



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

RODRIGO BARBOSA DE ARAÚJO

**ESTRATÉGIAS DE LEVEZA E RESISTÊNCIA NO TECIDO VEGETAL DO  
ESCAPO FLORAL DA AGAVE SISALANA: DESIGN BIOINSPIRADO DE  
MATERIAIS E ESTRUTURAS COM MODELAGEM PARAMÉTRICA PARA  
ARTEFATOS DE SURF SUSTENTÁVEIS.**

Recife

2023

RODRIGO BARBOSA DE ARAÚJO

**ESTRATÉGIAS DE LEVEZA E RESISTÊNCIA NO TECIDO VEGETAL DO  
ESCAPO FLORAL DA AGAVE SISALANA: DESIGN BIOINSPIRADO DE  
MATERIAIS E ESTRUTURAS COM MODELAGEM PARAMÉTRICA PARA  
ARTEFATOS DE SURF SUSTENTÁVEIS.**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Design da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de doutor em Design. Área de concentração: Planejamento e Contextualização de Artefatos.

Orientador (a): PhD. Amilton José Vieira de Arruda

Coorientador (a): PhD. Fernando Jorge Lino Alves

Recife

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Araújo, Rodrigo Barbosa de .

Estratégias de leveza e resistência no tecido vegetal do escapo floral da  
Agave sisalana: design bioinspirado de materiais e estruturas com modelagem  
paramétrica para artefatos de surf sustentáveis. / Rodrigo Barbosa de Araújo.  
- Recife, 2023.

306 : il., tab.

Orientador(a): Amilton José Vieira de Arruda

Coorientador(a): Fernando Jorge Lino Alves

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Artes e  
Comunicação, Programa de Pós-Graduação em Design, 2023.

Inclui referências, apêndices.

1. Biomimética. 2. Agave. 3. Design paramétrico. 4. Fabricação digital. 5.  
Prancha de surf sustentável. I. Arruda, Amilton José Vieira de. (Orientação). II.  
Alves, Fernando Jorge Lino. (Coorientação). IV. Título.

700 CDD (22.ed.)

UFPE (CAC 2024 - 37)

RODRIGO BARBOSA DE ARAÚJO

**"ESTRATÉGIAS DE LEVEZA E RESISTÊNCIA NO TECIDO VEGETAL DO  
ESCAPO FLORAL DA AGAVE SISALANA: DESIGN BIOINSPIRADO DE  
MATERIAIS E ESTRUTURAS COM MODELAGEM PARAMÉTRICA PARA  
ARTEFATOS DE SURF SUSTENTÁVEIS."**

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: 30/01/2023.

**BANCA EXAMINADORA**

Participação via Videoconferência

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

Participação via Videoconferência

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Emília Cristina Pereira de Arruda (Examinadora Externa)  
Universidade Federal de Pernambuco

Participação via Videoconferência

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Bárbara Rangel Carvalho (Examinadora Externa)  
Universidade Federal de Pernambuco

Participação via Videoconferência

Prof. Dr. Marivaldo Wagner Souza Silva (Examinador Externo)  
Universidade Federal de Pernambuco

Participação via Videoconferência

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

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha amada família, cujo apoio inabalável foi fundamental em minha jornada acadêmica. Em especial, expresso minha profunda gratidão aos meus pais, João Batista de Araújo Filho e Maria Marta Vilarim Barbosa, cujo amor e incentivo me inspiraram a perseguir os meus sonhos. À minha amada esposa, Adriana de Souza Nascimento, e, acima de tudo, ao meu filho, Cauã Souza Barbosa de Araújo, cuja chegada durante meu doutorado se tornou uma fonte inesgotável de força e determinação.

Além disso, dedico este trabalho à memória do meu avô, Avelino Ferreira Barbosa, e do meu tio, Antônio Marcelo Vilarim Barbosa, que, com seu apoio inestimável e generosidade ao me oferecerem suporte e estadia no início do meu doutorado, ajudaram a pavimentar o caminho para esta realização. Suas partidas recentes deixam um vazio, mas seus legados de apoio e amor continuará a inspirar esta conquista. Esta tese é dedicada a todos vocês, com profundo carinho, gratidão e a saudade que jamais se apagará.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, expresso minha profunda gratidão a Deus por me conceder saúde, sabedoria, força e fé para perseverar na busca dos meus objetivos diariamente. À minha amada família e amigos, agradeço por seu apoio constante e encorajamento ao longo desta jornada.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Design da UFPE, meu sincero agradecimento por compartilharem seu valioso conhecimento. Ao professor PhD. Amilton Arruda, minha gratidão é imensa. Sua confiança em minha capacidade, orientação e amizade foram fundamentais durante esses anos, assim como as inúmeras oportunidades que proporcionou. À dedicada equipe de investigadores do Laboratório Biodesign UFPE, e pelo acesso aos equipamentos de impressão 3D. À professora Dra. Emilia Arruda, coordenadora do Laboratório de Anatomia Vegetal (LAVeg UFPE), agradeço pelas orientações valiosas no campo da biologia e pelo acesso aos equipamentos de microscopia que enriqueceram minha pesquisa. Ao técnico de laboratório Rafael Padilha do Laboratório de Imunopatologia Keiko Asami (LIKA) e aos colegas investigadores que prestaram suporte na produção de imagens de MEV, meu apreço.

Ao professor PhD. Jorge Lino, que gentilmente concordou em ser meu coorientador, expresso minha gratidão pela confiança em minha pesquisa e pela paciência e orientações fundamentais. Também agradeço pela oportunidade de ter realizado um intercâmbio de mobilidade internacional na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), com acesso ao Laboratório de Desenvolvimento de Produtos e Serviços, 3D Lab. e aos equipamentos disponibilizados. E à equipe de engenheiros investigadores que prestaram suporte nos ensaios mecânicos, incluindo Me. Ana Pais, Dr. Henrique Idogava e Dr. Leonardo Santana, sou imensamente grato. Ao arquiteto e designer paramétrico Paulo Carvalho, todo meu apreço pelo suporte técnico em design paramétrico, fabricação digital e emulação das estratégias do Agave no Grasshopper, bem como ao FabLab Selvagen e aos equipamentos disponibilizados.

À CAPES, agradeço pela bolsa de pesquisa que possibilitou a realização deste doutorado.

Cada um desempenhou um papel crucial em minha jornada acadêmica, e agradeço profundamente por seu apoio, orientação e contribuições para realização deste trabalho.

"Olhe profundamente para a natureza, e então você entenderá tudo melhor."

Albert Einstein

## RESUMO

Matérias primas são fundamentais para fabricação de artefatos. Porém, a crescente demanda para extrair recursos naturais finitos contribui significativamente para a degradação ambiental. Por outro lado, dentre as fibras vegetais mais utilizadas, as de *Agave sisalana* são uma alternativa de extremo valor por apresentar excelentes propriedades mecânicas e baixos impactos ambientais. O uso de materiais naturais vêm ganhando espaço há décadas, como por exemplo, a utilização de Agave e outros materiais de base biológica na fabricação de pranchas de surf sustentáveis. Através do Agave, objeto de estudo desta investigação, busca-se entender porque esse sistema natural é leve e resistente, quais as estratégias biológicas de leveza e resistência da estrutura das suas paredes celulares. Acredita-se que uma abordagem bioinspirada é aquela que favorece a pesquisa de desempenho ecológico e métricas sobre a criação de formas e materiais bioinspirados. A investigação é guiada pela abordagem metodológica Biomimicry Thinking do Biomimicry Institute 3.8 tendo os Princípios da Vida como diretrizes sustentáveis de projeto. Através de métodos de analogia e transferência de função, as estratégias biológicas são emuladas em princípios de design auxiliado por processos de modelagem paramétrica. Em particular, esta proposta visa o desenvolvimento de algoritmos para gerar objetos leves e resistentes com seus núcleos internos obtidos por um design baseado em diagramas de Voronoi, por meio do uso de estratégias computacionais para criação de estruturas bioinspiradas em um conceito genérico de leveza e resistência. Também foram desenvolvidos mais dois códigos com a mesma abordagem e aplicação no desenvolvimento de pranchas de surf e quilhas, onde foi incluído um algoritmo evolutivo para seleção de opções de padrões otimizados e outro parâmetro de verificação de integridade das estruturas dos artefatos. Deste modo trabalhou-se a bioinspiração na leveza e resistência do Agave com investigação biológica, processos de modelagem paramétrica e fabricação digital para geração de protótipos e modelos de estudo. Deste modo foi possível realizar emulações das estratégias do Agave em termos de experimentação com estruturas e materiais. Explora-se ainda as potencialidades de aplicação das fibras com desenvolvimento de compósitos com matrizes de base biológica, com verificação das propriedades mecânicas em ensaios de flexão e tração.

**Palavras-chave:** biomimética; agave; design paramétrico; fabricação digital; design de materiais; prancha de surf sustentável.

## ABSTRACT

Raw materials are fundamental for the manufacture of artifacts. However, the growing demand to extract finite natural resources contributes significantly to environmental degradation. On the other hand, among the most used vegetable fibers, those of *Agave sisalana* are an extremely valuable alternative for presenting excellent mechanical and environmental properties. The use of natural materials has been gaining ground for decades, such as the use of Agave and other bio-based materials in the manufacture of sustainable surfboards. The Agave is an object of study in this investigation, thus, we seek to understand why this natural system is light and resistant, what are the biological strategies of lightness and resistance of the structure of cell walls. A bioinspired approach is believed to be one that favors eco-performance research and metrics over creating bioinspired shapes and materials. The investigation is guided by the Biomimicry Thinking methodological approach of the Instituto de Biomimética 3.8, having the Principles of Life as sustainable design guidelines. Through analogy and transfer-of-function methods, biological strategies are emulated into design principles aided by parametric modeling processes. In particular, this proposal aims at the development of algorithms to generate light and resistant objects with their inner cores composed of Voronoi diagrams, through the use of computational strategies to create bioinspired structures in a generic concept of lightness and resistance. Two more codes were also developed with the same approach and application in the development of surfboards and fins, which included an evolutionary algorithm for selecting optimized pattern options and another parameter for verifying the integrity of artifact structures. In this way, bioinspiration was worked on in the lightness and resistance of Agave with biological research, parametric modeling processes and digital fabrication for the generation of prototypes and study models. In this way, it was possible to carry out emulations of Agave strategies in terms of experimentation with structures and materials. It also explores the potential application of fibers with the development of composites with biologically-based matrices, with verification of mechanical properties in flexion and tensile tests.

**Keywords:** biomimicry; agave; parametric design; digital fabrication; material design; sustainable surfboard.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Micrografias eletrônicas de varredura de madeira Balsa ( <i>Ochroma lagopus</i> ) 500 µm e Balsa ( <i>Ochroma pyramidale</i> ) 400 µm; Fabricação aditiva de compósito celular leve bioinspirado.  | 7  |
| Figura 2 - Amostras de madeira de <i>Paulownia elongata x fortunei</i> (Cotevisa 2 iPaulownia), apresentando características marcantes na anatomia: Corte transversal de lenho de Paulownia ao microscópio: 1-fibras, 2-vaso, 3-raio, 4-parênquima. | 9  |
| Figura 3 - Corte transversal do escapo floral apresentando feixes vasculares circundados por tecido parenquimático.   | 9  |
| Figura 4 - Imagem à esquerda: microscopia ótica, ampliação em 200 µm. Imagens à direita: micrografia (MEV) de feixes de fibra de Agave.   | 10 |
| Figura 5 - Impressão 3D como exemplo de aplicação de uma estrutura bioinspirada nas estratégias de leveza e resistência do Agave. Estrutura que pode ser emulada em uma ampla gamas de artefatos (Araújo, 2015).                                    | 12 |
| Figura 6 - Diagrama Biomimicry Thinking - Biologia para Design.   | 35 |
| Figura 7 - Equipamento de testes MultiTest 2.5 - dV Mecmesin no LDPS (FEUP) para ensaios de flexão e tração. Detalhe das adaptações nos corpos de prova para se acomodar nas pinças.  | 36 |
| Figura 8 - Sobreposição simples.  | 39 |
| Figura 9 - Foram feitos três provetes de junta colada de sobreposição simples, submetida à tensão de cisalhamento das amostras definidas para realização dos ensaios de cisalhamento de adesivos com materiais bioinspirados e com cola PU.         | 40 |
| Figura 10 - Ensaio realizado na máquina de testes universais eletromecânicos Instron da séries 3367 no Departamento de Engenharia Mecânica - FEUP.  | 40 |
| Figura 11 - As barras pretas indicam a proporção de artigos e as barras brancas indicam a proporção de conferências.  | 42 |
| Figura 12 - Nuvem de palavras de assuntos abrangidos pelo escopo da biomimética.  | 42 |
| Figura 13 - Banco de pesquisa em biomimética.   | 44 |
| Figura 14 - Biomimicry DesignLens.  | 62 |
| Figura 15 - Elementos Essenciais - Biomimicry DesignLens.   | 63 |
| Figura 16 - Diagrama Princípios da Vida - Biomimicry DesignLens   | 65 |
| Figura 17 - Biomimicry Thinking - Biomimicry DesignLens.  | 67 |
| Figura 18 - Diagrama Biomimicry Thinking - Challenge to Biology - Biomimicry DesignLens.  | 68 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 19 - Diagrama Biomimicry Thinking - Biology to Design.  | 69  |
| Figura 20 - Biblioteca de estruturas naturais open source. Inspiração em estratégias da natureza. Muitas estruturas da natureza pode atender a indústria com a aplicação de soluções naturais para realizar inovações sustentáveis.  | 70  |
| Figura 21 - Estruturas eficientes com redução de peso.   | 71  |
| Figura 22 - Processo de projeto sistemático que utiliza as estruturas otimizadas da natureza no plâncton para ajudar a otimizar estruturas marítimas, automotivas e outras para resistência, rigidez e leveza.   | 71  |
| Figura 23 - Arranjo celular do tecido vegetal de uma espécie de Geranium.  | 73  |
| Figura 24 - Estrutura paramétrica bioinspirada com otimização da relação entre densidade e reforço mecânico.   | 74  |
| Figura 25 - Tipos de impressão 3D experimentadas nesta pesquisa.   | 77  |
| Figura 26 - Acima: exemplo de material de impressão 3D para manufatura aditiva por extrusão de filamento composto por materiais biodegradáveis, madeira e PLA. Abaixo: Projeto Shapes of Sweden (Lilian Van Daal), bioinspiração nas raízes das árvores. Estrutura impressa em 3D com biomaterial de pinheiro, que atende às funções de flexibilidade, resiliência e estabilidade (imagem abaixo). | 80  |
| Figura 27 - Exemplo da interface dos componentes no Grasshopper.   | 84  |
| Figura 28 - Caixa de parâmetros da estratégia de design paramétrico do Agave.  | 84  |
| Figura 29 - Geometria de uma célula de Voronoi.  | 86  |
| Figura 30 - O mais simples entre os algoritmos que compõem o diagrama de Voronoi é a triangulação de Delaunay. O desenho é composto de triângulos e círculos conectando todos os pontos em um conjunto de três pontos. Embora pareça aleatório, há apenas um resultado.  | 87  |
| Figura 31 - (a) Modelos de comparação apresentando as seções transversais com células de Voronoi distribuídas aleatoriamente. (b) e (d) Visualização da relação entre a tensão axial nos elementos da viga e a tensão de escoamento do material. (c) Distribuições otimizadas de células de Voronoi. Abaixo modelos de testes: viga de compressão, viga simplesmente apoiada e viga cantilever.    | 88  |
| Figura 32 - Projeto Poroso, impressão 3D com materiais de base biológica, bioinspirado nos veios da madeira.   | 101 |
| Figura 33 - <i>Agave sisalana</i> , destaque para os pendões florais.  | 105 |
| Figura 34 - Distribuição dos tecidos vasculares e dos tecidos do sistema fundamental na folha, caule e raiz.   | 109 |
| Figura 35 - A célula e paredes vegetais com destaque para a lamela mediana, que tem função de unir as paredes das células vizinha.   | 110 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 36 - Esquerda - Tecido fundamental do parênquima. Direita - Corte transversal do caule de <i>Opuntia rufida</i> destacando as células do tecido parenquimático.   | 111 |
| Figura 37 - Esquemas do arranjo das microfibrilas nas paredes celulares.   | 112 |
| Figura 38 - Paredes celulares do Agave apresentando pontoações espalhadas aleatoriamente.  | 113 |
| Figura 39 - Representação da estrutura e composição química da parede celular dos vegetais.  | 114 |
| Figura 40 - Composição da parede celular.  | 115 |
| Figura 41 - Fibra comercial de <i>Agave sisalana</i> contínua extraída das folhas da planta.   | 116 |
| Figura 42 - Seção tridimensional da madeira de <i>P. fortunei</i> usando micrografia de varredura eletrônica; e seção transversal, pode ser observado diferenças entre a madeira inicial e tardia, arranjo anelar poroso.                                    | 120 |
| Figura 43 - (a/b) Secção transversal: limite distintivo do anel de crescimento (branco), vasos do lenho inicial (poros) (vermelho), vasos do lenho final (amarelo), células de fibras (azul), parênquima axial bandado (*), parênquima vasicêntrico (preto). | 121 |
| Figura 44 - Parte média do anel de crescimento. Destaque para as células apresentado diagramas de Voronoi.   | 121 |
| Figura 45 - Pranchas de surf de Agave icônicas de Gary Linden (1998-2000).   | 128 |
| Figura 46 - Prancha produzida com 100% de Agave, projeto da Jose Cuervo® Tradicional® juntamente com Gary Linden.  | 129 |
| Figura 47 - Pranchas de Agave.   | 130 |
| Figura 48 - As pranchas de Agave são leves e resistentes.  | 130 |
| Figura 49 - Uma das maiores fazendas de plantação de Agave situada no Quênia.  | 131 |
| Figura 50 - Fábrica Grow Blanks; “Da planta à prancha”.  | 132 |
| Figura 51 - Shaper/ designer moldando uma prancha de Agave à mão.  | 133 |
| Figura 52 - Blocos de Agave Grow Blanks e pranchas produzidas por Koabär Surf/Skates.  | 133 |
| Figura 53 - Prancha a ser usinado na CNC com um bloco de Agave da Grow Blanks na oficina do designer de pranchas Cristian Delfs da BAV Boards.   | 133 |
| Figura 54 - Pranchas de Agave maquinadas na CNC, a de baixo inteira de Agave, a do meio com bordas de madeira Balsa e a de cima com borda de Cortiça.  | 134 |
| Figura 55 - Processo de fresamento e resultado final.  | 135 |
| Figura 56 - Pranchas ocas de madeira criadas por Tom Blake, década de 1930.  | 135 |
| Figura 57 - David Weber Surfboards.  | 136 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 58 - Nos métodos de construção oca modernos a fabricação digital caminha junto com o artesanato. Peças cortadas na CNC e etapa de construção da prancha.                                | 137 |
| Figura 59 - Pranchas de surf construídas com cedro sustentável local combinado com espuma de plástico PET 100% reciclado, GreenRail.   | 138 |
| Figura 60 - Prancha oca do kit DIY da Grain Surfboards com bordas de Cortiça.  | 138 |
| Figura 61 - A modelagem paramétrica com Grasshopper é a base da projeção de pranchas de surf ocas de madeira disponível com a interface da plataforma Webshapingbay.                           | 139 |
| Figura 62 - Contraplacado flexível é usado no esqueleto e no fechamento da prancha com borda de Cortiça.   | 140 |
| Figura 63 - O corte transversal do Agave apresenta o tecido fundamental, que é representado pelo parênquima de preenchimento e sistema vascular.   | 143 |
| Figura 64 - Cortes transversais e longitudinal do tecido parenquimático do Agave apresentando diferentes geometrias.   | 144 |
| Figura 65 - Corte Longitudinal. O crescimento e alongamento intenso do Agave formam muitos elementos traqueais com espessamentos anelares e espiralados, escalariforme, reticulado e pontoado. | 145 |
| Figura 66 - Preparação das amostras para MEV e alguns equipamento utilizados (ponto crítico e MEV Zeiss EVO).  | 146 |
| Figura 67 - Micrografias eletrônicas de varredura de amostras do tecido vegetal do escapo floral da Agave sisalana.  | 147 |
| Figura 68 - Distribuição variada à esquerda e uniforme à direita.  | 148 |
| Figura 69 - Distribuição dos padrões, arranjos celulares uniformes e variados.   | 149 |
| Figura 70 - Distribuição uniforme.   | 150 |
| Figura 71 - Padrões com estrutura de distribuição de células e paredes uniformes. Amostras visuais - provetes ilustrativos visuais com recorte de imagem de MEV.                               | 151 |
| Figura 72 - Distribuição variada.  | 152 |
| Figura 73 - Concentração de densidade no centro das peças. Amostras visuais - provetes ilustrativos visuais com recorte de imagem de MEV.  | 152 |
| Figura 74 - Concentração de densidade nas extremidades das peças.  | 153 |
| Figura 75 - Código da emulação genérica da estratégia de leveza e resistência do Agave.  | 157 |
| Figura 76 - Curva atratora relacionada ao método 02 - distribuição variada por atrator.  | 158 |
| Figura 77 - A caixa de parâmetros atende aos dois métodos.   | 159 |
| Figura 78 - Exemplo de efeito gerado pela alteração do número de células. O padrão à esquerda apresenta 30 células enquanto à direita apresenta 50.  | 159 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 79 - Code: sequência de etapas e ações realizadas no algoritmo a partir de parâmetros associados à componentes. Parte de cima do código é referente ao método 01, enquanto a parte de baixo é referente ao método 02. Ambos fazem uso da caixa de parâmetros dos inputs.             | 161 |
| Figura 80 - Configuração da placa mais a altura da peça (extrusão).   | 162 |
| Figura 81 - Configuração da margem da placa (borda).  | 163 |
| Figura 82 - Configuração da população de pontos.  | 163 |
| Figura 83 - Configuração das células Voronoi.   | 164 |
| Figura 84 - Configuração dos componentes denominados Furos, que atende aos dois métodos de distribuição uniforme e variada.   | 164 |
| Figura 85 - Configuração do recurso para redução de furos demasiados pequenos. Atende ao método 01 e 02 respectivamente.  | 165 |
| Figura 86 - Configuração do escalonamento da espessura das paredes celulares.   | 165 |
| Figura 87 - Configuração do efeito de arredondamento que suaviza a forma das quinas internas da célula.   | 166 |
| Figura 88 - Configuração do dimensionamento das placas.   | 166 |
| Figura 89 - Caixa de checagem referente ao método 01 e 02. Imagem de um modelo gerado com checagem de paredes demasiado finas e comprometidas para impressão devido à espessura.  | 167 |
| Figura 90 - Visualização instantânea da peça final no Rhino ao manipular os parâmetros. O componente Z para transformação em objeto tridimensional está contido no grupo da PEÇA FINAL 3D.  | 168 |
| Figura 91 - Artefatos 3D gerados pelo comando BAKE ME! na interface do Rhino.   | 168 |
| Figura 92 - Volume da peça.   | 168 |
| Figura 93 - CURVE ATTRACTOR relacionado ao método 02 - Distribuição variada por atrator. Ao se modificar a forma curva ou a posição da mesma, ocasiona em diferentes resultados no padrão de distribuição da densidade do artefato.   | 169 |
| Figura 94 - Alterando os valores do domínio se consegue ter controle sobre as espessuras da parede, apresentando paredes finas e espessas no padrão ao mesmo tempo.   | 170 |
| Figura 95 - O componente BAKE gera o artefato final, atende aos dois métodos, a parte de como é referente ao primeiro e a parte de baixo ao segundo.  | 170 |
| Figura 96 - Modelos genéricos representativos do dois métodos de distribuição, uniforme e variada; e micrografias de Agave referentes aos dois princípios de padrões de distribuição de células com arranjos uniformes e variados, os quais representam o conceito de leveza e resistência. | 171 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 97 - Estruturas paramétricas como alternativas de emulação dos padrões e gerando inúmeras possibilidades estéticas e estruturais.  | 172 |
| Figura 98 - Problemas identificados na fase de pré impressão, algumas partes apresentaram paredes com menores que 1 mm e precisaram ser revistas.   | 173 |
| Figura 99 - Redesign dos modelos revisados.   | 173 |
| Figura 100 - Modelo de impressão 3D (SLS) com dimensões 60x60x03mm.   | 174 |
| Figura 101 - Modelo de impressão 3D (FE) com dimensões 150x150x10mm.  | 175 |
| Figura 102 - Projeto original do modelo de prancha oca de madeira “7Seas” David Weber Surfboards.   | 176 |
| Figura 103 - Emulação da estratégia de leveza e resistência com base na estrutura das paredes celulares de Agave usando o padrão de diagrama de Voronoi como meio de distribuição de unidades celulares e manipulação paramétrica. Em cada frame do esqueleto obteve-se os padrões mais otimizados. | 176 |
| Figura 104 - Códigos do Grasshopper da configuração do esqueleto e da quilha com a aplicação da estratégia bioinspirada.  | 177 |
| Figura 105 - INPUTS do esqueleto da prancha (esquerda) e da quilha (direita), compostos pelas caixas de parâmetros e pelas curvas importadas do Rhino.  | 178 |
| Figura 106 - Curvas de input. Outline do esqueleto, da quilha, e curva do volume da quilha.   | 179 |
| Figura 107 - Primeira parte do CODE.  | 180 |
| Figura 108 - Segunda parte do CODE. Dois parâmetros que foram incorporados - otimização e análise.  | 182 |
| Figura 109 - Parâmetros das curvas referenciadas. Outline do esqueleto. Seção do outline mostrando as ZONAS DE PERFURAÇÃO e ZONAS DE ENCAIXES.  | 183 |
| Figura 110 - Seção margem do outline (definidas entre as zonas de perfuração e as zonas de encaixe).  | 184 |
| Figura 111 - Componente de distribuição dos pontos associado ao parâmetro fator de distribuição. População de pontos nas secções do esqueleto.  | 184 |
| Figura 112 - Divisão celular (Voronoi) que está associado ao parâmetro semente para permitir alterações na disposição das células.  | 185 |
| Figura 113 - Escalonamento das células através do controle do domínio para alterar a espessura das paredes.   | 186 |
| Figura 114 - A suavização da célula torna a estrutura mais orgânica ou mais poligonal.  | 186 |
| Figura 115 - Extrusão das secções.  | 187 |
| Figura 116 - Outline da quilha.   | 188 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 117 - Inputs iniciais contendo as curvas que são os parâmetros estáticos do código. Curvas da quilha para gerar o volume do artefato.   | 188 |
| Figura 118 - Componentes para geração do 3D da quilha. Superfície de composição do volume da quilha (superfícies são unidas em suas bordas para descrever o limite externo de um objeto sólido). Sólido 3d da quilha.  | 189 |
| Figura 119 - Os componentes de geração da margem estão associados ao parâmetro de input que controla a margem da borda; A borda do outline pode ser aumentada ou reduzida alterando o parâmetro.   | 190 |
| Figura 120 - População de células (pontos); A movimentação dos pontos para borda permite irá permitir aumentar ou reduzir a densidade de células na região da borda.   | 191 |
| Figura 121 - Divisão celular e recorte do Voronoi no limite definido para borda.   | 192 |
| Figura 122 - Escalonamento de células Voronoi. As espessuras podem ser controladas e modificadas.  | 192 |
| Figura 123 - O efeito de suavização das células Voronoi é gerado pelos componentes e manipulado pelo parâmetro de input. Quanto maior o valor do arredondamento mais área e mais material é adicionado ao artefato.  | 193 |
| Figura 124 - Extrusão das células Voronoi; Superfície furada e furos transformados em sólidos extrudados.  | 194 |
| Figura 125 - Subtração furos extrudados e sólido 3d da quilha.   | 194 |
| Figura 126 - Variedade genética. Os valores correspondem a área do artefato em mm <sup>2</sup> .   | 195 |
| Figura 127 - Efeitos obtidos ao alterar os valores da quantidade células. A quilha da esquerda apresenta 30 células e área de 2760 mm <sup>2</sup> , a central apresenta 40 células e área de 2759 mm <sup>2</sup> , a direita apresenta 50 células e área de 2761 mm <sup>2</sup> . | 196 |
| Figura 128 - Algoritmos evolutivos para seleção de opção otimizada Galápagos. Aplicação no esqueleto acima, e na quilha abaixo.  | 198 |
| Figura 129 - Algoritmo evolutivo para a seleção de opções otimizadas e outputs gerados.  | 199 |
| Figura 130 - Este modelo foi identificado como sendo o “fitness”, ou seja, o mais otimizado. Entretanto o modelo apresenta pouca células no padrão, O que não quer dizer que seja adequado aos objetivos da pesquisa.  | 200 |
| Figura 131 - Gradiente de cor. As cores do gradiente podem ser selecionadas.   | 202 |
| Figura 132 - Os componentes usados para esta ação atuam na transformação das paredes em superfícies do tipo mesh e realiza a análise da curvatura utilizando um gráfico de cores do tipo gradiente.  | 203 |
| Figura 133 - Modelo 3D da mesh que representa o gradiente de cores do padrão analisado.  | 203 |
| Figura 134 - Componentes de outputs do esqueleto.  | 205 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 135 - Rendering digital e impressão 3D em escala reduzida do esqueleto da prancha.   | 206 |
| Figura 136 - Máquina CNC do Fab Lab Selvagen a usinar esqueletos com diferentes configurações de densidade nos padrões de Voronoi; e protótipo do esqueleto em escala real.   | 206 |
| Figura 137 - Protótipo de uma prancha de surf de madeira de Paulownia, construída com o método David Weber Surfboards, como estudo de caso e aplicação da estratégia bioinspirada do Agave no esqueleto interno.  | 207 |
| Figura 138 - Exemplos de outputs com células de Voronoi poligonais e orgânicas.   | 208 |
| Figura 139 - Componentes de outputs da quilha.  | 209 |
| Figura 140 - Primeiro output da quilha gerada com o código.   | 209 |
| Figura 141 - Variedade genética da estratégia de distribuição das densidades do Agave. Da esquerda para a direita, de cima para baixo, com os dados gerados pelos outputs da área dos artefatos (mm <sup>2</sup> ), conseqüentemente, maior área é igual a maior peso.  | 210 |
| Figura 142 - Variedade genética dos modelos selecionados.   | 210 |
| Figura 143 - Fibras de Agave trituradas.  | 213 |
| Figura 144 - Representação de conjunto de peneiras em escala de laboratório.  | 214 |
| Figura 145 - Fibras obtidas através do processo de peneiramento realizado no INEGI - FEUP.  | 215 |
| Figura 146 - Seleção de fibras para o desenvolvimento de amostras. Foram utilizadas fibras de Agave com tamanhos de 106 µm e 600 µm. As fibras de 106 µm apresentam-se predominantemente na forma de pó, enquanto as fibras de 600 µm possuem formato de fibras curtas. | 215 |
| Figura 147 - Processo de preparação e moldagem do compósito bioinspirado de PLA com fibras de Agave.  | 217 |
| Figura 148 - Provetes à esquerda contém 5% de Agave e a direita 10% Agave. Os de cima são fibras de 600 µm e os dois de baixo têm fibras de 106 µm.   | 218 |
| Figura 149 - Amostras das resinas.  | 221 |
| Figura 150 - Visão e aspecto do volume de fibra e resina na mistura. Fibra de Agave 600 µm. Exemplo de proporção obtida 50% peso de fibra 50% peso de resina (2 gramas de fibra + 2 gramas de resina).  | 222 |
| Figura 151 - Testes iniciais das fibras com as resinas de mamona.   | 222 |
| Figura 152 - Provetes testes iniciais com Resina 3002 e fibra de 600 µm.  | 223 |
| Figura 153 -Acima, fibras já incrementadas à resina que foi misturada previamente, depois postas no molde, que foi prensado. Abaixo, detalhe dos amostras.  | 224 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 154 - Amostra que apresenta bons resultados táteis e visuais na consistência do material.   | 224 |
| Figura 155 - Esta amostra apresenta com características bastante homogênea na mistura da fibra de 106 µm com a espuma poliuretana.   | 225 |
| Figura 156 - Provetes de madeira de Paulownia colados com a mistura da fibra de Agave em pó com a resina poliuretana.  | 226 |
| Figura 157 - Amostras diversas resultado de experimentos.  | 226 |
| Figura 158 - Provetes das amostras definidas para realização dos ensaios mecânicos.  | 228 |
| Figura 159 - Provetes de Agave.  | 230 |
| Figura 160 - Algumas etapas de confecção de diferentes amostras. Os provetes foram moldados, possuem seção transversal uniformemente retangular, e as amostras estavam sólidas e consistentes.   | 230 |
| Figura 161 - Amostras.   | 231 |
| Figura 162 - Molde manual com uma amostra da composição Respan com 20% de fibras de 600 µm.  | 248 |
| Figura 163 - Etapas de desenvolvimento de um protótipo de quilha bioinspirada em estruturas celulares com padrão aplicação do padrão de Voronoi com base nas estratégias de leveza e resistência do Agave, e aplicação de material bioinspirado com fibras de Agave e resinas de mamona. | 249 |
| Figura 164 - Laminação de fibra de vidro de 4oz em matriz de resina elastômera de mamona (Resina 3002).  | 250 |
| Figura 165 - Quilhas impressas em SLA com resina a base vegetal de soja com inserção de carga de fibra de Agave (3% em peso) para obtenção de uma estética bioinspirada nas texturas e fibras do escapo floral do Agave.   | 251 |

## LISTA DE TABELAS

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 1 - Métodos de pesquisa científica.   | 24  |
| Tabela 2 - Comparativo de densidades em diferentes espécies de Paulownia e Balsa.  | 123 |
| Tabela 3 - Comparativo de propriedades mecânicas em diferentes espécies de Paulownia e Balsa.  | 126 |
| Tabela 4 - Dados dos modelos de impressão 3D.  | 174 |
| Tabela 5 - Área da estrutura dos modelos em mm <sup>2</sup> . Os valores foram fornecidos pelo código gerado no Grasshopper.   | 195 |
| Tabela 6 - Área da estrutura dos modelos em mm <sup>2</sup> . Os valores foram fornecidos pelo código gerado no Grasshopper.   | 196 |
| Tabela 7 - Dados dos modelos comparados (Figura 138).  | 208 |
| Tabela 8 - Dados gerados pelos outputs com a área dos artefatos em (mm <sup>2</sup> ) referentes à Figura 141.   | 210 |
| Tabela 9 - Dados gerados pelos outputs com a área dos artefatos em (mm <sup>3</sup> ) dos modelos virtuais referentes à Figura 142.  | 211 |
| Tabela 10 - Tabela comparativa entre os valores de tensão máxima e módulo de elasticidade das amostras.  | 232 |
| Tabela 11 - Comparação entre os valores das propriedades mecânicas da madeira de Paulownia Cotevisa 2, fornecidos pelo iPaulownia, e os resultados obtidos neste estudo com amostras provenientes do mesmo produtor. | 234 |
| Tabela 12 - Dados dos estudos realizados com PU expandido de mamona, fibras de Sisal (Agave sisalana) e serragem de madeira.   | 237 |
| Tabela 13 - Tabela comparativa entre a tensão máxima das amostras.   | 240 |
| Tabela 14 - Densidades de compósitos de PU mamona e fibras naturais: serragem e Sisal.   | 243 |
| Tabela 15 - Dados do teste de cisalhamento de juntas coladas. Carga máxima (N); Extensão máxima (mm); Deformação por cisalhamento (mm/mm) e Tensão de cisalhamento (MPa).  | 245 |

## LISTA DE QUADROS

|  |     |
|--|-----|
| Quadro 1 - Etapas do Biomimicry Thinking.                                  | 33  |
| Quadro 2 - Etapas metodológicas realizadas dentro do contexto do diagrama. | 35  |
| Quadro 3 - Informações de software.  | 155 |
| Quadro 4 - Definição das amostras.   | 229 |

## LISTA DE GRÁFICOS

|   |     |
|---|-----|
| Gráfico 1 - Comparativo das densidades de espécies de Paulownia e Balsa.  | 123 |
| Gráfico 2 - Resultados do teste de flexão em três pontos: tensão máxima (MPa), módulo de elasticidade (GPa) e respectivos coeficientes de variação. | 232 |
| Gráfico 3 - Gráfico Comparativo do ensaio de tração mostrando a tensão máxima (MPa) e o coeficiente de variação.                                    | 241 |
| Gráfico 4 - Comparativo da densidade das amostras.  | 242 |
| Gráfico 5 - Comparativo da tensão de cisalhamento (MPa) e deformação por cisalhamento (mm/mm) nos testes de cisalhamento.                           | 246 |

## SUMÁRIO

|          |   |    |
|----------|---|----|
| 1        | Contextualização  | 1  |
| 1.1      | Introdução  | 1  |
| 1.2      | Justificativa e relevância de pesquisa                        | 13 |
| 1.3      | Elementos pré-textuais  | 19 |
| 1.3.1    | Tema  | 19 |
| 1.3.2    | Objeto genérico da pesquisa                                   | 20 |
| 1.3.4    | Objeto de estudo  | 20 |
| 1.3.5    | Objeto de pesquisa  | 20 |
| 1.3.6    | Campo de atuação da pesquisa                                  | 20 |
| 1.3.7    | Pergunta do problema  | 20 |
| 1.3.8    | Problemática  | 21 |
| 1.3.9    | Hipótese  | 21 |
| 1.3.10   | Mapeamento do contexto e entorno - recortes de pesquisa       | 22 |
| 1.3.11   | Objetivo geral  | 23 |
| 1.3.12   | Objetivos específicos   | 23 |
| 1.3.13   | Metodologia científica  | 23 |
| 1.3.14   | Materiais e métodos   | 29 |
| 1.3.14.1 | Estado da arte  | 30 |
| 1.3.14.2 | Desenvolvimento - Abordagem metodológica Biologia para Design | 32 |
| 1.3.14.3 | Ensaio mecânicos  | 35 |
|          | Ensaio de flexão  | 37 |
|          | Ensaio de tração  | 38 |
|          | Ensaio de cisalhamento  | 38 |
| 2        | Estado da arte   referencial teórico                          | 41 |
| 2.1      | Biomimética   | 41 |
| 2.1.1    | Background histórico  | 45 |

|         |   |     |
|---------|---|-----|
| 2.1.2   | Conceitos   Definições  | 48  |
| 2.1.3   | Métodos e processos em biomimética                                      | 55  |
| 2.1.3.1 | Biomimicry DesignLens   | 61  |
| 2.1.3.2 | Elementos essenciais  | 62  |
| 2.1.3.3 | Princípios da Vida  | 63  |
| 2.1.3.4 | Biomimicry Thinking   | 66  |
| 2.1.3.5 | Challenge to Biology (Desafio de biologia)                              | 68  |
| 2.1.3.6 | Biology to Design (Biologia para Design)                                | 69  |
| 2.1.4   | Bioinspiração e relação estrutura-função                                | 69  |
| 2.2     | Fabricação digital  | 75  |
| 2.3     | Design paramétrico  | 81  |
| 2.3.1   | Grasshopper   | 83  |
| 2.4     | Design de materiais bioinspirados - propriedades dos materiais          | 89  |
| 2.4.1   | Materiais de base biológica   | 97  |
| 2.4.1.1 | PU expandido de Mamona e fibras naturais                                | 97  |
| 2.4.1.2 | PLA   | 98  |
| 2.4.2   | Design de materiais e impressão 3D                                      | 99  |
| 2.4.3   | Computação bioinspirada e manufatura na biomimética                     | 103 |
| 2.5     | Agave   | 105 |
| 2.5.1   | Anatomia vegetal  | 108 |
| 2.5.2   | Anatomia Vegetal - Propriedades Químicas e Mecânicas da Fibra de Agave  | 114 |
| 2.6     | Paulownia   | 117 |
| 2.6.1   | Contextualização e usos da madeira de Paulownia                         | 117 |
| 2.6.2   | Características físicas em relação à estrutura macroscópica da madeira: | 118 |
| 2.6.3   | Estrutura microscópica – anatomia vegetal                               | 119 |

|  |     |
|--|-----|
| 2.6.4 Propriedades da madeira  | 121 |
| 2.6.5 Propriedades mecânicas   | 125 |
| 3 Desenvolvimento  | 128 |
| 3.1 Pranchas de surf sustentáveis - contextualização sincrônica, materiais e tipos de construção                     | 128 |
| 3.2 Abstrair ideias biológicas - microscopia de <i>Agave sisalana</i> (anatomia vegetal)                             | 141 |
| 3.3 Identificando função - estratégia de leveza e resistência  | 147 |
| 3.3.1 Análise da variação dos padrões Voronoi identificados  | 147 |
| 3.4 Emulação da estratégia - design paramétrico - emulação genérica de estruturas bioinspiradas leves e resistentes. | 154 |
| 3.4.1 Inputs   | 158 |
| 3.4.1.1 Parâmetros estáticos / fixos   | 158 |
| 3.4.1.2 Parâmetros customizáveis / editáveis   | 158 |
| 3.4.1.3 Code   | 160 |
| 3.4.2 Estrutura e função do algoritmo  | 161 |
| 3.4.2.1 Método 01 - Distribuição uniforme  | 162 |
| 3.4.2.2 Método 02 - Distribuição variada por atrator   | 169 |
| 3.4.3 Outputs  | 171 |
| 3.5 Design paramétrico - criando ideias bioinspiradas  | 175 |
| 3.5.1 Emulação bioinspirada no design de artefatos (leveza e resistência).   | 175 |
| 3.5.2 Inputs   | 177 |
| 3.5.2.1 Parâmetros Estáticos / Fixos   | 178 |
| 3.5.2.2 Parâmetros Customizáveis / Editáveis   | 179 |
| 3.5.2.3 Code   | 180 |
| 3.5.3 Estrutura e função do algoritmo  | 182 |
| 3.5.4 Output   | 203 |

|   |     |
|---|-----|
| 3.6 Design de materiais bioinspirados - experimentação com fibras de agave em matrizes de materiais biodegradáveis. | 211 |
| 3.6.1 Experimentação com materiais de base biológica.   | 211 |
| 3.6.1.1 Fibras Agave  | 212 |
| 3.6.1.2 Fibras Agave + PLA  | 216 |
| 3.6.1.3 Fibras Agave + resinas de mamona bicomponente   | 221 |
| 3.6.1.4 Definição das amostras  | 227 |
| 3.7 Ensaio mecânicos (análise dos dados e desempenho dos materiais)   | 231 |
| 3.7.1 Flexão  | 231 |
| 3.7.1.1 Considerações e conclusões sobre os ensaios de flexão   | 238 |
| 3.7.2 Ensaio de tração  | 240 |
| 3.7.3 Densidade   | 242 |
| 3.7.4 Ensaio de cisalhamento de adesivos com materiais bioinspirados.   | 245 |
| 3.8 Aplicações e experimentações em artefatos de surf com materiais bioinspirados.                                  | 247 |
| 3.8.1 Outras experimentações com a fibra de Agave e impressão 3D.   | 250 |
| 4 Conclusões e considerações  | 251 |
| Referências   | 257 |
| Apêndice A – ensaio flexão  | 268 |
| Apêndice B – ensaio tração  | 277 |
| Apêndice C – ensaio cisalhamento  | 278 |
| Apêndice D – códigos Grasshopper  | 279 |

# 1 CONTEXTUALIZAÇÃO

## 1.1 INTRODUÇÃO

O campo da biomimética é amplo e está se destacando, especialmente devido à crescente quantidade de descobertas recentes nas áreas de biologia e engenharia. Esse progresso está impulsionando a busca por novas tecnologias que se baseiam na transferência de funções de sistemas biológicos (Lepora, *et al.*, 2013).

Através da biomimética, estamos aprendendo a emular formas, processos e ecossistemas naturais com o propósito de conceber projetos de maior sustentabilidade. Essa disciplina investiga a natureza para aprimorar diversas áreas, como a busca por uma célula solar mais eficaz inspirada na estrutura de folhas ou a criação de empresas mais resilientes modeladas a partir de recifes de coral. A ideia central reside no fato de que a natureza já resolveu muitos dos desafios que enfrentamos, abrangendo energia, produção de alimentos, regulação climática, transporte, colaboração, eficiência estrutural, ecológica e química benigna, entre outros. A imitação desses designs refinados pode orientar os avanços tecnológicos humanos rumo a soluções que demandam menor consumo de energia, reduzem o uso de materiais, minimizam a emissão de substâncias tóxicas e funcionam de maneira integrada para criar condições propícias à vida (Baumeister, 2014; Benyus, 2013).

Conforme observado por Baumeister (2014), em uma análise mais detalhada, os organismos gerenciam essas conquistas por meio de um conjunto simples e atraente de matérias-primas comuns, adquiridas localmente, processadas à temperatura e pressão corporais, e transformadas discretamente em água. Ao chegar ao final de seu ciclo de vida, essas matérias-primas são coletadas e reconfiguradas por outros organismos, passando por repetidos processos de reciclagem, impulsionados pela energia solar.

Conforme destacado por Soares & Arruda (2018), do ponto de vista do projetista, estamos sempre nos referindo à "analogia", que neste contexto desempenha a função de fazer alusão a um ambiente ou modelo natural. Isso implica na transposição para um contexto artificial, onde artefatos mantêm suas características amplas, preservando suas peculiaridades formais, funcionais, materiais e evolutivas. É importante salientar que o que se aplica aos sistemas

naturais deve, de forma correspondente, ser aplicado aos sistemas artificiais análogos. A regra fundamental para projetistas biomiméticos é constantemente questionar soluções e métodos. O autor também enfatiza que é difícil, senão praticamente impossível, replicar integralmente um modelo natural. O cerne não está em duplicar, mas sim em compreender, captar os princípios subjacentes que regem um fenômeno na natureza e, a partir desse entendimento, aplicá-los ao desenvolvimento de novos conhecimentos.

A aplicação das estratégias da natureza em conjunto com a fabricação digital e tecnologias de manufatura aditiva possui grande relevância no campo do projeto, especialmente quando se alinham com os princípios dos sistemas biológicos. Nas últimas décadas, as pesquisas voltadas para a resolução de problemas por meio de inspiração na natureza têm se concentrado no desenvolvimento de métodos e ferramentas para a utilização sistemática e aplicação das informações provenientes dos elementos naturais. Dentro deste contexto, os cientistas estão adotando a natureza como um modelo para emular técnicas de resolução de problemas que são inerentes a ela.

A observação sistemática da natureza para resolver desafios técnicos tem sido uma característica marcante ao longo da história da humanidade. No século XXI, as oportunidades são ampliadas pelas mais recentes tecnologias, que abrangem sistemas de produção e o desenvolvimento de novas estruturas e materiais. A área do design de materiais, como resposta à crescente demanda da ciência e da tecnologia por inovação, tem avançado com o progresso do conhecimento nos campos de ciência e tecnologia dos materiais. Isso tem possibilitado a manipulação e criação de novos materiais com propriedades aprimoradas, atendendo a aplicações específicas, com a biomimética desempenhando um papel significativo na busca por soluções sustentáveis. Barauna, *et al.* (2016), por sua vez, abordam o desenvolvimento do design de materiais como uma abordagem que surgiu da engenharia de materiais no final do Século XX, quando a ideia de pensamento preditivo foi adotada para o desenvolvimento e aplicação de materiais avançados. Já no Século XXI, o conceito de design de materiais evoluiu, incorporando conhecimentos de design e gestão de processos, com o objetivo de aumentar a probabilidade de sucesso na inovação de materiais em benefício da sociedade.

Com o advento das tecnologias de manufatura aditiva e o design de novos materiais voltados para a impressão 3D, as oportunidades para o surgimento de novos

materiais compostos com diversas propriedades e inovações em sustentabilidade têm aumentado constantemente. No entanto, o rápido aumento no consumo de materiais e produtos no mercado global está resultando em impactos prejudiciais ao meio ambiente e à saúde humana. À medida que o consumo continua a crescer, torna-se imperativo abordar os efeitos decorrentes das escolhas de materiais. A integração de decisões relativas à seleção de materiais mais seguros durante o processo de design e desenvolvimento de produtos pode reduzir os impactos ambientais e os riscos para a saúde humana. Além disso, é importante destacar que o desempenho sustentável dos produtos depende das escolhas dos materiais utilizados em sua composição (Daya, 2017).

De acordo com Oxman (2015), a cultura contemporânea de design está passando por uma transformação em direção ao design consciente dos materiais. Inspirando-se nas estratégias encontradas na natureza, onde a formação de estruturas é guiada pela busca do melhor desempenho com a utilização mínima de recursos, essa abordagem envolve a programação das propriedades do material. A autora propõe e desenvolve modelos e processos que se baseiam nos materiais e na geração de formas e estruturas habilitadas computacionalmente. Esse conhecimento tem sido aplicado com êxito em tecnologias emergentes, como a fabricação digital.

Conforme mencionado por Oxman (2010), uma nova abordagem de design, inspirada na natureza, denominada ecologia material, emergiu recentemente. Seu objetivo é estabelecer uma relação mais profunda entre o objeto de design e o ambiente que o circunda. Essa abordagem reconhece que o ambiente e o objeto de design interagem em várias dimensões e respondem a diversas variáveis ambientais. A ecologia material busca preencher essa lacuna, expandindo a dimensionalidade do espaço de design por meio de estruturas inspiradas na natureza, materiais multifuncionais e fabricação digital. Ao fazer isso, ela promove uma visão holística do design, considerando a computação, a fabricação e o próprio material como dimensões inseparáveis do processo de design. Isso resulta na concepção de objetos ecologicamente conscientes desde o início do processo criativo.

Segundo Kapsali (2016), o papel dos materiais no contexto dos princípios biomiméticos pode revelar novas oportunidades de design. A autora ressalta que, na natureza, os materiais são limitados em variedade, mas extraordinariamente eficientes. Basicamente, existem dois principais grupos de polímeros - proteínas e polissacarídeos - que servem como blocos de construção para todos os sistemas

biológicos, proporcionando uma ampla gama de propriedades e funções essenciais para sustentar a vida. Essa abordagem engenhosa do design na biologia é uma resposta à limitação na diversidade de matérias-primas disponíveis. A complexidade e multifuncionalidade dos sistemas biológicos, em grande parte, decorrem da hierarquia estrutural, onde os materiais e suas estruturas são montados em várias camadas, em vez de dependerem exclusivamente das propriedades químicas dos materiais.

Dependemos das propriedades intrínsecas dos materiais para incorporar resistência, elasticidade e outras características em um produto. Por exemplo, se desejamos aumentar a resistência de uma ponte, geralmente optamos por utilizar aço mais resistente ou aumentar a quantidade de material. No entanto, ao revisar o design, podemos explorar alternativas bioinspiradas que otimizem o uso de materiais e energia, em vez de simplesmente aumentar a quantidade de um material.

Atualmente, temos à disposição mais de 300 tipos de polímeros comerciais utilizados na fabricação de produtos. Muitos desses polímeros têm origem em recursos naturais cada vez mais escassos, requerendo consideráveis quantidades de energia e envolvendo processos poluentes em sua produção. Além disso, ao final de sua vida útil, esses materiais frequentemente acabam em aterros sanitários (Kapsali, 2016). Materiais robustos, como metais, plásticos reforçados e polímeros de alta resistência, desempenham um papel fundamental em nosso ambiente construído. Confiamos em sua resistência para manter as estruturas funcionando. No entanto, a natureza nos mostra que é possível construir estruturas robustas utilizando materiais menos resistentes. A natureza também nos ensina como comportamentos complexos e avançados podem surgir de uma abordagem hierárquica para o design. O princípio biomimético de maximização de recursos ilustra como uma estrutura forte pode ser criada a partir de materiais inicialmente frágeis.

Por outro lado, o desenvolvimento econômico baseado em tecnologias industriais mais limpas tem se tornado uma prática amplamente discutida nos últimos anos. A consideração de questões ambientais resulta em um modelo de desenvolvimento econômico que prioriza inovações tecnológicas mais sustentáveis, promovendo uma maior harmonia com o meio ambiente. Isso envolve a utilização de matérias-primas e energia de forma mais eficiente. Notavelmente, os compósitos biodegradáveis e provenientes de fontes renováveis têm ganhado destaque, impulsionados pela busca contínua por materiais que possam, total ou parcialmente,

substituir os polímeros derivados do petróleo. Nesse contexto, o desenvolvimento de novos biomateriais ou biocompósitos se baseia na combinação de matérias-primas renováveis e biodegradáveis. Essa abordagem contribui significativamente para a redução da geração de resíduos tóxicos.

De acordo com Carneiro (2017), as fibras vegetais estão ganhando espaço nas indústrias não apenas por motivos ambientais, mas também por razões técnicas e econômicas. Elas estão sendo amplamente utilizadas como substitutas de compostos reforçados por fibras sintéticas. Essa transição ocorre devido às características naturais das fibras, que são biodegradáveis, recicláveis e de baixo custo. Elas encontram uma ampla gama de aplicações em setores como a indústria automotiva, a indústria de tapeçaria e a construção civil, entre outros. Entre as diversas fibras lignocelulósicas em ascensão, destaca-se o sisal, obtido da planta *Agave sisalana*, cultivada no Nordeste do Brasil. O sisal oferece várias vantagens técnicas, econômicas e ambientais, tornando-se uma excelente matéria-prima, inclusive para a produção de celulose. Em termos de composição, a fibra de sisal (*Agave sisalana* Perrine) pode conter até 75% de celulose. Além disso, as fibras de sisal exibem um comportamento mecânico semelhante ao das fibras sintéticas em relação à tensão de tração (Carneiro, 2017).

Além das fibras vegetais que estão se tornando cada vez mais populares na indústria devido às suas propriedades ambientais e econômicas, outra alternativa promissora está surgindo no campo dos compósitos poliméricos. Essa alternativa envolve o uso de espuma de poliuretano derivada de óleo vegetal, reforçada com fibras vegetais, oferecendo uma solução que combina matéria-prima renovável com benefícios ambientais significativos (Paula *et al.* 2022; Jesus 2000).

Os compósitos poliméricos frequentemente utilizados na produção de artefatos costumam ser originados de fontes não renováveis, o que pode ser prejudicial à saúde devido à liberação de solventes tóxicos. No entanto, a utilização dessas espumas de poliuretano baseadas em óleos vegetais tem demonstrado resistência às condições climáticas e boa resistência mecânica em comparação com as espumas derivadas do petróleo (Paula *et al.* 2022).

É fundamental, conforme destaca Baumeister (2014), diferenciar as diversas abordagens de soluções inspiradas biologicamente para materiais. Não se deve confundir uma abordagem de design biomimético com outras soluções bioinspiradas, como a bio utilização. Enquanto a biomimética busca aprender e abstrair as

estratégias de um modelo natural para emulá-las em processos, artefatos e materiais, copiando através de um processo de analogia, a bio utilização implica na colheita de um produto ou produtor, como o corte de madeira para produtos. No entanto, é importante ressaltar que a bio utilização não é incompatível com o objetivo de sustentabilidade do projeto, desde que seja contextualizada e alinhada com as realidades locais, proporcionando benefícios ao ecossistema e respeitando princípios biologicamente inspirados.

Segundo Baumeister (2014), na cultura industrial ocidental, buscar orientação na natureza representa uma mudança de paradigma significativa. Quando começamos a enxergar a natureza como uma fonte de inspiração para ideias, em vez de apenas como uma fonte de recursos, nosso respeito pela vida e sua incrível capacidade de adaptação cresce. À medida que mais pessoas se envolvem na prática da biomimética e compreendem o que podemos aprender com os sistemas vivos, torna-se evidente o argumento em favor da conservação da biodiversidade. Uma abordagem científica profundamente diferente emerge, uma que nos leva a aprender com os métodos naturais em vez de simplesmente explorar os recursos naturais. O estudo de organismos, com a intenção subsequente de imitá-los, exige um retorno aos organismos com um novo conjunto de perguntas e uma perspectiva mais profunda.

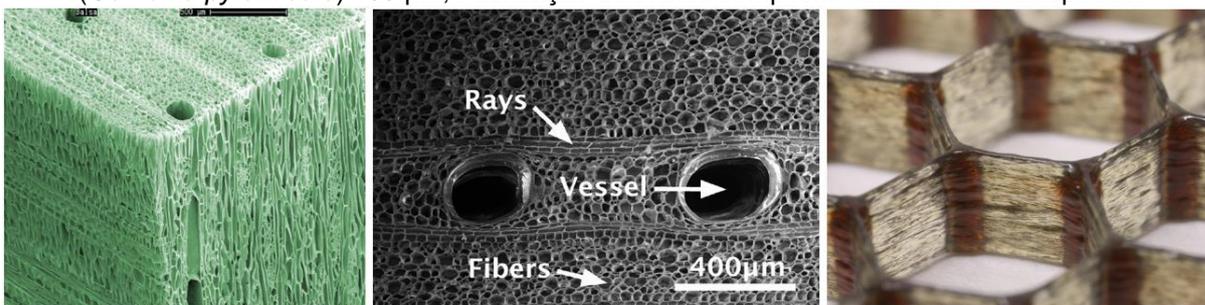
Além disso, como observado por Byrne, *et al.* (2018), há várias abordagens e soluções inspiradas biologicamente para estruturas e materiais. Os avanços significativos em soluções de materiais inspiradas na biologia podem estar relacionados principalmente às propriedades físicas e mecânicas dos materiais ou, alternativamente, às características da estrutura construída com esses materiais. Uma abordagem possível para soluções inspiradas biologicamente em materiais envolve a compreensão da relação entre as estruturas biológicas e suas funções. Byrne *et al.* (2018) também destacam uma abordagem mais recente que se concentra em inspirações em escalas muito pequenas, como a escala nanométrica. No entanto, essa forma de bioinspiração está mais relacionada às características da superfície do material do que à sua estrutura interna.

Nas abordagens em escala micro, também podem ser obtidos resultados bem-sucedidos direcionando o foco de estudo e análise para a forma e composição da estrutura. Esta abordagem é eficaz quando se relaciona a função com as características da estrutura biológica, bem como com as propriedades do material

biológico. Conforme observado por Byrne *et al.* (2018), substituir o material biológico por um material artificial não resulta na perda dos aspectos fundamentais da função de interesse. Isso ocorre porque a função é derivada de maneira mais eficaz das características estruturais, em vez das propriedades materiais.

No entanto, é importante destacar que resultados mais alinhados aos princípios de biomimética são alcançados quando essas duas perspectivas são combinadas. A Figura 1 ilustra duas micrografias eletrônicas de varredura da estrutura celular leve e resistente da madeira Balsa, bem como um estudo com estrutura bioinspirada nas propriedades mecânicas da madeira Balsa. Neste estudo, foram impressas em 3D estruturas que emulam a estrutura da madeira Balsa, utilizando um material compósito composto de resina epóxi e fibras de carbono para reforço estrutural sem excesso de peso. Isso representa a transferência de função das estratégias de leveza e resistência, simulando as propriedades mecânicas dos materiais da Balsa (Compton & Lewis, 2014).

Figura 1 - Micrografias eletrônicas de varredura de madeira Balsa (*Ochroma lagopus*) 500  $\mu\text{m}$  e Balsa (*Ochroma pyramidale*) 400  $\mu\text{m}$ ; Fabricação aditiva de compósito celular leve bioinspirado.



Fontes: <http://sciencewise.anu.edu.au/articles/timbers> (2018); Borrega *et al.* (2015); Compton & Lewis (2014).

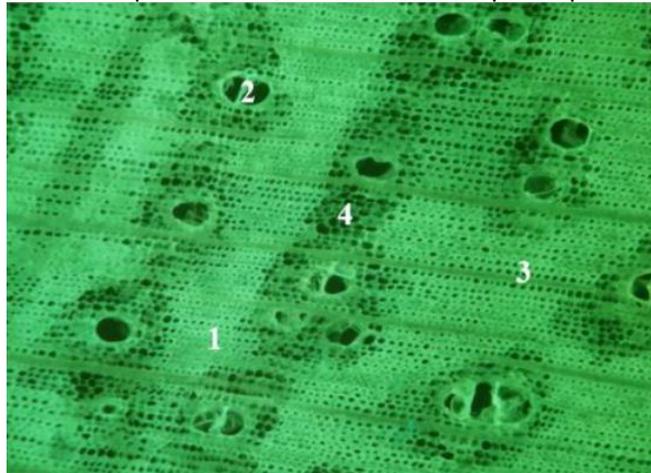
A Balsa é uma madeira de crescimento rápido, conhecida por sua densidade muito baixa, que normalmente varia entre 100 e 250  $\text{kg}/\text{m}^3$ , mas pode alcançar valores entre 60 e 380  $\text{kg}/\text{m}^3$  (Borrega *et al.* 2015). Essa notável leveza a torna um recurso altamente valioso em aplicações que requerem materiais leves e resistentes, como na fabricação de painéis estruturais para turbinas eólicas, aeronaves, equipamentos esportivos e pranchas de surf. É importante ressaltar que a madeira de Balsa é composta principalmente por três tipos de células: vasos, raios e fibras. Essas características da madeira de Balsa a tornam particularmente atraente para o design de pranchas de surf, onde a busca por materiais leves é fundamental.

A natureza é uma fonte rica de inspiração para o design de produtos, especialmente quando se trata de sistemas naturais que exibem propriedades desejáveis, como leveza e resistência. Um exemplo notável de como a biomimética e o design bioinspirado podem ser aplicados para criar produtos mais eficientes e sustentáveis é o Agave. Assim como o Agave, encontramos uma ampla variedade de outros sistemas naturais com propriedades semelhantes, como a madeira de Paulownia e suas várias espécies. A madeira de Paulownia (Figura 2), frequentemente usada na fabricação de pranchas de surf devido às suas propriedades físicas de baixa densidade, também se destaca como uma escolha sustentável, devido ao seu rápido crescimento.

Segundo Stern *et al.* (2010), a densidade da madeira desempenha um papel crucial em sua resistência, dureza e trabalhabilidade. Madeiras densas tendem a apresentar maior contração e expansão em comparação com as mais leves. Essa diferença de densidade está relacionada principalmente com a relação entre as paredes celulares e os lúmenes, sendo as fibras um componente essencial nesse aspecto. Paredes espessas e lúmenes estreitos resultam em maior densidade, enquanto paredes finas e lúmenes largos resultam em menor densidade. A presença de muitos vasos de paredes finas também contribui para a diminuição da densidade da madeira.

Ambos os exemplos demonstram como a observação e a compreensão dos sistemas naturais podem levar a soluções de design mais eficazes e ecológicas. A biomimética de materiais é um campo em crescimento que busca aplicar os princípios encontrados na natureza para melhorar a funcionalidade e a eficiência de produtos e processos industriais. Isso pode ser particularmente relevante para o desenvolvimento de pranchas de surf sustentáveis e outros produtos relacionados ao surf, onde a leveza, resistência e sustentabilidade são fundamentais.

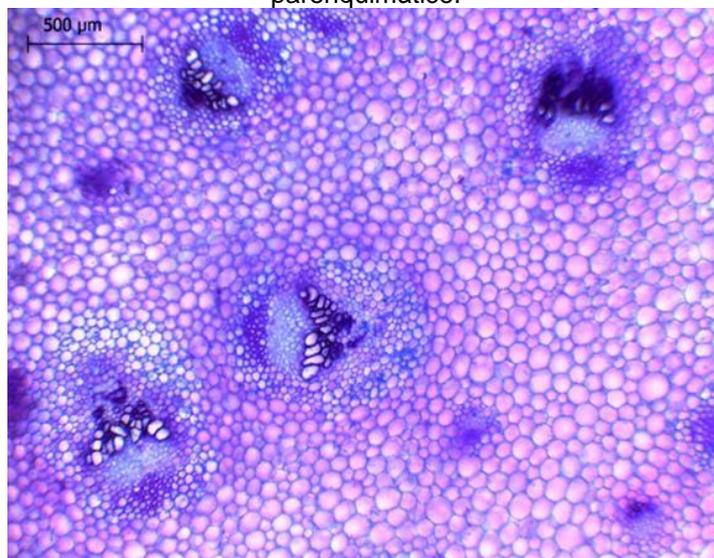
Figura 2 - Amostras de madeira de *Paulownia elongata x fortunei* (Cotevisa 2 iPaulownia), apresentando características marcantes na anatomia: Corte transversal de lenho de Paulownia ao microscópio: 1-fibras, 2-vaso, 3-raio, 4-parênquima.



Fonte: Neves de Sá (2022).

Um exemplo prático dessa abordagem é o trabalho desenvolvido por Araújo (2015), que investigou a estrutura das paredes celulares do tecido vegetal do pendão floral da planta Agave. A pesquisa buscou entender as estratégias naturais de leveza e resistência presentes no Agave. Por meio de técnicas de microscopia, foi possível visualizar a organização estrutural das células lignocelulósicas no tecido vegetal do Agave (conforme mostrado na Figura 3).

Figura 3 - Corte transversal do escapo floral apresentando feixes vasculares circundados por tecido parenquimático.

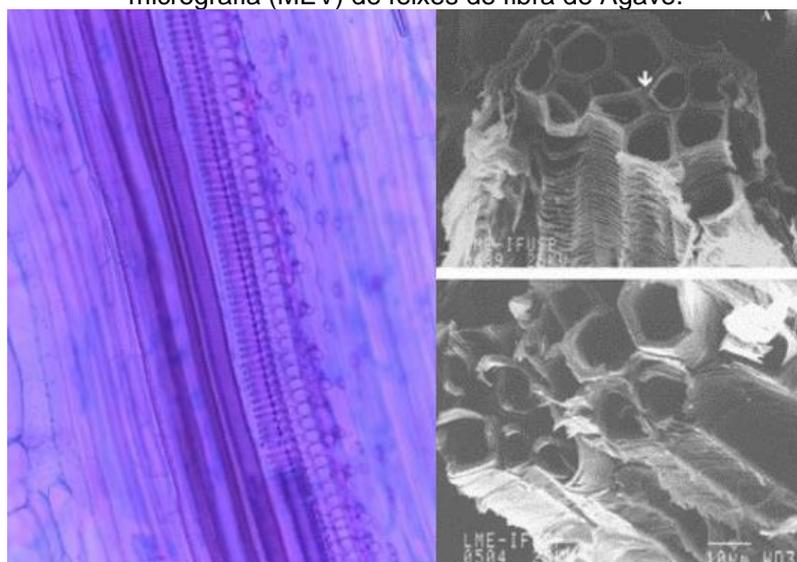


Fonte: Araújo (2015).

A descrição das células parenquimáticas e das características do xilema no Agave é importante para compreender a complexidade e as propriedades do tecido vegetal dessa planta. As células parenquimáticas, que estão predominantemente presentes no parênquima, um tecido fundamental nas plantas, têm funções diversas, incluindo armazenamento, preenchimento de espaços e trocas gasosas em tecidos específicos. Por outro lado, o xilema é uma parte essencial da planta, composto por traqueídes e elementos de vaso, desempenhando um papel vital no transporte de água e nutrientes.

No caso do Agave, além das células parenquimáticas com paredes primárias, a presença de células especializadas com paredes secundárias mais espessas é uma característica proeminente. Estas células incluem fibras e traqueídes, organizadas em filamentos verticais sobrepostos, que têm uma forma alongada e possuem parede secundária. Essas fibras desempenham um papel crucial na sustentação da planta, conferindo-lhe propriedades de rigidez e flexibilidade. A orientação paralela das fibras depositadas é um fator fundamental que contribui para as propriedades mecânicas da planta, proporcionando uma resistência significativa à tração.

Figura 4 - Imagem à esquerda: microscopia ótica, ampliação em 200 µm. Imagens à direita: micrografia (MEV) de feixes de fibra de Agave.



Fontes: Araújo (2015); Martins, M. *et al.* (2004).

A comunicação entre as diferentes células do Agave é essencial para seu funcionamento, e isso é facilitado por espaços vazados nas paredes celulares, conhecidos como pontoações e campos de pontoação. Esses campos de pontoação são áreas onde, durante a formação da parede secundária, geralmente não ocorre a

deposição de material de parede. Esses espaços vazados se assemelham a orifícios e são distribuídos de maneira elegante e equilibrada, seguindo padrões bem definidos. Surpreendentemente, a ausência de material nessas regiões não compromete a estrutura e a resistência mecânica do Agave. Pelo contrário, contribui para maior flexibilidade, resistência e leveza da planta.

A estrutura das paredes celulares do tecido vegetal do Agave revela estratégias eficazes para alcançar leveza e resistência com otimização de matéria e energia. Uma das estratégias notáveis é a deposição mínima de lignina, um polímero natural estrutural responsável pela rigidez das células vegetais. Essa deposição mínima de lignina proporciona à planta sustentação e resistência mecânica, ao mesmo tempo em que economiza peso, mantendo a leveza e a resistência necessárias com economia de matéria e energia. Essas propriedades podem ser aplicadas no desenvolvimento de estruturas bioinspiradas genéricas que atendam a uma variedade de artefatos que requerem leveza e resistência.

Esses insights da estrutura do Agave destacam a capacidade da natureza de otimizar suas soluções para alcançar propriedades desejadas, como resistência e flexibilidade, enquanto minimiza o uso de recursos. Essas descobertas não apenas enriquecem nosso entendimento da biologia das plantas, mas também têm aplicações práticas na criação de materiais e produtos inspirados na natureza, alinhados com princípios de sustentabilidade e eficiência.

O estudo conduzido por Araújo (2015) tinha como principal objetivo desenvolver uma estrutura biomimética inspirada na organização das paredes celulares lignocelulósicas do Agave, com o propósito de emular as estratégias biológicas em artefatos concretos. Para alcançar esse objetivo, foram empregados processos de modelagem digital, design paramétrico e impressão 3D (como ilustrado na Figura 05), permitindo alinhar o projeto aos princípios de crescimento e desenvolvimento de modelos biológicos. Esses modelos biológicos depositam matéria-prima e energia de forma eficiente, seguindo o princípio da maximização de recursos, mantendo ao mesmo tempo características mecânicas adequadas para suas funções.

Esse processo foi conduzido com base em uma abordagem metodológica em biomimética conhecida como "Biomimicry Thinking," que foi desenvolvida pelo Instituto de Biomimética 3.8 e faz parte do Biomimicry DesignLens. O DesignLens é um conjunto de ferramentas e diagramas concebidos para orientar o processo de

design biomimético, incorporando princípios de sustentabilidade que são observados na natureza. Autores como Benyus (2013) e Baumeister (2014), em conjunto com o Instituto de Biomimética 3.8, identificaram os "Princípios da Vida" como a ferramenta central para o design biomimético. Esses princípios são fundamentais para impulsionar e avaliar a sustentabilidade e a adequação de projetos inovadores e sustentáveis, representando as estratégias que a natureza utiliza para se manter sustentável ao longo de bilhões de anos na Terra (Baumeister, 2014).

O DesignLens tem como objetivo aprofundar a compreensão de como a vida funciona e estabelecer parâmetros para a utilização da sabedoria da natureza na orientação do design humano. Essa abordagem incorpora uma série de diagramas que visualmente representam os fundamentos do processo de design inspirado na natureza, integrando o Biomimicry Thinking com os Elementos Essenciais e os Princípios da Vida.

Figura 5 - Impressão 3D como exemplo de aplicação de uma estrutura bioinspirada nas estratégias de leveza e resistência do Agave. Estrutura que pode ser emulada em uma ampla gama de artefatos (Araújo, 2015).



Fonte: Araújo (2015).

É importante salientar que a pesquisa conduzida por Araújo (2015) tinha um escopo limitado, focando-se exclusivamente na emulação da estrutura formal e funcional das paredes celulares do Agave. No entanto, neste estudo, um dos principais objetivos é expandir essa abordagem, concentrando-se na abstração dos padrões de Voronoi do Agave e na criação de emulações em estruturas paramétricas de fabricação digital. Simultaneamente, foram realizadas experimentações com as fibras

do Agave, explorando suas propriedades mecânicas para aplicação em artefatos de surf bioinspirados.

Essa pesquisa mais abrangente e aprofundada visa obter um entendimento mais completo do sistema natural do Agave, incluindo os fatores responsáveis por suas notáveis propriedades mecânicas. Essas propriedades podem ser aplicadas no desenvolvimento de estruturas e materiais que sejam leves, resistentes e biodegradáveis. Essa abordagem está alinhada com os Princípios da Vida, buscando impulsionar a inovação em sustentabilidade e tecnologia.

Além disso, para fins de comparação e compreensão mais abrangente, também foram realizados estudos de caracterização mecânica da madeira de Paulownia, que é reconhecida por sua leveza e resistência. A pesquisa enfatiza a importância de encontrar materiais biodegradáveis que sejam ecologicamente responsáveis, permitindo a extração de princípios da natureza e sua aplicação no mundo humano. Essa abordagem é fundamental para promover a sustentabilidade e a harmonia com o meio ambiente.

## 1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DE PESQUISA

Conforme a norma ISO 18458-2015, o campo da biomimética apresenta uma significativa relevância para o avanço da ciência e tecnologia. Este campo atua numa prática altamente interdisciplinar, reunindo especialistas de diversas áreas, como biologia e engenharia, e possui um notável potencial para a inovação. Em razão disso, a biomimética tornou-se um objeto de pesquisa e educação em diversas universidades e instituições de pesquisa. Além disso, empresas de manufatura estão cada vez mais adotando métodos biomiméticos para desenvolver novos produtos, otimizar produtos existentes e criar novos materiais. Apesar do aumento no número de pesquisadores e usuários ativos no campo da biomimética, a transferência de conhecimento da biologia para a tecnologia ainda é um processo complexo que requer um alto grau de envolvimento por parte dos profissionais envolvidos.

A biomimética no design muitas vezes é mal compreendida como a simples imitação de formas naturais. No entanto, Janine Benyus, que cunhou o termo, destaca que a verdadeira biomimética se concentra na pesquisa de desempenho ecológico em vez de apenas criar formas (Baumeister, 2014). Essa abordagem representa uma nova forma de enxergar a natureza, não como uma fonte de recursos, mas como uma

fonte de ideias inspiradoras. À medida que mais pessoas adotam a biomimética, percebem o potencial de aprendizado com os sistemas vivos e reconhecem a importância da conservação da biodiversidade. De acordo com Müller *et al.* (2018), a bioinspiração, que utiliza insights da natureza para desenvolver novos conceitos de engenharia, é um campo científico de rápido crescimento e sucesso.

Lepora *et al.* (2013) argumentam sobre a relevância da biomimética no desenvolvimento de novas tecnologias através da destilação de princípios do estudo de sistemas biológicos. As tecnologias biomiméticas surgem de um fluxo de ideias das ciências biológicas para a engenharia, beneficiando-se dos milhões de anos de esforços de design realizados pela seleção natural nos sistemas vivos. Ao abordar a biodiversidade como recurso natural para o design e engenharia, o autor expõe que;

A bioinspiração atrai ideias para soluções de engenharia de sistemas vivos. A biodiversidade do mundo pode ser vista como um recurso natural para o desenvolvimento tecnológico, assim como florestas, água, minerais, combustíveis fósseis ou energia geotérmica servem como recursos para atender a diferentes necessidades (Lepora *et al.* 2013).

De acordo com o autor, apesar de sua utilidade comprovada, o ritmo atual da bioinspiração como um campo deixou esse recurso natural amplamente inexplorado e subutilizado por vários anos. A bioinspiração está atualmente progredindo em um ritmo onde os períodos de progresso são pontuados por inovações que ocorrem sempre que um dos relativamente poucos modelos orgânicos é introduzido (Lepora, *et al.*, 2013). Desta forma, Müller *et al.* (2018) fala que os sucessos da bioinspiração e do potencial de crescimento como um campo da inovação tem sido dirigido pelas metodologias ad hoc, pela qual designers e engenheiros identificam os organismos de interesse (Müller *et al.* 2018).

A norma ISO (18458-2015) destaca que a transferência de soluções biológicas para aplicações técnicas se baseia na suposição de que as estruturas biológicas são otimizadas para suas necessidades, oferecendo potenciais aplicações significativas e justificáveis. Com mais de 2.5 milhões de espécies identificadas, existe um vasto conjunto de ideias disponíveis para solucionar problemas práticos por meio da biomimética. No entanto, apenas uma pequena fração da biodiversidade mundial tem sido explorada como fonte de inspiração em áreas como design, arquitetura, engenharia e gestão, que são cruciais para o desenvolvimento social, econômico e

ambiental. Isso implica que muitos sistemas biológicos valiosos para a engenharia provavelmente permanecem inexplorados.

Müller *et al.* (2018) destacam a importância dos insights relacionados à forma e função, presentes nas relações evolutivas ao longo da árvore da vida, que em breve poderão se tornar acessíveis graças aos avanços recentes em várias áreas de pesquisa. Isso inclui a digitalização de espécimes de museus, métodos para a descrição e análise de formas biológicas complexas, previsão quantitativa da função biológica da forma e análise de grandes conjuntos de dados digitais. O autor justifica que, quando combinados, o crescimento das bases de dados e as capacidades emergentes possibilitarão a exploração da biodiversidade conhecida no mundo como um recurso valioso para o conhecimento relevante na engenharia. Essa transformação na bioinspiração é altamente oportuna para o desenvolvimento da engenharia, pois pode fornecer os insights necessários para tornar a tecnologia mais autônoma, adaptável e capaz de operar em ambientes complexos.

O campo da tecnologia bioinspirada, que envolve a integração de processos, princípios e recursos da natureza em sistemas técnicos, está ganhando cada vez mais destaque. É considerado de grande importância nos desenvolvimentos científicos e tecnológicos a médio e longo prazo, com potencial para transformar a manufatura atual e abrir novos mercados para indústrias envolvidas em tecnologias de fabricação e desenvolvimento de sistemas e materiais inovadores (Byrne *et al.*, 2018).

Byrne *et al.* (2018) ressaltam a relevância da sustentabilidade no desenvolvimento de inovações ao utilizar soluções de materiais biológicos, uma vez que esses materiais são intrinsecamente sustentáveis. De fato, sistemas biológicos feitos de materiais biológicos não geram resíduos nem causam danos irreversíveis ao ecossistema. Pelo contrário, eles desempenham um papel fundamental ao enriquecer e sustentar o ecossistema em que estão inseridos. Além disso, as estruturas biológicas oferecem uma ampla gama de propriedades com um uso mínimo de materiais e energia, resultando em produtos totalmente recicláveis de forma natural.

Os avanços na compreensão da função de organismos biológicos e o desenvolvimento de técnicas de fabricação digital avançadas resultaram em um aumento significativo nas concessões, pesquisas e patentes bioinspiradas desde 2000. Prevê-se que a bioinspiração tenha o potencial de gerar US \$1,6 trilhão em produção total, economizando mais US \$500 bilhões em mitigação de recursos e

poluição até 2030. Esses números destacam tanto o valor científico quanto econômico da bioinspiração (Byrne *et al.*, 2018).

Os autores argumentam que a manufatura digital por meio da abordagem bioinspirada representa uma nova fronteira na digitalização e na Indústria 4.0, com um forte potencial de mercado. No entanto, ressaltam que serão necessários esforços substanciais em pesquisa e desenvolvimento para maximizar os benefícios dessa transformação biológica. Se a biotecnologia de manufatura liderar a indústria do futuro, poderemos reduzir o uso de materiais metálicos, contribuindo para mitigar os impactos ambientais da extração de minérios, mesmo que a maioria dos metais seja reciclável.

A promessa da solução material bioinspirada é enorme. Milhões de soluções estão aí para serem levadas em consideração pelos pesquisadores. As soluções de materiais biológicos passaram pelos testes severos de evolução natural, não têm limitações devido a patentes, podem ser muito surpreendentes e podem promover inovação sustentável. Mesmo que as propriedades dos materiais biológicos nem sempre sejam ideais, elas representam uma fonte de conhecimento de alta qualidade para soluções inovadoras (Byrne *et al.*, 2018).

O desenvolvimento de abordagens científicas radicalmente diferentes exige aprender com a natureza, não apenas explorar seus recursos. Ao estudar organismos e tentar imitá-los, é essencial adotar uma perspectiva que vá além da imitação superficial. Artefatos biomiméticos fabricados digitalmente com materiais bioinspirados proporcionam oportunidades valiosas para compreender as contrapartes biológicas do Agave. Isso permite a formulação de novas perguntas e a busca de respostas sobre a relação entre a estrutura celular e os materiais. Essas questões não podem ser adequadamente abordadas apenas por meio de especulações teóricas.

A transferência de funções da biologia para artefatos biomiméticos é fundamental. Isso permite que a biomimética emule e teste hipóteses das ciências biológicas. Sem essa abordagem, existe o risco de simplesmente copiar cegamente ou imitar os princípios do design, sem compreender plenamente as verdadeiras funções das formas e composições dos modelos naturais. A transferência de funções biológicas para sistemas biomiméticos oferece um campo de testes para ideias

teóricas em biologia, com o auxílio de analogias e a capacidade de materializar soluções biológicas para desafios na ciência e tecnologia. Isso também contribui para a implementação justificada dos Princípios da Vida (Baumeister, 2014).

A pesquisa até este ponto enfatizou a importância da biomimética e dos materiais bioinspirados, destacando seu potencial sustentável e econômico. Agora, direcionaremos nossa atenção para a aplicação específica deste conceito em nosso estudo. Esta pesquisa se baseia na relevância do estudo biomimético de um modelo da natureza, o *Agave sisalana*. Surpreendentemente, essa perspectiva científica da biomimética ainda não foi aplicada a esse modelo específico. Não foram encontrados estudos na literatura que se dedicassem à emulação das estratégias do *Agave sisalana*, especialmente focando nos princípios de leveza, resistência e ciclo de vida, nem na replicação das propriedades mecânicas de seu tecido vegetal do escapo floral. Por outro lado, a literatura oferece uma ampla gama de estudos biológicos sobre o *Agave sisalana*, abordando aspectos como botânica, anatomia vegetal, ecologia e suas aplicações econômicas e engenharias. No entanto, até o momento, não se identificaram estudos biomiméticos envolvendo esse modelo natural.

Dada a natureza multidisciplinar da prática da biomimética, é crucial preencher essa lacuna de conhecimento. Esses estudos especializados e específicos são de suma importância, pois servirão como fundamentos teóricos e práticos para extrair as funções e estratégias naturais por meio de analogias e emulações, com a orientação de especialistas e profissionais qualificados.

A justificação para esta pesquisa é apoiada pela formação de uma equipe diversificada de especialistas, abrangendo biólogos, engenheiros, técnicos de laboratório, designers e programadores digitais. Essa equipe multidisciplinar permitiu a realização de diversas atividades fundamentais para o desenvolvimento deste estudo. Foram conduzidas atividades de campo para a coleta de amostras, bem como a preparação da matéria-prima essencial para a pesquisa. O Laboratório de Anatomia Vegetal (LAVeg) da Universidade Federal de Pernambuco, sob a coordenação da professora bióloga Dr. Emília Arruda, desempenhou um papel crucial na análise dos dados biológicos coletados. Além disso, o Laboratório de Imunopatologia Keizo Asami (LIKA), parte do Instituto Oswaldo Cruz (Fiocruz) da UFPE, contribuiu significativamente ao produzir imagens de alta resolução em Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das amostras do *Agave sisalana*.

Essas etapas incluíram análises detalhadas das amostras de estudo, visando a obtenção de informações qualitativas sobre as propriedades do objeto de pesquisa. Todas as atividades laboratoriais foram realizadas com rigor científico, cumprindo os padrões necessários, e contaram com a orientação da Dra. Emília Arruda.

Além disso, a equipe de pesquisa contou com a participação do Laboratório de Biodesign e Artefatos Industriais da UFPE, que é coordenado pelo professor designer Amilton Arruda, PhD na área de biônica e orientador deste estudo. Este laboratório desempenhou um papel fundamental ao oferecer orientações e insights essenciais nas etapas de projeto, bem como no estudo do modelo natural para a extração de analogias. Além disso, contribuiu significativamente na investigação sobre a transferência de funções para o design paramétrico e a fabricação digital.

A pesquisa também recebeu apoio significativo na área de engenharia mecânica e na manipulação de materiais, graças à colaboração dos laboratórios coordenados pelo professor engenheiro PhD. Jorge Lino Alves, que também atua como coorientador neste estudo. Esses laboratórios desempenharam um papel crucial no desenvolvimento do projeto: Laboratório de Desenvolvimento de Produtos e Serviços na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP); e Laboratório de Impressão 3D do INEGI - Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial. Esses laboratórios proporcionaram recursos essenciais, incluindo maquinários para a manipulação de materiais, ensaios mecânicos e equipamentos de impressão 3D. Essa colaboração permitiu a realização de experimentos relacionados ao desenvolvimento de materiais bioinspirados, incluindo a tentativa de produção de um filamento para impressoras 3D, bem como a execução de ensaios mecânicos para a coleta de dados quantitativos e qualitativos sobre o comportamento desses materiais. Além disso, as atividades de preparação e manipulação da matéria-prima para os experimentos mencionados, foram fundamentais para o avanço da pesquisa. A oportunidade de realizar uma mobilidade internacional de pesquisa na FEUP desempenhou um papel crucial nesse processo, pois permitiu o acesso a equipamentos e recursos indispensáveis para o desenvolvimento do projeto.

Além disso, a pesquisa contou com a colaboração de FabLabs e empresas de impressão 3D, como a Shapeways, que desempenharam um papel importante no desenvolvimento do projeto. Essas entidades forneceram recursos adicionais e suporte técnico valioso.

O arquiteto e designer paramétrico Paulo Carvalho também contribuiu de forma significativa, oferecendo suporte técnico e conhecimento especializado. Além disso, o laboratório de fabricação digital da startup Selvagen (Selva Generativa) desempenhou um papel fundamental no desenvolvimento de estratégias computacionais no Grasshopper para a criação dos códigos algorítmicos apresentados nesta tese. Eles também colaboraram na utilização da CNC para usinar modelos tridimensionais e protótipos com a aplicação das estratégias bioinspiradas.

No tópico 1.2 exploramos a justificação e relevância desta pesquisa na biomimética, particularmente no estudo do *Agave sisalana*. Destacamos a falta de estudos biomiméticos abordando esse modelo natural, ressaltando sua importância em áreas como emulação de estratégias, propriedades mecânicas e materiais. Salientamos a necessidade de uma abordagem multidisciplinar, envolvendo diversos especialistas, laboratórios e colaboradores. Este tópico enfatiza o valor científico e econômico da bioinspiração, especialmente no contexto da manufatura digital e Indústria 4.0, promovendo inovação sustentável. Também destacamos a importância da transferência de funções biológicas para artefatos biomiméticos e sua contribuição para testar ideias teóricas em biologia. Em resumo, este tópico estabelece uma base sólida para a pesquisa subsequente, resumindo a relevância da biomimética no estudo do *Agave sisalana* e suas potenciais aplicações em engenharia e design de materiais.

### 1.3 ELEMENTOS PRÉ-TEXTUAIS

#### 1.3.1 Tema

Biomimética, Fabricação Digital e Materiais.

SUBTEMAS: Artefatos Bio-inspirados; Design Paramétrico; Design de Materiais; e Impressão 3D.

O tema desta pesquisa abrange "Biomimética, Fabricação Digital e Materiais." Além disso, os subtemas específicos que serão explorados incluem "Artefatos Bio-inspirados," "Design Paramétrico," "Design de Materiais," e "Impressão 3D." Esses elementos fornecem um contexto abrangente para a investigação.

### **1.3.2 Objeto genérico da pesquisa**

O objeto genérico desta pesquisa reside no domínio dos artefatos, envolvendo a manipulação da matéria-prima, os processos de fabricação e a exploração de sistemas naturais, especificamente relacionados ao Agave e à biomimética.

### **1.3.4 Objeto de estudo**

O objeto de estudo desta pesquisa abrange o Agave e os artefatos de surf sustentáveis.

### **1.3.5 Objeto de pesquisa**

O objeto de pesquisa se concentra nas estratégias de leveza e resistência observadas no Agave.

### **1.3.6 Campo de atuação da pesquisa**

O campo de atuação desta pesquisa é principalmente o campo material. Ela envolve uma prática de pesquisa qualitativa que inclui investigação e apropriação do objeto de estudo, seu contexto e entorno. Além disso, abrange a prática projetual, com foco no desenvolvimento de artefatos em laboratório, utilizando dados da exploração do objeto de estudo. Também inclui uma prática de pesquisa para quantificar dados, analisar e avaliar os experimentos e artefatos gerados.

### **1.3.7 Pergunta do problema**

De que maneira aliando processos biomiméticos, design paramétrico, fabricação digital e design de materiais bio-inspirados, é possível emular as propriedades de leveza e resistência da estrutura e composição das paredes celulares da *Agave sisalana* em artefatos de surf bioinspirados eficientes em estrutura e material?

### 1.3.8 Problemática

A problemática desta pesquisa envolve a exploração de estruturas biomiméticas leves e resistentes, bem como materiais biodegradáveis, por meio da utilização de tecnologias de fabricação digital. Isso se relaciona com a possibilidade de inovação em design e sustentabilidade, com foco no design de estruturas, materiais e geração de artefatos biodigitais, em um contexto multidisciplinar que abrange biomimética, biologia, processamento de materiais e impressão 3D. A pesquisa também aborda questões ambientais, como a economia de matéria e energia, e a demanda reprimida por acesso a materiais biodegradáveis em artefatos. Além disso, aborda a falta de adequação desses materiais aos processos naturais de reciclagem e reintegração ao ciclo natural do meio ambiente.

Algumas das perguntas fundamentais levantadas sobre a exploração de estruturas e materiais bioinspirados leves e resistentes incluem:

1. Como projetar estruturas bioinspiradas otimizadas em leveza e resistência para artefatos ambientalmente corretos e tecnicamente eficientes?
2. De que forma estruturas e materiais bioinspirados podem melhor atender aos requisitos de leveza e resistência em artefatos de surf?
3. As estruturas e materiais bioinspirados são passíveis de aplicação em artefatos de surf por meio de processos de fabricação digital e manufatura artesanal?

Essas questões são fundamentais para direcionar a pesquisa e explorar o potencial da biomimética e da fabricação digital na criação de soluções inovadoras, sustentáveis e eficazes no campo dos artefatos de surf.

### 1.3.9 Hipótese

Com uma abordagem teórico-metodológica multidisciplinar bioinspirada é possível sistematizar e integrar as áreas de conhecimento envolvidas na pesquisa. Sendo assim, acredita-se que é possível emular as estratégias de leveza e resistência da estrutura das paredes celulares do escapo floral da *Agave sisalana* em artefatos digitais bio-inspirados, por meio da exploração de materiais de base biológica aliado a processos de design paramétrico e fabricação digital.

### 1.3.10 Mapeamento do contexto e entorno - recortes de pesquisa



**Ambiental:** Inclui a preocupação ambiental levando-se em consideração a integração dos Princípios da Vida, economia de energia e matéria prima, e ciclo de vida de materiais biodegradáveis.

**Tecnológico:** Permite a conversão de estratégias do Agave em design paramétrico e artefatos digitais impressos. Permite tornar a relação materiais e processos de fabricação digital em uma forma ambientalmente adequada.

**Mercadológico:** Engloba a escassez de artefatos de surf (produtos e materiais) bio-inspirados no mercado.

**Estrutural:** Recorte de suma importância para viabilização das etapas da pesquisa, pois se trata do acesso ao tipo de estrutura de suporte necessária, abrangendo: Laboratório de Anatomia Vegetal (LAVeGe - UFPE); Laboratório de microscopia eletrônica - LIKA (Laboratório de Imunopatologia Keizo Asami) que faz parte do Instituto Oswaldo Cruz (Fio Cruz) - UFPE; Laboratório Biodesign - UFPE; FabLab e Startup Selva Generativa (Selvagen) Brasil/ Portugal; Laboratório de Desenvolvimento de Produtos e Serviços - LDPS situado no Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) Portugal; Atelier Biodesign Surfboards - Porto, Portugal.

**Tecnológico:** Contribui para o entendimento dos tipos de tecnologias envolvidas e do modus operandi desses equipamentos. As principais tecnologias exploradas abrangem a área da fabricação digital e tipos de impressão 3D. Outros equipamentos também estão incluídos neste recorte, como: Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV); impressoras 3D (FE, SLS, SLA, CNC), equipamentos para realização de ensaios das propriedades mecânicas de materiais bio-inspirados.

Disciplinar: Este recorte visa os principais campos disciplinares que serão abordados na pesquisa. Envolve Design; Biomimética; Anatomia vegetal; Fabricação digital; Engenharia mecânica.

Profissional: Visitas a empresas e laboratórios, como detalhado no recorte estrutural; Entrevistas com pesquisadores, especialistas e profissionais das áreas envolvidas.

Material: Elemento concreto de abordagem do objeto de pesquisa que materializa a análise ou aplicabilidade. Impressão 3D de artefatos em materiais e estruturas leves resistentes e bioinspirados; Material de base biológica com fibras de Agave e resinas biodegradáveis - material compósito biodegradável.

### **1.3.11 Objetivo geral**

Explorar a aplicação biomimética de estratégias de leveza e resistência da *Agave sisalana* no design de artefatos de surf bioinspirados através de processos de design paramétrico e fabricação digital com manipulação de material bioinspirado.

### **1.3.12 Objetivos específicos**

Fazer levantamento do estado da arte sobre artefatos e materiais bioinspirados para fabricação digital e tipos de processos de impressão 3D;

Realizar diferentes abordagens de estratégias computacionais e emulação paramétrica da leveza e resistência do Agave com aplicação em artefatos bioinspirados;

Explorar as potencialidades das fibras de Agave com experimentos em compósitos com matrizes de base biológica, e realização de ensaios mecânicos para análise comparativa com materiais naturais, como Agave e madeira de Paulownia.

### **1.3.13 Metodologia científica**

Nesta seção, delineamos os métodos e abordagens de pesquisa empregados neste estudo interdisciplinar que aborda a biomimética, a fabricação digital e materiais para a criação de artefatos de surf sustentáveis. Os métodos selecionados refletem a natureza complexa desta pesquisa, que envolve tanto investigação teórica quanto

procedimentos práticos. A Tabela 1 oferece uma visão geral dos tipos de métodos e abordagens que serão discutidos em detalhes a seguir, destacando a abordagem indutiva, a pesquisa aplicada, a análise quantitativa e qualitativa, bem como outros procedimentos específicos. Esses métodos se combinam para fornecer uma compreensão abrangente das estratégias de leveza e resistência do *Agave sisalana* no contexto do design bioinspirado.

Tabela 1 - Métodos de pesquisa científica.

| <b>Tipo/Método/Abordagem/Procedimento de Pesquisa</b> | <b>Autores Citados</b>               |
|---|--------------------------------------|
| Método Indutivo                                       | Lakatos & Marconi (2007)             |
| Pesquisa Aplicada                                     | Prodanov & Freitas (2013)            |
| Pesquisa Básica                                       | Prodanov & Freitas (2013)            |
| Pesquisa Exploratória                                 | Prodanov & Freitas (2013)            |
| Pesquisa Bibliográfica                                | Prodanov & Freitas (2013)            |
| Pesquisa Experimental                                 | Prodanov & Freitas (2013)            |
| Pesquisa Explicativa                                  | Gil (2010)                           |
| Método Comparativo                                    | Lakatos & Marconi (2007), Gil (2008) |
| Pesquisa Qualitativa                                  | Prodanov & Freitas (2013)            |
| Pesquisa Quantitativa                                 | Prodanov & Freitas (2013)            |

Fonte: O autor (2018).

Este projeto de pesquisa consiste em uma tese de doutorado que emprega uma abordagem metodológica de natureza indutiva. A seleção desse método baseia-se na intenção de examinar minuciosamente as características estruturais particulares da planta *Agave*, possibilitando, dessa forma, extrapolações abrangentes que se aplicam a outras estruturas leves.

Quanto à natureza da pesquisa, esta se alinha ao paradigma de pesquisa aplicada. Isso se deve ao fato de que o estudo em questão possui uma dimensão prática, evidenciada pela implementação direta das descobertas nos artefatos fabricados. Como resultado, os impactos da pesquisa se estendem à concepção e refinamento de produtos tangíveis.

A abordagem metodológica adotada demonstra tanto uma vertente quantitativa quanto qualitativa. A abordagem quantitativa encontra respaldo na execução de testes de engenharia embasados em dados empíricos. Paralelamente, a abordagem qualitativa se manifesta nas análises aprofundadas dos padrões Voronoi presentes no

tecido vegetal do Agave, adicionando uma camada de compreensão detalhada à pesquisa sobre a anatomia vegetal do Agave.

Quanto aos objetivos, a pesquisa assume um caráter exploratório, sendo conduzida por meio de pesquisa bibliográfica de caráter teórico. Além disso, emerge uma dimensão descritiva proveniente dos procedimentos experimentais empregados, resultando em uma compreensão minuciosa das interações subjacentes.

Quanto aos fins para alcançar os objetivos, este estudo incorpora uma variedade de métodos, que vão além do levantamento. Isso inclui não apenas entrevistas com especialistas e engenheiros, mas também um acompanhamento e suporte ativo durante os testes mecânicos, bem como nas etapas de manipulação no design paramétrico. Essa abordagem enriquece a investigação, fornecendo insights e perspectivas profissionais ao longo de todo o processo.

Destaca-se, ainda, uma vertente explicativa, ilustrada pelo escopo da investigação biológica da anatomia vegetal do Agave, conduzida com o emprego de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Esta análise busca esclarecer os fenômenos subjacentes aos padrões identificados, contribuindo, assim, para uma compreensão ampla e embasada dos aspectos biológicos envolvidos. Nesse sentido, esta vertente também assume características descritivas, enriquecendo a pesquisa com dados detalhados obtidos a partir do levantamento.

O método indutivo é fundamental na pesquisa científica, partindo de observações específicas para conclusões amplas. Lakatos & Marconi (2007) descrevem a indução como dedução de verdades gerais a partir de dados particulares confirmados. A observação é central, entendendo relações entre fenômenos particulares e generalizando-as para contextos semelhantes (Prodanov & Freitas, 2013). Cervo & Bervian (1978) afirmam que premissas corretas fortalecem conclusões indutivas.

O processo inclui observar fenômenos, descobrir relações e generalizar essas relações (Lakatos e Marconi, 2007). No campo científico, o método visa expandir conhecimento por experimentação e investigação, gerando teorias abrangentes (Prodanov & Freitas, 2013). Lakatos e Marconi (2007) afirmam que o método eleva pesquisa de constatações particulares para leis gerais. Gil (2008) destaca observação de fatos e construção gradual de generalizações como bases do método.

Quanto a natureza, este estudo incorpora tanto a pesquisa básica quanto a pesquisa aplicada para alcançar seus objetivos. Inicialmente, adota-se a abordagem

de Pesquisa Básica com o intuito de gerar conhecimento, seguindo a definição de Prodanov & Freitas (2013) que a descreve como a busca por novos entendimentos relevantes para o avanço científico, ainda que não tenha uma aplicação prática direta. Esta fase da pesquisa se concentra em descobrir verdades e interesses universais.

A pesquisa básica atua como alicerçamento para a pesquisa aplicada. Na esfera da Pesquisa Aplicada, o foco está na produção de artefatos e/ou processos com propósitos práticos imediatos. Nesse estágio, o conhecimento resultante da Pesquisa Básica se integra às tecnologias existentes para gerar soluções concretas. Essa abordagem estabelece uma conexão dinâmica entre a base de conhecimento e a implementação prática, evidenciando a simbiose entre a pesquisa fundamentada e suas aplicações no mundo real.

No que concerne aos seus objetivos, a pesquisa exploratória adota um planejamento flexível que viabiliza a abordagem do tema de diversas perspectivas. Geralmente, engloba:

Exploração da literatura existente;

Entrevistas com indivíduos que possuem vivências práticas relacionadas ao problema de pesquisa;

Análise de exemplos que enriqueçam a compreensão do tema.

Prodanov & Freitas (2013) destacam que os métodos de procedimento representam etapas mais concretas da investigação, abrangendo finalidades mais específicas em comparação com explicações gerais de fenômenos.

Na perspectiva dos procedimentos técnicos, a abordagem engloba os seguintes pontos:

**Pesquisa Bibliográfica:** Esta abordagem envolve a exploração da literatura existente para fundamentar a pesquisa.

**Pesquisa Experimental:** Trabalhos experimentais submetem o fenômeno estudado a condições controladas, abrangendo diversas áreas. Geralmente, são empregados para identificar relações causais entre variáveis.

**Pesquisa Explicativa:** Essa abordagem visa explicar as causas e os porquês dos fenômenos. Por meio da análise, classificação e interpretação dos fenômenos observados, procura identificar os fatores contribuintes. A pesquisa explicativa aprofunda o entendimento da realidade, buscando esclarecer as razões subjacentes aos acontecimentos (Gil, 2008).

A maioria das pesquisas explicativas utiliza o método experimental, permitindo a manipulação e controle de variáveis para identificar relações causais entre elas.

No âmbito dos procedimentos técnicos, os métodos de procedimento representam etapas de investigação que estão intrinsecamente ligadas aos procedimentos técnicos adotados pelo pesquisador em uma área específica de conhecimento. A seleção dos métodos determina os procedimentos a serem empregados tanto na coleta de dados e informações quanto na análise (Prodanov & Freitas, 2013).

A pesquisa experimental, segundo Prodanov & Freitas (2013), é mais comum nas ciências tecnológicas e biológicas, visando revelar os "como" e "porquê" dos fenômenos. Este método envolve submeter objetos de estudo a variáveis específicas em condições controladas pelo pesquisador para observar os efeitos produzidos (Gil, 2008). O objetivo é recriar as condições do fenômeno para observação sob controle, utilizando equipamentos precisos e métodos rigorosos para compreender suas causas e efeitos.

De acordo com Prodanov & Freitas (2013), a pesquisa experimental é mais comum nas ciências tecnológicas e biológicas, visando demonstrar o "como" e "porquê" de certos fenômenos. O método experimental consiste em submeter objetos de estudo a influências de variáveis específicas, em condições controladas pelo investigador, para observar os efeitos produzidos pelas variáveis no objeto (Gil, 2008).

O delineamento da pesquisa abrange o planejamento amplo, considerando diagramação, análise e interpretação dos dados coletados. Este envolve a escolha das fontes de dados, seja por meio de fontes de papel (pesquisa bibliográfica e documental) ou por meio de interação com pessoas (pesquisa experimental, levantamento, estudo de caso). Na pesquisa experimental, o pesquisador define um objeto de estudo, seleciona variáveis influentes, estabelece controle e observa os efeitos causados pela variável. Dessa forma, a pesquisa experimental recria as condições do fenômeno para observação sob controle, utilizando equipamentos e instrumentos de precisão para entender as causas e os efeitos do fenômeno estudado (Prodanov & Freitas, 2013).

O método comparativo tem por objetivo explicar fenômenos, permitindo a análise de dados concretos e a dedução de "elementos constantes, abstratos e gerais" (Lakatos; Marconi, 2007, p. 107). Gil (2008) complementa que este método investiga

indivíduos, classes, fenômenos ou fatos, visando a ressaltar suas diferenças e similaridades.

Centrado na análise de semelhanças e diferenças, o método comparativo realiza comparações para verificar similitudes e explicar divergências. Ao se aprofundar na explicação dos fenômenos, possibilita a análise de dados concretos e a dedução de elementos constantes, abstratos ou gerais. Embora algumas vezes seja considerado menos abrangente, há situações em que seus procedimentos são rigorosamente controlados, resultando em generalizações significativas (Prodanov & Freitas, 2013).

Do ponto de vista da abordagem do problema, há duas vertentes: a qualitativa e a quantitativa.

A pesquisa quantitativa considera que todas as informações podem ser quantificadas, o que implica traduzir opiniões e dados em números para classificação e análise. Isso demanda o uso de recursos e técnicas estatísticas, como média, mediana, desvio-padrão, coeficiente de correlação, entre outros. No desenvolvimento da pesquisa quantitativa, é essencial formular hipóteses e estabelecer relações entre as variáveis para garantir a precisão dos resultados, minimizando contradições no processo de análise e interpretação. Essa abordagem busca identificar relações de causa e efeito entre fenômenos, assim como descrever a complexidade de hipóteses ou problemas, analisar interações entre variáveis e compreender processos dinâmicos, com interpretação focada em particularidades.

A pesquisa qualitativa, por outro lado, é essencialmente descritiva. Nesse método, os pesquisadores analisam os dados de maneira indutiva, buscando padrões e significados subjacentes. Algumas vezes, autores não fazem uma distinção rigorosa entre as abordagens quantitativa e qualitativa, considerando que a pesquisa quantitativa também possui elementos qualitativos. As duas abordagens estão interligadas e se complementam, contribuindo para uma compreensão abrangente do problema em questão (Prodanov & Freitas, 2013).

A presente pesquisa almeja fornecer um arcabouço científico sólido e abrangente, culminando na geração de conhecimento significativo no campo do design, especialmente no que diz respeito às estruturas leves e à aplicação das descobertas na produção de artefatos práticos.

### 1.3.14 Materiais e métodos

Materiais e métodos descreve detalhadamente a metodologia geral empregada na pesquisa realizada. Este tópico apresenta a visão geral sobre como está arquitetada a metodologia de pesquisa. Apresenta uma estrutura organizada em três partes principais, inicia com a contextualização, seguido por estado da arte, e o desenvolvimento (incluindo a abordagem metodológica do Biomimicry Thinking, Biologia para Design).

Na seção de contextualização, apresentamos de maneira sucinta e expositiva o delineamento da pesquisa. Começamos com uma introdução que situa o contexto geral e o escopo da pesquisa. Além disso, fornecemos informações sobre os elementos pré-textuais, que compreendem o tema, objeto de pesquisa, campo de atuação, pergunta do problema, problemática, hipótese, objetivos geral e específicos, justificativas e relevância da pesquisa, bem como uma descrição da metodologia e sua relação com os objetivos.

O processo de pesquisa é dividido em várias etapas distintas. Inicialmente, realizamos uma investigação detalhada na literatura sobre os temas abordados. Em seguida, passamos para a investigação microscópica do Agave, onde analisamos as estratégias de leveza e resistência das paredes celulares do escapo floral desta planta. Outra fase essencial do projeto envolve a emulação das estratégias do Agave. Isso é realizado por meio de processos de modelagem paramétrica aplicados a estruturas e artefatos. Além disso, trabalhamos no desenvolvimento de materiais compósitos bioinspirados. Estes materiais são biodegradáveis e produzidos a partir das fibras de Agave e resinas de base biológica. A pesquisa também inclui a realização de ensaios das propriedades mecânicas dos materiais desenvolvidos. Estes ensaios são comparados com amostras de Agave e madeira de Paulownia para avaliar seu desempenho.

Principais etapas metodológicas:

- Verificação do estado da arte e elaboração de referencial teórico;
- Pesquisa multidisciplinar, permeando o campo da biomimética, biologia, design de materiais, processos de fabricação digital e engenharia mecânica;
- Pesquisa exploratória, entrevista com especialistas das áreas;
- Pesquisa de campo para coleta de dados e amostras de Agave, as quais foram utilizadas na pesquisa tanto para processamento de imagens em MEV, como também

para utilização nas etapas de manipulação de materiais compósitos e ensaios mecânicos;

- Etapas projetuais, manipulação de artefatos e protótipos bio-inspirados, design paramétrico e fabricação digital;
- Manipulação de materiais e protótipos. Ensaio das propriedades mecânicas das amostras desenvolvidas na FEUP-Portugal (intercâmbio de mobilidade internacional).

#### 1.3.14.1 Estado da arte

Para fundamentar nossa pesquisa, realizamos uma extensa revisão bibliográfica do estado da arte dos temas relacionados. Esta revisão se baseou em fontes de alta relevância, incluindo livros, teses, dissertações, periódicos, artigos de conferências e sites especializados.

Iniciamos nossa pesquisa com artigos recentes sobre biomimética e revisões sistemáticas como ponto de partida para entender o panorama atual da biomimética e fabricação digital. Esses artigos foram selecionados com base em critérios específicos, como ano de publicação, revista, conferência e palavras-chave relacionadas à biomimética.

Nossas estratégias de busca incluíram critérios de inclusão e exclusão, além do uso de palavras-chave relevantes. Consultamos bancos de dados de artigos revisados por especialistas, que são fontes confiáveis de trabalhos científicos e tecnológicos. Além disso, examinamos as bibliografias dos artigos selecionados e incluímos referências adicionais que contribuíram para o nosso conhecimento.

Durante essa busca, procuramos identificar exemplos de design biomimético, com foco especial em estratégias relacionadas a forma, função, materiais e tecnologias inspiradas na natureza. Alguns autores, como Imani *et al.* (2017), mencionaram fontes sólidas, incluindo Science Direct, Scopus, Elsevier, Springer e a revista *Ciência e Tecnologia de Materiais Avançados*, que foram essenciais para nossa pesquisa.

A revisão procurou encontrar precedentes na literatura através de um meio sistemático de pesquisar a natureza para inovações em design de estruturas leves e resistentes e materiais bioinspirados que abordassem um resultado de design sustentável. Para isso, uma analogia na biomimética foi explorada, a maneira como

os organismos naturais são capazes de adaptar suas estruturas com leveza e resistência com economia de matéria-prima e energia, relacionadas com as propriedades mecânicas dos seus materiais constituintes. O argumento é que esse processo de analogia pode ocorrer por meio de investigação biológica com auxílio de técnicas avançadas de microscopia (MEV), com o auxílio de métodos de transferências de funções, da tecnologia computacional e design paramétrico, unido à técnicas de fabricação digital e design de materiais bioinspirados.

Outro foco importante da revisão da literatura foi a busca por documentos que descrevessem abordagens biomiméticas para a descoberta de soluções inspiradas na natureza. Nosso objetivo foi identificar artigos que apresentassem sistemas ou procedimentos para encontrar soluções biomiméticas para desafios de design, bem como aqueles que relatassem exemplos existentes de design biomimético. Muitos estudos indicam que o design bioinspirado pode levar a inovações significativas no contexto da fabricação digital e design de materiais. No entanto, durante a revisão da literatura, não encontramos publicações que delineassem um procedimento sistematizado para incorporar estratégias de leveza e resistência, economizando matéria-prima e energia, no âmbito da fabricação digital e design de materiais. Além disso, não encontramos estudos que utilizassem o vegetal Agave como modelo de referência para analogias biomiméticas, especialmente em relação às suas propriedades mecânicas. Por outro lado, identificamos artigos na área da biologia e anatomia vegetal que detalhavam as propriedades químicas, físicas e mecânicas do Agave, fornecendo uma base sólida para nossa pesquisa.

Também conduzimos uma revisão qualitativa do estado da arte no campo das pranchas de surf sustentáveis, incluindo aquelas feitas de Agave e outros materiais alternativos. A exploração do uso do Agave em pranchas de surf foi o ponto de partida que nos levou a questionar por que esse sistema natural é leve e resistente. Esse questionamento, por sua vez, nos motivou a iniciar um estudo detalhado da anatomia vegetal, com o objetivo de aplicar as descobertas dessa pesquisa no desenvolvimento de novos processos e materiais de fabricação de pranchas de surf, adotando uma abordagem bioinspirada e tecnológica.

#### 1.3.14.2 Desenvolvimento - Abordagem metodológica Biologia para Design

As fases desta pesquisa são representadas de maneira abrangente nos diagramas que compõem o Biomimicry DesignLens (uma abordagem metodológica em biomimética desenvolvida pelo Biomimicry Institute 3.8 - Figura 10). O detalhamento dessas fases é incorporado nas etapas e fases do diagrama 'Biologia para Design', que é uma metodologia flexível para processos criativos com aplicação de modelos da natureza na criação de soluções bioinspiradas inovadoras. Durante o desenvolvimento desta tese, o diálogo ocorre de forma contínua em todas as etapas. A escolha da modalidade 'Biologia para Design' se deve à sua afinidade com uma abordagem bottom-up de projeto, o que facilita a abordagem dos objetivos diante da problemática apresentada.

O Biomimicry Thinking envolve quatro áreas de desenvolvimento do processo: definição de escopo, descoberta, criação e avaliação. Esta pesquisa segue os passos do método 'Biologia para Design', integrando com sucesso seus requisitos e estratégias aos Princípios da Vida na área de projetos bioinspirados.

O diagrama é composto por quatro áreas principais:

- . Escopo: Envolve a definição do contexto do problema, a identificação das funções necessárias ao projeto e a integração dos Princípios da Vida. Isso inclui um exercício de briefing para identificar o problema e seu contexto antes de iniciar o design da solução.
- . Descoberta: Consiste em encontrar um modelo natural e abstrair as estratégias biológicas. Isso representa a fase de pesquisa exploratória em busca de inspiração para o design.
- . Criação: Inclui o brainstorming de ideias bioinspiradas e a emulação dos princípios de design. É uma etapa dedicada à busca de soluções de design criativas para um desafio específico.
- . Avaliação: Nesta fase, o projeto é avaliado usando os Princípios da Vida como medida. Geralmente, esse processo ocorre de forma iterativa, permitindo medir a natureza, qualidade, capacidade, extensão ou importância de uma solução específica.

Quadro 1 - Etapas do Biomimicry Thinking.

|           | Etapas do Biomimicry Thinking   | O que a biologia incorpora  | Benefícios  |
|-----------|---|---|---|
| Esopo     | <ul style="list-style-type: none"> <li>. Definindo o contexto.</li> <li>. Identificando o verdadeiro desafio como uma função.</li> <li>. Estabelecendo metas aspiracionais usando os Princípios da Vida.</li> </ul> | <p>Lição universal da vida: Uma estratégia biológica bem adaptada deve atender às necessidades funcionais do organismo no contexto em que vive, a fim de contribuir para sua sobrevivência.</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>. Muda mentalidades. Ajuda a identificar o verdadeiro desafio. Amplia o espaço potencial da solução. Aprofunda a compreensão do contexto.</li> <li>. Articula uma visão de maneira sustentável.</li> </ul> |
| Descobrir | <ul style="list-style-type: none"> <li>. Biologizando a função identificada</li> <li>. Descobrir modelos naturais</li> <li>. Abstrair estratégias biológicas em princípios de design</li> </ul>                     | <p>Estratégias e mecanismos de organismos, processos e sistemas representados por adaptações de sucesso ou como padrões profundos que ocorrem em muitos exemplos.</p>                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>. Descubra uma infinidade de modelos novos, inovadores e amigáveis à vida.</li> <li>. Encontre ideias pré testadas e comprovadas.</li> </ul>   |
| Criando   | <ul style="list-style-type: none"> <li>. Brainstorming de ideias inspiradas bio.</li> <li>. Emulação de princípios de design abstraídos de estratégias biológicas.</li> </ul>                                       | <p>Resumo dos princípios de design da fase de descoberta, bem como dos Princípios da Vida.</p>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>. Seja inspirado por ideias bonitas e elegantes.</li> <li>. Resolver desafios irritantes.</li> <li>. Crie soluções verdadeiramente inovadoras.</li> </ul>  |
| Avaliando | <ul style="list-style-type: none"> <li>. Medir e avaliar contra os Princípios da Vida</li> </ul>  | <p>Princípios da Vida.</p> <p>* Deve-se pensar na questão adicional "o que a natureza não faria (aqui)?"</p>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>. Identifica limites e oportunidades perdidas. Pré-testes para o sucesso.</li> <li>. Trabalha com uma definição mais holística de sucesso.</li> </ul>  |

Fonte: Adaptado de Baumesiter (2014).

Nesta tese, os diagramas Biomimicry Design Lens desempenham um papel fundamental no processo de pesquisa e projeto. Eles desempenham duas funções principais:

- . Organização de Inputs: Os diagramas auxiliam na obtenção e organização dos dados gerados a partir da investigação das propriedades mecânicas das fibras de Agave. Isso fornece uma estrutura sólida para a pesquisa.

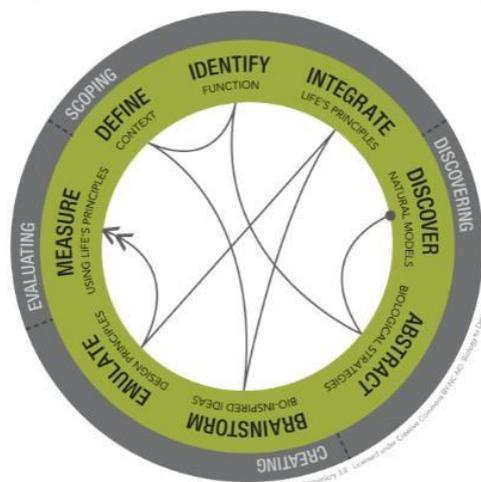
. Analogia e Abstração: Além disso, esses diagramas facilitam a analogia e abstração das estratégias biológicas para o design de estruturas e materiais bioinspirados. Eles permitem a emulação das estratégias de leveza e resistência das fibras de Agave, integrando tecnologias sustentáveis como impressoras 3D e CNCs. Os resultados gerados têm o potencial de inovação significativa na área de design de estruturas e materiais bioinspirados.

Além disso, esta pesquisa buscou uma compreensão mais profunda das fibras, examinando o sistema natural da planta Agave em sua totalidade. Isso incluiu a exploração de possibilidades e métodos para aplicar estratégias biológicas em estruturas leves e resistentes inspiradas na natureza. Também investigou a utilização das fibras em matrizes de resinas de base biológica, com o objetivo de desenvolver materiais biodegradáveis que possam ser reintegrados ao ciclo natural com impacto ambiental reduzido.

Desde o início da pesquisa, já tínhamos identificado o modelo natural específico a ser estudado, neste caso, o Agave. Essa escolha se baseou no conhecimento prévio do uso do Agave na fabricação de pranchas de surf sustentáveis, o que nos motivou a buscar uma compreensão mais profunda sobre por que esse sistema natural é leve e resistente, características essenciais para sua aplicação na produção sustentável de pranchas de surf. A decisão de adotar a modalidade 'Biologia para Design' foi influenciada pelo fato de já possuímos o modelo natural para estudo desde o início. Essa abordagem começa com a descoberta de um modelo natural e busca aplicá-lo de forma específica em projetos.

Com base na citação de Baumeister (2014), a abordagem de biomimética adotada neste projeto, conhecida como "Biologia para Design" (conforme mostrado na Figura 6), tem início com a descoberta de modelos naturais e segue por várias etapas, incluindo a abstração de princípios de design, geração de ideias potenciais por meio de brainstorming, emulação de estratégias da natureza e, por fim, a avaliação do design em relação aos Princípios da Vida. Estas foram as etapas que percorremos durante esta investigação. No entanto, é importante destacar que essa abordagem é flexível e pode se adaptar às especificidades e necessidades da pesquisa. Além disso, algumas etapas específicas relacionadas ao contexto da pesquisa realizada estão detalhadas no Quadro 2.

Figura 6 - Diagrama Biomimicry Thinking - Biologia para Design.



Fonte: Biomimicry Institute 3.8 (2015).

Quadro 2 - Etapas metodológicas realizadas dentro do contexto do diagrama.

|         |   |
|---------|---|
| Etapa 1 | Contextualização - Pranchas de surf sustentáveis, materiais e tipos de construção;      |
| Etapa 2 | Microscopia do Agave (anatomia vegetal) - Abstrair ideias biológicas;                   |
| Etapa 3 | Estratégias de leveza e resistência - Identificando função;                             |
| Etapa 4 | Design paramétrico - Emulação genérica da estratégia em estruturas leves e resistentes; |
| Etapa 5 | Aplicação da estratégia do Agave em artefatos de surf - Criando ideias bioinspiradas;   |
| Etapa 6 | Design de materiais bioinspirados - Integrar Princípios da Vida aspiracionais;          |
| Etapa 7 | Ensaio mecânicos de flexão, tração e tensão de cisalhamento de cola;                    |
| Etapa 8 | Experimentações e aplicação dos materiais bioinspirados em artefatos.                   |

Fonte: O autor (2018).

### 1.3.14.3 Ensaio mecânicos

Nesta fase, procedemos com os ensaios de flexão e tração para avaliar as propriedades mecânicas do material em desenvolvimento. Na seção de discussão, aprofundamos a análise dos resultados, considerando a influência do tamanho e proporção das fibras nos aspectos mecânicos. Essa discussão abrange uma avaliação individual de cada material, bem como comparações entre eles.

Para a realização desses ensaios, utilizamos o equipamento de testes universais de coluna única MultiTest 2.5 - dV Mecmesin, localizado no Laboratório de Desenvolvimento de Produtos e Serviços (LDPS) da FEUP. Este equipamento possui uma célula de carga de 2.5 kN e foi operado com o software VectorPro™, responsável pela coleta de dados essenciais, como carga, deslocamento e tempo.

Figura 7 - Equipamento de testes MultiTest 2.5 - dV Mecmesin no LDPS (FEUP) para ensaios de flexão e tração. Detalhe das adaptações nos corpos de prova para se acomodar nas pinças.



Fonte: O autor (2022).

Para os ensaios de flexão e tração, as dimensões dos provetes foram medidas com um paquímetro digital. Foram realizadas pelo menos três medições de cada lado para obter uma média. As medidas foram inseridas em uma planilha Excel, que executou os cálculos e gerou os dados e gráficos dos ensaios. Os gráficos de análise de dados foram criados utilizando o software OriginPro, que permitiu a medição da inclinação por meio de análise de regressão linear para maior precisão. No ensaio de flexão, a inclinação da curva na zona elástica foi calculada para determinar o módulo de flexão.

Nos testes de flexão, procuramos determinar as propriedades de flexão dos compósitos reforçados usando um sistema de carga de três eixos. A amostra é apoiada por dois suportes e é carregada por um nariz de carga posicionado no ponto médio entre os suportes. Esse procedimento foi empregado para medir propriedades de flexão, incluindo o módulo de flexão e o Módulo de Young. As amostras foram submetidas à carga até a ruptura, permitindo o cálculo da deformação máxima e obtendo informações sobre a capacidade de deformação e rigidez das amostras.

No ensaio de tração, optamos por um tratamento de dados mais simplificado. Medimos a largura e espessura do provete na região útil do ensaio, obtendo três medidas em cada direção para calcular a média. Sob as condições estabelecidas, esse método investiga o comportamento das amostras de teste, com foco na determinação da resistência à tração, especificamente a tensão máxima.

Os provetes foram fabricados de acordo com as normas de ensaios mecânicos para verificação das propriedades de tração (ASTM D638) para materiais plásticos e

flexão (ISO D790) para materiais compósitos plásticos reforçados com fibras. Conforme as diretrizes das normas, foram produzidos pelo menos cinco provetes para cada composição, totalizando 90 provetes (45 para flexão e 45 para tração), dado que nove amostras diferentes foram definidas. Adicionalmente, foram criadas cinco amostras adicionais para o teste de cisalhamento, com três provetes para cada composição, utilizada como adesivo. Em resumo, um total de 105 provetes foram ensaiados.

### *Ensaio de flexão*



A norma ASTM D790-17 define métodos de teste padrão para avaliar as propriedades de flexão de plásticos, abrangendo tanto materiais reforçados quanto não reforçados. Estes métodos utilizam um sistema de carga de três pontos para aplicar a força necessária. As amostras, que possuem uma seção transversal retangular, são moldadas manualmente em moldes de silicone, com o objetivo de assegurar a uniformidade, mesmo considerando o processo manual.

No ensaio, a amostra é posicionada sobre dois suportes e submetida a uma carga aplicada por um nariz de carga localizado no ponto médio entre os suportes. Esse procedimento é especialmente indicado para materiais que deformam-se com deflexões relativamente pequenas, tornando-o ideal para medir o módulo de flexão. A taxa de deformação utilizada é de 0,01 mm/mm/min, seguindo os padrões estabelecidos para este método de teste.

No caso de materiais de moldagem, como termoplásticos e termofixos, as dimensões recomendadas para as amostras são de 12,7 mm de largura, 3,2 mm de espessura e 127 mm de comprimento. Os resultados obtidos a partir do ensaio de flexão incluem principalmente o módulo de flexão. Esse valor é calculado com base na deformação da amostra durante o teste e na força aplicada. A taxa de deformação utilizada no procedimento é de 0,01 mm/mm/min. Assim, o ensaio de flexão proporciona informações importantes sobre a capacidade do material de resistir à flexão sob carga.

### *Ensaio de tração*



O ensaio de tração é um método amplamente utilizado para avaliar as propriedades de resistência à tração de materiais, particularmente plásticos e compósitos de plástico. Duas normas bem reconhecidas para conduzir esse teste são a ASTM D638 e o ISO 527-1, consideradas equivalentes em termos técnicos. O ensaio consiste em esticar uma amostra do material ao longo de seu eixo principal em uma velocidade constante até que ela se rompa. Durante esse processo, uma máquina de teste registra a carga aplicada à amostra. A preparação da amostra deve seguir as especificações da norma apropriada ao material.

Normalmente, as amostras de tração têm formato de haltere. No entanto, para acomodar as garras da máquina de teste, foi necessário remover as abas laterais da amostra, mantendo as dimensões especificadas pela norma na região de teste. Isso resulta em dimensões típicas de amostra de 13 mm de largura, 4 mm de espessura e 165 mm de comprimento. A amostra é fixada nas garras da máquina de teste, garantindo alinhamento correto. Durante o teste, a máquina aplica gradualmente uma carga à amostra, registrando continuamente a força suportada pela amostra. Os resultados incluem a tensão máxima suportada antes da ruptura. Essa tensão máxima é calculada dividindo a força pela área da seção transversal da amostra. A área é obtida medindo espessura e largura em vários pontos. Geralmente, a tensão máxima corresponde à tensão de ruptura, indicada por uma queda abrupta na curva de tensão versus deformação.

### *Ensaio de cisalhamento*



Foram realizados ensaios nos materiais desenvolvidos, incluindo compósitos bioinspirados aplicados como adesivos para a colagem de madeira de Paulownia. Cinco amostras foram submetidas a testes, e em cada uma delas, foram ensaiados três provetes, totalizando 15 provetes ensaiados. As amostras testadas incluíram: Respan, Respan 106 20%, Respan 600 20%, Resina 3002 106 20%, e Cola PU (cola

poliuretana expansiva D4 para madeira, marca Ceys). A inclusão da cola PU nos ensaios teve como propósito estabelecer um parâmetro de comparação com os materiais desenvolvidos. No entanto, é importante observar que, ao contrário das resinas de mamona utilizadas, a cola PU apresenta diversos avisos de segurança relacionados à inalação dos gases tóxicos. Essa distinção destaca a característica atóxica das resinas de mamona utilizadas nesta pesquisa.

A cola utilizada é uma cola de poliuretano monocomponente ultra forte especialmente adequada para colar todos os tipos de madeiras, duras e macias, entre si e em combinação com outros materiais. Caracteriza-se pela excelente resistência à água: classificação D4 segundo a norma europeia EN-204, pelo que é especialmente adequada para aplicações náuticas e exteriores. É um adesivo espumante, com capacidade de enchimento que expande uma vez aplicado. Adequado para madeiras porosas e superfícies irregulares. Transparente (Informações fornecidas pelo fabricante Ceys). Ou seja, esta cola apresenta as características básicas que estão presentes nas espumas poliuretanas de mamona, por este motivo foi incluída neste ensaio para comparar com o desempenho dos materiais bioinspirados no quesito de resistência como colagem. Este ensaio serve para mensurar a força de ligação dos adesivos quando forçados a deslizar entre dois provetes de junta coladas de sobreposição simples, um sobre a outra nas extremidades. Foram ainda adicionadas calços nas extremidades na zona da pega da garra para que o teste ocorra de forma alinhada sem deslocar o sentido da força de tensão.

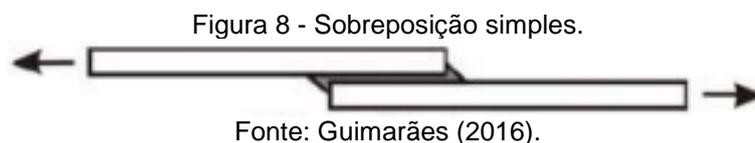


Figura 9 - Foram feitos três provetes de junta colada de sobreposição simples, submetida à tensão de cisalhamento das amostras definidas para realização dos ensaios de cisalhamento de adesivos com materiais bioinspirados e com cola PU.



Fonte: O autor (2022).

Desse modo, o ensaio é realizado com dois provetes sobrepostos unidos pelo adesivo, que são tracionados acarretando uma tensão de cisalhamento na junta. A ruptura da união vai ocorrer quando a força aplicada para tracionar os provetes aumenta linearmente durante o ensaio até atingir o limite da resistência do adesivo, ou neste caso, do rompimento da madeira na região da junta. Os dados de carga e de deslocamento foram medidos para construção de um gráfico com as curvas do desempenho das amostras.

Durante o ensaio os provetes foram então posicionados nas garras de modo que a força de tração fosse aplicada perpendicularmente à união ao longo de todo o ensaio, ou seja, evitando variação na posição da junta sobreposta, assim como, evitar que ocorra escorregamento da fixação do provete das pinças das garras.

Figura 10 - Ensaio realizado na máquina de testes universais eletromecânicos Instron da séries 3367 no Departamento de Engenharia Mecânica - FEUP.



Fonte: O autor (2022).

## 2 ESTADO DA ARTE | REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 BIOMIMÉTICA

Artigos sobre o estado da arte da biomimética e sobre revisões sistemáticas serviram de base para um levantamento bibliográfico inicial sobre o estado da arte atual da biomimética, buscando investigar um panorama geral sobre conceitos, definições, visão diacrônica, processos e métodos, e aplicações no campo da biomimética. Procurou-se ainda, identificar documentos relatando exemplos existentes de design biomimético com atenção especial à estratégias de forma, função e materiais.

Lepora *et al.* (2013), em seu artigo intitulado 'O estado da arte em biomimética', argumentam que o processo biomimético ocorre por meio de analogias comumente utilizadas, envolvendo a transferência de funções de sistemas biológicos para a tecnologia de artefatos. Eles buscam inspiração na forma como organismos naturais atuam em seus ambientes locais e como se adaptam a condições específicas.

No estudo, Lepora *et al.* (2013) compilaram um extenso banco de dados de publicações e utilizaram técnicas de análise de informações baseadas em redes para avaliar o impacto desse campo na engenharia e em áreas relacionadas, abrangendo temas de pesquisa que incluem robótica, ciência da computação e bioengenharia. Seus critérios de seleção incluíram o ano de publicação, a revista ou conferência e as áreas de assunto identificadas por meio de termos populares e comuns nos títulos. Os resultados revelaram que a pesquisa em biomimética cresceu rapidamente, passando de menos de 100 artigos por ano na década de 1990 para vários milhares por ano na primeira década deste século, e essa tendência de crescimento continua.

As cinco principais revistas em ordem de número de publicação são: Biomateriais (Elsevier) com um total de 484 artigos, seguidos de Bioinspiração e Biomimética (IOP) com 343 artigos, Acta Biomaterialia (Elsevier) com 159 artigos. O conteúdo desses periódicos está dividido entre biomimética geral e ciência dos materiais em medicina. Atualmente Bioinspiration e Biomimetics está publicando o número máximo de artigos sobre biomimética por ano, seguido de Biomateriais... As conferências são patrocinadas pelo IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), o que indica a ênfase dessas



Conforme Lepora *et al.* (2013), em conjunto esses resultados indicam que a biomimética está se tornando um paradigma dominante para o desenvolvimento de artefatos tecnológicos e mais sustentáveis, através de processos de design bioinspirados, da robótica, da ciência de materiais, fabricação digital e outras disciplinas tecnológicas, com um potencial de impacto científico, social, econômico e ambiental significativo ao longo do século XXI.

No artigo intitulado 'Biomimética como inovação - Uma revisão sistemática', Imani *et al.* (2017), apresentam uma revisão de literatura que adotou uma abordagem sistemática para pesquisar precedentes na natureza com o objetivo de descobrir inovações em artefatos que promovam resultados de design sustentável. Esta pesquisa buscou identificar documentos que descrevessem novas abordagens biomiméticas inspiradas na natureza, capazes de solucionar desafios de design com foco na sustentabilidade. Os autores desenvolveram uma estratégia de busca que incluiu critérios de inclusão e exclusão, palavras-chave relevantes e fontes de evidências. A pesquisa na literatura foi realizada em bancos de dados de artigos revisados por especialistas, que oferecem uma fonte abrangente de trabalhos científicos e tecnológicos. Entre as plataformas exploradas, as bases de dados 'Ciência e Tecnologia de Materiais Avançados', 'Science Direct' e 'Scopus' foram destacadas pelos autores como sendo de grande relevância na área.

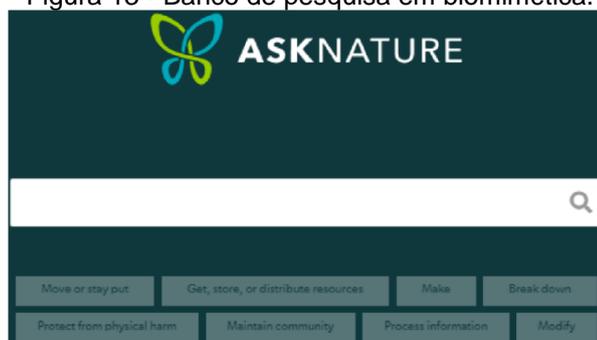
Na revisão sistemática de literatura desenvolvida por Imani, *et al.* (2017), os termos 'bionics', 'biomimicry' e 'biomimetics' foram usadas de forma intercambiável em suas pesquisas. Os resultados apresentam as visões de diversos autores na área, incluindo a de designers pioneiros, a exemplo de Papanek (1974), que acredita que o biônico está mais relacionado à "cibernética". Benyus (1997) também definiu um conjunto de dimensões para biomimética: natureza como modelo, medida e mentora. Alguns pesquisadores acreditam que essas dimensões formam a base para classificar as diferentes abordagens da biomimética (Mcgregor, 2013; Reed, 2003). Para Wahl, (2006), o projeto biônico considera assumir o controle da natureza; e busca resolver problemas de engenharia usando dados relacionados às funções biológicas (Reap *et al.* 2005), enquanto a biomimética é primariamente focada na sustentabilidade (Wahl, 2006), e imita a eficiência da natureza (Reap *et al.* 2005). Verificou-se ainda, que para Reap *et al.* (2005), a biomimética está envolvida com mecanismos artificiais para produzir materiais semelhantes aos existentes na natureza.

Além disso, de acordo com Imani *et al.* (2017) e as sugestões de Pawlyn (2016), os organismos biológicos podem ser considerados como incorporando tecnologias que oferecem soluções sustentáveis. Essas perspectivas estão alinhadas com a visão de Rao (2014), que descreve a biomimética como a utilização de padrões ecológicos para avaliar a sustentabilidade de inovações. Essas visões convergem com a abordagem da Biomimicry Design Lens, juntamente com seus componentes de avaliação dos Princípios da Vida como um ideal de sustentabilidade no processo biomimético. Essa abordagem foi desenvolvida pelo Biomimicry Institute 3.8 e apresentada no livro 'Handbook Biomimicry Resource' (Baumeister, 2014).

No estudo de Imani *et al.* (2017), muitas representações destacam como novas ideias ou conceitos podem ser extraídos da natureza, sugerindo que o design bioinspirado pode contribuir para a eficiência energética de produtos e artefatos. No entanto, o autor observa que os conceitos de design biomimético frequentemente parecem estar focados em exemplos específicos, mais relacionados ao uso metafórico de casos isolados de design inspirado na natureza do que a uma abordagem geral para a exploração de sistemas biológicos em busca de inspiração para o design.

Recentemente, surgiram iniciativas para criar bancos de dados que apoiam o design inspirado na biologia. O Instituto de Biomimética (<http://www.biomimicry.net/>), por exemplo, oferece a biblioteca online AskNature ([www.asknature.org/](http://www.asknature.org/)), que abriga um banco de pesquisa e desenvolvimento de estudos sobre design biomimético organizados por função.

Figura 13 - Banco de pesquisa em biomimética.



Fonte: Asknature.org (2019).

Neste tópico, realizamos uma análise sobre o estado da arte da biomimética, destacando sua expansão ao longo dos anos e a interconexão entre inovação

tecnológica e critérios de sustentabilidade dentro desse campo. A seguir, abordaremos o contexto histórico da biomimética e suas raízes na natureza como fonte de inspiração para o design e a engenharia.

### **2.1.1 Background histórico**

A partir da década de 1950, surgiram na literatura científica termos relacionados às atividades investigativas e de design que se inspiravam no ambiente natural. Dois desses termos que ganharam destaque são a biônica e a biomimética, ambos compartilhando o princípio fundamental da inspiração na natureza. Mencionado por Queiroz *et al.* (2015), essas duas nomenclaturas refletem essa abordagem. A busca por soluções na natureza remonta a séculos atrás, com várias culturas incorporando conhecimento da natureza para resolver problemas. No século XX, essa abordagem ganhou reconhecimento científico, com muitos pesquisadores vendo a natureza como uma fonte valiosa de soluções para uma ampla variedade de artefatos humanos. A bioinspiração se tornou uma ferramenta valiosa para melhorar o desempenho de uma variedade de projetos humanos. De acordo com a ISO 18458-2015, o desenvolvimento da biomimética passou por várias fases históricas. A partir dos anos 1950, surgiu a prática da biomimética baseada em modelos da natureza, particularmente no projeto e construção de aeronaves, veículos e embarcações, com a aplicação de regras de modelagem derivadas da teoria da similaridade, permitindo a transferência de princípios de sistemas biológicos para projetos técnicos.

Historicamente, o termo "biomimética" foi introduzido por Otto Schmitt na década de 1950, quando ele diferenciou uma abordagem da engenharia/física das ciências biológicas, chamada de "biofísica," de uma abordagem biológica à engenharia, que ele denominou "biomimética." Lepora *et al.* (2013) destacam que em 1958, a inspiração na natureza ganhou reconhecimento com o termo "biônica," popularizado por Jack Steel da Força Aérea dos EUA, significando a prática de copiar e tirar ideias da natureza, conforme mencionado no livro de Daniel Halacy, "Bionics: The Science of Living Machines" (1965).

Por volta de 1960, os termos "biologia" e "tecnologia" se tornaram os dois pilares da biomimética e foram combinados linguisticamente pela primeira vez devido à influência da cibernética. Isso resultou no termo "biônica," que estabeleceu uma

base comum para o campo da biomimética, centrando-se na transferência de conhecimento (ISO 18458-2015).

Soares e Arruda (2017) mencionam que em 1969, o engenheiro Otto Schmitt definiu o termo "Biomimética" no contexto de biomateriais, que foi oficialmente incluído no dicionário de Webster em 1974. A definição enfatiza o estudo da formação, estrutura e função de substâncias e materiais produzidos biologicamente, bem como processos biológicos, para a síntese de produtos semelhantes por mecanismos artificiais que imitam os naturais.

Além disso, Lepora *et al.* (2013) observam que Schmitt também desempenhou um papel fundamental na criação do campo da engenharia biomédica, que inclui a importante área de estudo dos biomateriais, mantendo fortes conexões com a biomimética. O termo "bioinspirado" ou "biologicamente inspirado" também são comumente usados, especialmente na área de computação biologicamente inspirada.

Segundo Whal (2006), nas décadas de 1960 e 1970, visionários como McHarg e os fundadores do New Alchemy Institute, John Todd, Nancy Jack Todd e McLarney, lideraram uma abordagem inovadora ao design ecológico. Seu objetivo era integrar-se ao processo natural e aplicar as lições de design da natureza na criação de infraestruturas, produtos e processos mais sustentáveis para a humanidade. Entre esses pioneiros, destaca-se a visão de John Todd para o design no século XXI:

As ecologias da Terra estão incorporadas a um conjunto de instruções que precisamos urgentemente decodificar e empregar no projeto de sistemas humanos (p. 1). Com mais de quatro décadas de pesquisa no entrelaçamento da biologia, ecologia e design, Todd enfatiza: É possível projetar com a Natureza... através do design ecológico, é possível ter uma alta civilização usando apenas um décimo dos recursos do mundo que a sociedade industrial usa hoje (p. 3) (Whal, 2006, *apud* Todd, J., 2000).

De acordo com Whal (2006), paralelamente ao surgimento do design ecológico e sua estratégia de biomimética, emergiu um processo tecnologicamente orientado para aplicar as lições de design da natureza. Nos anos 2000, Janine Benyus e os colaboradores do Biomimicry Institute 3.8 definiram Princípios da Vida, que representam lições de sustentabilidade incorporadas a qualquer processo de design bioinspirado. A autora enfatiza que esse componente é o mais importante e influente da biomimética (Baumeister, 2014). Enquanto a biomimética se consolidava como

uma abordagem que unia design e sustentabilidade, outra disciplina, a biônica, também surgia com base na inspiração da natureza. Neste contexto, o zoólogo alemão Werner Nachtigall desempenhou um papel fundamental na expansão dessas abordagens.

Conforme ressaltado por Whall (2006), o zoólogo alemão Werner Nachtigall desempenhou um papel notável na promoção da Biônica. A partir da década de 1970, com seu trabalho pioneiro, ele contribuiu significativamente para estabelecer a Biônica como uma disciplina de apoio fundamental para engenheiros e tecnólogos. Durante os anos 1980, a biomimética expandiu-se para a micro e nanoescala, exemplificada pelo Lotus-Effect (Chen, 2019), impulsionada por avanços na medição e tecnologia de fabricação. Em 1990, Nachtigall inaugurou o campo da 'Biologia Técnica e Biomimética', concentrando-se na aplicação da tecnologia nos campos da biologia, biomecânica de voo e biônica geral. No contexto da biônica, observa-se uma ênfase na análise de mecanismos do reino animal e na criação de partes artificiais do corpo humano, como orelhas, membros e olhos biônicos.

Desde a década de 1990, a biomimética recebeu um impulso adicional, principalmente devido ao rápido desenvolvimento tecnológico nos campos relacionados da ciência da computação. Nanotecnologia, mecatrônica e biotecnologia. Em muitos casos, são os novos desenvolvimentos nesses campos que permitem a transferência de sistemas biológicos complexos em primeiro lugar (ISO 18458-2015).

Desta forma, o campo da biônica tem ganhado espaço e popularidade, e recentemente tem sido associado à robótica (Whall, 2006). Além disso, muitos designers pioneiros exploraram a biônica como uma abordagem de projeto. Por exemplo, Victor Papanek menciona a biônica em sua obra 'Design for the Real World' (1971), e Bruno Munari em 'Das Coisas Nascem Coisas' (1981). Com o passar dos anos e à medida que as discussões contemporâneas sobre inspiração na natureza, sustentabilidade e complexidade em projetos foram assimiladas, surgiram outros termos, como Biomimetismo, Bioinspiração e Biodesign. Atualmente, o termo mais difundido é Biomimética (Queiroz *et al.*, 2015). Este campo é cada vez mais reconhecido como uma disciplina científica que gerou inúmeras inovações em produtos e tecnologias (ISO 18458-2015). No entanto, como disciplina científica, a biomimética adota uma abordagem sistêmica para a aplicação de processos de

construção e princípios de desenvolvimento observados em sistemas biológicos (Whal, 2006).

No encerramento deste tópico, exploramos as origens históricas da biomimética e sua evolução ao longo do tempo. Desde as raízes da biônica até a consolidação da biomimética como uma disciplina científica, vimos como a inspiração na natureza tem desempenhado um papel fundamental na inovação tecnológica e no design sustentável.

### **2.1.2 Conceitos | Definições**

A norma ISO 18458: 2015, aborda a biomimética, onde define sua terminologia, conceito e metodologia. A definição da biomimética de acordo com a norma ISO 18458:2015 é clara e abrangente, estabelecendo seu escopo e propósito. A biomimética é apresentada como a aplicação de abordagens de pesquisa e desenvolvimento que utilizam o conhecimento adquirido com a análise de sistemas biológicos para resolver problemas, inovar e transferir esse conhecimento para sistemas técnicos. Essa definição enfatiza a importância da transferência de princípios biológicos para a tecnologia como o cerne da biomimética, unindo os campos da biologia e tecnologia para alcançar soluções técnicas por meio da abstração e aplicação do conhecimento derivado de modelos biológicos.

Conforme a norma, a biomimética é definida como a aplicação de abordagens de pesquisa e desenvolvimento com o propósito de empregar práticas que utilizam o conhecimento adquirido por meio da análise de sistemas biológicos para encontrar soluções a problemas, gerar novas invenções e inovações, bem como transferir esse conhecimento para sistemas técnicos. O cerne da biomimética reside na transferência de princípios biológicos para a tecnologia. De acordo com essa definição, a biomimética integra as disciplinas de biologia e tecnologia, visando resolver desafios técnicos por meio da abstração, transferência e aplicação do conhecimento obtido a partir de modelos biológicos.

No entanto, é importante destacar que traçar uma linha nítida entre as abordagens da biônica e da biomimética, com base na importância relativa que essas abordagens oferecem para alcançar maior sustentabilidade, pode ser um desafio (Whal, 2006). Atualmente, o termo biomimética tem ganhado mais popularidade (Queiroz *et al.*, 2015). Para Imani *et al.* (2017), o design biomimético é considerado

uma ciência aplicada que se inspira no mundo natural, abrindo caminhos para o design, inovação tecnológica e sustentabilidade. Eles sugerem que o estudo da natureza pode revelar soluções mais sustentáveis em termos de processos, funções, sistemas e materiais eficientes. Nesse contexto, Arruda (2018) enfatiza que a ciência biônica/biomimética promove um intercâmbio de conhecimentos entre diversas áreas, baseando-se na transferência desses conhecimentos para estudar estruturas biológicas da natureza com o propósito de aplicar processos análogos em novas técnicas, produtos, materiais e processos. De acordo com Whall (2006), Nachtigall definiu a biônica como um processo de “aprender com a natureza como uma inspiração para o design técnico independente” e formulou uma série de princípios do design biônico:

1. Integrado em vez de construção aditiva;
2. Otimização do todo, ao invés de maximização de elementos individuais;
3. Multifuncionalidade em vez de monofuncionalidade;
4. Ajuste fino adaptado a ambientes particulares;
5. Economia de energia em vez de esbanjamento de energia;
6. Uso direto e indireto da energia solar;
7. Limitação temporal em vez de durabilidade desnecessária;
8. Reciclagem total em vez de acumulação de resíduos;
9. Redes em vez de linearidade;
10. Desenvolvimento através do processo de tentativa e erro (Whall, 2006 *apud* Nachtigall, 1997).

Segundo Bluchel (2009), os padrões básicos técnicos que regem os sistemas biológicos coincidem com os padrões técnicos presentes na sociedade. A natureza é repleta de refinamentos técnicos, e é importante notar que a biologia e a tecnologia não são oponentes fundamentais. Embora existam diferenças entre máquinas e organismos vivos, ambos estão sujeitos às mesmas leis físicas. Portanto, é possível observar os sistemas vivos e suas estruturas sob uma perspectiva técnica. Nesse contexto, Helms *et al.* (2009) descrevem que o design biologicamente inspirado utiliza analogias de sistemas biológicos para desenvolver soluções para problemas de engenharia.

A Natureza é um supersistema tecnológico que transforma grandes quantidades de energia e matéria-prima, gerenciando resíduos de forma limpa e equilibrada. A ciência interdisciplinar da biônica pode oferecer serviços pioneiros

valiosos para a pesquisa e desenvolvimento. De acordo com a visão de Bluchel (2009), se aumentássemos nossa disposição para aprender abrangentemente com a natureza em termos de funcionalidade e aplicássemos esse conhecimento às condições humanas, talvez pudéssemos aprender com a natureza, que realiza suas ações de maneira visivelmente perfeita:

A utilização econômica dos recursos naturais e das fontes de energia, bem como a devolução e o tratamento de detritos e produtos secundários em um processo de reaproveitamento. A técnica das plantas e dos animais não causa barulho nem lixo, nem uma atmosfera carregada com poluição, nem águas mortas. Os sistemas biológicos são designers, arquitetos e engenheiros brilhantes (Bluchel, 2009).

Outros autores compartilham dessa visão por meio da biomimética, um termo cunhado por Benyus (2003) que etimologicamente vem do grego: bios (vida) e mimesis (imitação). Benyus define a biomimética como uma abordagem à inovação que busca soluções para os desafios humanos ao emular padrões e estratégias testados pelo tempo na natureza. Essa abordagem tem sido amplamente difundida para promover nossa compreensão da ordem natural das coisas e uma compreensão mais profunda do ecossistema, visando uma verdadeira adaptação do ser humano ao meio ambiente. A autora argumenta que devemos considerar a natureza como um modelo, uma medida e uma mentora para o design, sendo estes os princípios base da biomimética:

- Natureza como modelo: Estudar os modelos da natureza e imitá-los ou usá-los como inspiração, com o intuito de resolver os problemas humanos;
- Natureza como uma medida: Usar o padrão ecológico para julgar a relevância e a validade das nossas inovações. Após bilhões de anos de evolução, a natureza aprendeu o que funciona, o que é mais apropriado e o que perdura;
- Natureza como um mentor: Nova forma de observar e avaliar a natureza. Preocupar-se não no que podemos extrair do mundo natural, mas no que podemos aprender com ele. Os seres vivos, em conjunto, mantêm uma estabilidade dinâmica, continuamente manipulando recursos sem desperdícios.

O objetivo é criar produtos, processos e políticas - novos modos de vida - que sejam bem adaptados à vida na Terra a longo prazo. A ideia central é que a natureza possui 3,8 bilhões de anos de evolução e já resolveu muitos dos problemas com os quais estamos lidando. Animais, plantas e micróbios são engenheiros consumados.

Após bilhões de anos de pesquisa e desenvolvimento, as falhas são fósseis e o que nos rodeia é o segredo da sobrevivência (Benyus, 2003).

A natureza sabe o que funciona e o que perdura, realizando o aparentemente impossível: cria formas que são ao mesmo tempo semelhantes e diferentes. Sempre podemos encontrar um padrão básico central na natureza, ligando tudo pelas proporções formadas por esse padrão. Segundo Bluchel (2009), como todos os sistemas biológicos, cada célula minúscula é uma parte ínfima do sistema todo, na escala nanométrica, representando um cosmos fascinante em nível atômico e molecular. O autor destaca que algo impressionante é a dimensão inimaginável que ultrapassa os limites da capacidade de reconhecimento.

Se não quisermos permanecer no estado da técnica atual, que ainda é relativamente simples e nem um pouco amadurecida, se quisermos desenvolvê-la eficazmente segundo modelo da natureza, então a transição ao micro e ao nano mundo vai acontecer automaticamente. Simplesmente porque será prudente, por motivos econômicos e ecológicos, atingir um objetivo com o menor dispêndio de material e energia. (Bluchel, 2009 pg.92).

De acordo com Benyus (2003), o biomimetismo não se restringe à imitação da forma biológica, mas também abrange a inspiração nos comportamentos dos seres vivos. É uma abordagem de design baseada nas formas e estruturas encontradas na natureza. A autora destaca que a natureza oferece inúmeros exemplos de como podemos revolucionar produtos, processos e nossa vida cotidiana em busca de soluções sustentáveis, inspirando-nos em modelos que evoluíram ao longo de milhões de anos.

A ideia central é que a natureza, ao adaptar-se às suas necessidades, já resolveu muitos dos problemas que enfrentamos diariamente, como a obtenção de energia, o gerenciamento de recursos hídricos, a criação de estruturas leves e resistentes, a produção de alimentos, entre outros. Além disso, materiais complexos, como ossos, dentes e conchas marinhas, desenvolvidos ao longo de milhões de anos, exibem propriedades de grande interesse para os seres humanos. No entanto, replicar essas propriedades por meios artificiais representa um desafio significativo para os cientistas (Stuart, 2012).

Sob essa perspectiva, muitos pesquisadores, designers e projetistas têm se voltado para a natureza em busca de princípios e soluções que sustentem um design

consciente do meio ambiente. A biomimética se apoia na natureza porque os sistemas biológicos existentes sobreviveram ao longo de milênios adaptando-se às condições ambientais predominantes e utilizando os recursos naturais de forma altamente eficiente. Isso oferece ao designer a oportunidade de incorporar esses princípios na criação de produtos e materiais mais inteligentes, inovadores e de menor impacto ambiental.

No entanto, de acordo com Reap *et al.* (2005), a criação de produtos socialmente benéficos, lucrativos e ecologicamente restauradores, como artefatos considerados sustentáveis, continua sendo um desafio complexo. A emulação da sustentabilidade inerente ao mundo natural por meio do design biomimético oferece uma abordagem promissora para a criação de produtos sustentáveis ou, pelo menos, menos insustentáveis. De fato, o design biologicamente inspirado está ganhando destaque como um movimento difundido no design voltado para o desenvolvimento sustentável e a conscientização ambiental. Do ponto de vista dos estudos de design, Helms *et al.* (2009) identificam várias características que tornam o design biologicamente inspirado um tema fascinante para estudo:

1. O design biologicamente inspirado é inerentemente interdisciplinar. Por definição, é baseado em analogias entre domínios que exigem perícia em dois domínios distintos (engenharia e biologia).
2. Como os objetos, relações e processos em biologia e engenharia são muito diferentes, biólogos e engenheiros tipicamente falam uma linguagem muito diferente, criando desafios de comunicação.
3. Como os biólogos em geral buscam entender os projetos que ocorrem na natureza enquanto os engenheiros de projeto geralmente buscam gerar projetos para novos problemas, eles normalmente usam diferentes métodos de investigação e geralmente têm diferentes perspectivas sobre o projeto.
4. Projetos biológicos normalmente resultam em projetos mais multifuncionais e interdependentes do que projetos de engenharia.
5. Os recursos, tais como materiais e processos, disponíveis na natureza para realizar um conceito abstrato de projeto são tipicamente muito diferentes dos recursos disponíveis no domínio da engenharia (Helms, *et al.* 2009).

De acordo com Cohen & Reich (2016), assim como destacado por Helms *et al.* (2009), a busca por orientação na natureza em busca de modelos e medidas sustentáveis é uma abordagem sensata e que ganhou mais destaque nos últimos anos. Eles argumentam que ao estudar os sistemas biológicos, que operam dentro de limitações específicas da vida sem gerar desperdício ou causar danos irreversíveis aos ecossistemas, podemos enriquecer e sustentar esses mesmos ecossistemas. Os autores enfatizam que é possível aprender sobre a sustentabilidade observando certos parâmetros presentes na natureza:

- As formas e estruturas da natureza fornecem uma ampla gama de propriedades com o uso mínimo de material ou energia;
- Os processos de fabricação da natureza são conduzidos dentro da vida e, portanto, evitam alta temperatura, pressões fortes ou materiais tóxicos;
- Sistemas naturais demonstram fluxos eficientes de energia e material;
- Os produtos da natureza são recicláveis (Cohen & Reich, 2016).

A biomimética desempenha um papel significativo em vários paradigmas de design devido à sua ampla gama de aplicações. Ela contribui tanto na prática quanto na filosofia para muitos dos paradigmas de design ecológico que surgiram nas últimas três décadas. Diversos esforços foram feitos para definir os "Princípios da Vida" (Benyus, 1997; Baumeister, 2014; Biomimicry Institute 3.8, 2015), que representam estratégias de sustentabilidade presentes na natureza e são fundamentais para a prática da biomimética como parâmetros de sustentabilidade (Cohen & Reich, 2016).

Além disso, o conceito de "Berço ao Berço" exemplifica uma ferramenta de sustentabilidade biomimética. Inspirado pelo ciclo cíclico de energia e materiais na natureza, esse conceito foi desenvolvido por Michael Braungart e William McDonough, conforme apresentado no livro "Cradle to Cradle - criar e recriar ilimitadamente" (2014). Ele representa uma mudança fundamental em relação aos sistemas lineares tradicionais, que extraem recursos naturais e acabam em aterros sanitários (do berço ao túmulo). Em vez disso, os sistemas cíclicos (berço ao berço) são projetados para permitir a circulação contínua de materiais, tanto orgânicos quanto técnicos, de maneira semelhante à natureza (Cohen & Reich, 2016).

Conforme, McDonough & Braungart (2013), na criação de processos saudáveis e circulares, os resíduos são reintroduzidos como nutrientes através do desenho de

produtos e sistemas no início de sua concepção. Esta abordagem defende a aplicação crescente do conhecimento da inteligência dos sistemas naturais em nossos produtos, processos e sistemas. São três princípios básicos fundamentais para o desenho de produtos e sistemas eco efetivos:

1. Resíduos são nutrientes: onde os materiais devem ser saudáveis para os seres humanos e a biosfera; deve-se mimetizar a lógica cíclica da natureza nos nossos processos produtivos; e o valor dos materiais deve ser recuperado após cada ciclo de uso.
2. Usar fonte solar ilimitada: Os seres vivos, os sistemas naturais e o planeta como um todo dependem da energia solar para sobreviver e prosperar. A energia solar tem uma entrada constante e infinita, que é substituída a todo momento, e por isso a denominamos de renovável. A fonte solar é utilizada em seu máximo potencial, a partir de tecnologias existentes ou novas que estão por surgir, como é o caso de energias eólicas, geotérmicas e hidráulicas, que se originam de fatores provenientes do Sol.
3. Celebrar a diversidade: A diversidade fortalece sistemas biológicos e industriais, valorizando materiais, processos e soluções específicas a cada local ou situação. A arquitetura dos espaços físicos de produção e distribuição pode acolher e estimular a biodiversidade, interagindo positivamente com o entorno e dando espaço para a natureza se acomodar.

A biomimética abrange uma ampla variedade de campos de pesquisa, desde fisiologia e biologia molecular até ecologia, zoologia e botânica (Lepora *et al.*, 2013). Essa abordagem promissora é aplicável a diversos campos, como o design de estruturas, sistemas, materiais e automação, inspirando-se em princípios da natureza que evoluíram ao longo de milhões de anos. Além disso, a pesquisa biomimética, especialmente em escala nanométrica, pode impulsionar avanços na miniaturização, eficiência energética e sistemas robóticos biomiméticos (Johnson *et al.*, 2009; Lepora *et al.*, 2013).

A literatura em ciências do design apresenta estudos de caso que ilustram o potencial do design biomimético, como a imitação do design das pinhas para desenvolver roupas reguladoras de temperatura e o desenvolvimento de revestimentos super-hidrofóbicos inspirados nas folhas de lótus (Helms *et al.*, 2009). Além disso, diversos projetos de robôs biomiméticos foram estudados, abrangendo autores como Vincent & Mann (2002), Zhu *et al.* (2005), Floyd *et al.* (2006), Beer *et al.* (1999) e Bar-Cohen & Brazeal (2003).

A biônica e a biomimética têm contribuído significativamente para inovações tecnológicas em áreas como dinâmica aerodinâmica, ecolocalização, construção leve, ventilação, embalagem, adesão, propulsão, locomoção, composição de materiais, otimização de volume, entre outros (Whall, 2006). No entanto, é importante reconhecer que a abordagem técnica e de engenharia da biônica possui méritos e limitações. Cohen & Reich (2016) enfatizam que simplesmente imitar soluções da natureza, sem incorporar os princípios de design sustentável da natureza, não garante a sustentabilidade. A relação entre biomimética e sustentabilidade é complexa, uma vez que um produto inspirado na natureza pode ser fabricado usando métodos prejudiciais ao meio ambiente, como o uso excessivo de energia ou a produção de contaminantes.

Reap *et al.* (2005) criticam a abordagem reducionista da biomimética, que se limita à imitação superficial de forma ou estrutura, sem compreender completamente as estratégias técnicas e de sustentabilidade dos modelos biológicos. Eles argumentam que a sustentabilidade não pode ser alcançada apenas através da imitação microscópica, mas requer uma compreensão holística das estratégias de sistemas biológicos em níveis mais abrangentes. Portanto, é essencial adotar uma abordagem ampla que considere o ciclo de vida completo do produto e busque a integração dos princípios de sustentabilidade em todas as fases do desenvolvimento.

Concluindo este tópico, a biomimética emerge como uma abordagem de design inovadora, inspirada na natureza, que oferece um vasto potencial para soluções tecnológicas sustentáveis. No entanto, sua eficácia depende não apenas da imitação de formas biológicas, mas também da incorporação dos princípios de sustentabilidade da natureza em todas as fases do processo de design. O próximo capítulo explorará os métodos e processos envolvidos na aplicação da biomimética, aprofundando o entendimento dessa disciplina interdisciplinar.

### **2.1.3 Métodos e processos em biomimética**

De acordo com Helms, *et al.* (2009), embora a comunidade de designers tenha se inspirado na biologia por milhares de anos, não havia um processo normativo específico para o design de inspiração biológica. Esta prática encontra-se na vanguarda de um campo em rápido crescimento, onde os métodos tradicionais de resolução de problemas já não são adequados. Arthur Koestler cunhou o termo

'biassociação' para descrever um processo que é fundamental tanto para a arte da descoberta quanto para a descoberta da arte. A biassociação envolve um salto criativo que une, de forma inesperada, ideias, observações, percepções ou sistemas de referência previamente desconexos. Esse processo criativo, muitas vezes, ocorre de forma intuitiva, onde artistas e cientistas criativos podem explorar essas conexões mesmo que inconscientemente. A verdade, nesse contexto, é subjetiva e incerta, mas é o fio condutor que leva à solução de problemas complexos por meio de analogias (Bluchel, 2009).

Com isto, a prática descritiva de estudos em biomimética está começando a fornecer um modelo detalhado de processamento de informações no design biologicamente inspirado, enfocando os processos cognitivos ou "mecanismos" de analogias que facilitam ou limitam as práticas e produtos de design (Helms, *et al.* 2009). Em consonância, Soares & Arruda (2017) afirmam que o estudo do funcionamento de sistemas físicos e mecânicos naturais também ocorre por meio de analogia. A Analogia Funcional é uma abordagem que busca compreender as funções desempenhadas pelos modelos naturais, tanto em sua totalidade quanto em suas partes e componentes. Em outras palavras, essa abordagem identifica os atributos funcionais e qualidades específicas que podem ser mimetizadas a partir das estruturas naturais analisadas. Uma vez que os organismos naturais desenvolveram habilidades complexas e altamente adaptáveis, a ideia é emular essas aptidões funcionais e aplicá-las em artefatos artificiais.

A bioinspiração na manufatura é definida, de acordo com Byrne *et al.* (2018), como a transferência analógica de conhecimento da biologia, atuando como o domínio de origem, para a tecnologia, que se configura como o domínio alvo. Essa analogia pode assumir duas formas: superficial, baseada na transferência de princípios de alto nível, ou aprofundada, fundamentada na transferência de estruturas ou processos precisos. A abordagem de transferência superficial está mais associada à compreensão e aplicação de ideias ou conceitos naturais (bioinspiração), enquanto a abordagem de transferência aprofundada está diretamente relacionada à imitação direta (biomimética).

Conforme destacado por Lepora, *et al.* (2013), na computação bioinspirada, a tendência concentra-se em abordagens bottom-up e descentralizadas, como algoritmos genéticos, em contraste com a abordagem top-down mais tradicional da inteligência artificial. Além disso, como afirmado por Byrne *et al.* (2018), essas

abordagens também podem ser aplicadas à biotecnologia na manufatura. A primeira abordagem é a top-down, na qual o problema técnico é inicialmente definido, seguido pela busca por analogias biológicas e sua interpretação técnica. A outra abordagem é a bottom-up, que começa com uma análise da natureza ou de ocorrências naturais, seguida pela abstração dos princípios biológicos e pela busca por uma aplicação técnica. Nessa abordagem bottom-up, as características biológicas são relacionadas a uma solução de engenharia.

Nkandu & Alibaba (2018) apresentam em seus estudos duas abordagens distintas da biomimética no design: a abordagem baseada em problemas e a abordagem baseada em soluções. Ambas têm suas próprias vantagens, desvantagens e impactos na sustentabilidade geral. A abordagem baseada em problemas é conhecida por nomes diferentes em várias literaturas, como 'design que se inspira na biologia' (Zari, 2007), 'design orientado por problemas biologicamente inspirados' (Helms *et al.* 2009) e 'abordagem top-down' (Knippers, 2009), todos com o mesmo significado. Nessa abordagem, os designers buscam soluções na natureza ao reconhecerem seus próprios problemas de design e observarem como organismos e sistemas na natureza resolveram desafios semelhantes. A abordagem baseada em problemas pode servir como um ponto de partida valioso para a transição de artefatos ineficientes para artefatos mais sustentáveis (Nkandu & Alibaba, 2018, *apud* McDonough, 2002).

Conforme o autor, a segunda abordagem, baseada em soluções, também é conhecida como 'biologia influenciando o design', 'abordagem bottom-up' ou 'design biologicamente inspirado orientado para a solução'. Nesta abordagem, o conhecimento biológico influencia o design humano. Uma vantagem dessa abordagem é que o conhecimento da biologia pode impactar o projeto de várias maneiras, não se limitando apenas ao problema de design predefinido. No entanto, uma desvantagem é que exige uma pesquisa biológica aprofundada, e as informações coletadas devem ser cuidadosamente avaliadas quanto à relevância no contexto do projeto (Nkandu & Alibaba, 2018).

Helms, *et al.* (2009), com base em sua própria experiência e na comunidade de design biologicamente inspirado, identificaram o que consideravam ser as melhores práticas. Eles observaram que uma estrutura organizacional focada principalmente no processo orientado a problemas era eficaz, embora um segundo processo orientado a soluções tenha emergido na prática. Esse processo é descrito

por meio de uma estrutura organizacional que inclui seis etapas. Embora seja dinâmico, é crucial manter um foco claro e objetivo no problema central da pesquisa, permitindo a reformulação e aprofundamento da compreensão do problema e das alternativas de solução.

Os autores descrevem que o padrão de design biologicamente inspirado pelo problema segue uma progressão de etapas que, na prática, é não-linear e dinâmica. Isso significa que as fases do processo não ocorrem estritamente em uma sequência linear, e há interações e influências mútuas entre elas. Em outras palavras, o progresso em fases posteriores frequentemente afeta as etapas anteriores, gerando um feedback iterativo e ciclos de refinamento ao longo do processo de design. Essa abordagem não linear e dinâmica permite uma adaptação contínua à medida que novas informações e insights surgem durante o desenvolvimento do projeto, levando a um design mais refinado e eficaz.

Etapa 1: definição do problema;

Etapa 2: reenquadre o problema;

Etapa 3: pesquisa de solução biológica;

Etapa 4: defina a solução biológica;

Etapa 5: extração de princípio;

Etapa 6: aplicação do princípio (Helms, *et al.* 2009).

Os autores, Helms *et al.* (2009), destacam que em relação à abordagem de design biologicamente inspirado orientado à solução, o processo pode começar a partir de dois pontos de partida diferentes, a solução ou o problema, levando a dois padrões distintos: solução para problema ou problema-solução. Em seus estudos de caso, muitas vezes o processo começa com uma solução biológica da qual se extrai um princípio profundo e, em seguida, se busca problemas aos quais esse princípio possa ser aplicado. Embora exista um padrão de alto nível para o processo orientado a problemas, na prática, o processo real não segue necessariamente uma sequência linear, sendo flexível e adaptável às necessidades do projeto em questão, por exemplo:

Etapa 1: identificação da solução biológica;

Aqui, os designers começam com uma solução biológica específica em mente.

Etapa 2: defina a solução biológica;

Etapa 3: extração de princípio;

Etapa 4: reenquadre a solução;

Nesse caso, a reestruturação de quadros força os projetistas a pensar em termos de como os humanos podem ver a utilidade da função biológica sendo alcançada.

Etapa 5: pesquisa de problemas;

Enquanto a pesquisa no domínio biológico inclui a pesquisa por meio de algum espaço finito de soluções biológicas documentadas, a pesquisa de problemas pode incluir a definição de problemas inteiramente novos. Isso é muito diferente da etapa de pesquisa de solução no processo orientado a problemas.

Etapa 6: definição do problema;

Etapa 7: aplicação do princípio (Helms, *et al.* 2009).

Ao analisar o processo de design de inspiração biológica, Helms *et al.* (2009) identificaram que, enquanto o processo orientado a problemas é amplamente reconhecido como uma metodologia normativa para projetos de inspiração biológica, o processo orientado a soluções é menos comum, mas pode surgir na prática. Com base nessa análise, os autores chegaram a três conclusões importantes sobre o processo de design inspirado biologicamente.

Primeiro, quando uma solução biológica é selecionada, essa solução restringe o restante do processo de projeto. Quando o processo de design começa com uma solução biológica, como em quase metade dos casos estudados, essa solução orienta fundamentalmente o processo de design, desde a definição do problema até o design final. No processo de projeto orientado a problemas, a solução biológica torna-se uma fonte de fixação de projeto, limitando a fonte de inspiração àquela única fonte. Em segundo lugar, ao longo do processo de design, os projetistas são consistentemente presos a um conjunto comum de erros, que vão desde problemas mal definidos até transferências analógicas impróprias. Terceiro, os padrões de prática surgem espontaneamente no design inspirado na biologia, como o foco na estrutura. Cada processo, padrão de prática e erro cognitivo fornece uma oportunidade tanto para aprimorar a compreensão do projeto de natureza biologicamente inspirada quanto para desenvolver estratégias para melhorar o desempenho de projetistas envolvidos em projetos de inspiração biológica (Helms *et al.* 2009).

As abordagens discutidas anteriormente se enquadram em diferentes níveis de biomimética, conforme definidos pelo Instituto de Biomimética 3.8 e Janine Benyus (2003), que incluem três níveis distintos: forma (organismo), processo (comportamento) e ecossistema (Ahmar *et al.*, 2013; Nkandu & Alibaba, 2018). Esses níveis fornecem uma estrutura para os designers que desejam aplicar métodos de biomimética para melhorar a sustentabilidade de artefatos, ajudando a determinar qual abordagem adotar.

. Nível do Organismo: Neste nível, os projetistas observam a forma de um organismo específico e analisam como ele funciona. Isso pode envolver a imitação do organismo como um todo ou apenas de partes específicas. Refere-se a um animal ou planta específico e suas características. (Zari, 2007; Ahmar *et al.*, 2013; Nkandu & Alibaba, 2018).

. Nível de Comportamento: Aqui, a biomimética se concentra na imitação de como um organismo interage com seu ambiente imediato. Envolve a compreensão e imitação do comportamento de um organismo, incluindo como ele se relaciona ou interage com seu contexto. (Zari, 2007; Ahmar *et al.*, 2013; Nkandu & Alibaba, 2018).

. Nível de Ecossistema: No terceiro nível, a biomimética envolve a imitação de como um organismo interage com seu ambiente e como diversos componentes trabalham em conjunto. Isso geralmente resulta em projetos mais complexos, com múltiplos elementos que imitam os princípios gerais que permitem que os ecossistemas funcionem com sucesso. (Zari, 2007; Ahmar *et al.*, 2013; Nkandu & Alibaba, 2018).

Esses níveis fornecem uma abordagem flexível para a aplicação da biomimética, permitindo que os designers escolham o aspecto da biologia a ser imitado com base nas necessidades de seus projetos.

Zari (2007) abordou e desenvolveu esses níveis, reafirmando o potencial da biomimética, com maior ênfase no nível do ecossistema, que é o mais elevado e escolhido para estudos mais aprofundados, pois oferece o maior potencial para orientar uma abordagem de design sustentável. Ahmar, *et al.* (2013) destacam que é válido perceber que esses níveis de design biomimético podem ser vistos de outra perspectiva, levando a uma classificação diferente. Segundo os autores, eles podem ser percebidos como escalas ascendentes:

. A escala celular dos organismos vivos, incluindo composição material e leis de crescimento celular, por exemplo.

. A segunda escala pode englobar aspectos anatômicos e estruturais do organismo como um todo.

. A terceira escala envolve o microambiente, incluindo a influência e interação com outros organismos e o entorno imediato.

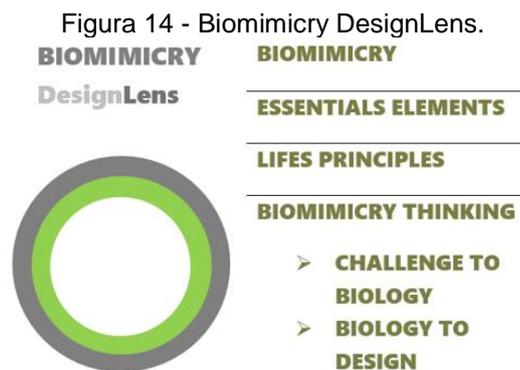
. A quarta e última escala é o macroambiente, abrangendo o contexto e o ecossistema em que o organismo sobrevive e se desenvolve.

Qualquer uma dessas escalas pode ser aplicada de maneira benéfica no design, não necessariamente abordando todos os níveis e nem na mesma escala correspondente. No entanto, estudos em escala celular, abordando sua forma, funções, materiais, embalagem, interações, etc., podem ser úteis para o desenvolvimento de novos materiais e para a criação de formas de construção bioinspirada.

Além disso, o Biomimicry Institute 3.8 tem desenvolvido propostas para sistematizar processos biomiméticos do meio natural. Como exemplo desta abordagem, Dayana Baumeister, Janine Benyus e seus colaboradores apresentam uma metodologia definida como 'Biomimicry Thinking', onde apresentam as lentes do design biomimético (Biomimicry DesignLens), ferramentas e parâmetros na forma de diagramas que fornecem o contexto para onde seguir (tomadas de decisões), como, o quê e por que a biomimética se encaixa no processo de qualquer disciplina ou em qualquer escala de design (projeto).

#### 2.1.3.1 Biomimicry DesignLens

O Biomimicry Institute 3.8, em colaboração com Janine Benyus, Dayana Baumeister e sua equipe de colaboradores, vem desenvolvendo e aprimorando essa abordagem metodológica em biomimética desde 1998. Chamada de Biomimicry DesignLens (Figura 14), sua representação é feita por meio de diagramas que exploram três componentes principais para a prática de projeto em design biomimético: Elementos Essenciais, Princípios da Vida e Biomimicry Thinking.



Fonte: Adaptado de Baumeister (2014).

O DesignLens tem o objetivo de promover uma profunda compreensão de como a vida funciona e estabelecer parâmetros para a utilização da genialidade da natureza na orientação do design humano. De acordo com o Instituto, consiste em um conjunto de diagramas que visualizam os fundamentos da abordagem de design em relação à natureza. Essa abordagem de projeto integra o Biomimicry Thinking com os Elementos Essenciais e os Princípios da Vida, e foi aplicada nas etapas propostas nesta pesquisa de doutorado.

Segundo Baumeister (2014), este manual é uma ferramenta prática destinada a profissionais que buscam soluções inovadoras e sustentáveis em desafios de design. Ele foi desenvolvido para ser aplicável a designers, biólogos, engenheiros, empreendedores e é igualmente acessível a estudantes, educadores e profissionais de diversas áreas. A metodologia e os Princípios da Vida são elementos dinâmicos que evoluíram ao longo dos anos e estão em constante atualização para refletir os avanços mais recentes nas ciências e aplicações em design.

Os Princípios da Vida representam a ferramenta mais abrangente e influente da biomimética, englobando os Elementos Essenciais da Biomimicry, que abordam os três pilares fundamentais: ethos, (re)conectar e emular.

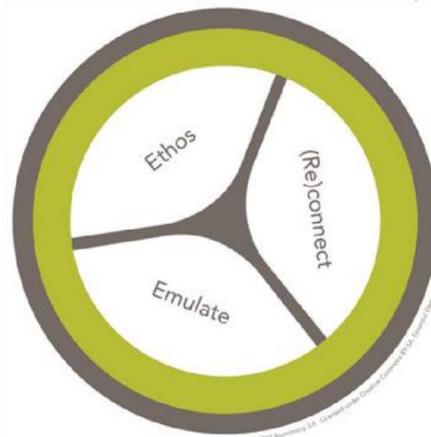
### 2.1.3.2 Elementos essenciais

O Biomimicry Institute 3.8 identifica três elementos essenciais e interconectados para a prática de biomimética (Figura 15): Ethos, que representa o respeito, a responsabilidade e a gratidão da espécie humana pelo planeta; (Re) Conexão, que enfatiza a nossa interligação profunda com a natureza, reconectando o humano com o meio natural; e Emular, que envolve a inspiração pelo design a partir

dos princípios, padrões, estratégias e funções encontrados na natureza. Emular significa imitar ou exceder outrem de maneira estimulante e cooperativa (Baumeister, 2014).

O processo começa com uma atitude empática em relação ao meio natural, mantendo em mente a importância dos Elementos Essenciais, que são três elementos interconectados para a prática de design inspirado pela natureza.

Figura 15 - Elementos Essenciais - Biomimicry DesignLens.



Fonte: Biomimicry Institute 3.8 (2015).

Os elementos essenciais do Biomimicry Institute 3.8 podem ser descritos da seguinte maneira:

- . Ethos: Representa o respeito, responsabilidade e gratidão da humanidade pelo planeta.
- . (Re) Conexão: Reflete a nossa interligação profunda com a natureza, reconectando o ser humano com o meio natural.
- . Emular: Envolve a inspiração no design a partir dos princípios, padrões, estratégias e funções encontrados na natureza, promovendo uma imitação estimulante e cooperativa.

### 2.1.3.3 Princípios da Vida

O segundo componente fundamental desta abordagem são os Princípios da Vida. De acordo com o Biomimicry Institute 3.8 (2015), esses princípios são ensinamentos e estratégias que a natureza oferece em termos de design e ideais aspiracionais para projetos com parâmetros sustentáveis, aprendidos e aperfeiçoados

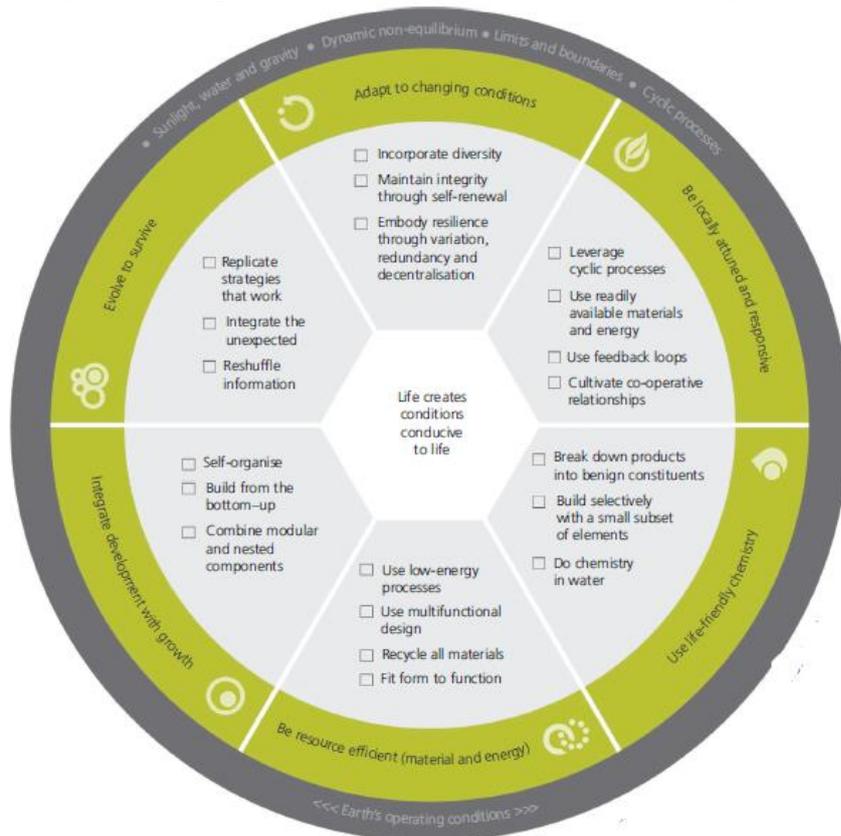
ao longo de 3.8 bilhões de anos de evolução. Esses princípios criam condições propícias à vida.

Com seis ensinamentos principais, podem-se modelar estratégias inovadoras e parâmetros sustentáveis orientados pela natureza. De acordo com Baumeister (2014), é onde ocorre a integração e otimização das estratégias da natureza, criando condições favoráveis à vida, utilizando os Princípios da Vida como ideais aspiracionais para o projeto. São a base para a mudança de mentalidade que deve ocorrer para que a sustentabilidade se integre ao nosso ethos e à nossa reconexão com o meio natural. Esses princípios fornecem uma ponte para a biologia, resumindo anos de pesquisa que os cientistas realizaram ao observar e analisar a natureza (Baumeister, 2014).

No processo de emulação, os Princípios da Vida fornecem as ferramentas necessárias para diferentes aspectos do método de biomimética. Eles podem orientar prioridades de projeto, inspirar o design e fornecer uma estrutura para a tomada de decisões. Após a conclusão do design bioinspirado, os Princípios da Vida podem servir como base para a avaliação contínua do resultado final do projeto.

O conjunto de Princípios da Vida é uma ferramenta importante para a integração da biomimética no seu local de trabalho e na sua vida como um todo. Eles podem servir como ethos subjacente e metas aspiracionais para o escopo e a visão de um projeto, além de fornecer uma lista tangível para avaliar um design. Como os Princípios da Vida estão incorporados em muitos aspectos da implementação da biomimética, sua compreensão é essencial para abraçar essa abordagem.

Figura 16 - Diagrama Princípios da Vida - Biomimicry DesignLens



Fonte: Baumeister (2014).



Evolver para sobreviver: envolve estratégias de gerenciamento de informações. Listando: datar estratégias; identificar abordagens de sucesso anteriores; identificar erros; integrar soluções alternativas a um mesmo problema; e evoluir as abordagens criando novas opções de soluções.



Adaptar-se as condições de mudanças: incluir soluções que permitam resiliência, redundância e descentralização do sistema. Permitir a adição de energia e matéria, desde que voltado para reparar/sanar e melhorar o desempenho do sistema. Incorporar a diversidade que o rodeia (estudar processos, funções e formas para prover um melhor funcionamento).



BE LOCALLY ATTUNED  
AND RESPONSIVE

Ser atento e responsivo as questões locais: usar materiais de fácil acesso (local e energético); cultivar processos de cooperação mútua, onde todos ganham; tirar proveitos de fenômenos locais que se repetem (clima, ciclos, etc.); incluir o fluxo de informações em processos cíclicos, nunca lineares.



INTEGRATE DEVELOPMENT  
WITH GROWTH

Integrar conhecimento e crescimento: combinar elementos modulares e sistemas que evoluem do simples para o complexo; compreender o funcionamento do todo e também dos pequenos componentes e sistemas que o compõe; ser capaz de construí-lo de baixo para cima; criar condições para que os componentes interajam de uma forma que o todo consiga ter propriedades de auto-organização.



USE LIFE-FRIENDLY  
CHEMISTRY

Usar química amigável a vida: usar poucos elementos de uma forma elegante; usar química favorável à vida, ou seja, evitar produtos tóxicos; usar água como solvente.



BE RESOURCE EFFICIENT  
(MATERIAL AND ENERGY)

Ser eficiente (materiais e energia): integrar múltiplas necessidades em soluções elegantes (evitar desperdício); minimizar o consumo energético; buscar fontes renováveis; gerenciar o uso de materiais em ciclo, ou seja, planejar o ciclo de vida. Segundo este preceito, a forma deve seguir o desempenho pretendido.

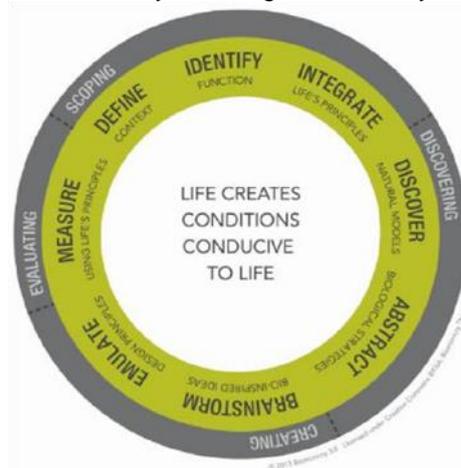
#### 2.1.3.4 Biomimicry Thinking

O Biomimicry DesignLens, enquanto método ou ferramenta, representa uma estrutura que facilita a prática de projetos bioinspirados. Seu propósito é auxiliar pessoas na aplicação da biomimética no design de qualquer coisa. Ele abrange etapas

de pesquisa, projeto, tomada de decisões e feedback das etapas, fornecendo o contexto para onde seguir, como, o quê e por que a biomimética se encaixa no processo de qualquer disciplina ou em qualquer escala de design.

Ao seguir os passos específicos dentro de cada fase, o Biomimicry DesignLens ajuda a garantir a integração bem-sucedida de estratégias da natureza em projetos humanos. Ele inclui quatro áreas que fornecem os valores essenciais para o processo: Escopo, Descobrendo, Criando e Avaliando.

Figura 17 - Biomimicry Thinking - Biomimicry DesignLens.



Fonte: Biomimicry Institute 3.8 (2015).

A abordagem não é rígida, permitindo que o diagrama seja percorrido de forma sequencial (do Desafio à Biologia) ou aleatória (da Biologia ao Design). Ambos os casos seguem uma abordagem cíclica e considera-se que os melhores resultados surgem ao usar o diagrama várias vezes em um processo iterativo, resultando no aprimoramento do projeto (Biomimicry Institute 3.8, 2015).

No primeiro caso, Desafio à Biologia, as etapas seguem no sentido horário. Inicia-se com um problema específico, busca-se uma solução inspirada na natureza, abstrai-se a ideia do conceito e, em seguida, passa-se para a fase de emulação e avaliação através da validação das hipóteses.

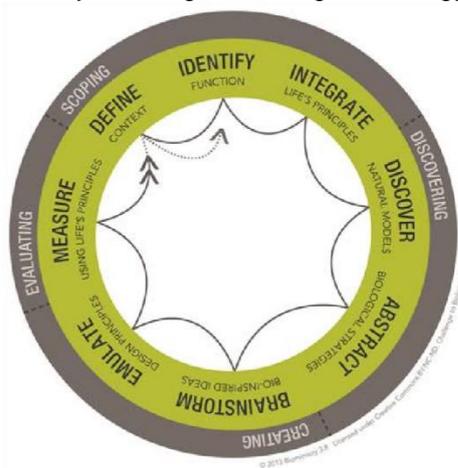
No segundo caso, Biologia ao Design, a abordagem permite a transição de um campo para outro sem seguir uma sequência linear, conforme necessário. Quando se descobre algum princípio natural aleatoriamente, visualiza-se uma aplicação daquele conceito para solucionar algum problema específico em áreas como design, arquitetura, engenharia e diversos outros casos. Essa modalidade se aproxima das abordagens "bottom-up", que começam com uma análise da natureza ou de

ocorrências naturais, seguidas pela abstração dos princípios biológicos e pela busca por uma aplicação técnica. Também se alinha à abordagem "baseada em soluções", também referida como "biologia influenciando o design" ou "design biológico orientado à solução". Nessas abordagens, o conhecimento biológico influencia o design humano, e o conhecimento da biologia pode influenciar o projeto de diversas maneiras além do problema de design predeterminado. No entanto, é necessário realizar uma pesquisa biológica em profundidade, onde as informações coletadas devem ser consideradas relevantes para um contexto de projeto específico.

### 2.1.3.5 Challenge to Biology (Desafio de biologia)

A primeira possibilidade de abordagem é denominada Challenge to Biology (Desafio de Biologia), onde se percorre as etapas em sequência e sentido horário. O processo se inicia à partir da definição de uma problemática e se busca possíveis soluções em estratégias de elementos naturais as quais se tenha algum conhecimento prévio, ou seja, quando se tem um problema específico e se está buscando ideias biológicas para a solução.

Figura 18 - Diagrama Biomimicry Thinking - Challenge to Biology - Biomimicry DesignLens.



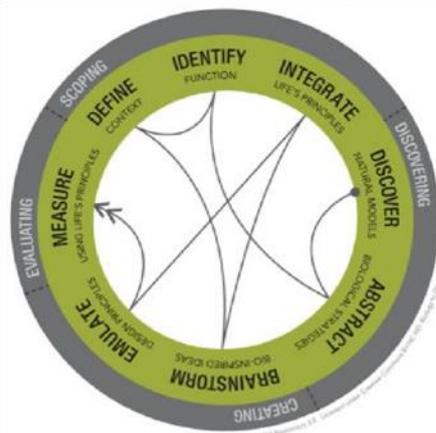
Fonte: Biomimicry Institute 3.8 (2015).

Desafio de biologia é um caminho específico, útil para criação de cenários, quando se tem um problema específico e se está buscando ideias biológicas para a solução. É particularmente útil para uma configuração "controlada", ou para a criação de um processo iterativo de design. Não surpreendentemente, os melhores resultados ocorrem quando você navega o caminho várias vezes.

### 2.1.3.6 Biology to Design (Biologia para Design)

É outro caminho específico, este é mais adequado quando o processo inicia com uma visão biológica inspiradora (como por exemplo, quando se visualiza em determinada situação algum dos Princípios da Vida) e que se deseja manifestá-lo em um projeto. Esta abordagem está muito relacionada à prática de projeto em design e sustentabilidade com estratégias biológicas que possam resultar em inovações tecnológicas de interesse da população.

Figura 19 - Diagrama Biomimicry Thinking - Biology to Design.



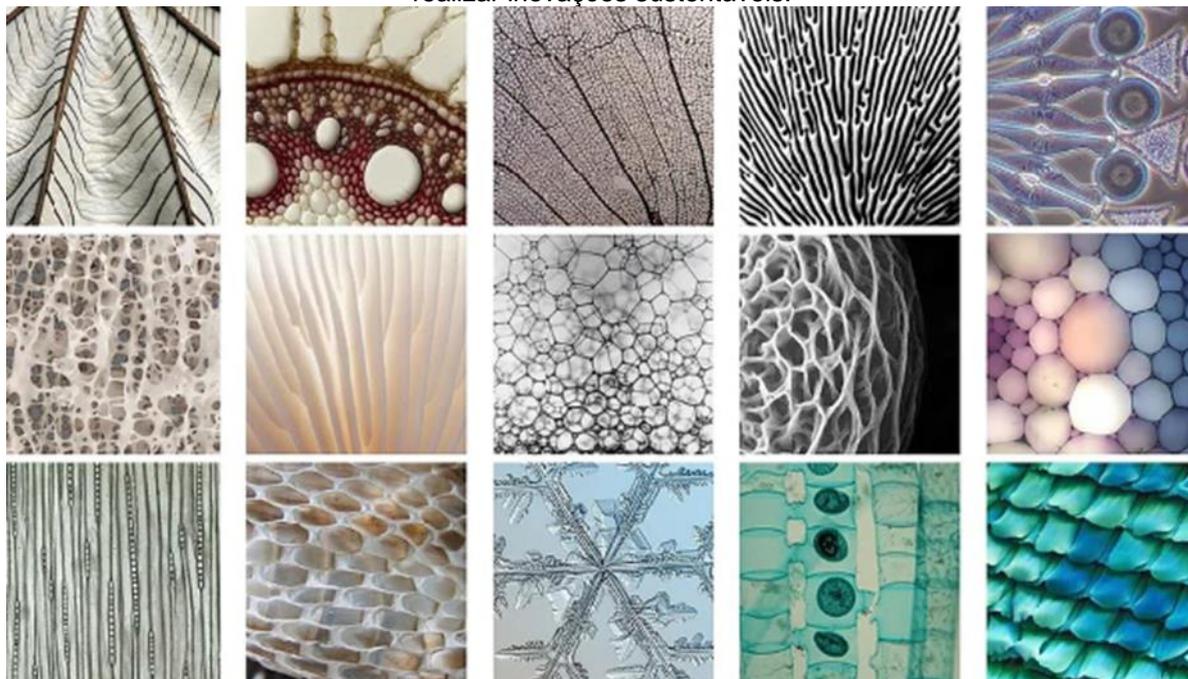
Fonte: Biomimicry Institute 3.8 (2015).

O uso deste diagrama auxilia o processo de criação para designers, engenheiros, arquitetos, inventores, empreendedores e estudantes que não tem seu próprio processo de projeto, mas que estimulam processos criativos através de analogias da natureza, facilitando o caminho para inovação.

### 2.1.4 Bioinspiração e relação estrutura-função

A invenção e a criação dos objetos que constituem nossas realidades materiais de hoje, mesmo altamente tecnológicos, são largamente baseadas em princípios revelados pelas formas da natureza. O design de muitos produtos bem-sucedidos pode ser considerado fruto de uma relação bem sucedida com as formas naturais e os fenômenos nelas contemplados (Hsuan-Na 2018).

Figura 20 - Biblioteca de estruturas naturais open source. Inspiração em estratégias da natureza. Muitas estruturas da natureza pode atender a indústria com a aplicação de soluções naturais para realizar inovações sustentáveis.



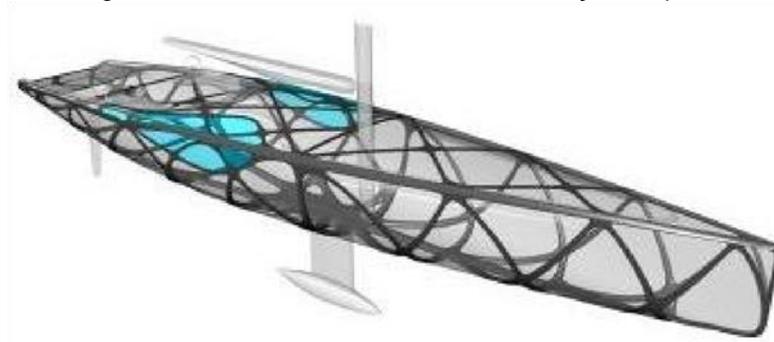
Fonte: <https://www.lilianvandaal.com/single-post/2017/11/06/structure-library> (2022).

As relações estrutura-função também podem fornecer uma plataforma fértil para a cooperação entre engenheiros e biólogos. Essa relação é inerente tanto ao pensamento biológico quanto ao de engenharia e pode ser um denominador comum entre as duas disciplinas. (Cohen & Reich, 2016).

Segundo Wilson *et al.* (2010), a análise de elementos morfológicos da natureza desafia e promove a capacidade de perceber os detalhes e as estratégias funcionais presentes em sua estrutura. Ideias inovadoras vêm surgindo de pesquisas sobre sistemas e propriedades naturais que nem sempre se traduzem somente no aspecto e estética, mas que a forma natural favorece também o ganho em eficiência (Soares & Arruda, 2018). Quanto a morfologia funcional, para Gleich *et al.* (2002) o princípio de forma e função é a primeira e mais antiga das vertentes do desenvolvimento de artefatos com base em organismos da natureza e concentra-se na relação entre formas ou estruturas biológicas e suas funções. As origens já se encontram em observações pré-científicas da natureza, que muitas vezes serviram de estímulo para soluções técnicas. As (Figura 21, 22) são exemplos de como as lições aprendidas de estruturas altamente eficientes na natureza - por exemplo, ossos, árvores e milhares de tipos diferentes de plâncton marinho - podem fornecer princípios estruturais que

podem ser aplicados para reduzir o peso em até 70% em estruturas como longarinas de barco, pilares automotivos e quadros de bicicleta.

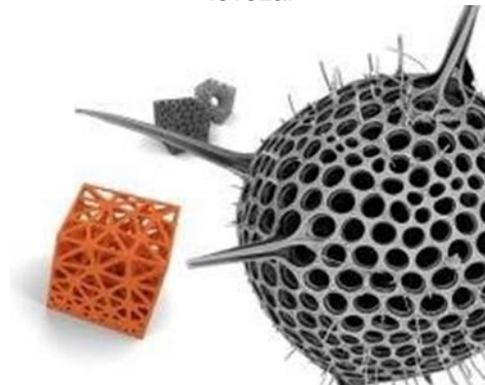
Figura 21 - Estruturas eficientes com redução de peso.



Fonte: Leidenfrost (2015).

Esta pesquisa apresenta conceitos como juntas assimetricamente radiadas e reforço automático de cascos e volumes, onde o tamanho e a geometria de cada célula são adaptados de acordo com a carga - por exemplo, células menores e mais fechadas, onde a carga é maior, transformando-se em células maiores e mais abertas, onde há aplicação de cargas menores (Leidenfrost, 2015).

Figura 22 - Processo de projeto sistemático que utiliza as estruturas otimizadas da natureza no plâncton para ajudar a otimizar estruturas marítimas, automotivas e outras para resistência, rigidez e leveza.



Fonte: ELiSE (2017).

Bonsiepe (1982) define a analogia morfológica como a busca experimental de modelos elaborados da tradução das características estruturais e formais para transpor em projetos. Sendo assim, Soares e Arruda, (2018) expõem que este tipo de analogia procura estudar e analisar o porquê da forma natural, as inter-relações da sua geometria, observando e compreendendo suas texturas, atentando para as características do shape (forma externa), das partes e componentes, dos detalhes de

alguma parte a nível macro ou microscópico, assim como, para as suas formas estruturais. A ideia de que a função se encaixa na forma ou estrutura é um dos princípios básicos de design na natureza e bem aceite tanto na biologia quanto na literatura de design. Esta ideia é propagada pela expressão “a função segue a forma”, ‘estrutura’ cunhada por Sullivan, Louis H. em 1896 (Cohen & Reich, 2016).

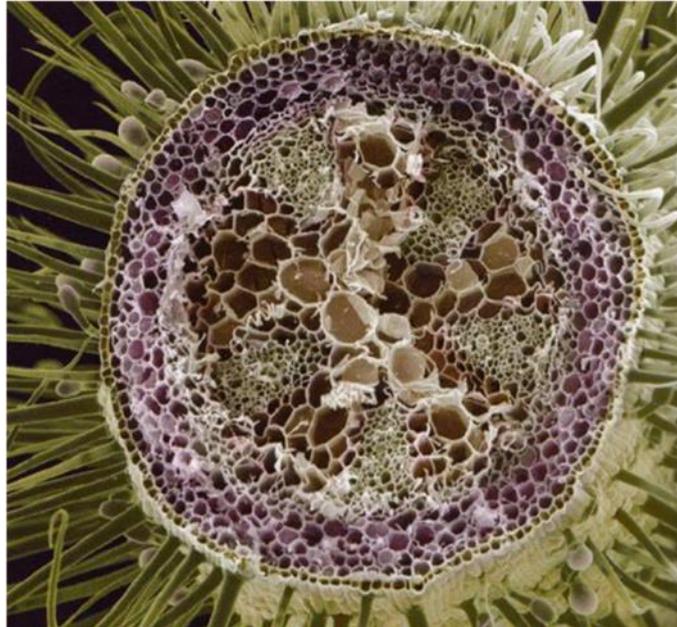
De acordo com Gleich, *et al.* (2002), algumas observações científicas da natureza tem atuado tanto no campo macroscópico como no microscópico. As implementações técnicas dentro da dimensão macroscópica foram capazes de obter êxito com a observação e utilização das técnicas disponíveis, isso funciona especialmente bem quando a função desejada está mais intimamente relacionada à sua forma ou estrutura e menos ao material que dá forma. Através dos casos analisados pelos autores, entre as inovações mais bem-sucedidas nesta vertente, por exemplo, estão as formas aerodinâmicas, as asas das aeronaves para gerar elevação e o paraquedas. Para a função de elevação de uma asa de aeronave, a sua forma/estrutura, acima de tudo, é que é decisiva. Sua realização técnica em um material não biológico não muda isso, o mesmo vale para estruturas de diversas configurações formais.

Contudo, a natureza faz bom uso da forma. Muitos projetos biomiméticos, como velcro, superfícies de efeito de lótus e peles inspiradas em tubarões, devem seu sucesso simplesmente à inteligente morfologia e escala dos materiais biológicos (Ahmar, *et al.* 2013 *apud* Dickinson, 1999).

A dimensão microscópica permite a observação das estruturas da natureza em níveis de detalhamento avançado. Em particular, a forma e a função no campo micro e nano biomimético parece estar se fundindo. Em muitos casos, somente com as possibilidades técnicas oferecidas pela microscopia eletrônica de varredura e transmissão é que é possível uma extensa realização e implementação técnica dos resultados derivados da dimensão micro e nano da vertente morfológica funcional (Gleich, *et al.* 2002). Um recorrente exemplo é representado pela anatomia celular vegetal das plantas em geral, que revela feixes compactados de vasos e células diferenciadas. O arranjo geométrico e a integração compactada produz uma estrutura complexa, resistente, mas flexível e capaz de movimento diferencial. Todas as células têm um papel estrutural além de outras funções, e a capacidade estrutural emerge de sua interação entre si. Como exemplo, no caule de um Geranium (Figura 23), as células ilustram uma variação na sua secção transversal e diferentes arranjos em

sucessivas hierarquias. Deste modo, têm um papel estrutural (como suportar a própria planta e resistir às cargas de vento em escala macro) além de distribuir carboidratos, hormônios e água ao mesmo tempo (escala micro).

Figura 23 - Arranjo celular do tecido vegetal de uma espécie de Geranium.



Fonte: Ahmar *et al.* (2013).

Cohen & Reich, (2016) aponta para um princípio básico de padrões de estruturas tubulares presente na natureza. Tais estruturas são caracterizadas por um cilindro oco, haste ou tubo. O cilindro oco aparece na pena dos pássaros, em caules de flores, bambus e juncos, caules de grãos, membros de insetos e longos ossos humanos, como o fêmur, a maioria das casas dos moradores da terra também apresenta um design tubular, assim como, a estrutura microscópica das células/fibras presentes no tecido vegetal de Agave (Araújo, 2015). Cohen & Reich (2016), descreve que o cilindro oco proporciona estabilidade contra a flexão e deformação e é ajustado para resistir à flexão em todas as direções. No caso de repetidas estruturas de tubos, cada tubo no arranjo funciona como um único tubo, distribuindo as tensões por toda a estrutura otimizando a resistência aos esforços mecânicos.

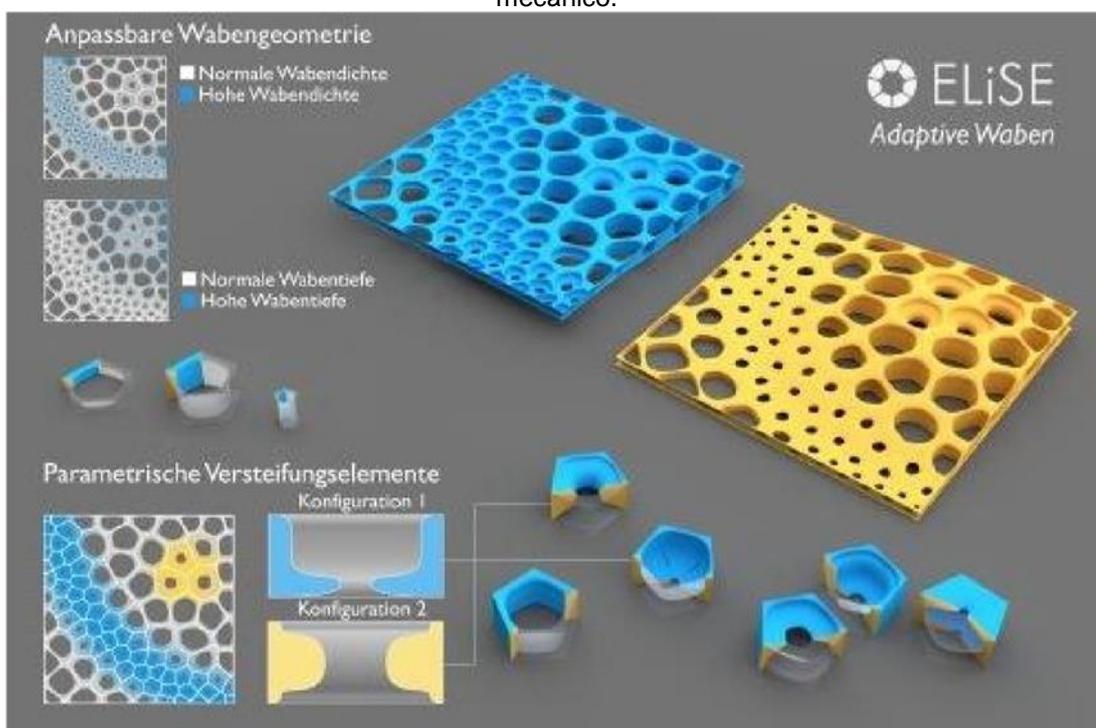
Neste sentido, em um processo de analogia e transferência no campo da biomimética, segundo Cohen & Reich (2016) comparadas às funções, as estruturas ou padrões são menos sujeitas a interpretações pessoais e a terminologias de domínio do campo em estudo. Embora as funções biológicas e tecnológicas sejam derivadas de diferentes terminologias, as estruturas são visuais e, portanto, menos subordinadas

a diferentes interpretações. Os padrões de estrutura-função, em particular, podem abstrair soluções de design da natureza para vários problemas. Portanto, os padrões podem ser a cadeia comum que conecta os campos da biologia e da tecnologia. Essas estruturas inspiraram uma nova geração de tecnologias inovadoras na comunidade de ciência, engenharia e design.

No entanto, em um contexto biomimético, Johnson *et al.* (2009) defendem que não há benefício simplesmente em copiar os designs da natureza, pois não se obtém nada além de versões limitadas das contrapartes biológicas. É improvável que uma madeira artificial, por exemplo, seja tão rentável quanto a madeira real. A inspiração biológica deve ter como objetivo extrair os bons projetos da natureza e implementá-los de uma maneira que agregue valor e funcionalidade aos nossos projetos mecânicos.

A empresa ELiSE desenvolveu uma estrutura paramétrica bioinspirada onde o enrijecimento automático de invólucros e volumes tem relação direta com o tamanho e a geometria de cada célula e são adaptados de acordo com a carga - por exemplo, células menores e mais fechadas, onde a carga é maior, transformando-se em células maiores e mais abertas, onde o carregamento é mínimo (Figura 24).

Figura 24 - Estrutura paramétrica bioinspirada com otimização da relação entre densidade e reforço mecânico.



Fonte: David Leidenfrost, ELiSE (2015).

Com o desenvolvimento contínuo da fabricação digital, o design biomimético é realmente o futuro para estruturas leves e eficientes. Como o processo, a fabricação digital unindo modelagem paramétrica e inclusão das estratégias bioinspiradas no início do processo de desenvolvimento de projeto, apresenta maior potencial de serem alcançadas soluções sustentáveis mais eficientes.

## 2.2 FABRICAÇÃO DIGITAL

A ligação entre design e fabricação sempre foi crucial para a arquitetura e o design industrial. Novas técnicas de manufatura, processos de montagem e materiais, muitas vezes provocam mudanças de paradigma no projeto. Antes da revolução digital, o designer gerenciava a complexidade dos projetos dividindo os componentes em partes individuais e estudando estratégias de montagem de partes por meio de modelos e desenhos em escala. Este processo era limitado a estruturas ortogonais e não tinha a capacidade de responder a formas complexas. A revolução digital liberou essa restrição ao integrar a saída do design diretamente à fabricação (Tedeschi, 2014).

O primeiro estágio da revolução digital se concentrou no controle do projeto por meio da geração de modelos tridimensionais digitais. Uma vez que os processos de construção são interpretados diretamente da geometria 3D, levam à criação de estruturas 3D. A ambição de traduzir diretamente uma ideia em realidade já é possível para objetos ou componentes de diversas escalas. Em outras palavras, é possível criar um objeto físico a partir de um modelo virtual 3D com técnicas de fabricação aditiva (Tedeschi, 2014).

Uma impressora 3D é uma máquina de fabricação assistida por computador (CAM) semelhante a um dispositivo CNC que cria objetos tridimensionais. Como uma impressora tradicional, uma impressora 3D recebe dados digitais de um computador como entrada. No entanto, uma impressora 3D constrói um modelo tridimensional a partir de materiais especiais. As impressoras 3D usam um processo chamado manufatura aditiva para formar objetos físicos camada por camada até que o modelo esteja completo. Isso é diferente da manufatura subtrativa, na qual uma máquina remodela ou remove material de um molde existente. Como as impressoras 3D criam modelos a partir do zero, elas são mais eficientes e produzem menos desperdício do que os dispositivos de fabricação subtrativos (Markose *et al.* 2022).

Como as impressoras 3D criam modelos a partir do zero, elas são mais eficientes e produzem menos desperdício do que os dispositivos de fabricação subtrativos. Neste sentido Damodaram (2018), exemplifica que para fabricação de baixo volume, peças de alta complexidade, componentes totalmente montados, peças personalizadas ou peças sensíveis ao tempo, o uso de uma impressora 3D profissional é a melhor escolha. Devendo escolher o método de impressão, as propriedades do material, acabamento da superfície e complexidade da peça mais adequado ao objetivo específico, em dada altura de um projeto de fabricação digital.

Conforme Seely (2004), a fabricação digital é empregada para processos de projeto e produção que utilizam desenhos assistidos por computador (Computer Aided Design - CAD), associados com manufatura auxiliada por computador (Computer Aided Manufacturing — CAM). Estas tecnologias correspondem a programas computacionais que permitem desde um simples controle vetorial até a programação e manipulação paramétrica de modelos virtuais. Abrangem também processos com máquinas que podem construir fisicamente modelos através de camadas ou planos geométricos usando materiais específicos (BARROS, 2011). Segundo o autor, ao abordar impressoras e impressão 3D, os processos de produção de artefatos físicos utilizando modelos virtuais podem ser classificados conforme a sua finalidade, conforme o número de eixos que operam ou de acordo com a maneira como produzem os objetos. O meio de emprego para produzir, testar e avaliar um modelo pode ser definido como prototipagem rápida.

Conforme Ashby & Johnson (2011), a prototipagem rápida se dá através de sistemas aditivos, onde ocorre a solidificação ou deposição da matéria prima em camadas, podendo realizar formas tridimensionais complexas e possibilitando a materialização de artefatos com designs bioinspirados na natureza. Desta forma são produzidos modelos físicos e artefatos com materiais diversos, principalmente sintéticos e outros naturais.

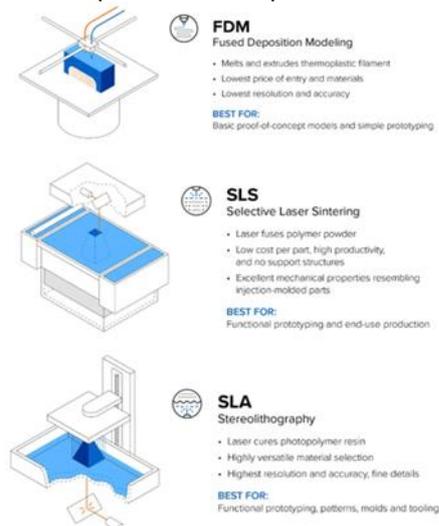
Barros (2011) descreve a impressão tridimensional da seguinte forma: É um processo baseado na tecnologia das impressoras a jato de tinta. Ele consiste em depositar o material (polímeros termoplásticos) através dos cabeçotes de impressão sobre uma área de trabalho que pode movimentar-se conforme necessário. Além disso, pode compor artefatos físicos coloridos e nas tecnologias mais avançadas, mesclar diferentes tipos de materiais.

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

Em alguns processos de fabricação digital do tipo aditivo, os artefatos vão se materializando através da formação de camadas seriadas de material, ocorrendo assim, a deposição/ sinterização/ polimerização do material de insumo apenas o mínimo necessário na utilização das impressoras 3D. Como descrito por Ashby & Johnson (2011), na modelagem por deposição de material fundido, um fio corrente de termoplástico é depositado por um cabeçote de extrusão biaxial aquecido. O material é extrudado do cabeçote aquecido e depositado em camadas, ocorrendo desta forma uma fusão térmica, aonde o material irá se solidificar posteriormente.

De acordo com Celani (2008) as técnicas de fabricação digital podem ser classificadas em três categorias: aditivas, subtrativas e formativas. As técnicas aditivas produzem objetos por meio da deposição sucessiva de camadas de material com baixos índices de perda em relação aos processos subtrativos. Entretanto é um conceito relativo, a depender do artefato de impressão ou a ser usinado numa CNC, um artefato impresso com muitos suportes acaba por ter um grande desperdício também. Existem diversos processos de fabricação aditiva, fabrico por filamento fundido (FFF ou FDM), e sinterização seletiva a laser (SLA), estereolitografia (SLA), dentre outros. São exemplos:

Figura 25 - Tipos de impressão 3D experimentadas nesta pesquisa.



Fonte: FormLabs (2022)

Os processos por adição, descritos acima apresentam suas possibilidades de construção de artefatos diversos, assim como também possuem limitações. Contudo, Byrne, *et al.* (2018), relata que os processos de manufatura aditiva (AM) eliminaram muitas restrições tradicionais de forma e estrutura que foram induzidas por processos tradicionais como usinagem, fundição e fabricação de moldes e matrizes. O uso de técnicas de deposição de material multimaterial e graduado permitirá propriedades sob medida que não poderiam ser realizadas antes, de uma forma mais sustentável e econômica.

De fato, as tecnologias dos processos de manufatura aditiva possivelmente podem beneficiar o desenvolvimento de materiais bioinspirados como insumo para impressão, que sejam adaptáveis ao tipo de processo de impressão específico de cada impressora. Levando em consideração a economia de matéria e energia através da aplicação de materiais mais leves e resistentes.

Em um projeto de design biomimético, por exemplo, ao se observar em escala micro, recursos de MEV permitem obter dados biológicos precisos, correlacionando estes métodos de geração de dados com a combinação da computação e modelagem digital, por exemplo, as imagens obtidas são transferidas para um computador e editadas. Então, é possível parametrizar os dados, ou seja, simplificar as formas dos detalhes de interesse das amostras. O esboço estrutural (delineação) do elemento principal através de inputs e outputs permite uma interação entre a ideia criativa e as informações adquiridas. Nesta fase, a informação é "traduzida" em linguagem técnica através da parametrização.

As atuais tecnologias de manufatura precisam ser desenvolvidas para atingir a capacidade tecnológica de produzir texturas e estruturas complexas e biologicamente inspiradas, e cada vez mais biomateriais. Byrne, *et al.* (2018) procuram fornecer insights sobre o potencial de tecnologias e sistemas avançados de manufatura inteligente e sustentável no contexto do uso e integração de princípios, funções e recursos biológicos e bioinspirados. Com relação ao trabalho desenvolvido pelos autores, a definição desenvolvida para biologicalização na manufatura, envolve os fatores e direcionadores relacionados aos elementos-chave da cadeia de valor de fabricação de tecnologias e sistemas de manufatura em geral. O escopo do trabalho apresentado refere-se à transformação biológica na fabricação no campo da manufatura, que inclui: materiais e superfícies; design de produtos e sistemas de

fabricação; processos de fabricação, máquinas-ferramenta, robôs e operações de montagem; e sistemas de produção e cadeias de fornecimento e organizações.

Assim com Lepora, *et al.* (2013) aborda a computação biologicamente inspirada. Byrne, *et al.* (2018) abordam a digitalização como plataforma para a biologicalização na manufatura. Alguns dos aspectos de alto nível da nova fronteira de biologicalização na manufatura que estão se abrindo como próxima fase dos desenvolvimentos da digitalização e da Indústria 4.0 incluem:

- . Novos desenvolvimentos em química e novos materiais;
- . Novos produtos usando novos biomateriais;
- . Processos industriais clássicos sendo influenciados com potencial para desenvolver processos industriais bio-inspirados inteiramente novos;
- . Potencial para novos equipamentos de fabricação bio-inspirados, incluindo robótica, máquinas, ferramentas e equipamentos de medição, e;
- . Novos modelos bio-inspirados para organização de produção, incluindo sistemas de manufatura e cadeias de suprimentos.

No processo de escolhas de materiais para manufatura aditiva, como esclarece Daya, (2017), o desempenho sustentável pode se tornar parte integrante do processo de escolha de materiais e visa facilitar escolhas por materiais mais sustentáveis durante o processo de desenvolvimento de produtos. A autora analisou trinta e seis tipos de filamentos para manufatura aditiva de impressão 3D que foram examinados através de uma ferramenta que mapeia as compensações entre os custos de material, desempenho e impacto ambiental, onde para cada filamento, a descrição, composição básica, propriedades mecânicas, diretrizes de impressão e riscos foram coletados. No entanto, tornou-se claro que existem barreiras significativas para a integração de escolhas materiais sustentáveis no processo de desenvolvimento de produtos que devem ser superadas para fazê-lo. Barros (2017) identifica que uma destas barreiras está mais relacionado com a maneira que as pessoas usam a tecnologia, o que geralmente gera mais impactos do que a própria tecnologia ou simples escolhas dos materiais.

De fato, o interesse pela manufatura aditiva aumentou muito desde 2013. No processo de desenvolvimento de produtos, com a impressão 3D, a alta complexidade da peça pode ser obtida sem custos adicionais e ainda fazer uso de matéria-prima de maneira eficiente e escolhas materiais mais sustentáveis. Wimmer *et al.* (2015) analisaram os desenvolvimentos na impressão 3D no que diz respeito ao uso de

materiais naturais. Segundo os autores, materiais biológicos de impressão, a exemplo de filamentos com partículas de madeira, são mais utilizados por conta da aparência, o que parece ser de maior prioridade do que o conteúdo de madeira como tal. Também exigem cuidados com as especificações de uso das impressoras e dos materiais para que se obtenha um resultado de impressão mais eficiente e econômico. Filamentos de impressão de madeira requerem partículas muito finas para garantir um processo de impressão homogêneo, sem o bloqueio do bico.

Wimmer *et al.* (2015) ainda descreve formas distintas de se incorporar as características e propriedades da madeira em materiais para manufatura aditiva bioinspirados. São apresentados três exemplos de como a madeira pode chegar à impressão 3D: desenvolvimento de filamentos de base biológica, impressão de objetos 3D tipo madeira (mimetizando a aparência dos veios e feixes/ texturas da madeira) e a realização de "auto replicação" da madeira com microtomografia computadorizada combinando impressão 3D. Segundo os autores, a "auto replicação de madeira" é uma nova abordagem que promove pesquisa em biomimética. O 3D relacionado à madeira, podendo citar ainda, metal, pó de café, e outros filamentos com diferentes tipos de resíduos, que certamente terá um futuro, mas provavelmente ocupará o nicho de mercado para, por exemplo, produtos de madeira de formato complexo, e produtos mais sustentáveis (Wimmer *et al.* 2015). A (Figura 26) apresenta exemplos de filamento de base biológica: madeira + PLA e aplicações.

Figura 26 - Acima: exemplo de material de impressão 3D para manufatura aditiva por extrusão de filamento composto por materiais biodegradáveis, madeira e PLA. Abaixo: Projeto Shapes of Sweden (Lilian Van Daal), bioinspiração nas raízes das árvores. Estrutura impressa em 3D com biomaterial de pinheiro, que atende às funções de flexibilidade, resiliência e estabilidade (imagem abaixo).



Fontes: <https://tobuya3dprinter.com/expect-3d-printing-wood/#prettyPhoto> (2018); <https://www.lilianvandaal.com/shapes-of-sweden> (2015).

É claro que as técnicas de manufatura aditiva têm suas próprias restrições, no entanto com a maioria das restrições geométricas removidas, todos os tipos de formas otimizadas da natureza podem ser usadas em combinação com materiais “projetados”, entretanto aqui alguns os processos que têm suportes podem ser limitativos. Uma nova geração de máquinas-ferramentas que combinam manufatura aditiva e subtrativa está em desenvolvimento. Já a manufatura aditiva tem o potencial de superar muitos paradigmas tradicionais de manufatura, porque torna atraente a produção de peças com um grau muito maior de complexidade e integração e, portanto, reduz o número de peças para a construção de um produto (Byrne, *et al.* 2018).

A fabricação digital no contexto da biomimética tem sido uma abordagem inovadora para traduzir os princípios e estratégias encontrados na natureza em projetos e produtos tangíveis. Através da utilização de tecnologias avançadas, como impressão 3D e fabricação digital, é possível explorar a complexidade e eficiência dos padrões biomiméticos, criando estruturas e componentes inspirados em formas orgânicas e funcionamento biológico. Essa abordagem baseada na fabricação digital proporciona uma maior flexibilidade na produção e permite a fabricação de produtos altamente personalizados e adaptáveis. Além disso, a aplicação do design paramétrico, que é uma técnica de projeto baseada em parâmetros e algoritmos, torna-se uma complementação natural nesse processo. O design paramétrico possibilita a geração rápida de variações de projeto, ajustando parâmetros de forma intuitiva e automatizada. Essa combinação entre fabricação digital e design paramétrico impulsiona a criatividade e a inovação, permitindo a criação de soluções mais eficientes, sustentáveis e inspiradas pela natureza.

### 2.3 DESIGN PARAMÉTRICO

O parametrismo tem sua origem no design paramétrico, visa organizar e articular a crescente diversidade e complexidade de sistemas naturais. Implica que todos os elementos de artefatos de design e arquitetura são parametricamente manipuláveis. Isso implica uma mudança ontológica fundamental nos elementos básicos e constituintes de projeto. Não está limitado ao uso de figuras geométricas rígidas - retângulos, cubos, cilindros, pirâmides e esferas - parametrismo as formas são entidades geométricas, blocos de construção geométricos fundamentais para

sistemas dinâmicos, orgânicos que podem reagir a 'atratores', e ser produzidos para interagir uns com os outros por meio de scripts. O objetivo é formar uma ordem estrutural variada e complexa, usando os scripts para diferenciar e relacionar todos os elementos e subsistemas de um projeto (Schumacher, 2010).

Aspectos do parametrismo têm sido usados em design industrial, design arquitetônico, design de interiores e urbanismo. Se baseia nas restrições de uma equação paramétrica e permite realizar emulações de sistemas naturais para fins de projetos. Uma das características determinantes é que o parametrismo implica que todos os elementos do projeto se tornam parametricamente variáveis e mutuamente adaptáveis, através de computadores, programas de algoritmos e geometria computacional.

A geometria computacional se preocupa com o projeto e análise de algoritmos para problemas geométricos. Além disso, outras áreas da ciência da computação mais orientadas para a prática de design dão origem a problemas que são inerentemente geométricos. Esta é uma das razões pelas quais a geometria computacional desperta grande interesse de investigação sendo uma área bem estabelecida (Aurenhammer, 1991).

De acordo com Rattes (2015), o design paramétrico ainda é mais difundido em projetos de arquitetura do que de design de produto, entretanto toma proporções maiores nesta área a cada dia. Com ele, utiliza-se de softwares CAD que trabalham com algoritmos generativos e por meio de parâmetros, sejam estes de qualquer ordem, mas que estejam fundamentados, pois ajudam a grupos de designers e arquitetos utilizar a computação como um processo, e não mais uma mera representação do objeto final. Pode-se alterar profundamente o sentido do projeto, de acordo com as entidades (parâmetros) que completam a complexidade do projeto.

Esta geração de formas e estruturas por meio de parâmetros, facilitam e aceleram o processo de criação, pois permitem a transposição da geometria da natureza ao ambiente computacional (CAD), auxiliando na realização de analogias entre o sistema natural e o design. Além de se adequarem com fidelidade ao contexto de complexidade, pelo fato de conceber formas complexas (sistema natural) e a capacidade de ser ajustável por parâmetros, conforme a necessidade ou condições (Rattes, 2015).

Após compreender os fundamentos do design paramétrico, é possível explorar ainda mais suas capacidades por meio de ferramentas específicas, como o

Grasshopper. O Grasshopper é um plugin de modelagem paramétrica para o software de design computacional Rhinoceros 3D. Ele permite a criação de algoritmos visuais que definem relações e lógicas entre os elementos de um projeto, oferecendo maior flexibilidade e controle no processo de design. Com o Grasshopper, é possível estabelecer parâmetros e regras personalizadas, criando uma abordagem de design mais intuitiva e interativa. Ao adentrar o universo do Grasshopper, o designer é capaz de explorar novas possibilidades, experimentar variações e otimizar suas soluções de maneira eficiente. Deste modo, a prática do design paramétrico no Grasshopper amplia o potencial criativo e a eficácia do processo de design, oferecendo novas ferramentas e recursos para o desenvolvimento de projetos complexos e inovadores.

### **2.3.1 Grasshopper**

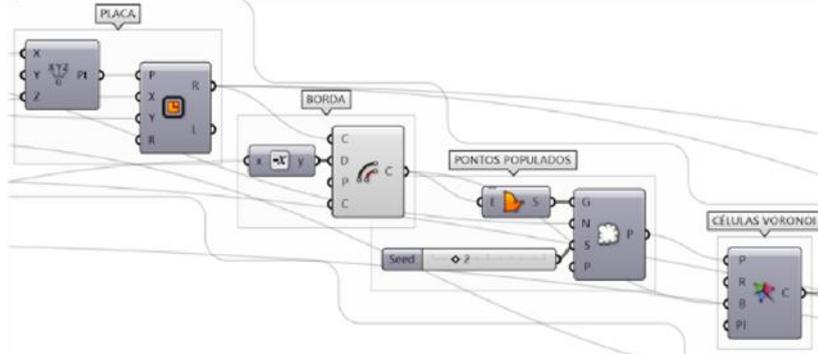
Segundo Akos, *et al.* (2014) Grasshopper é um editor de “programação visual” em forma de plug-in integrado ao Rhino3D desenvolvido pela Robert McNeel & Associados. Possui um ambiente de modelagem versátil usado por profissionais criativos em uma diversificada variedade de campos, incluindo arquitetura, engenharia, design de produto, entre outros. Em paralelo, Grasshopper e Rhino oferecem a oportunidade de definir controle preciso a modelos paramétricos, de explorar os fluxos de trabalho de design generativos, e de desenvolver lógica de programação de alto nível - tudo dentro de uma interface gráfica intuitiva.

Trata-se de uma linguagem de programação visual onde se trabalha com diversos tipos de objetos, parâmetros e componentes. Atua com o conceito de input e output: Input pode ser traduzido como “entrada de dados”. Os objetos do Grasshopper requerem dados de entrada, há blocos que permitem indefinidas entradas de dados que podem ser estabelecidas pela necessidade do projeto. Output pode ser traduzido como “saída de dados”. Uma vez estabelecido os dados de entrada e o objeto, este por sua vez, irá estabelecer dados de saída. Os dados de saída têm relação direta com a ação representada pelo objeto (Akos, *et al.* 2014).

Os parâmetros são caixas que normalmente possuem entrada e saída, armazenam dados - números, cores, geometria, etc. Os parâmetros de geometria podem fazer referência a uma geometria a partir do Rhino, ou herdar a geometria a partir de outros componentes do Grasshopper. Os parâmetros de entrada são objetos de interface dinâmicos que permitem interação com a sua definição. O number slider,

representa um número que pode ser definido pelo usuário a partir de um domínio. Os componentes executam ações com base nos dados de entrada que recebem. Há muitos tipos de componentes para diferentes tarefas (AKOS, *et al* 2014). Cada componente pode ser considerado como um módulo pois carrega uma programação que tem um resultado específico.

Figura 27 - Exemplo da interface dos componentes no Grasshopper.



Fonte: Autor (2021).

Objetos “deslizantes” controlam a geometria de forma natural e intuitiva, a conexão que se faz entre este objeto de entrada com o que se visualiza no Rhino é instantânea. Um dos benefícios no uso do Grasshopper é que a visualização da geometria é uma representação leve da solução que é atualizada automaticamente (Akos, *et al.*, 2014).

Figura 28 - Caixa de parâmetros da estratégia de design paramétrico do Agave.



Fonte: Autor (2021).

De acordo com Aurenhammer (1991) uma das estruturas de dados fundamentais em geometria computacional bastante explorado por designers, arquitetos, engenheiros, é o diagrama de Voronoi. Georgy Voronoi (1868 - 1908), inventor de um método original de diagramas, publicou vários artigos científicos importantes sobre a teoria dos números, descreveu um método de diagramas, ou

polígonos, que ficou conhecido como o método dos diagramas de Voronoi. Na era digital esse método e suas modificações encontraram novas aplicações. O tema “Voronoi” tem se tornado mais popular nas últimas décadas, e o método dos diagramas de Voronoi e suas modificações são amplamente descritos em manuais e artigos científicos (Pokojski, W. & Pokojska, P. 2018).

O diagrama de Voronoi tem aplicações práticas em diferentes campos, desde a matemática, física, arquitetura, design e no campo das artes, despertando seu fascínio por sua estética intrínseca. Graças ao desenvolvimento de ferramentas digitais usadas no processo de design, o diagrama de Voronoi é um exemplo das principais tendências em design de arquitetura, permitindo, por exemplo, descrever um sistema de auto-organização de estruturas biológicas por meio digital (Nowak, 2015).

Os métodos de design moderno dependem cada vez mais da compreensão da natureza dos processos e princípios de auto-organização de estruturas biológicas e sua representação usando modelos matemáticos que podem ser aplicados em tecnologia e fabricação digital. Como resultado, os elementos de design biônico desempenham um papel mais significativo na formação da arquitetura contemporânea e do design. O desenvolvimento da tecnologia da computação tornou possível criar estruturas e superfícies mais complexas e complicadas inspiradas em formas naturais (Nowak, 2015).

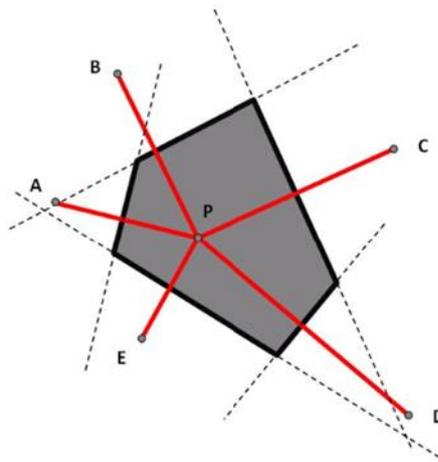
Diagramas de Voronoi é um conjunto associado de regiões em torno de pontos no plano euclidiano. Dentre várias definições matemáticas e aplicações diversas, também são utilizados em computação gráfica para gerar alguns tipos de texturas orgânicas. Segundo Tedeschi (2014) o diagrama de Voronoi é uma decomposição de um espaço métrico de acordo com critérios de proximidade. Dado algum número de pontos no plano, seu diagrama de Voronoi divide o plano de acordo com o vizinho mais próximo.

Para Nowak (2015) a inspiração para a discretização de uma superfície ou estrutura, ou seja, transformar uma distribuição de funções contínuas em unidades individuais, utilizando o diagrama de Voronoi é cada vez mais aplicada na modelagem de artefatos bioinspirados. Como um problema matemático, a divisão do espaço fascina cientistas e investigadores. Conseqüentemente, designers usam as células espaciais de Voronoi também na modelagem das formas estruturais ou espaciais e como padrões aplicados em projetos. A utilização de modelos matemáticos representa

a estrutura e organização das formas encontradas na natureza, sendo cada vez mais utilizada nos projetos multidisciplinares. O projeto das estruturas e elementos tanto na arquitetura quanto no design usando métodos de geometria computacional cria novas oportunidades para projetos pela tesselação de Voronoi.

Ainda, segundo Nowak (2015), o diagrama de Voronoi é um gráfico que consiste em células criadas a partir de células, das arestas e nós do diagrama de Voronoi (um ponto equidistante de pelo menos três centros. O diagrama de Voronoi é constituído de segmentos e meias-linhas que constituem as bordas das áreas de Voronoi para cada um dos centros. A área de Voronoi é definida para cada centro como um conjunto de pontos na planície que estão mais próximos de um determinado centro.

Figura 29 - Geometria de uma célula de Voronoi.



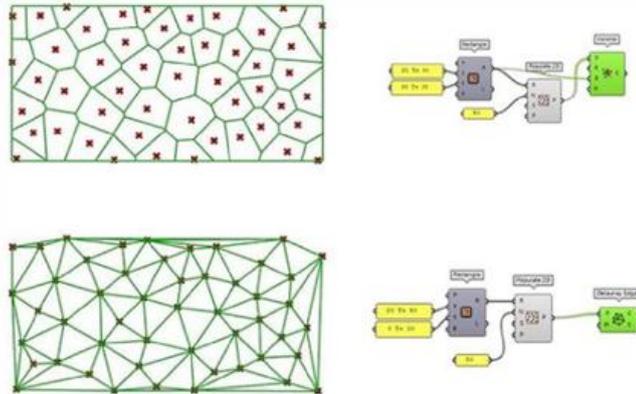
Fonte: Pokojski, W. & Pokojaska, P (2018).

Em outras palavras, o Voronoi forma células e núcleos de células representados no código como pontos, e a partir desses pontos é feita a divisão pelas mediatrizes, entre cada ponto é formado uma linha mediatriz e quando se juntam todas as linhas mediatrizes de todos os pontos é formada a célula de Voronoi.

Graças ao desenvolvimento de ferramentas digitais usadas no processo de design, os diagramas de Voronoi são usados na arquitetura moderna e no design de produtos, uma infinidade de programas de computador permite (por exemplo, Grasshopper) para um amplo espectro de possibilidades de modelagem, na busca inovadora de novas formas de criação de algoritmos para construir estruturas ideais. A modelagem das formas arquitetônicas e estruturais a partir dos Diagramas de

Voronoi é uma das tendências mais importantes na investigação de novas formas de expressão no projeto arquitetônico.

Figura 30 - O mais simples entre os algoritmos que compõem o diagrama de Voronoi é a triangulação de Delaunay. O desenho é composto de triângulos e círculos conectando todos os pontos em um conjunto de três pontos. Embora pareça aleatório, há apenas um resultado



Fonte: <https://www.instagram.com/p/CNGA5DwBIMb> (2021).

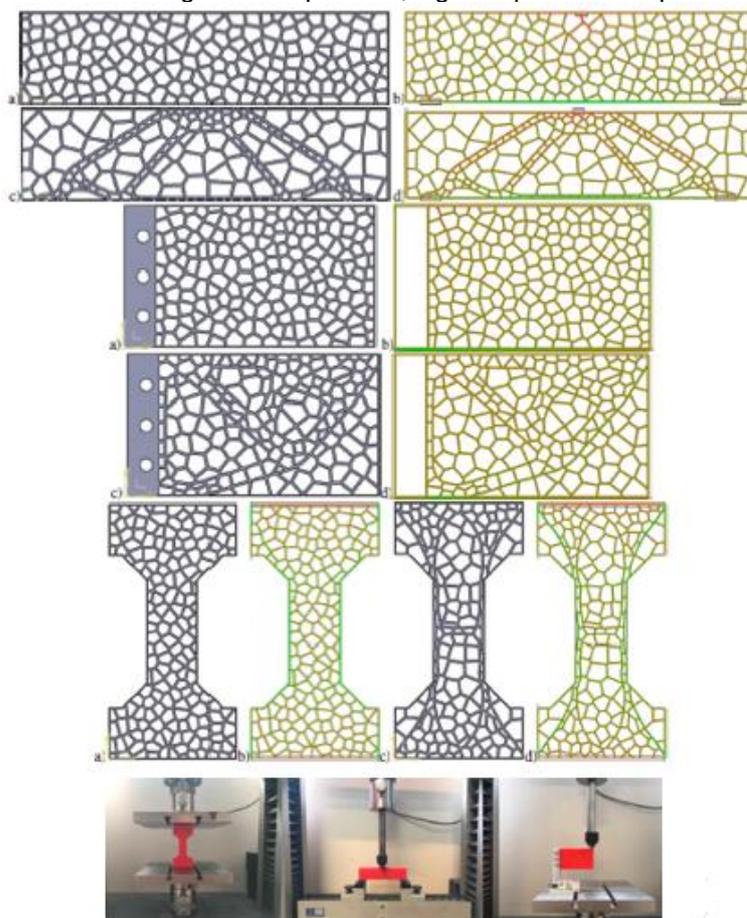
Os diagramas de Voronoi também podem ser usados para transformar uma distribuição contínua de unidades celulares individuais em formas espaciais ou estruturais, levando à criação de estruturas 3D. Como resultado, é possível criar objetos com um design natural e notável inspirados nas formas encontradas na natureza ou aplicando sistemas naturais de auto-organização de estruturas biológicas nas formas geométricas clássicas. Conseqüentemente, algoritmos que simulam processos de formação natural são cada vez mais usados em campo, modelando princípios dos diagramas de Voronoi.

Com base na eficiência de estruturas de sistemas naturais, Öncel, A. & Yamam, U. (2019), realizaram estudos onde verificou-se que as relações resistência-peso de artefato podem ser otimizados para atender requisitos de projeto através da aplicação de diagramas de Voronoi em estruturas internas bioinspiradas construídas por células ocas. Os autores desenvolveram um código generativo para população de células de Voronoi com base na otimização da topologia do volume do artefato, dividido em regiões de maior densidade. Com condições específicas de carga e suporte, de acordo com os valores médios de tensão nessas regiões correspondentes, a quantidade de células de Voronoi geradas nas zonas estruturalmente críticas é maior do que em outras.

Através de estratégias computacionais de design paramétrico com plug-ins do Grasshopper, Öncel, A. & Yamam, U. (2019), utilizaram um algoritmo evolutivo para

seleção de opções de estruturas otimizadas disposto em padrões de Voronoi de acordo com os requisitos do projeto, deste modo encontra-se o resultado otimizado para melhores desempenhos mecânicos. Modelos impressos através de fabricação por extrusão de filamento foram ensaiados para verificar a flexibilidade das estruturas geradas. Os resultados indicam que o método é aplicável para gerar padrões otimizados de preenchimento de Voronoi em uma dada geometria. A abordagem proposta foi testada e o desempenho do método é comparado com relação aos casos com distribuições aleatórias de sítios de Voronoi. No geral, o padrão Voronoi de preenchimento otimizado exibiu maior desempenho mecânico do que os padrões de preenchimento aleatório (Figura 32).

Figura 31 - (a) Modelos de comparação apresentando as seções transversais com células de Voronoi distribuídas aleatoriamente. (b) e (d) Visualização da relação entre a tensão axial nos elementos da viga e a tensão de escoamento do material. (c) Distribuições otimizadas de células de Voronoi. Abaixo modelos de testes: viga de compressão, viga simplesmente apoiada e viga cantilever.



Fonte: Adaptado de Öncel, A. & Yamam, U. (2019).

## 2.4 DESIGN DE MATERIAIS BIOINSPIRADOS - PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

De acordo com Callister (2000), a ciência e a tecnologia dos materiais, em conjunto com a engenharia, desenvolveram combinações de materiais individuais para obter propriedades únicas. Essas combinações envolvem a junção de dois ou mais materiais distintos em um único material, denominado compósito. Os compósitos são materiais que consistem em uma matriz contínua, geralmente polimérica, reforçada com partículas, fibras ou outros materiais. Essa combinação permite a obtenção de propriedades mecânicas e físicas superiores às dos materiais individuais. Ainda segundo o autor, grande parte dos materiais compósitos é constituída por apenas duas fases. As características dos compósitos são uma função das propriedades das fases constituintes, das suas quantidades relativas e da geometria da fase dispersa.

1º Fase matriz, que é contínua e envolve a outra fase; 2º Fase dispersa, que no contexto, “geometria da fase dispersa”, subentende-se a configuração das partículas ou fibras, tamanho, disposição e sua orientação. O autor define que os materiais compósitos consistem em três categorias principais, que são os compósitos reforçados com partículas, os compósitos reforçados com fibras e os compósitos estruturais (Callister, 2000).

Os compósitos mais importantes tecnologicamente falando, são aqueles em que a fase dispersa encontra-se na forma de fibra. Compósitos reforçados com fibras são projetados e desenvolvidos com o objetivo de se incluir resistência, rigidez em relação ao seu peso, ou maior flexibilidade. Os compósitos reforçados com fibras são subclassificados de acordo com o comprimento da fibra (Callister, 2000).

O arranjo ou orientação das fibras em relação umas às outras, a concentração das fibras e sua distribuição têm influência significativa sobre a resistência e sobre outras propriedades dos compósitos reforçados com fibras. Em relação à orientação das fibras, são possíveis dois extremos: (1) um alinhamento paralelo do eixo longitudinal das fibras em uma única direção e (2) um alinhamento totalmente aleatório. Normalmente, as fibras contínuas estão alinhadas (a), enquanto as fibras descontínuas podem estar alinhadas (b), orientadas aleatoriamente (c) ou parcialmente orientadas (Callister, 2000).

Um compósito estrutural é composto normalmente tanto por materiais homogêneos como por materiais compósitos, cujas propriedades dependem não somente das propriedades dos materiais constituintes, mas também do projeto geométrico dos vários elementos estruturais. Os compósitos laminares e os painéis sanduíche são dois tipos de compósitos estruturais mais comuns (Callister, 2000).

Callister (2000) define um compósito laminar como sendo um composto de chapas ou painéis bidimensionais possuindo sua direção objetivando a alta resistência. Os laminados também podem ser construídos empregando-se materiais na forma de tecidos ou tramas, dentre outros. Estes materiais são inseridos dentro de uma matriz, configurando um compósito laminar que possui uma resistência consideravelmente alta em diversas direções no plano bidimensional.

Compósitos reforçados por partículas através de dispersão são materiais que envolvem a adição de partículas reforçadoras em uma matriz polimérica. Essas partículas podem ser de diferentes materiais, como fibras sintéticas ou naturais. No caso das fibras naturais, como fibras de celulose, sisal, juta, bambu, entre outras, elas são amplamente utilizadas como reforço em matrizes poliméricas para a produção de compósitos. As fibras naturais são adicionadas à matriz polimérica com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas, como resistência à tração, rigidez e resistência ao impacto. A dispersão adequada das fibras naturais na matriz é realizada por meio de técnicas de processamento, como mistura, moldagem por compressão, extrusão ou moldagem por injeção.

Os compósitos reforçados com fibras naturais oferecem benefícios significativos, como menor peso, maior resistência e menor impacto ambiental em comparação aos compósitos reforçados com fibras sintéticas. Além disso, as fibras naturais são uma alternativa sustentável e de baixo custo para reforçar matrizes poliméricas, contribuindo para a busca por soluções mais sustentáveis na indústria de materiais. Portanto, as fibras naturais estão dentro do escopo dos compósitos reforçados por partículas através de dispersão, oferecendo uma gama de possibilidades para o desenvolvimento de materiais com propriedades mecânicas aprimoradas e sustentabilidade.

A manipulação de materiais é uma tarefa desempenhada a tempos pela humanidade, para em seguida, serem aplicados no design de artefatos. A área de design de materiais como uma demanda da ciência e da tecnologia à inovação com o avanço do conhecimento na ciência e tecnologia dos materiais possibilitou a

manipulação e a criação de novos materiais com melhores propriedades em atendimento a aplicações específicas e a biomimética tem contribuído fortemente nesta área para soluções sustentáveis (Müller *et al.*, 2018).

Compósitos formados por matrizes poliméricas e fibras vegetais constituem, na atualidade, uma das maiores áreas de interesse na investigação de materiais alternativos. Este interesse surgiu através de uma maior conscientização, da necessidade de preservação do ambiente e de fontes naturais. Neste sentido, quando fibras vegetais são associadas com resinas derivadas de óleos vegetais, fazem parte de uma classe especial de materiais chamada de compósito biodegradável, formado por materiais derivados de fontes renováveis. A fibra de sisal mostra-se promissora no desenvolvimento de materiais compósitos devido ao seu baixo custo, boas propriedades mecânicas, fácil processamento e disponibilidade (Silva, 2003).

Paula *et al.* (2022) têm se concentrado na caracterização de compósitos de espuma de poliuretano, explorando diferentes métodos de produção e parâmetros. Isso inclui a análise de compósitos de expansão livre e limitada, bem como compósitos contendo fibras naturais curtas de Sisal e variações nos parâmetros de prensagem. Estudos envolvendo diversas fibras e adesivos de poliuretano derivados de óleos vegetais sugerem que compósitos poliméricos reforçados com fibras são adequados para uma variedade de aplicações, incluindo móveis, artesanato e peças estruturais (Silva *et al.* 2019).

Ao mesmo tempo cresce o interesse por compósitos bioinspirados, que fazem uso de materiais naturais e biodegradáveis, os compósitos reforçados com fibras naturais para aplicações estruturais têm sido amplamente pesquisados por cientistas e engenheiros nas últimas décadas por sua aplicabilidade em diferentes setores industriais devido à sua natureza sustentável (Kopparthy & Netravali, 2021).

De acordo com Paula *et al.* (2022), a combinação de espuma de poliuretano derivada de óleos vegetais com serragem de madeira e fibras de sisal apresenta um potencial considerável para aplicações na indústria de móveis e na construção civil. Isso ocorre devido à combinação de leveza, biodegradabilidade, ausência de solventes tóxicos e sustentabilidade ambiental desses materiais.

Dessa forma, a bio utilização (uso da matéria-prima biológica) é viável desde que favoreça a construção de objetivos visando a sustentabilidade do projeto e apresente benefícios ou redução de danos ao ecossistema em sua utilização. Essa

abordagem é bem sucedida quando relaciona as características da estrutura biológica com as propriedades do material biológico (Byrne *et al.*, 2018).

Vivemos em um mundo de materiais, assim como ocorre na natureza, porém a grande maioria dos materiais utilizados pelo ser humano no século XXI são sintéticos/artificiais, ou são materiais naturais transformados a ponto de perderem suas características de origem. Materiais são a matéria-prima do design, que através da história, ditaram as oportunidades e os limites do design. São os materiais que dão substância a tudo que vemos e tocamos. Nossa espécie *Homo sapiens* - é diferente das outras talvez mais significativamente pela habilidade de projetar, produzir “coisas” a partir de materiais, e pela capacidade de enxergar um pouco mais além com o desenvolvimento de novos materiais, benéficos aos homens, porém danosos para o meio ambiente. Novos desenvolvimentos em materiais e processos são fontes de inspiração para designers de produto porque sugerem novas soluções técnicas, visuais, táteis, esculturais e espaciais para o produto (Ashby & Johnson, 2011).

De acordo com Byrne *et al.* (2018) é universalmente reconhecido que o progresso da civilização sempre esteve intimamente ligado ao desenvolvimento e aplicação de novos materiais com características cada vez mais aprimoradas. Desde os tempos antigos até hoje, uma ampla gama de novos materiais surgiu. Polímeros podem ser naturais, como goma-laca, âmbar, lã, seda e borracha natural, incluindo as fibras e são usados há séculos. Podem ser biológicos, como a teia de aranha e sintéticos como baquelite, nylon, neoprene, borracha sintética, silicone e muitos mais. Eles estão em toda parte e desempenham um papel essencial na vida cotidiana. Contudo, sua aplicação requer um conhecimento profundo de sua estrutura e propriedades. Além disso, aplicações particularmente notáveis podem ser realizadas usando materiais multifuncionais inspirados em biologia (bioinspiração para superestruturas complexas) que podem fornecer recursos e funções excepcionais.

Em relação aos aspectos para seleção dos materiais no design de produtos, Ashby & Johnson (2011) organizam os diferentes tipos de materiais através de famílias, classes, etc. Assim como, Lima (2006), que organiza os materiais através da classificação e propriedades dos materiais. As propriedades são estruturadas através das características físicas, mecânicas, térmicas, ópticas, de processamento, ecológicas, etc. Na seleção dos materiais, devem-se atender os requisitos exigidos para um produto em todo o seu ciclo de vida, o que envolve sua transformação, seu

funcionamento, sua comercialização, seu uso (manipulação e manutenção) e finalmente o desuso/ reuso e reciclagem.

Deste modo, confiamos nas propriedades inerentes de um material para introduzir força, elasticidade e assim por diante em um produto. Se precisarmos melhorar a resistência de uma ponte, fabricamos aço mais resistente ou usamos mais material. Porém, nossa dependência das propriedades do material para funcionalidade resulta em produtos multimaterial que, entre outras coisas, desestimulam a desmontagem, a reciclagem e a decomposição. Hoje, existem mais de 300 tipos de polímeros comerciais usados para fabricar produtos, muitos dos quais derivam de recursos naturais cada vez mais esgotados, exigindo grandes quantidades de energia e processos contaminantes para produzir, e acabam em aterros sanitários (Kapsali, 2016).

Para Byrne *et al.* (2018) os materiais biológicos existentes podem fornecer soluções muito interessantes para novos desenvolvimentos de materiais inspirados na biologia, como alta dureza, materiais leves e resistentes. Combinando dois ou mais materiais com diferentes propriedades, obtêm-se materiais compósitos leves e de alta resistência. O comportamento é inspirado em compostos biológicos sempre presentes na natureza, como ossos e madeira. Compósitos têm sido feitos há milhares de anos: um dos primeiros exemplos é a palha e a lama combinadas para formar tijolos para a construção. Compósitos modernos substituíram com sucesso materiais convencionais em numerosas aplicações tecnológicas avançadas.

Enquanto na engenharia tradicional, dureza e rigidez são consideradas propriedades desejáveis em um material, a biologia faz uso considerável e vantajoso de recursos mais maleáveis e flexíveis. A importância dos materiais biológicos tem sido reconhecida desde o nível molecular até níveis mais elevados de organização (Johnson, *et al.* 2009).

Estes são exemplos, que podem nortear o estabelecimento dos requisitos para o design de novos materiais ou produtos, levando-se em consideração a seleção dos elementos que o compõem o material, determinando suas especificações e propriedades. Os aspectos podem ser distribuídos em requisitos, como: funcionamento; uso; otimização em matéria e energia; fabricação/comercialização; normas e legislação; ecologia, etc. Já os materiais para fabricação digital estão condicionados aos atributos e processamento da matéria-prima, onde se devem levar

em consideração as propriedades dos materiais, requeridas para um devido fim. Lima (2006) afirma que é importante saber a maneira como um material se comporta sob a ação de esforços mecânicos, intempéries, seu peso, densidade, aparência, desempenho térmico, tendo as propriedades definidas pela microestrutura e organização dos elementos que o constitui, assim como ocorre na natureza e na organização das células e dos elementos que as compõem.

É oportuno lembrar que a forma como os átomos são organizados na configuração de algum material desenvolvido pela engenharia está limitado ao que a tecnologia impõe ao homem. Johnson *et al.* (2009) asseguram que embora nem sempre haja analogias naturais em nossas soluções de design e engenharia, a vasta gama de materiais e estruturas disponíveis na natureza nos fornece uma fonte de inspiração aparentemente ilimitada. Em um futuro não tão distante com avanços significativos da nanotecnologia será possível projetar moléculas que funcionarão de acordo com necessidades e desempenhos desejados, ou seja, terão propriedades específicas, assim como, os materiais bioinspirados em propriedades emuladas pelas estratégias da natureza (Araújo, 2015).

Uma abordagem engenhosa do design em biologia surgiu para compensar a restrição da variedade de matérias-primas: a natureza complexa e multifuncional dos sistemas biológicos deve-se principalmente à hierarquia estrutural (sólidos compostos de elementos estruturais compostos por elementos estruturais menores e assim por diante), em que o material é montado, ao invés de se obter propriedades decorrentes da química. E deste modo, a natureza nos mostra como comportamentos complexos e avançados podem emergir de uma abordagem hierárquica para o design e materiais com base na biologia (Kapsali, 2016).

Johnson, *et al.* (2009) chama a atenção para a importância de tais materiais e, em particular, as estruturas funcionais que eles formam. Explica que usando apenas alguns blocos de construção simples, a natureza é capaz de desenvolver uma infinidade de materiais diversos, cada um com um conjunto muito diferente de propriedades mecânicas e do qual um número aparentemente grande de estruturas variadas é formado. Há pouca dúvida de que isso é possível pelo fato de que a maioria dos "materiais" biológicos ou "estruturas" serem baseados em fibras e que essas fibras fornecem oportunidades para hierarquias funcionais. Neste sentido o papel dos materiais no contexto de princípios biomiméticos pode revelar novas oportunidades de design. Segundo Kapsali (2016), os materiais na natureza são limitados: existem

basicamente dois grupos principais de polímeros - proteínas e polissacarídeos - que formam os blocos de construção de todos os sistemas biológicos e fornecem a multiplicidade de propriedades e funções necessárias para sustentar a vida.

É importante entender a diferença entre um material e uma estrutura. Um material é homogêneo, até o nível atômico. Uma estrutura, por outro lado, não é homogênea e pode até ser anisotrópica. As propriedades mecânicas de uma estrutura dependem tanto da forma da estrutura quanto das propriedades do material de que é feita. Madeira, músculo e cutícula são exemplos naturais de como materiais simples, proteínas e polissacarídeos são formados de maneira hierárquica para criar estruturas organizacionais superiores com funcionalidade adicional (JOHNSON, *et al.* 2009 *apud* Vincent, 1992; Jeronimidis 1980; Vincent & Wegst 2004).

O crescimento dos dados biológicos é enorme e os mecanismos básicos foram descobertos. A inovação baseada na bioinspiração oferece a oportunidade de tornar esses dados biológicos aplicáveis e produtivos na indústria (Byrne *et al.* 2018). Se a bioinspiração é vista como um motor de inovação, os dados biológicos são seu combustível que ativa esse mecanismo em direção a inovações. No entanto, existem vários obstáculos ao sucesso da inovação bioinspirada. Cohen & Reich (2016) também alertam que existem alguns obstáculos para o sucesso do processo de design biomimético:

Escalabilidade - a mudança de escala micro para macro expõe designs a novas restrições. Alguns mecanismos biológicos funcionam na escala nano, mas não funcionam em escala macro. Exemplo é o mecanismo de anexação gecko. Os imitadores sintéticos do sistema de fixação da lagartixa falharam em mostrar o desempenho do adesivo em grandes escalas. Isto acontece também em soluções tecnológicas. Por exemplo, na transferência da macro para a micro, com o desenvolvimento de MEMS (sistemas micro eletromecânico), ficou claro que o atrito age de maneira muito diferente nessas duas escalas. Outra restrição faz referência aos materiais, onde às vezes não há substituto artificial para o material biológico. Principalmente quando a função está mais relacionada ao material dado e menos à estrutura. Um exemplo é a seda de aranha. Embora sua estrutura molecular seja conhecida, o mundo científico luta para sintetizar materiais artificiais que possam imitar a estrutura e manter suas características únicas. Byrne *et al.* (2018) ainda

destaca uma terceira restrição, a de manufatura - os problemas de manufatura estão entre as principais limitações na entrega de inovações bioinspiradas. Por exemplo, os produtos de folhas de lótus artificiais ficam muito aquém em termos de desempenho biológico.

As variações de qualquer forma biológica não devem ser vistas separadamente de seus materiais ou estrutura. O desempenho geral dos organismos naturais emerge das hierarquias complexas de seus materiais. Forma, estrutura e material afetam um ao outro e as propriedades de um organismo não podem ser determinadas pelas propriedades de qualquer um deles sozinho (Ahmar *et al.* 2013)

Deste modo, pode-se verificar uma forte relação com a forma de estudo e aplicação dos conceitos da biomimética no desenvolvimento do design de um material bioinspirado. De acordo com Ahmar *et al.* (2013) a ideia de sistemas de materiais dentro do design não se refere apenas ao sistema de construção e componentes materiais de um artefato, mas também se refere a complexas inter-relações entre material, forma, estrutura e os processos associados de fabricação e produção, bem como os efeitos que resultam de influências ambientais. Os sistemas de materiais da natureza têm como objetivo a eficiência material. De acordo com Benyus (2003), organismos e ecossistemas naturais tendem a usar os mesmos materiais para mais de uma função, o que significa que a energia é economizada para ser usada em outras funções como crescimento, reprodução, saúde, etc.

Além do mais, no contexto da fabricação digital, todos esses fatores podem ser introduzidos em uma configuração computacional desde o início, influenciando diretamente o processo de design e o resultado final. As estruturas de materiais biológicos são “fabricadas” para operar dentro da vida e, portanto, evitam altas temperaturas, altas pressões ou materiais altamente poluentes (Byrne *et al.* 2018). A escolha e determinação de suas propriedades, podem se basear em uma gama de elementos naturais e sintéticos similares no mercado, e disponíveis à interferência humana. Porém, levando-se em consideração os fatores ecológicos esta busca pode ocorrer através da bioinspiração em elementos naturais, o Agave apresenta em sua anatomia celular propriedades de leveza e resistência, como excelentes propriedades mecânicas que convertidas em tecnologia e incorporando os Princípios da Vida (Biomimicry Institute 3.8, 2015), contribuem para uma maior aproximação com o meio natural (Araújo, 2015).

## 2.4.1 Materiais de base biológica

### 2.4.1.1 PU expandido de Mamona e fibras naturais

Paula *et al.* (2022) têm se concentrado na caracterização de compósitos de espuma de poliuretano, explorando diferentes métodos de produção e parâmetros, incluindo a análise de compósitos de expansão livre e limitada, bem como compósitos contendo fibras e variações nos parâmetros de prensagem. Esses estudos demonstram que a espuma de poliuretano derivada de óleos vegetais pode ser usada como matriz em compósitos com fibras naturais, como as fibras de *Agave sisalana*. A pesquisa realizada por Paula *et al.* (2022) envolveu a caracterização de compósitos de espuma de poliuretano derivada de óleo vegetal, reforçada com serragem de madeira *Pinus taeda* e fibras curtas de sisal, as quais foram cortadas manualmente com tesouras, com cerca de  $5 \pm 2$  mm de comprimento.

Os resultados mostraram que os compósitos com 50% de espuma, 37,5% de serragem e 12,5% de sisal apresentaram a maior resistência à flexão, atingindo 11,31 MPa, em comparação com os compósitos compostos por 50% de espuma e 50% de fibras de sisal, que alcançaram apenas 2,76 Mpa. Nas análises das amostras, foram observadas deformações, com áreas de baixa densidade, entrelaçamento das fibras de sisal e uma distribuição não homogênea do material. Essas deformações indicam variação de densidade ao longo da espessura dos compósitos, relacionada à dificuldade de homogeneização da mistura de materiais, resultando na formação de camadas. A dispersão das partículas de sisal nas amostras dificultou a distribuição homogênea dos materiais, levando ao acúmulo de fibras com pontas soltas dentro das bolhas de espuma. Por outro lado, a serragem de madeira, sendo menor e mais leve, acompanhou a expansão da espuma e auxiliou no acomodamento das fibras, preenchendo os espaços vazios criados durante a expansão (Paula *et al.* 2022)

Em resumo, o aumento na quantidade de sisal na composição dos compósitos tornou a mistura dos componentes mais desafiadora e resultou em uma redução significativa na resistência à flexão e tração dos compósitos. Entretanto os compósitos foram considerados adequados para uso em móveis e artesanato.

#### 2.4.1.2 PLA

O ácido polilático (PLA) é um bioplástico; um dos plásticos biodegradáveis mais amplamente produzidos. De acordo com Ashby & Johnson (2014), o PLA é um termoplástico derivado principalmente de recursos renováveis anualmente. Este bioplástico é um material sintético feito de polímeros orgânicos, de acordo com Real & Fratello (2018), é composto principalmente de carbono, oxigênio e hidrogênio, derivados de amido de milho, raízes de mandioca, cana-de-açúcar, dentre outros. Uma bactéria é usada para obter o ácido láctico desses amidos e então esse material é polimerizado. No processo de produção as bactérias produzem o ácido láctico por meio do processo de fermentação de vegetais ricos em amido, como a beterraba, o milho e a mandioca, ou seja, é feito utilizando fontes renováveis (Ashby & Johnson, 2014; Rael & Fratello, 2018).

Os autores afirmam que os plásticos deveriam se degradar naturalmente no final de sua vida útil e não causar efeitos adversos ao meio ambiente, defendem que o uso de materiais à base de celulose é uma solução importante para a criação de plásticos e compósitos com baixo impacto ambiental. Apesar de ser 100% um plástico biodegradável (se dispuser de condições ideais), ao final da vida, o PLA pode ser reciclado, mas é mais frequentemente bem-sucedido em situações em que a compostagem industrial pode ser uma opção para o fim da vida. Portanto, à medida que se degrada ou é incinerado, ele libera apenas elementos orgânicos na atmosfera ou no solo.

Pode se decompor em quarenta e cinco dias em uma instalação de compostagem. No entanto, em condições ambientais estáveis, leva centenas de anos para biodegradar, o que significa que se mostra promissor como um material durável e resistente o suficiente para aplicações diversas no design e arquitetura. O PLA se parece com um plástico normal, além de ter aprovação para embalagens de alimentos. Assemelha-se ao poliestireno translúcido, proporciona boa estética (brilho e clareza), mas é rígido e quebradiço. O polímero pode ser composto para fornecer uma gama mais ampla de propriedades do material. Ele pode ser processado como a maioria dos termoplásticos em fibras, filmes, termoformado ou moldado por injeção, dentre outras possibilidades (Rael & Fratello, 2018).

Como qualquer outro termoplástico, há muitas maneiras de transformar esse material em artefatos, incluindo a fundição em moldes, e ainda, a adição de cargas

diversas, como por exemplo a inclusão de resíduos biodegradáveis para criação de novos materiais e produtos com base no ecodesign e design circular. Leite, R. *et al.* (2020) apresenta o processo de desenvolvimento de um compósito biodegradável, compostável e reciclável produzido a partir de cascas de ovos e ácido polilático, o PLAegg. Para alcançar os resultados obtidos, foram realizados vários experimentos com variação das formulações e do processamento do material. O material desenvolvido foi aplicado a um novo produto, um candeeiro denominado LEXI lamp.

Pode ser usado para extrusão, por este motivo, também é uma das matérias-primas mais comuns usadas em impressoras 3D de mesa hoje. A temperatura de moldagem recomendada é de 165-170 C°. Entretanto, também é possível a inserção de fibras naturais para melhorar aspectos de resistência e aumento da carga de matéria prima biológica.

#### **2.4.2 Design de materiais e impressão 3D**

De acordo com Rael & Fratello (2018), na impressão 3D com bioplástico, os materiais à base de celulose que entram no PLA incluem uma gama cada vez maior. Agora é possível imprimir em 3D com PLA feito não apenas de amido de milho, mas também de cânhamo, bambu e cevada. Além disso, materiais como café, vidro e metais em pó podem ser adicionados ao PLA para dar a ele propriedades especiais, incluindo cor, resistência e brilho. Os corantes também podem ser adicionados ao filamento de PLA para oferecer uma ampla gama de cores que são parte integrante do material.

A natureza produziu muitos designs estruturais leves, como ossos, bambu, madeira, favo de mel, dentre inúmeros outros exemplos. Damodaram (2018) considera que os materiais bioinspirados na natureza com estruturas celulares otimizadas terão alta rigidez específica, ou flexibilidade acentuada e levarão a materiais leves. A área de design de materiais como uma demanda da ciência e da tecnologia à inovação com o avanço do conhecimento na ciência e tecnologia dos materiais possibilitou a manipulação e a criação de novos materiais com melhores propriedades em atendimento a aplicações específicas e a biomimética tem contribuído fortemente nesta área para soluções sustentáveis (Müller *et al.*, 2018). O proveito dos recursos materiais locais e ecológicos e servem como veículo para o

upcycling, reduzindo o desperdício em com os diversos métodos de produção disponíveis na tecnologia.

A sustentabilidade é um ponto forte no desenvolvimento de inovações ao fazer uso direto de soluções de materiais biológicos. De fato, sistemas biológicos feitos de materiais biológicos não criam desperdícios ou danos irreversíveis ao ecossistema. São de grande relevância pois eles enriquecem e sustentam o ecossistema onde operam. Além disso, as estruturas biológicas fornecem uma ampla gama de propriedades com uso e fluxo mínimos de materiais e energia, e geram produtos totalmente recicláveis (Byrne *et al.* 2018).

Porventura, os materiais de construção na forma de partículas ou fibras, por exemplo, advindo de processo subtrativo de corte e lixamento de madeira reduzindo as árvores a serragem, composta por minúsculas partículas. Em grande parte, é um subproduto gerado pela indústria da madeira em serrarias e fábricas de móveis e em canteiros de obras que pode ser reaproveitado ou reciclado em compósitos reforçados com fibras, a exemplo do desenvolvimento de filamentos de impressão 3D (Rael & Fratello, 2018).

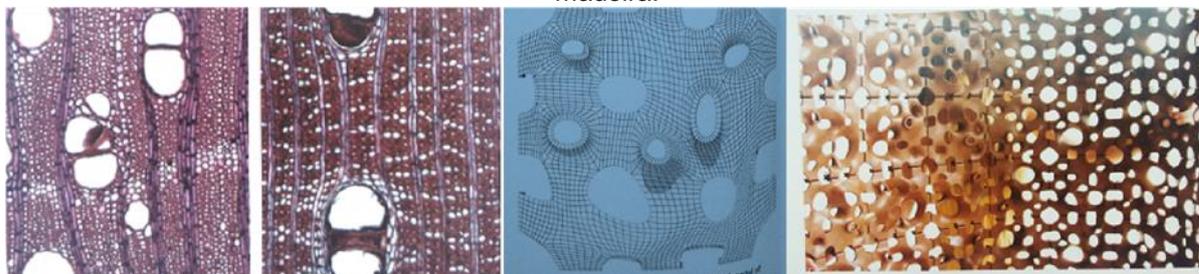
A madeira é um material biodegradável amplamente disponível na forma de resíduos de madeira. Pequenos pedaços de madeira podem ser moídos em frações menores para fornecer farinha de madeira fina, que pode então ser usada como material de enchimento na impressão 3D com materiais plásticos convencionais. A farinha de madeira também pode ser usada para impressão em combinação com uma variedade de adesivos comerciais e naturais. O impacto dos produtos impressos em 3D no meio ambiente pode ser drasticamente reduzido. A madeira tem vantagens significativas em comparação com termoplásticos, como polipropileno, polietileno e ácido poli(lático) (PLA). É a biomassa lignocelulósica mais abundante do mundo. A madeira tem características superiores, como alto módulo, baixo custo, baixa abrasão, menos abrasividade, abundante e renovável, boa usinabilidade e descarte ecológico. Em particular, farinha ou fibra de madeira é adicionada aos termoplásticos para reduzir o custo de fabricação e melhorar o módulo e as propriedades térmicas do compósito (Ayrilmis *et al.* 2019).

De acordo com os autores, a impressão 3D com serragem tem algumas semelhanças com a fabricação de produtos de madeira, mas em muitos aspectos

também é bastante diferente. Para Rael & Fratello (2018), a serragem não é o único material que pode ser usado para imprimir objetos semelhantes à madeira em 3D. Cascas de nozes, cascas e sementes são todos subprodutos agrícolas que podem ser moídos em pós e farinhas finas e usados para fazer objetos impressos em 3D com cores e propriedades semelhantes.

A computação paramétrica bioinspirada também permite, por exemplo, modelagens digitais que podem simular o grão natural da madeira. No projeto Poroso (Figura 32) apresentado por Rael & Fratello (2018), uma tela composta por componentes individuais de madeira impressos em 3D são fixados juntos para formar um invólucro e uma superfície com dimensões variáveis. Seu padrão poroso é inspirado nos vasos encontrados na análise microscópica da anatomia das madeiras de lei, como se a madeira quisesse retornar ao seu estado original e expressar seu crescimento interno.

Figura 32 - Projeto Poroso, impressão 3D com materiais de base biológica, bioinspirado nos veios da madeira.



Fonte: Rael & Fratello (2018).

Quando vistos da fibra final, esses vasos demonstram a porosidade da madeira. Em uma árvore viva, eles servem como dutos dentro do tronco, um sistema de transporte de água e seiva. Na tela de serragem, os vasos servem como uma oportunidade para a porosidade visual. A curvatura sutil de cada vaso acentua as aberturas como aberturas convexas ou côncavas, tornando a tela uma experiência visual e tátil (Rael & Fratello, 2018).

Dentro dessa perspectiva, os autores tornam evidente que a impressão 3D com serragem e outros subprodutos agrícolas têm o potencial de transformar um processo inerentemente subtrativo - que começa com árvores e termina com poeira - em um processo aditivo que transforma esse material amplamente disponível em componentes do design e arquitetura. Produto da impressão 3D da madeira, explorando as formas e dimensões possíveis com o resíduo de madeira como um

material emergente na manufatura aditiva. Outros projetos são também apresentados por Rael & Fratello (2018), como o Wood Block, projetado por Anthony Giannini, que usa pó de celulose impressa em 3D como material de construção que pode ser customizado em massa.

Deste modo, a bio utilização (uso da matéria-prima biológica) é viável, desde que favoreça a construção de um objetivo visando a sustentabilidade do projeto, se adequando às realidades locais e que apresente benefícios (ou redução de danos) ao ecossistema na sua utilização, no esforço de atender a determinados princípios biologicamente inspirados. Esta abordagem é bem sucedida quando se relaciona a função com as características da estrutura biológica e também com as propriedades do material biológico (Byrne *et al.* 2018).

A investigação das propriedades das fibras de Agave com aplicação na fabricação digital ou processos manufaturados, apresenta potencialidades para experimentações com materiais bioinspirados possuindo ainda condições de biodegradação. As fibras de Agave têm sido utilizadas anteriormente para a obtenção de biocompósitos, proporcionando a geração de novos materiais para impressão 3D com certas vantagens, como leveza, sustentabilidade, biodegradabilidade e baixo custo (Velarde *et al.* 2021).

Velarde *et al.* (2021), descreve o desenvolvimento de filamentos biodegradáveis constituídos por fibras de Agave com PLA para impressoras 3D baseada em fabrico por extrusão, em diferentes porcentagens de peso (0, 3, 5 e 10% em peso). Como apresentado em seus estudos, espera-se que adição de fibras de Agave aumente a rigidez do compósito, como ocorre com matrizes poliméricas reforçadas com fibras de Agave moldados por técnicas de compressão e injeção. Dentre várias outras propriedades, foram estudadas as propriedades mecânicas dos biocompósitos (propriedades de tração, flexão). Entretanto, foi verificado que aumentar a quantidade de fibras resultou em uma redução do desempenho das propriedades mecânicas dos biocompósitos.

Segundo os autores (Velarde *et al.* 2021), o aumento do teor de fibra causou uma diminuição nas propriedades de tração dos biocompósitos de fibra de Agave e PLA impressos em 3D, os filamentos com 100% PLA tiveram resistência à tração e valores de módulo de (~ 51 MPa). Em filamentos com 5% de fibra os autores obtiveram valores de (31 Mpa) com 10% de fibra, obtiveram (28 Mpa). O que representa uma redução na resistência à tração em comparação com peças de PLA puras. Entretanto,

os autores verificaram que comparando-se com outros reforços de fibras naturais para fabrico por extrusão, as fibras de Agave são melhores opções de carga do que os compósitos de madeira e PLA, compósitos de Cortiça e PLA. Enquanto que biocompósitos reforçados de fibra de bagaço de cana e PLA apresentam ganho na resistência à tração de 55 MPa com 6% em peso de fibra. Entretanto foi verificado que a adição de fibras aos filamentos geraram estruturas porosas com maior teor de células abertas e densidades aparentes menores do que as peças de PLA puro. Provavelmente devido a uma maior porosidade e um valor de cristalinidade diferente do material final causado pelo processo de fabrico por extrusão. Além de que, a biodegradação dos biocompósitos sob condições simuladas de compostagem foi retardada 1,6 vezes com a adição de fibras de Agave, em comparação com o PLA puro. Entretanto os motivos causadores da redução da resistência do compósito não ficam claras e do retardamento da biodegradação não ficam claras. Embora a investigação tenha mostrado um comportamento de redução de algumas propriedades frente ao PLA puro, isto não descarta de todo as potencialidades do material, assim a fibra de Agave pode ser empregado como insumo para impressão 3D, e os materiais com matrizes de base biológica e fibras naturais são uma alternativa em relação a outras matrizes de materiais provenientes de fontes não renováveis.

### **2.4.3 Computação bioinspirada e manufatura na biomimética**

Ao abordar o tema da transformação biológica na manufatura, a literatura apresenta uma nova fronteira emergente na evolução da digitalização e a 4ª revolução industrial (Indústria 4.0), que é denominada como “biotecnologia na produção”. Byrne *et al.* (2018) se acercam de uma consideração detalhada para dar significado e definir as implicações da “biologização” (como definem) na perspectiva do design, função e operação de produtos, processos de fabricação, sistemas de manufatura, cadeias de suprimentos e organizações.

Após considerável deliberação, Byrne *et al.* (2018) definiram o termo “biologização na manufatura” como sendo: “O uso e a integração de princípios, materiais, funções, estruturas e recursos biológicos e bioinspirados para tecnologias e sistemas de manufatura inteligentes e sustentáveis, com o objetivo de alcançar todo o seu potencial”. No contexto de desenvolvimentos significativos na ciência e engenharia de materiais, fornece uma visão para o desenvolvimento da ciência e

tecnologia de manufatura e fabricação digital na perspectiva de incorporar a inspiração dos sistemas biológicos.

Segundo Ahmar *et al.* (2013), uma abordagem ao design verdadeiramente biomimético, que não apenas imite a forma (shape ou estrutura), requer o desenvolvimento de novos métodos de projeto que integrem fatores e influências ambientais. Como uma metodologia para projeto computacional baseada em princípios biológicos, que permite o desenvolvimento de designs biomiméticos através da modelagem computacional, levando em conta as restrições do processo de materialização. Isso requer uma compreensão da forma, do material e da estrutura não como elementos separados, mas como inter-relações complexas que são incorporadas e exploradas através de um processo de projeto bioinspirado. Protocolos computacionais unificando princípios naturais é uma nova abordagem desenvolvida para projetos que está fortemente relacionada com a biologia e fabricação digital (Ahmar *et al.* 2013).

Embora a humanidade tenha desempenhado tarefas de manipular materiais e em seguida, transformar em artefatos, a impressão 3D interferiu na ideia do artesanato e introduziu um desvio na linhagem material de transformar o pequeno em grande. A impressão 3D está diretamente ligada às técnicas tradicionais de construir e fabricar coisas através de design auxiliado por computador (CAD) e processos de manufatura auxiliados por computador (CAM). A manufatura e a fabricação digital preenchem a grande lacuna que existe entre os modos de produção industriais, digitais e artesanal expandindo os benefícios de cada um (Rael & Fratello, 2018).

O computador e a impressora 3D nos permitiram emular estratégias da natureza utilizando dados para exploração de estruturas de sistemas materiais e transformam materiais naturais, por exemplo, fibras e partículas em objetos personalizados e produtos bioinspirados que servem como novos blocos de construção para o futuro, usando materiais que estão disponíveis localmente, baratos, e derivados de fontes sustentáveis ou fluxos de resíduos.

Rael & Fratello (2018) apontam o desafio de fontes limitadas disponíveis para materiais de manufatura aditiva, sugerindo novas possibilidades bioinspiradas para materialidade digital. Os aspectos digitais têm potencial não só para a transformação de materiais, mas também o design dos próprios materiais. A natureza desses materiais - que podem ser fabricados localmente, surgem de fontes recicladas; de subprodutos da manufatura industrial (fibras naturais, cascas de nozes, borra de café,

cascas de uva) - podem situá-los no reino dos materiais naturais de construção e fabricação. No entanto, o potencial expansivo e nascente desses materiais tradicionais, quando acoplado à manufatura aditiva, oferece possibilidades não convencionais, como a possibilidade de desenvolver capacidades estruturais direcionadas (Rael & Fratello, 2018).

Ainda segundo os autores, considerar a partícula e a peça, e suas possibilidades inerentes não é a única maneira que concebemos a ampliação da fabricação aditiva. Uma vantagem, é a possibilidade de imprimir peças menores para criar objetos maiores. Entretanto, as impressoras 3D geralmente não concluem suas tarefas sozinhas - é um processo que, por vezes, requer várias iniciações para concluir um trabalho de impressão. O atrativo por uma estrutura impressa em 3D construída é que cada parte pode ser individualmente ajustada para responder às particularidades geométricas de uma forma complexa. Além disso, a impressão 3D é um método de fabricação potencialmente sustentável.

## 2.5 AGAVE

Neste tópico é apresentada a caracterização do elemento natural (*Agave sisalana*), a importância e potencialidades de aplicações, seguido de conceitos de anatomia vegetal.

Figura 33 - *Agave sisalana*, destaque para os pendões florais.



Fonte: growblanks.com (2022).

O Brasil é o maior produtor mundial de Agave (ou Sisal), sendo responsável por cerca de 70% do mercado mundial de fibras duras. O nome científico da espécie mais comercializada é *Agave sisalana*, comum da região Nordeste do Brasil, onde é explorado apenas como fonte de fibra dura (sisal). Segundo a Conab (Companhia Nacional de Abastecimento - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento), a conjuntura mensal de setembro de 2018, apresenta dados representativos sobre a produção e comercialização do sisal. Em 2015 foi estimada uma produção de aproximadamente 92 mil toneladas e em 2016 chegou-se a uma produção estimada de 88 mil toneladas.

O Agave ou Sisal (*Agave sisalana* Perrine) da família Agavaceae é um vegetal exótico e invasor de dunas e restingas no litoral brasileiro, uma espécie introduzida, comumente encontrada em vários estados. Segundo Ulysséa & Silvestro (2010) além de ser uma planta invasora e dominante, prejudica o estabelecimento e desenvolvimento das espécies de flora nativa não oferecendo alimento à fauna local.

O Brasil é o maior produtor mundial, o cultivo é direcionado para a produção e confecção de cordas e artigos de artesanato através da utilização das fibras de suas folhas, sendo responsável por cerca de 70% do mercado mundial de fibras duras. O pendão floral da planta é utilizado na cobertura de casas e na construção de cercas, porém não possui valor comercial comparável à fibra da folha. Dentre muitas outras opções de utilização, está a fabricação de blocos para pranchas de surf, utilizando-se o tecido parenquimático do escapo floral, que possui propriedades de leveza e resistência.

A planta apresenta ciclo de vida que pode variar de 7 a 10 anos, de acordo com o Invasive Species Specialist Group - ISSG (Banco de Dados Global de Espécies Invasivas) (2020). O processo de reprodução do Agave ocorre no escapo floral. Silva *et al.* (2008) descrevem que surgem pequenas folhas estreitas e pontiagudas localizadas ao redor do ápice do pendão no momento de inflorescência. O 'caule' se transforma em um pedúnculo floral que pode atingir de seis a oito metros de altura. Surgem escamas parecidas com folhas, então produz entre vinte e quarenta ramos que, por sua vez, originam grupos tendo em torno de quarenta flores cada. Por se tratar de uma planta monocárpica, ela floresce uma só vez durante o ciclo vegetativo, morrendo posteriormente. Após a queda das flores, desenvolvem-se sobre a panícula novas plantas chamadas "bulbilhos" medindo entre seis e dez centímetros e

possuindo de seis a oito folhas e pequenas raízes adventícias. Estes bulbilhos caem no solo após três meses e atuam como órgão de propagação de novas plantas.

O estado ideal para utilização do pendão como matéria prima é quando a planta seca e morre naturalmente, encerrando o ciclo de vida que vai de sete a doze anos. Ulysséa & Silvestro (2010) explica que desta forma não há desmatamento, ao contrário, a retirada do meio ambiente nesta região se torna uma prática benéfica para o bioma local, pois se trata de uma espécie invasiva que não serve de alimento neste ecossistema. Contudo, o autor ainda ressalta a importância desta planta para a economia local.

O Agave é uma rica fonte para a produção de fibras naturais, esta espécie tem grande importância para a economia do semiárido brasileiro. O Brasil é o maior produtor e exportador de fibras de Sisal, produto que se destaca por sua ampla utilização doméstica, industrial e, mais recentemente, no reforço de compósitos poliméricos (Gondim, 2009, *apud* Martin *et al.*, 2009).

A agaveicultura ocupa uma extensa área de solos pobres na região semiárida de alguns estados do Nordeste, sendo inclusive a única alternativa de cultivo com resultados econômicos satisfatórios para a região. Cobertura do solo, geração de emprego e renda são outras razões que tornam o plantio comercial desse vegetal extremamente relevante para as regiões produtoras, seja no aspecto econômico, social ou ambiental (Neto, 2012, *apud* Suinaga *et al.*, 2006; Martin *et al.*, 2009).

Desta forma, pode-se verificar que apesar de ser uma espécie introduzida em nosso bioma, tem grande importância no cenário nordestino. Entretanto há um reflexo positivo no meio ambiente onde outras espécies vegetais não se adaptam. Gera renda e emprego para famílias locais através do plantio e produção de fibras através das folhas, dentre outras aplicações.

Ademais, com todo o potencial de mercado que o Agave possui, existe ainda, muita pouca atenção para utilização e comercialização do pendão floral no estágio final do ciclo de vida da planta, quando se transforma em uma matéria muito leve. Uma boa alternativa para que esta parte do vegetal seja mais bem aproveitada é justamente a utilização para fabricação de blocos para pranchas de surf. Ulysséa & Silvestro (2010) desenvolve pesquisas e trabalha com a produção de blocos de pranchas de surf com aplicação do Agave. Em 2001 iniciou a produção de blocos e

afirma as qualidades do produto final como pranchas de surf. Atualmente estes artefatos são bem aceitos quanto à usabilidade, leveza, resistência e requisitos ambientais.

A pesquisa e aplicação da biomimética é um meio eficaz para inovações bioinspiradas seguindo o modelo da natureza. Entender porque o escapo floral do Agave apresenta estratégias de leveza e resistência foi o ponto de partida. Para tanto, foi necessário investigar em escala micro a estrutura celular que compõem o pendão floral da planta através do estudo da biologia em anatomia vegetal. Informações sobre a anatomia celular do Agave podem contribuir sobremaneira para que se atinja um optimum em concepção de estruturas leves e resistentes com baixo consumo de matéria e energia.

Portanto, com base nestes dados que a escolha do Agave como elemento natural e fonte de inspiração se justifica alinhado aos princípios da biomimética e de sustentabilidade. Entretanto, como publicações sobre a estrutura anatômica dessa espécie são inexpressivas fez-se necessário realizar uma pesquisa sobre anatomia vegetal e posteriormente realizados experimentos em laboratório com auxílio de métodos de microscopia com amostras de Agave, com intuito de produzir imagens de alta resolução para avaliar a estrutura celular do escapo floral do vegetal. Este processo será detalhado na fase de desenvolvimento da investigação.

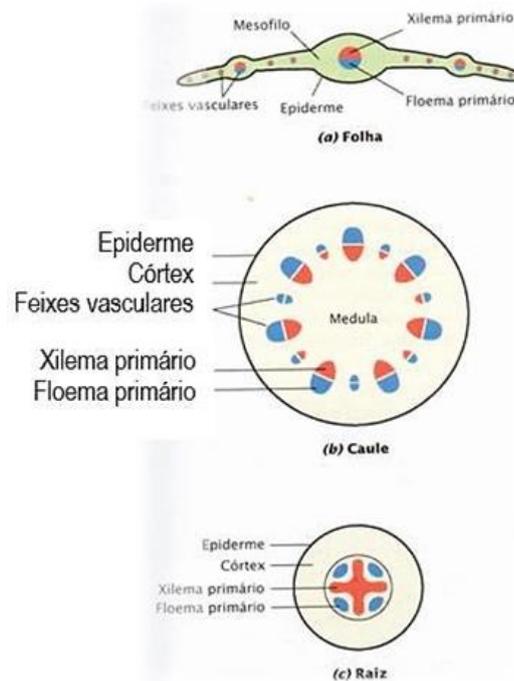
### **2.5.1 Anatomia vegetal**

A organização do corpo vegetal das plantas terrestres, conforme descreve Taiz & Zeiger (2004), são estruturalmente reforçadas para suportar sua massa à medida que elas crescem em direção à luz e contra a força da gravidade, bem como, transportar água e sais minerais do solo para os locais de fotossíntese, desenvolvimento e de crescimento.

A planta é uma entidade organizada que se desenvolve seguindo um padrão definido que resulta em estruturas e formas bem características, principalmente em escala microscópica. Basicamente, a estrutura primária do corpo vegetal é composta pela raiz, caule e folha (Figura 29). Estes são os órgãos vegetativos e são constituídos basicamente dos mesmos tecidos primários que estabelecem três sistemas de tecidos: dérmico (ou revestimento); fundamental (ou preenchimento); e de condução (ou vascular). Estes sistemas de tecido apresentam padrões de distribuição bem

característicos, basicamente a planta é revestida pelo sistema dérmico, que envolve o sistema fundamental, que contém o sistema vascular (Apezzato-Da-Glória & Guerreiro, 2006; Taiz & Zeiger, 2004).

Figura 34 - Distribuição dos tecidos vasculares e dos tecidos do sistema fundamental na folha, caule e raiz.



Fonte: Adaptado de Taiz & Zeiger (2004).

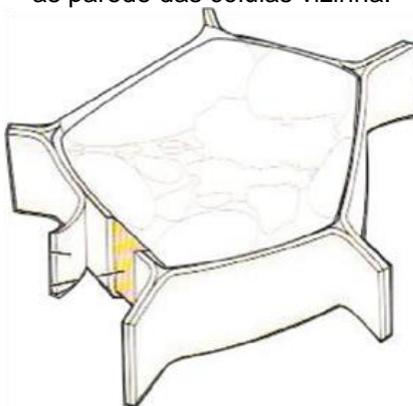
Glória & Guerreiro (2006) afirmam que o conhecimento da célula vegetal tem possibilitado grandes avanços na história e compreensão da Biologia. Outros autores descrevem que no século XVII, já eram realizados estudos microscópicos rudimentares em células vegetais:

O termo célula deriva-se do latim *cella*, cujo significado é despensa ou câmara. Inicialmente, foi empregado na biologia em 1665, pelo botânico inglês Robert Hooke, para descrever as unidades individuais de uma estrutura do tipo favos de mel, que ele observou em Cortiça, sob um microscópio primitivo (Taiz & Zeiger, 2004).

Por tanto, há tempos que as células são consideradas as unidades estruturais e funcionais que constituem os organismos vivos. Uma diferença fundamental entre os vegetais e os animais é justamente a presença de uma parede celular rígida que delimita as células vegetais. Trata-se de uma parede mecanicamente resistente, porém relativamente delgada. Esta é uma das características mais significativas da célula vegetal, a presença da parede que envolve externamente a membrana

plasmática e o conteúdo celular (Apezzato-Da-Glória; Guerreiro, 2006; Taiz; Zeiger, 2004).

Figura 35 - A célula e paredes vegetais com destaque para a lamela mediana, que tem função de unir as paredes das células vizinhas.

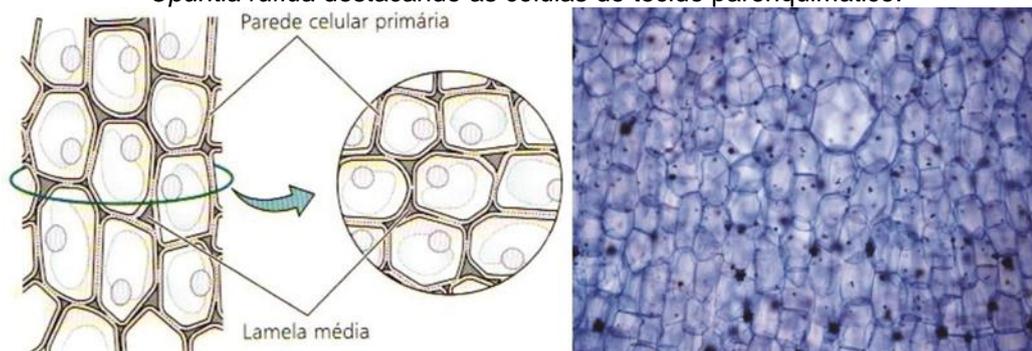


Fonte: Adaptado de Taiz & Zeiger (2004).

Segundo Taiz & Zeiger (2004), as “câmaras” da Cortiça que foram observadas no microscópio de Hooke eram na verdade, lumes vazios de células mortas. O lume é o espaço limitado pela parede da célula vegetal. Desta forma as migrações celulares são impedidas, pois as células estão ligadas firmemente umas às outras. É válido ressaltar que as funções fisiológicas e bioquímicas dos vegetais dependem das estruturas, da forma estrutural dos diversos tecidos, como por exemplo, o armazenamento de substrato no parênquima, a condução de água no xilema, propriedades mecânicas, etc.

O parênquima é um tecido de preenchimento simples, constituído de células vivas. Podem ter formatos diversos - poliédricas; cilíndricas ou esféricas, mas em geral, são células isodiamétricas multifacetadas. Apresenta múltiplas faces, ou seja, muitos lados possuindo aproximadamente as mesmas dimensões. Apezzato-da-Glória & Guerreiro (2006) descrevem que o tecido parenquimático está distribuído em quase todos os órgãos da planta: raiz, caule e folhas. As células parenquimáticas geralmente possuem paredes delgadas e podem dispor-se em uma ou mais camadas, entre o tecido de condução; entre a parte viva e a não viva do sistema vascular e seus elementos de transporte.

Figura 36 - Esquerda - Tecido fundamental do parênquima. Direita - Corte transversal do caule de *Opuntia rufida* destacando as células do tecido parenquimático.



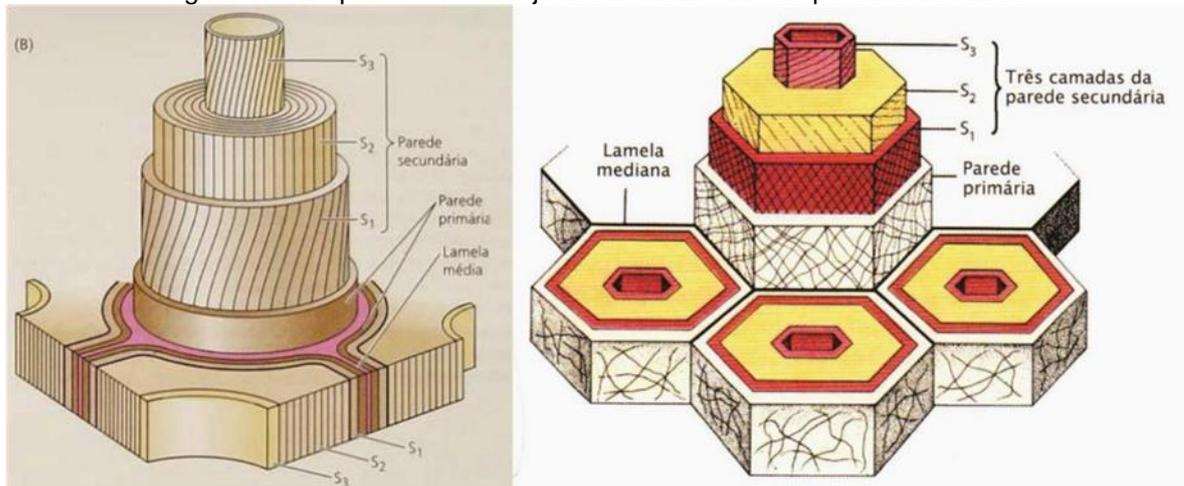
Fontes: Imagem à esquerda: Taiz & Zeiger (2004); Imagem à direita: Atlas de Anatomia Vegetal (2015).

Sobre a morfologia e arquitetura básica de paredes celulares, organização, composição e síntese de paredes celulares primárias e secundárias, Raven *et al.* (2007) descrevem que a parede celular é a principal característica da célula vegetal; é o que determina a sua estrutura, esta tem relação direta com suas funções. Uma das funções principais é permitir a permeabilidade da água e de várias substâncias. A parede celular determina em grande parte o tamanho e o formato da célula, fator que contribui para a forma final do órgão vegetal. Sendo assim, o autor distingue os tipos celulares pela estrutura de suas paredes. As paredes destas células podem possuir uma ou mais camadas que podem ser observadas através da utilização de técnicas microscópicas.

A parede celular que delimita uma célula podem também variar em espessura, ornamentação e frequência de pontuações, etc. Apesar dessa diversidade morfológica, as paredes celulares comumente são classificadas em dois tipos principais, primárias e secundárias. As paredes celulares primárias são tipicamente finas (menos de 1  $\mu\text{m}$ ), o que caracteriza células jovens e em crescimento. As paredes celulares secundárias são depositadas quando a maior parte do crescimento está concluído, são mais espessas e resistentes que as primárias. As células de xilema, tais como as encontradas na madeira, são notáveis por possuírem paredes secundárias espessadas, reforçadas por lignina. As paredes de algumas células diferenciadas (especializadas), como por exemplo, as fibras e elementos traqueais, estas possuem paredes espessas e multicamadas (Taiz & Zeiger, 2004), como pode ser observado na Figura 37, onde a organização das microfibrilas na parede celular varia entre a parede primária e a parede secundária. Na parede primária, as microfibrilas de celulose se entrelaçam, proporcionando flexibilidade. Já na parede

secundária, as microfibrilas se organizam de forma ordenada e paralela, formando camadas (S1, S2 e S3) com diferentes orientações. A parede secundária é mais espessa e confere maior resistência, sendo encontrada em células especializadas para suporte mecânico, como traqueídes e fibras.

Figura 37 - Esquemas do arranjo das microfibrilas nas paredes celulares.

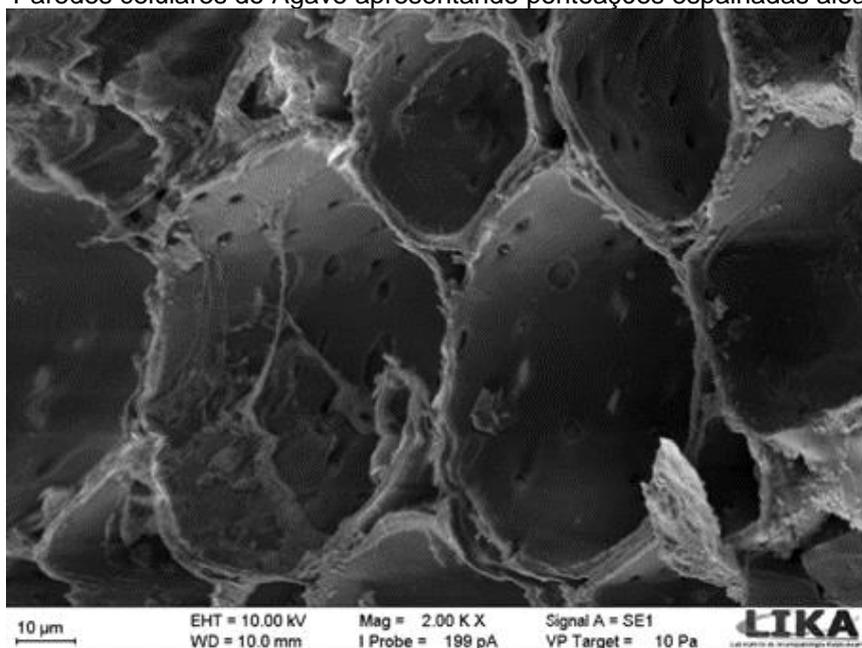


Fonte: Raven *et al.*, 2007; Taiz & Zeiger (2004).

Em relação à estrutura e composição das paredes celulares, estas apresentam um modelo básico. Em síntese a parede primária é composta por apenas uma camada, ao passo que, frequentemente as paredes secundárias possuem várias camadas e diferem da parede primária em estrutura e composição. Embora possua arquitetura variada, as diferentes células necessitam se comunicar com as outras, e o fazem por determinados espaços vazados localizados na parede celular, as pontoações e os campos de pontoação. No local onde está presente o campo de pontoação, durante a formação da parede secundária, geralmente nenhum material de parede é depositado (Taiz & Zeiger, 2004).

Apesar da formação da parede secundária, é mantida a comunicação de células vizinhas. No crescimento da parede secundária, determinadas zonas mantêm-se abertas. Tal zona da parede celular é chamada pontoação. Do grande espessamento da parede celular resultam desta maneira, autênticos canais de pontoação. A pontoação permite a condução da água, com isso a passagem é grandemente facilitada (Nultsch, 2000).

Figura 38 - Paredes celulares do Agave apresentando pontoações espalhadas aleatoriamente.



Fonte: Autor, (2019).

Quanto à rigidez da parede, esta se deve à presença de lignina, outro componente muito importante em muitos tipos de células, que providencia resistência à compressão e rigidez à parede celular. A lignina é comumente encontrada em paredes de células vegetais que têm função mecânica ou de sustentação. A lignina impõe resistência à compressão, enquanto confere rigidez. Neste sentido, as paredes secundárias devem sua resistência e rigidez à lignina (Raven *et al.*, 2007; Taiz & Zeiger, 2004). A lignificação determina o aumento da resistência mecânica, também está associado à certa perda de elasticidade. A rigidez mecânica da lignina fortalece os caules e o tecido vascular, permitindo o crescimento ascendente e possibilitando que a água e os sais minerais sejam conduzidos através do xilema.

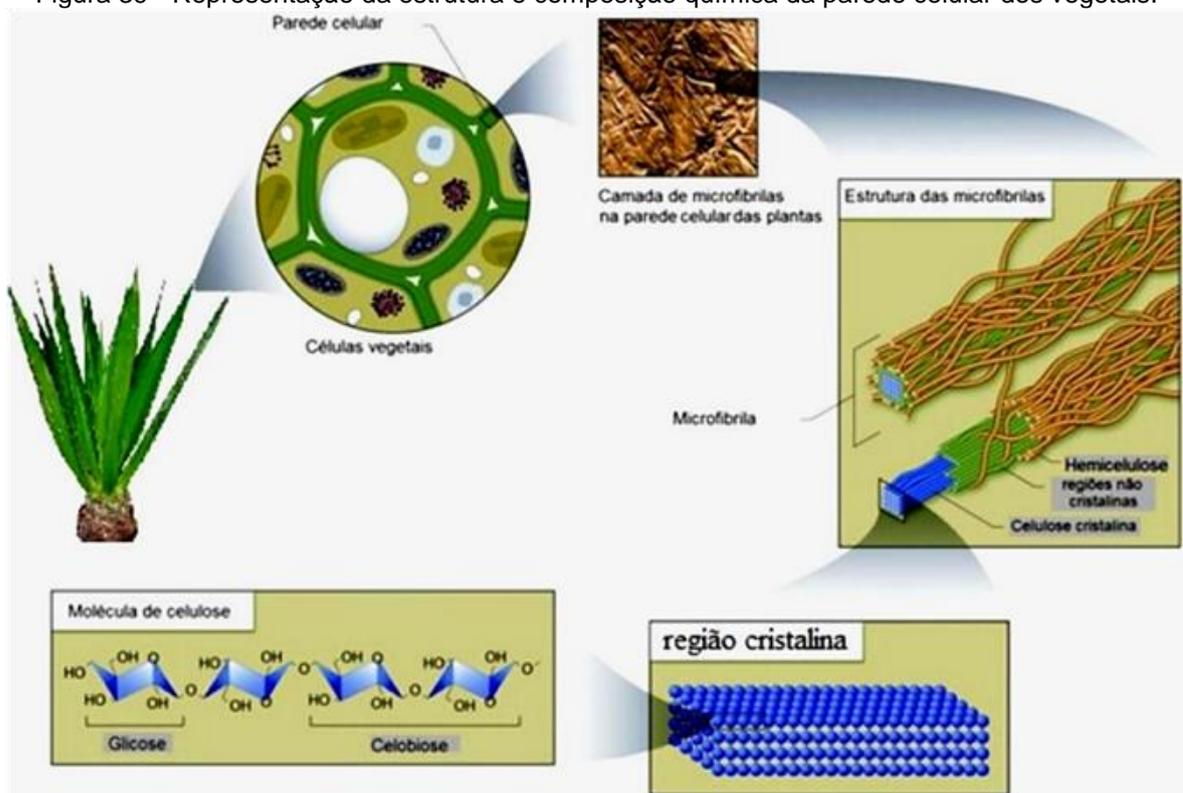
Por tanto, podemos concluir segundo a literatura, que quando uma planta morre, ou seja, encerra seu ciclo de vida, as células também morrem, então o substrato se vai juntamente com a água através de processos químicos onde os elementos passam de um estado sólido para líquido com muita facilidade à temperatura ambiente de forma limpa, retornando os nutrientes ao meio ambiente. O que lhe resta basicamente de matéria seca nas paredes primárias das células é algo em torno de 30% do seu peso, assim como, nas paredes secundárias o que resta é algo em torno de 70% do peso. A planta perde grande quantidade de peso, o que permanece são paredes celulares lignificadas, ficando só matéria leve e com espaços vazios no interior das células e nos espaços intercelulares ou lacunas intercelulares,

que são preenchidos com ar, desta forma restam apenas câmaras vazias e tubos ocos (Taiz & Zeiger, 2004).

## 2.5.2 Anatomia Vegetal - Propriedades Químicas e Mecânicas da Fibra de Agave

Do ponto de vista anatômico, as fibras do sisal são fibras estruturais cuja função é dar sustentação e rigidez às folhas. Deste modo, quando comparadas às demais fibras naturais, as de Sisal apresentam resistência superior, além de possuir boa durabilidade (Sapuan, 2006). As fibras de Agave podem atingir até aproximadamente um metro de comprimento. São constituídas de fibrilas ou fibras elementares que tem de 1,5 mm a 4,0 mm de comprimento e sua parede celular apresenta várias camadas, que diferem uma das outras em relação à sua estrutura e composição química (Carneiro, 2017).

Figura 39 - Representação da estrutura e composição química da parede celular dos vegetais.

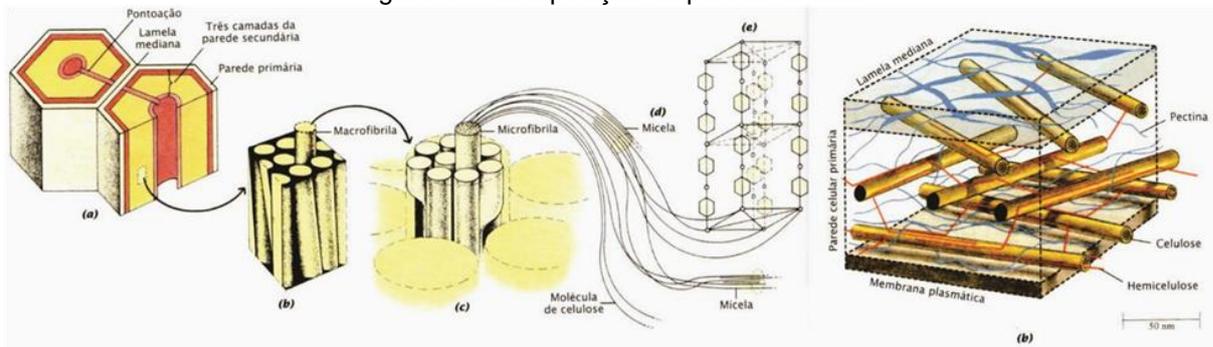


Fonte: Carneiro (2017).

Como as fibras provêm das folhas, e também estão presentes no pseudocaule da planta, sua constituição química é basicamente formada pelos mesmos compostos

presentes nas folhas, tendo em sua composição química celulose, hemicelulose, lignina, pectina e ceras (Araújo, 2015; Mwaikambo & Ansell, 2002; Meggiato Jr., 2007; Martin *et al.*, 2009)

Figura 40 - Composição da parede celular.



Fonte: Adaptado de Taiz & Zeiger (2004).

Carneiro (2017) apresenta estudos de diversos autores que estimaram a porcentagem dos elementos que compõem a fibra do sisal. Sendo apontado que as fibras pode conter de 65,8% a 73% de celulose, de 12% a 13% de hemicelulose, 9,9% a 11% de lignina e de 0,8% a 2% de pectina (Carneiro, 2017, *apud* Medina, 1954; Mwaikambo & Ansell, 2002).

Segundo Holanda (2013), a composição química lignocelulósica das fibras de sisal influencia na resistência da fibra. Neste sentido, a lignina que é um polímero complexo e de estrutura amorfa que proporciona resistência aos tecidos vegetais e o enrijecimento da parede célula, assim como protege as fibras contra danos químicos e físicos. Carneiro (2017), Agarwal e Broutman, (2006) afirmam que a lignina influencia a estrutura, as propriedades, a morfologia e a flexibilidade das fibras lignocelulósicas. Já a celulose é o polímero que confere às fibras vegetais excelentes propriedades de resistência à ruptura e alongamento.

Deste modo, a composição química lignocelulósica interfere diretamente na resistência da fibra. Em estudos realizados por Carneiro (2017), verificou-se que as fibras mais finas são compostas de fibrilas relativamente menores, o que resulta em comportamento mecânico superior. Por outro lado, à medida que o diâmetro da fibra aumenta, ocorre uma redução da resistência à tração e do módulo de elasticidade.

Dentre os elementos mais relevantes para a fibra, destaca-se o cálcio por ser um componente estrutural da parede celular, tendo em vista que a resistência da parede é estabelecida por sua composição, com base em teores de celulose,

hemicelulose e lignina, presentes na composição da parede primária e secundária das plantas. Alguns autores relatam que o fósforo e potássio devem ser considerados componentes nutricionais de grande relevância quando se considera a resistência da fibra vegetal, tendo em vista que o fósforo tende a aumentar o comprimento da fibra e o potássio a quantidade de celulose. Incrementos nestes elementos são importantes para imprimir maior resistência à fibra, refletindo em melhorias no comprimento, uniformidade de comprimento e finura desta (Carneiro, 2017, *apud* Aquino *et al.*, 2012a; Aquino *et al.*, 2012b; Rosolem e Witacker, 2007; Santos *et al.*, 2012; Carvalho, 2007).

Os compósitos reforçados com fibras de sisal se destacam por apresentarem alta resistência ao impacto, e boas propriedades de resistência à tração e flexão. Isto é atribuído ao fato da fibra de sisal apresentar um dos maiores valores de módulo de elasticidade e de resistência mecânica entre as fibras naturais (MARTIN, 2009). De acordo com Carneiro (2017), o comportamento do módulo de elasticidade das fibras de sisal se dá ao fato de existirem de forças intermoleculares entre as cadeias de celulose.

Figura 41 - Fibra comercial de *Agave sisalana* contínua extraída das folhas da planta.



Fonte: <https://www.wgc.de/es/produkte/sisal> (2019).

Carneiro (2017) apresenta estudos comparativos feitos com fibras vegetais e fibras poliméricas, incluindo o sisal e outras fibras naturais, e fibras de polipropileno (PP). Os trabalhos realizados demonstraram que as fibras de sisal apresentam maior módulo de elasticidade, conseqüentemente maior rigidez que fibras vegetais como coco e bagaço de cana, assim como fibras de polipropileno, estando esta rigidez

possivelmente associada ao teor de lignina presente nas fibras de sisal. A resistência à ruptura e alongamento também está relacionado devido às forças intermoleculares entre as cadeias de celulose.

Neste sentido, autores afirmam que as fibras de sisal podem substituir a fibra de vidro empregada como reforço aos compósitos poliméricos na fabricação de peças, produzidas por variados processos de fabricação, como moldagem por injeção, laminação, moldagem por transferência de resina, dentre outras utilidades. Ademais, podem ser alternativas como material substituto para as vigas de ferro, usadas no lugar de concreto em países como o Japão, que enfrentam problemas de tremores de terra de alta intensidade, pela sua alta resistência mecânica e leveza. (Carneiro, 2017, *apud* Agopyan, 2005; Ereno, 2007).

## 2.6 PAULOWNIA

### 2.6.1 Contextualização e usos da madeira de Paulownia

A madeira de Paulownia é conhecida por sua notável leveza, sendo apelidada de "alumínio das madeiras" devido a essa característica (Sá, 2022). É uma escolha popular em aplicações que exigem materiais leves, dada sua baixa densidade. Além disso, o gênero Paulownia tem despertado grande interesse devido ao seu rápido crescimento, alta absorção de carbono e resistência ao fogo (Esteves, B. *et al.*, 2022; Jakubowski, 2022).

Comparativamente, a Paulownia é a segunda madeira mais leve, perdendo apenas para a Balsa, e suas propriedades mecânicas a tornam uma candidata para substituir a Balsa em algumas aplicações (Barbu *et al.*, 2022). A madeira de Paulownia seca facilmente e é resistente a deformações, tornando-a adequada para diversas indústrias, desde aeronáutica até fabricação de pranchas de surf. Ela também é valorizada por sua baixa absorção de água salgada, uma vantagem em esportes aquáticos (Gonçalves *et al.*, 2019; Lachowicz & Giedrowicz, 2020; iPaulownia, 2023). A madeira de Paulownia é uma escolha versátil, conhecida por sua leveza excepcional e amplamente reconhecida por suas propriedades únicas, tornando-a valiosa em várias aplicações industriais (Zhu, Z. H. *et al.* 1986).

A Paulownia é notável por sua adaptação rápida e crescimento acelerado. Em circunstâncias normais, árvores de Paulownia atingem 30-40 cm de diâmetro em 10

anos, mas sob condições ideais, produzem madeira útil em apenas cinco a seis anos (Zhu, Z. H. *et al.* 1986). Este gênero, reconhecido por sua versatilidade e rápido crescimento, é extensivamente estudado e cultivado em diversas regiões de Portugal e Espanha (Neves de Sá, 2022). Apesar de suas cerca de vinte espécies serem distintas, compartilham características marcantes entre si.

Dentre as espécies do gênero *Paulownia*, como *Paulownia fortunei*, *Paulownia tomentosa* e *Paulownia elongata*, são produzidos híbridos para resistência local (Lachowicz & Giedrowicz, 2020). Condições ideais para seu crescimento estão no sul da Europa, como Espanha, Portugal e Itália (Jakubowski, 2022), sendo que *P. tomentosa*, *P. elongata* e *P. fortunei* foram as espécies principais introduzidas em outros países (Jakubowski, 2022).

Clones comuns derivam de cruzamentos entre *P. tomentosa* e *P. fortunei*, incluindo híbridos com *P. elongata* (Sá, 2022). Um exemplo notável é o rápido crescimento do clone Cotevisa 2 (COTE-2) em 7 anos, certificado com o selo QWF (Quality Wood Forestry) (Lachowicz & Giedrowicz, 2020; Esteves, B. *et al.* 2022). Sob condições adequadas, uma árvore de *Paulownia* Cotevisa 2® pode produzir até 1,4 m<sup>3</sup> de madeira em 8 a 10 anos (iPaulownia, 2023). A seleção criteriosa de híbridos e clones, como o COTE-2, é promissora para a produção sustentável de madeira de alta qualidade (Jakubowski, 2022; Sá, 2022; Esteves, B. *et al.* 2022; Lachowicz & Giedrowicz, 2020; Goncalves, 2019).

### **2.6.2 Características físicas em relação à estrutura macroscópica da madeira:**

A madeira de *Paulownia* exibe características físicas distintas em sua estrutura macroscópica. Sua coloração varia de amarelo pálido a vermelho pálido, com uma transição não nítida entre o alburno e o cerne. Normalmente, o alburno contém apenas um ou dois anéis anuais, enquanto o cerne é mais amplo e pode apresentar textura fina a ligeiramente grosseira. À medida que a árvore cresce rapidamente, os anéis de crescimento no cerne tornam-se largos, enquanto os poros nos anéis diminuem gradualmente de tamanho à medida que se afastam do centro. Os raios não são facilmente visíveis a olho nu, mas podem ser observados com uma lupa ou microscópio. Além disso, a madeira possui grão reto, brilho característico após aplainamento e é leve, macia e sem odor (Zhu, Z. H. *et al.* 1986).

Jakubowski, M. (2022) também destaca que as Paulownias têm cerne de cor amarelo claro a vermelho claro, e a fronteira entre o alburno e o cerne não é claramente definida. O alburno, bastante estreito, geralmente consiste em apenas um ou dois anéis anuais visíveis. A madeira exibe uma estrutura anelar porosa ou semi-anelar, e é conhecida por sua maciez e tendência a ser livre de nós. (Dogu *et al.* 2017; Barbu *et al.* 2022; Jakubowski, M. 2022).

### 2.6.3 Estrutura microscópica – anatomia vegetal

A análise da estrutura microscópica da madeira de Paulownia revela uma organização notável em escalas variadas. De maneira geral, os raios multisseriados, procumbentes, vasos solitários a múltiplos, e a ausência de obstruções são características marcantes dessa madeira (Zhu, Z. H. *et al.* 1986; Gonçalves *et al.* 2019).

Em níveis mais detalhados, os vasos são predominantemente solitários, com ocorrência de múltiplos radiais compostos por duas ou três células (Dogu *et al.* 2017; Sá, 2022). Eles podem apresentar contornos angulares, arredondados ou elípticos. As placas de perfuração são simples, e a diferença no tamanho dos vasos entre o lenho inicial e o lenho final varia de três a cinco vezes (Dogu *et al.* 2017).

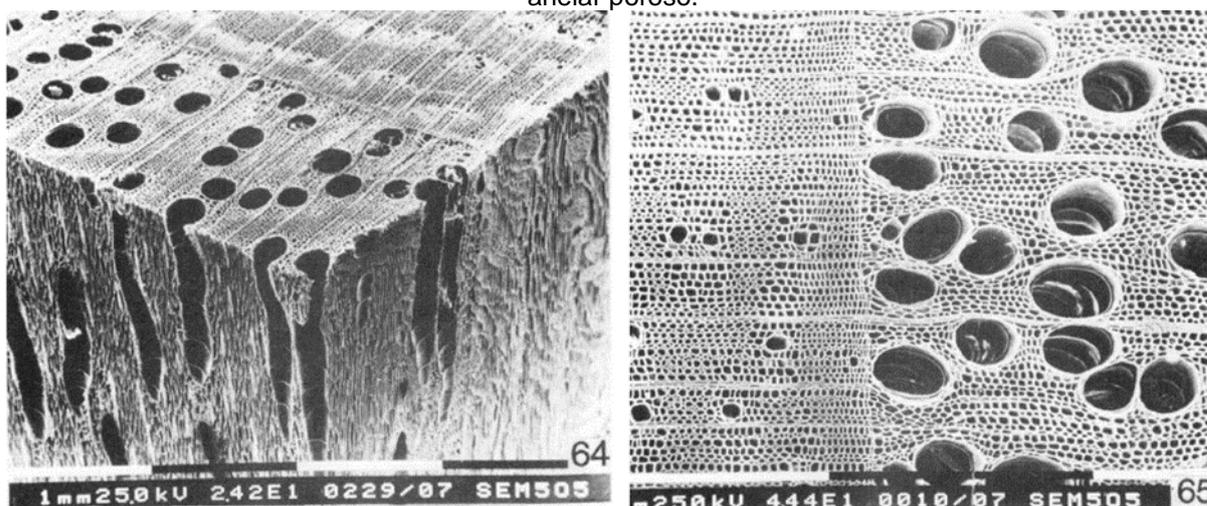
Além disso, os vasos são ovalados e podem ser divididos em vasos de lenho inicial e vasos de lenho tardio, sendo estes últimos de 3 a 10 vezes menores. Acompanhados por uma banda larga de parênquima com formas variadas, os raios são geralmente estreitos e ocupam principalmente uma única fila, embora raios multisseriados também ocorram (Jakubowski, M., 2022). O parênquima axial é paratraqueal e bem desenvolvido na madeira geralmente anular, com faixas comuns (Zhu, Z. H. *et al.* 1986; Dogu *et al.* 2017; Neves de Sá, 2022).

Em uma análise anatômica mais específica do híbrido *P. elongata* × *P. fortunei* (clone Paulownia COT2), é notável a presença de anéis de crescimento distintos, a maior concentração de vasos de grande diâmetro no início do anel e a maior proporção e espessamento das fibras no anel (Sá, 2022). As fibras possuem parede muito fina e são mais visíveis no lenho final em comparação ao lenho inicial. Os raios, em sua maioria, consistem em um único tipo de célula (homocelulares), embora ocasionalmente possam ser compostos por dois ou mais tipos de células

(heterocelulares), com células quadradas e eretas restritas a fileiras marginais (Dogu *et al.* 2017).

No que diz respeito às células de fibras, elas apresentam tamanho uniforme nos anéis anuais, e placas de limite são comuns. Essas fibras são organizadas em séries verticais, possuindo paredes celulares finas, com menos de 3  $\mu\text{m}$  de espessura, e um comprimento médio variando de 550 a 1700  $\mu\text{m}$  para *P. fortunei* (Figura 42, imagens 64, 65).

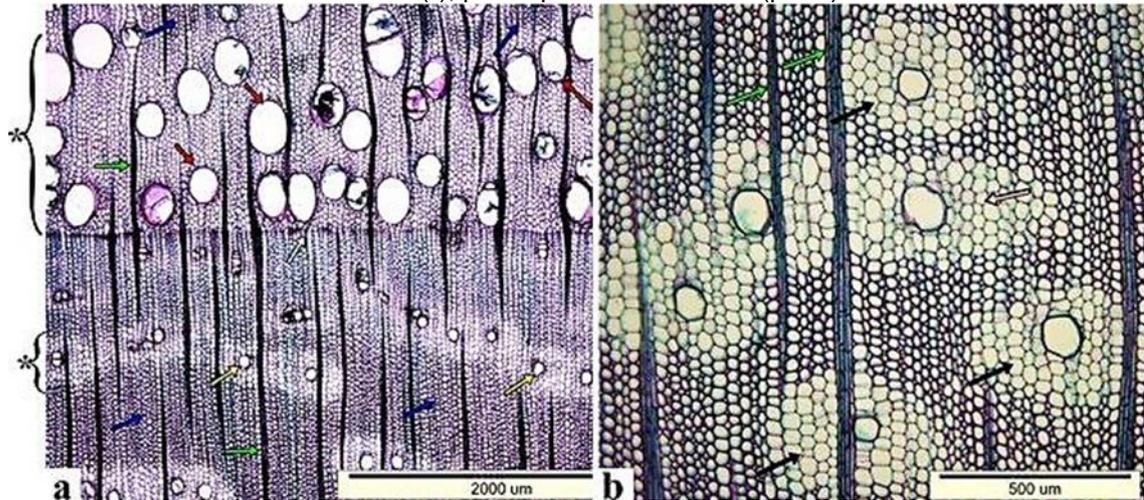
Figura 42 - Seção tridimensional da madeira de *P. fortunei* usando micrografia de varredura eletrônica; e seção transversal, pode ser observado diferenças entre a madeira inicial e tardia, arranjo anelar poroso.



Fonte: Zhu, Z. H. *et al.* (1986).

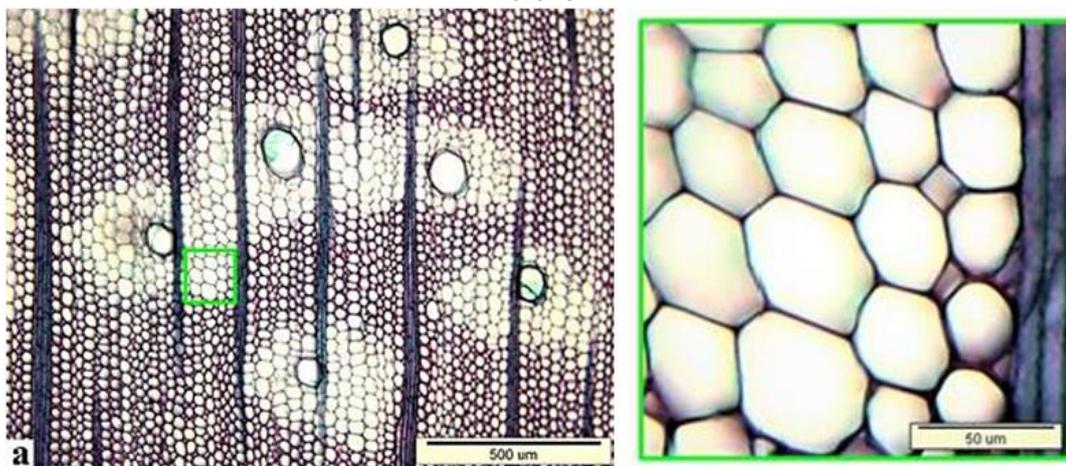
Neves de Sá (2022) relata que o comprimento médio das fibras no híbrido Cotevisa 2 varia entre 0,78 mm e 1,08 mm. Em concordância com as observações de Dogu *et al.* (2017), as paredes celulares do parênquima são mais finas em comparação com as das células de fibras. A madeira de Paulownia é caracterizada por uma menor quantidade de fibras e uma maior presença de células de parênquima. Sua estrutura microscópica exibe uma notável porosidade e uma organização celular que se assemelha a padrões de Voronoi. A Figura 43 ilustra imagens microscópicas da madeira de Paulownia não tratada.

Figura 43 - (a/b) Secção transversal: limite distintivo do anel de crescimento (branco), vasos do lenho inicial (poros) (vermelho), vasos do lenho final (amarelo), células de fibras (azul), parênquima axial bandado (\*), parênquima vasicêntrico (preto).



Fonte: Dogu *et al.* (2017).

Figura 44 - Parte média do anel de crescimento. Destaque para as células apresentado diagramas de Voronoi.



Fonte: Dogu *et al.* (2017).

Os resultados do estudo realizado por Dogu *et al.* (2017) levantaram a opinião de que a madeira de Paulownia se assemelha à madeira de Balsa em relação ao seu peso leve e à ocorrência de formas de células hexagonais na microestrutura. Essas propriedades derivam da microestrutura, que consiste em células traqueais com seções transversais aproximadamente hexagonais dispostas axialmente.

#### 2.6.4 Propriedades da madeira

A densidade é uma propriedade física, ela desempenha um papel importante na caracterização mecânica de materiais. A densidade não está relacionada

diretamente às propriedades mecânicas, como a resistência ou a elasticidade, mas é fundamental para o estudo dessas propriedades, uma vez que a densidade influencia a massa de um material, que por sua vez afeta como ele se comporta sob carga. Ela descreve a relação entre a massa de um objeto ou substância e o seu volume.

A madeira de Paulownia é conhecida por sua excepcional leveza. A densidade da madeira, que representa a relação entre sua massa e volume, é um parâmetro fundamental que influencia várias propriedades físicas e mecânicas (Zhu, Z. H. *et al.* 1986; Lachowicz & Giedrowicz, 2020; Barbu *et al.* 2022). Essa baixa densidade resulta da presença de muitos espaços vazios na madeira, conferindo-lhe suas propriedades leves. Além disso, devido à sua baixa densidade, a madeira de Paulownia apresenta um encolhimento total reduzido em direções anatômicas específicas, variando de 75% a 88% dependendo da espécie (Lachowicz & Giedrowicz, 2020).

A madeira de Paulownia é conhecida por sua notável leveza, apesar de sua resistência. Neves de Sá (2022) conduziu estudos que relatam variações na densidade, com valores oscilando entre 208 kg/m<sup>3</sup> e 310 kg/m<sup>3</sup>. Zhu, Z. H. *et al.* (1986) observaram que, após a secagem ao ar com teor de umidade de 15%, a densidade pode variar de 264 kg/cm<sup>3</sup> a 330 kg/cm<sup>3</sup>. A densidade varia de acordo com a espécie e as condições locais, mas todas as variedades produzem madeira excepcionalmente leve. Por exemplo, a *P. elongata* tem uma das densidades mais baixas, com uma média de 264 kg/m<sup>3</sup> a 15% de umidade, enquanto a *P. fortunei* tem cerca de 309 kg/m<sup>3</sup>. Lachowicz & Giedrowicz (2020) também relatam estudos que encontraram uma densidade média da madeira de *P. fortunei* em torno de 291 kg/m<sup>3</sup>. Gonçalves (2019) menciona que a densidade da Paulownia pode variar de 250 a 360 kg/m<sup>3</sup>, enquanto Jakubowski, M. (2022) destaca que, na maioria dos casos, a densidade da madeira de Paulownia gira em torno de 270 kg/m<sup>3</sup>.

Diversos estudos e testes foram conduzidos em híbridos *P. elongata x fortunei* por diferentes autores. Barbu *et al.* (2022) apresentaram as propriedades físicas e mecânicas da madeira de Paulownia, comparando-a com outras espécies de madeira leve, como a Balsa. As densidades relatadas foram: Paulownia COTE-2 (*P. elongata x fortunei* - Espanha) com 216 kg/m<sup>3</sup> e Balsa com 160 kg/m<sup>3</sup>.

Lachowicz & Giedrowicz (2020) conduziram uma pesquisa com o objetivo de investigar as propriedades físicas e mecânicas da madeira de Paulownia 'Cotevisa 2' (*P. elongata x fortunei* - Espanha) para caracterizar sua qualidade técnica e determinar suas possibilidades de uso. A densidade média da madeira de Paulownia 'Cotevisa 2'

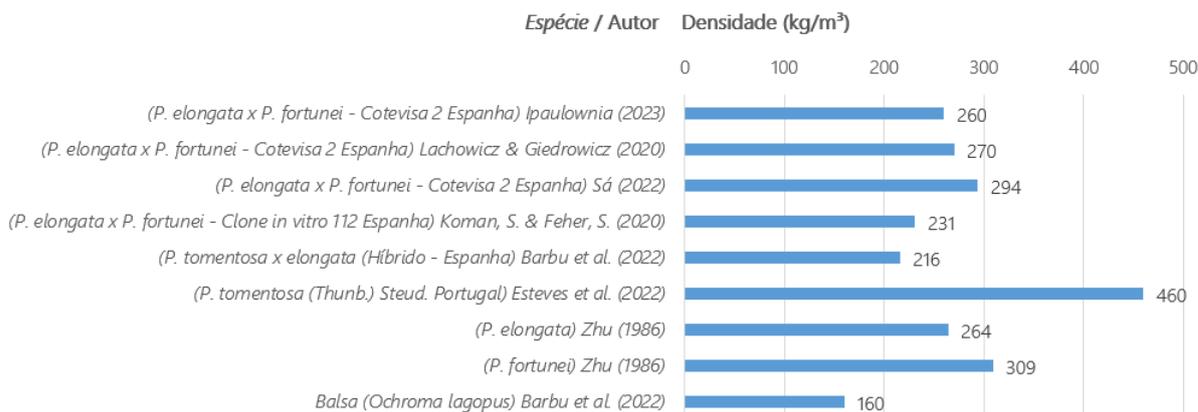
após secagem ao ar, com 12% de umidade, foi de aproximadamente 270 kg/m<sup>3</sup>, com um valor mínimo de 206 kg/m<sup>3</sup> e máximo de 360 kg/m<sup>3</sup> (Lachowicz & Giedrowicz, 2020). A empresa iPaulownia (2023), que produz clones do híbrido Cotevisa 2, estabeleceu a densidade em cerca de 260 kg/m<sup>3</sup>, enquanto Neves de Sá (2022) obteve uma densidade de aproximadamente 293,60 kg/m<sup>3</sup> para o híbrido Cotevisa 2.

Tabela 2 - Comparativo de densidades em diferentes espécies de Paulownia e Balsa.

| Autor                         | Espécie  | Densidade (kg/m <sup>3</sup> ) |
|-------------------------------|--|--------------------------------|
| Neste estudo                  | ( <i>P. elongata</i> x <i>P. fortunei</i> - Cotevisa 2 iPaulownia Espanha) | 310                            |
| iPaulownia (2023)             | ( <i>P. elongata</i> x <i>P. fortunei</i> - Cotevisa 2 Espanha)            | 260                            |
| Lachowicz & Giedrowicz (2020) | ( <i>P. elongata</i> x <i>P. fortunei</i> - Cotevisa 2 Espanha)            | 270                            |
| Neves de Sá (2022)            | ( <i>P. elongata</i> x <i>P. fortunei</i> - Cotevisa 2 Espanha)            | 294                            |
| Koman, S. & Feher, S. (2020)  | ( <i>P. elongata</i> x <i>P. fortunei</i> - Clone in vitro 112 Espanha)    | 231                            |
| Barbu <i>et al.</i> (2022)    | ( <i>P. tomentosa</i> x <i>elongata</i> (Híbrido - Espanha)                | 216                            |
| Esteves <i>et al.</i> (2022)  | ( <i>P. tomentosa</i> (Thunb.) Steud. Portugal)                            | 460                            |
| Zhu, Z. H. et al. (1986)      | ( <i>P. elongata</i> )   | 264                            |
| Zhu, Z. H. et al. (1986)      | ( <i>P. fortunei</i> )   | 309                            |
| Barbu <i>et al.</i> (2022)    | Balsa ( <i>Ochroma lagopus</i> )   | 160                            |

Fonte: O autor (2023).

Gráfico 1 - Comparativo das densidades de espécies de Paulownia e Balsa.



Fonte: O Autor (2023).

A densidade da madeira de Paulownia varia consideravelmente dependendo da espécie, local de cultivo e estudo realizado. Autores como Neves de Sá (2022) e Lachowicz & Giedrowicz (2020) relatam densidades próximas para a espécie *P. elongata* x *P. fortunei* - Cotevisa 2 Espanha, com valores de 294 kg/m<sup>3</sup> e 270 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente. No entanto, Koman, S. & Feher, S. (2020) apresentam uma densidade mais baixa para um clone in vitro da mesma espécie, registrando 231

kg/m<sup>3</sup>. Esteves *et al.* (2022), por outro lado, apresentam a densidade mais alta de todas as espécies estudadas, com 460 kg/m<sup>3</sup> para a espécie *P. tomentosa* (Thunb.) Steud. (Portugal). A variação na densidade destaca a importância de considerar fatores como espécie e local de cultivo ao avaliar a adequação da madeira de Paulownia para diferentes aplicações. Além disso, a densidade da Balsa (160 kg/m<sup>3</sup>), usada como referência, é consideravelmente menor do que a maioria das espécies de Paulownia, sublinhando a leveza excepcional desta última. O híbrido Cotevisa 2, com sua densidade média de cerca de 270 kg/m<sup>3</sup>, destaca-se como uma opção equilibrada entre os híbridos de Paulownia, oferecendo uma combinação notável de leveza e resistência para diversas aplicações.

A densidade da madeira também influencia suas propriedades de resistência. No caso da Paulownia, sua baixa densidade surpreendentemente não compromete a resistência de sua madeira (Kozakiewicz, 2018; Lachowicz & Giedrowicz, 2020). No entanto, embora seja abundantemente disponível, certas características da madeira de Paulownia, como a baixa resistência, densidade reduzida e baixa dureza, podem limitar seu potencial de uso final (Dogu *et al.* 2017). Por outro lado, devido às suas propriedades físicas e mecânicas, a madeira Paulownia COTE-2, de baixa densidade e boa resistência, pode não ser a escolha ideal em forma sólida para elementos estruturais de maiores dimensões que requerem propriedades mecânicas mais elevadas (Zhu, Z. H. *et al.* 1986; Lachowicz & Giedrowicz, 2020).

A norma técnica UNE 56540, sugere que, de acordo com os critérios e padrões estabelecidos, a madeira de Paulownia foi classificada como tendo uma baixa resistência em comparação com outros tipos de madeira. É importante notar que a classificação de "baixa resistência" não significa necessariamente que a madeira de Paulownia não tenha valor ou utilidade. Pode simplesmente indicar que ela possui características específicas de resistência que a tornam mais adequada para determinados usos e menos adequada para outros que requerem uma resistência maior. Portanto, não é adequada para uso como componentes de construção que normalmente exigem alta resistência. No entanto, no que diz respeito à relação resistência-peso (coeficiente de qualidade) é adequada para algumas utilizações que requerem madeira macia, porém relativamente resistente (Zhu, Z. H. *et al.* 1986).

O uso da madeira de Paulownia pode ser vantajoso em aplicações que não exigem alta resistência, devido a outras características favoráveis, como baixa

densidade e leveza. Sendo assim ideal para fabricação de pranchas de surf que requerem propriedades materiais de leveza e resistência.

### 2.6.5 Propriedades mecânicas

Jakubowski, M. (2022) analisou estudos de diversos autores e constatou que a resistência à flexão estática da madeira de Paulownia varia entre 23,98 e 43,56 MPa, dependendo da espécie, enquanto o módulo de elasticidade varia de 2,65 a 4,91 GPa. Zhu, Z. H. *et al.* (1986) apresenta as principais propriedades físico-mecânicas da madeira de duas espécies de Paulownia. Para *P. elongata*, a resistência à flexão foi de 28,35 MPa, e o módulo de elasticidade à flexão foi de 4,11 GPa. Já para *P. fortunei*, a resistência à flexão foi de 39,63 MPa, e o módulo de elasticidade à flexão foi de 6,16 GPa.

Por outro lado, Esteves *et al.* (2022) encontraram valores médios mais elevado para a resistência à flexão, atingindo 53,5 MPa e módulo de elasticidade de 7 GPa para a Paulownia de Portugal. Neves de Sá (2022) avaliou as seguintes propriedades da madeira Paulownia COTE-2: resistência à tensão de flexão de 52,90 MPa e módulo de elasticidade estático de flexão de 6,46 GPa. De acordo com a empresa iPaulownia (2023), o híbrido Cotevisa-2 apresenta um módulo de elasticidade de 5,6 GPa e um módulo de ruptura de 28 MPa.

No estudo realizado por Lachowicz & Giedrowicz (2020), a madeira de Paulownia do tipo Cotevisa 2 foi minuciosamente examinada, revelando propriedades notáveis. A resistência à flexão estática dessa madeira foi determinada com valores médios em torno de 39 MPa, variando de 23,9 a 53,7 MPa. Além disso, o módulo de elasticidade na flexão estática demonstrou uma ampla gama de valores, variando de 2,78 a 7,61 GPa, com uma média de 5,15 GPa. É importante ressaltar que o coeficiente de variação para todas essas propriedades permaneceu consistentemente abaixo de 25%, indicando uma relativa uniformidade nas medições.

Barbu *et al.* (2022) fornece os valores medidos nos testes de flexão para a Balsa. Esses valores são significativamente menores quando comparados com a tensão máxima de flexão (módulo de ruptura) e o módulo de elasticidade da madeira das espécies de Paulownia. A Balsa, por exemplo, apresenta uma tensão máxima de flexão de cerca de 17 MPa, notavelmente inferior à média da Paulownia. Além disso,

o módulo de elasticidade da madeira da Balsa também é menor em comparação com a Paulownia, com uma média de 2,90 GPa.

Tabela 3 - Comparativo de propriedades mecânicas em diferentes espécies de Paulownia e Balsa.

| Autor                           | Espécie  | Propriedade                   | Valor | Unidade |
|---------------------------------|--|-------------------------------|-------|---------|
| Neste estudo (2023)             | <i>(P. elongata x P. fortunei</i> - Cotevisa 2 iPaulownia Espanha) | Módulo de Elasticidade Flexão | 4,78  | GPa     |
|                                 |  | Tensão Máxima Flexão          | 58,75 | MPa     |
|                                 |  | Tensão Máxima Tração          | 17,02 | MPa     |
| iPaulownia (2023)               | <i>(P. elongata x P. fortunei</i> - Cotevisa 2 Espanha)            | Módulo de Elasticidade Flexão | 5,60  | GPa     |
|                                 |  | Tensão Máxima Flexão          | 28,00 | MPa     |
| Lachowicz & Giedrowicz (2020)   | <i>(P. elongata x P. fortunei</i> - Cotevisa 2 Espanha)            | Módulo de Elasticidade Flexão | 5,15  | GPa     |
|                                 |  | Tensão Máxima Flexão          | 39,63 | MPa     |
| Neves de Sá (2022)              | <i>(P. elongata x P. fortunei</i> - Cotevisa 2 Espanha)            | Módulo de Elasticidade Flexão | 6,46  | GPa     |
|                                 |  | Tensão Máxima Flexão          | 52,90 | MPa     |
| Koman, S. & Feher, S. (2020)    | <i>(P. elongata x P. fortunei</i> - Clone in vitro 112 Espanha)    | Módulo de Elasticidade Flexão | 3,80  | GPa     |
|                                 |  | Tensão Máxima Flexão          | 32,30 | MPa     |
| Barbu <i>et al.</i> (2022)      | <i>(P. tomentosa x elongata</i> (Híbrido - Espanha)                | Módulo de Elasticidade Flexão | 4,86  | GPa     |
|                                 |  | Tensão Máxima Flexão          | 39,77 | MPa     |
|                                 |  | Tensão Máxima Tração          | 44,12 | MPa     |
| Esteves <i>et al.</i> (2022)    | <i>(P. tomentosa</i> (Thunb.) Steud. Portugal)                     | Módulo de Elasticidade Flexão | 7,00  | GPa     |
|                                 |  | Tensão Máxima Flexão          | 53,50 | MPa     |
| Zhu, Z. H. <i>et al.</i> (1986) | <i>(P. elongata)</i>   | Módulo de Elasticidade Flexão | 4,11  | GPa     |
|                                 |  | Tensão Máxima Flexão          | 28,35 | MPa     |
|                                 |  | Tensão Máxima Tração          | 38,66 | MPa     |
| Zhu, Z. H. <i>et al.</i> (1986) | <i>(P. fortunei)</i>   | Módulo de Elasticidade Flexão | 6,16  | GPa     |
|                                 |  | Tensão Máxima Flexão          | 39,63 | MPa     |
|                                 |  | Tensão Máxima Tração          | 55,35 | MPa     |
| Barbu <i>et al.</i> (2022)      | <i>Balsa (Ochroma lagopus)</i>                                     | Módulo de Elasticidade Flexão | 2,90  | GPa     |
|                                 |  | Tensão Máxima Flexão          | 16,63 | MPa     |

Fonte: O Autor (2023).

Segundo Barbu *et al.* (2022) a madeira de Paulownia alcançou valores significativamente mais baixos em propriedades físicas e mecânicas em comparação com espécies convencionais como abeto, carvalho ou álamo. A madeira de Paulownia pode ser classificada como muito baixa e baixa para MOR (módulo de ruptura) e MOE (módulo de elasticidade). A Paulownia não é recomendada para usos estruturais, que requerem alta resistência mecânica e rigidez.

As Paulownias exibem um notável fator de qualidade de resistência, que se traduz em uma alta relação entre resistência e densidade. Esse parâmetro é extremamente valioso em aplicações específicas, particularmente em situações que requerem estruturas leves, porém robustas, como em painéis e estruturas leves de construção compostas (Jakubowski, M. 2022). Além disso, Lachowicz & Giedrowicz

(2020) concluíram que a madeira de Paulownia COTE-2 possui densidade muito baixa, o que se reflete em valores igualmente baixos de propriedades mecânicas. Surpreendentemente, quando comparada com outras espécies de Paulownia, a COTE-2 supera em propriedades mecânicas, apesar de sua menor densidade.

Conforme observado por Lachowicz & Giedrowicz (2020), quando a madeira de Paulownia é submetida a flexão estática, ela tende a rachar e desintegrar-se de maneira característica. Contudo, vale ressaltar que a madeira de Paulownia exibe um notável fator de qualidade de resistência quando submetida a compressão ao longo das fibras, comparável à resistência da madeira mais densas e pesadas, como bétula.

Portanto, podemos concluir que, em seu estado natural, a madeira de Paulownia não se classifica como madeira estrutural. No entanto, devido à sua notável leveza, a Paulownia apresenta uma relação excepcional entre resistência e densidade. Essa característica é de grande importância em diversas aplicações, como na construção de pranchas de surf e uma variedade de outros artefatos. Ao examinarmos a estrutura das paredes celulares em nível microscópico, podemos identificar padrões que se assemelham aos diagramas de Voronoi. Essa estrutura reflete as estratégias naturais de leveza e resistência encontradas na madeira de Paulownia, semelhantes à anatomia do Agave.

No capítulo de referencial teórico, foram abordados temas relevantes para a compreensão e embasamento do presente estudo. Inicialmente, explorou-se o campo da biomimética, com ênfase em seu histórico, conceitos, métodos e processos, assim como a relação entre estrutura e função de sistemas naturais e bioinspirados. Em seguida, foram discutidos a fabricação digital e o design paramétrico, destacando-se a ferramenta Grasshopper como um recurso essencial nesse contexto. Adicionalmente, foi investigado o design de materiais bioinspirados, abrangendo propriedades dos materiais de base biológica, computação bioinspirada e manufatura na biomimética, bem como o design de materiais e a impressão 3D. Por fim, foi realizado um estudo detalhado sobre o Agave, abordando sua anatomia vegetal, propriedades químicas e mecânicas da fibra de Agave, assim como a Paulownia. Essa revisão teórica estabelece um sólido embasamento para o desenvolvimento da pesquisa, cujas etapas metodológicas são abordadas no próximo capítulo. A partir desse contexto teórico abrangente, a pesquisa avançará para a execução das etapas metodológicas, a fim de aprofundar e aplicar os conhecimentos adquiridos.

### 3 DESENVOLVIMENTO

#### 3.1 PRANCHAS DE SURF SUSTENTÁVEIS - CONTEXTUALIZAÇÃO SINCRÔNICA, MATERIAIS E TIPOS DE CONSTRUÇÃO

De acordo com o designer de pranchas renomado com mais de 50 anos de experiência Gary Linden ([lindensurfboards.com/bio/](http://lindensurfboards.com/bio/) 2020), é possível usar materiais naturais e processos não poluentes para criar pranchas de alto desempenho que são mais benéficas para o meio ambiente. Com foco na sustentabilidade, é pioneiro na utilização do Agave para construir pranchas de surf, usando madeiras leves de Balsa e Agave para fazer pranchas de performance, duráveis e hidrodinâmicas.

Gary Linden produziu algumas pranchas de surf icônicas de Agave entre os anos de 1998 e 2000. Essas pranchas, ilustradas na Figura 45, foram feitas com Agave colhido manualmente na Califórnia, sendo posteriormente colado em bloco e moldado à mão. Entre os tamanhos das pranchas estão: 9'6" Pat Curren-Gary Linden Agave Gun, 10'11" Gary Linden Agave Gun, 9'6" Gary Linden Agave Swallowtail e 7'4" Gary Linden Agave Swallowtail.

Figura 45 - Pranchas de surf de Agave icônicas de Gary Linden (1998-2000).

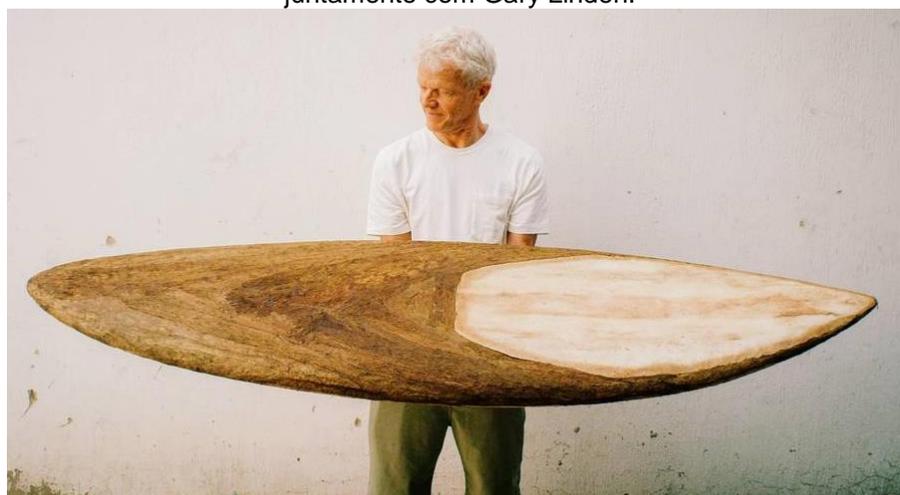


Fonte: Adaptado de Marcus, B. (2007).

Grandes empresas começam a perceber a relevância de projetos na área de surf com foco na sustentabilidade. A exemplo da empresa fabricante de tequila Jose Cuervo® Tradicional®, que lançou projetos para construção de pranchas de surf fornecendo o Agave de sua produção de tequila. Onde a tequila e o surf unem forças na criação de pranchas artesanais e sustentáveis feitas de materiais do Agave.

Um dos projetos chamado “100% Agave” em parceria com Gary Linden, construiu uma prancha de surf em sua totalidade feita de Agave. Ele moldou o bloco a partir dos talos de Agave, utilizou folhas de Agave para laminar a prancha e fixar a quilha, depois selou tudo com uma polpa e uma seiva extraída do próprio Agave. Na mostra Boardroom Surfboard 2015, Linden ganhou o título de Melhor Uso de Material Tradicional ao Projeto 100% Agave, elogiando seu uso criativo de recursos naturais e elevando a arte do surf a um nível orgânico ao criar uma prancha de surf totalmente a partir de materiais sustentáveis (2015).

Figura 46 - Prancha produzida com 100% de Agave, projeto da Jose Cuervo® Tradicional® juntamente com Gary Linden.



Fonte: <http://www.aframescreative.com/featuredwork/josecuervo> (2015).

Em outro projeto lançado, a Jose Cuervo® Tradicional® desafiou alguns dos melhores shapers de pranchas de surf do mundo para criar pranchas de Agave de alta performance e mais ecológicas do que as tábuas feitas com métodos de construção tradicionais.

Britt Merrick, um dos fabricantes de pranchas de Agave Jose Cuervo® Tradicional®, acredita que se deve estar sempre avançando no uso materiais que sejam amigáveis ao meio ambiente, não só usar materiais que sejam ecologicamente corretos - mas também avançar para a progressão do surf de performance.

Figura 47 - Pranchas de Agave.



Fonte: [cuervo.com/surf/](http://cuervo.com/surf/) (2016).

Figura 48 - As pranchas de Agave são leves e resistentes.



Fonte: esquerda - <https://www.surflife.com/surf-news/jose-cuervo%EF%B8%8F-tradicional%EF%B8%8F-agave-surfboard-plant-wave/94019> (2016); direita - <https://www.agavesurf.com.>(2018).

O conceito de prancha de surf de Agave surgiu há algum tempo graças aos pioneiros como Linden, mas só recentemente tem surgido modelos de negócios por trás disso. Segundo Howard (2018), Nate Headrick e Ian Bryan, ao buscar novas

maneiras de fazer equipamentos mais ecológicos e sustentáveis para surfistas, verificaram que o Agave pode ser colhido depois que a planta mãe se reproduziu através de clones muitas vezes e pode ser cultivado em quase todos os lugares onde existe cultura do surf. De acordo com Howard (2018), o próximo passo para o surf, é criar um sistema local de cultivo de Agave para pranchas de surf para substituir os materiais e práticas que prejudicam esse estilo de vida.

Um destes locais está localizado na África (Figura 49), como por exemplo, a empresa fabricante de blocos e pranchas de surf de Agave Grow Blanks Ltd com sede em uma das maiores fazendas de Agave do mundo no Quênia, onde colhem seu próprio material de fonte sustentável, usando os escapos florais das plantas de Agave de sisal como alternativa para as espumas oriundas de fontes não renováveis. Segundo a empresa, todos os produtos e resíduos são orgânicos e biodegradáveis, e qualquer resíduo da fábrica é transformado em outros produtos, como biocarvão para correções de solo, e cultivo de cogumelos à partir dos resíduos, proporcionando assim mais empregos e apoio para as comunidades locais.

Figura 49 - Uma das maiores fazendas de plantação de Agave situada no Quênia.



Fonte: Grow Blanks Surfboards (2022).

O escapo floral do Agave é colhido na altura correta, depois de seco é retirada a casca deixando as peças com as laterais paralelas e aproveitando a própria curvatura para fazer o rocker (curva longitudinal da prancha, do nose ao tail). As peças são coladas e unidas prensadas em plano seriado, depois são modelados conforme especificações e dimensões do bloco para cada tamanho e modelo específico de prancha.

Figura 50 - Fábrica Grow Blanks; “Da planta à prancha”.



Fonte: growblanks.com (2021)

Em relação aos processos de fabricação das pranchas, atualmente é usual o recurso da fabricação digital com auxílio de máquinas de usinagem CNC para realizar o pré shape de blocos e pranchas. Como também, podem ser feitas na íntegra através dos tradicionais métodos de manufatura artesanal de construção de pranchas. Entretanto, embora o campo da fabricação digital esteja bem estabelecido na indústria de pranchas de surf com a usinagem de blocos, sempre vão existir etapas manuais de acabamento e finalização da prancha, assim como acabamento à mão após a laminação. Os processos manuais são imprescindíveis para o acabamento do shape e finalização de uma prancha em cada etapa de lixa.

Figura 51 - Shaper/ designer moldando uma prancha de Agave à mão.



Fonte: Surfline.com (2016).

Ao desenvolver pranchas de surf com materiais ecológicos, a empresa alemã Koabär Surf/Skates, distribuidora de blocos de Agave da Grow Blanks na Europa, tem recorrido ao uso de CNC para usinar pranchas de Agave.

Figura 52 - Blocos de Agave Grow Blanks e pranchas produzidas por Koabär Surf/Skates.



Fonte: Koabär Surf/ Skate (2022).

Figura 53 - Prancha a ser usinado na CNC com um bloco de Agave da Grow Blanks na oficina do designer de pranchas Cristian Delfs da BAV Boards.



Fonte: Cristian Delfs (2022).

O foco da empresa BAV Boards, situada na Alemanha, do designer e shaper Christian Delfs, tem sido desenvolver pranchas de surf com reduzido impacto ambiental, principalmente através do uso de materiais de naturais como madeira e resinas epóxi de base biológica, que são em grande parte feitas de matérias-primas renováveis. Utiliza ainda, alternativas de espumas ecologicamente mais justificáveis ou construção em madeira oca. Segundo Delfs (2022), infelizmente 100% de sustentabilidade não pode ser alcançado no momento, entretanto o apoio de CNC e máquinas de marcenaria permite utilizar uma grande variedade de métodos construtivos e experimentações. Com isto, independentemente do material escolhido e utilizado, o desenvolvimento de pranchas de surf e a utilização de diferentes materiais é um processo dinâmico.

Figura 54 - Pranchas de Agave maquinadas na CNC, a de baixo inteira de Agave, a do meio com bordas de madeira Balsa e a de cima com borda de Cortiça.



Fonte: Delfs, C. (2022).

Na BAV Boards, Christian Delfs também tem desenvolvido modelos de pranchas ocas de madeira de Paulownia com estrutura interna hexagonal. Primeiramente foi desbastado o lado de inferior (bottom), em seguida o lado superior (deck), após o molde finalizado, são fresadas as cavidades internas hexagonais e o encaixe para o deck.

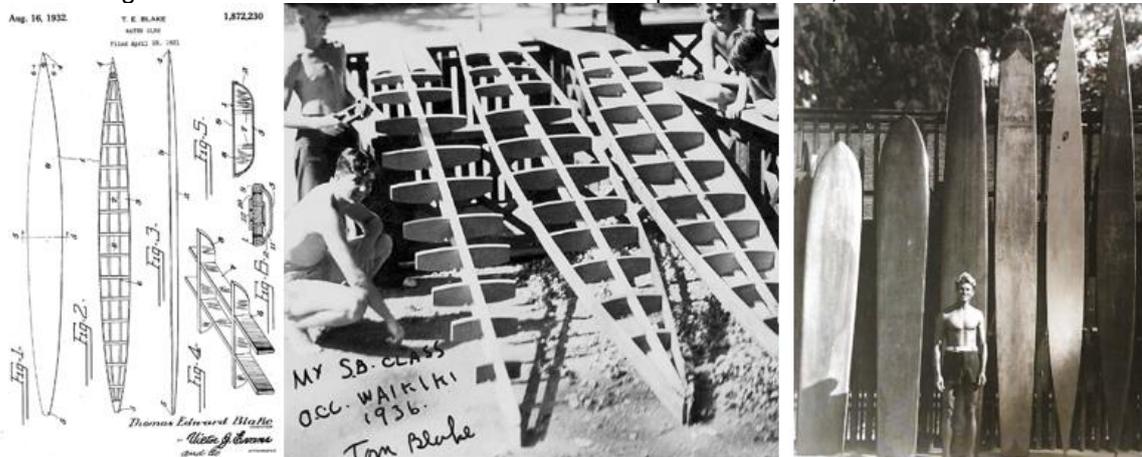
Figura 55 - Processo de fresamento e resultado final.



Fonte: Delfs, C. (2022).

O conceito original de prancha oca de madeira veio através de Tom Blake em 1927, quando estava a trabalhar em um projeto para revolucionar a construção de pranchas de surf, que até então eram feitas de madeira sólida, e estudava como torná-las mais leves. Desenvolveu então, um método de construção em forma de esqueleto em madeira inspirado na construção das asas dos aviões e construções navais. Mas, naquela época as pranchas eram muito pesadas, mesmo sendo ocas, e não era possível fazer qualquer forma.

Figura 56 - Pranchas ocas de madeira criadas por Tom Blake, década de 1930.



Fonte: @davidwebersurf (2022).

Atualmente o conceito da construção oca vem ressurgindo por parte de muitos designers e shapers mundo afora de uma forma modernizada e tecnológica, projetos

gerados por computador e um mix de artesanato e fabricação digital com o uso de routers CNC.

Figura 57 - David Weber Surfboards.



Fonte: @davidwebersurf (2022).

De acordo com o site do engenheiro e shaper de pranchas ocas de madeira David Weber davidweber.com.br (2022) situado em Florianópolis - Brasil, ele se afastou dos materiais convencionais, como PU e EPS, e foi pioneiro na integração de métodos alternativos e materiais para criar pranchas de surf ecológicas, com impacto ambiental mínimo, mantendo a integridade do shape, design e desempenho de pranchas de surf de ponta.

Segundo Weber (2022), suas pranchas de madeira são uma combinação de tecnologia, sustentabilidade e arte, são leves porque são ocas e feitas com madeiras leves como a Paulownia. Entretanto, a estrutura, o desenho e a forma de uma prancha oca estão contidos no esqueleto. Nele estão presentes todos os elementos da forma, de modo que o processo de construção da prancha consiste em cobrir o esqueleto com tábuas de madeira.

O projeto das pranchas é feito meticulosamente no computador, em um sistema CAD, o software Shape3D, que gera o shape (volume) da prancha e o esqueleto com as dimensões da prancha, estes são cortados na CNC, embora também possam ser

cortados à mão, entretanto a precisão obtida com a utilização desta ferramenta vai influenciar no resultado final da prancha, para que esta se mantenha fiel à todas as suas medidas. O método desenvolvido por David Weber também é ministrado em workshops DIY e servem tanto para construir shapes clássicos quanto modelos de alta performance.

Nessa mesma linha, também considerada pioneira e referência na construção oca, a empresa Grain Surfboards situada em York, Maine, trabalha um método de construção oca similar ao do David Weber, através de ideias testadas pelo tempo, formas progressivas, técnicas de construção naval, recursos renováveis, epóxis orgânicos e artesanato e fabricação digital e workshops. As pranchas da Grain representam novas formas de pensar o surf com pranchas duráveis, o que é uma característica das pranchas de madeira (Grain Surfboards, 2023).

A abordagem da Grain consiste em pegar o que é inspirador e evoluí-lo com uma seleção mais sábia de materiais e técnicas de design amplamente refinadas através de tecnologia CAD e CAM de última geração, tendo como resultado peças cortadas com precisão.

Figura 58 - Nos métodos de construção oca modernos a fabricação digital caminha junto com o artesanato. Peças cortadas na CNC e etapa de construção da prancha.



Fonte: @grainsurfboards (2022).

Nas suas construções utilizam cedros, também utilizada em embarcações, que são madeiras leves e fáceis de trabalhar, com boas relações resistência/peso, o que as torna boas para pranchas. Além produzirem as pranchas com bordas de madeira, também desenvolvem uma linha com bordas de feitas de material reciclado denominado “GreenRail”. Moldado à mão é feito inteiramente de materiais reciclados, 100% de garrafas plásticas de PET. Ainda tentam incluir e reciclar ao máximo os

resíduos produzidos a partir da confecção das bordas para completar o ciclo. De acordo com a Grain Surfboards (2023), estão continuamente a pensar em maneiras de “fechar o ciclo” do próprio fluxo de resíduos e também em como incluir em seus processos mais material reciclado e elementos de fluxo de resíduos de outras indústrias. Este recurso acaba por tornar as pranchas um pouco mais leves e com custo final ao consumidor final reduzido.

Figura 59 - Pranchas de surf construídas com cedro sustentável local combinado com espuma de plástico PET 100% reciclado, GreenRail.



Fonte: @grainsurfboards (2022).

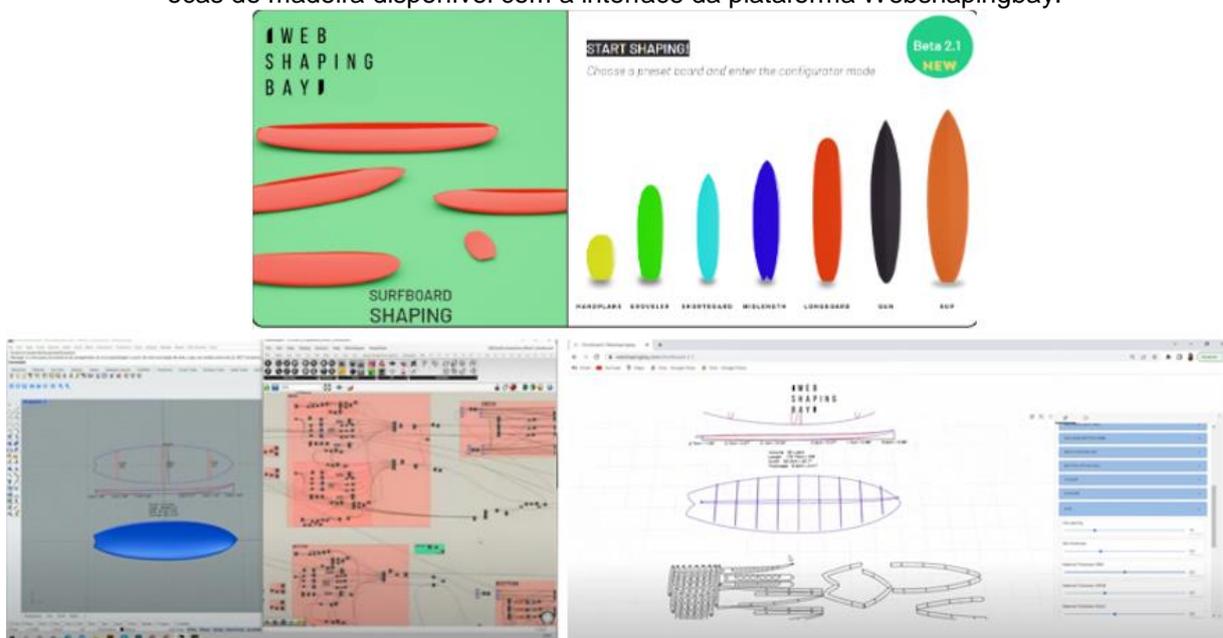
Figura 60 - Prancha oca do kit DIY da Grain Surfboards com bordas de Cortiça.



Fonte: Grainsurfboards (2018).

Outras variações de construção oca, fabricação digital e técnicas tradicionais também são exploradas pelo shaper e arquiteto Rodrigo Aranha Lopes na empresa Aranha Shapes, localizada em Portugal. Lopes (2018) desenvolveu um estudo onde aborda o projeto e construção de pranchas de surf por meio do uso de estratégias computacionais aplicadas ao design. O autor desenvolveu uma plataforma de codesign que permite aos usuários gerarem suas próprias pranchas de surf, por meio de modelagem algorítmica/ paramétrica (Grasshopper e ShapeDiver) usando um software de modelagem de pranchas que criou para gerar o esqueleto para pranchas ocas de madeira disponível como um aplicativo da web em webshapingbay.com, para qualquer um usar graças a Shapediver. O ShapeDiver é uma plataforma online que simplifica a hospedagem e o compartilhamento online de arquivos do Grasshopper. Deste modo, muitas pranchas vêm sendo desenvolvidas por Lopes e por outras pessoas que usaram a plataforma da Web Shaping Bay.

Figura 61 - A modelagem paramétrica com Grasshopper é a base da projeção de pranchas de surf ocas de madeira disponível com a interface da plataforma Webshapingbay.



Fontes: Webshapingbay (2022).

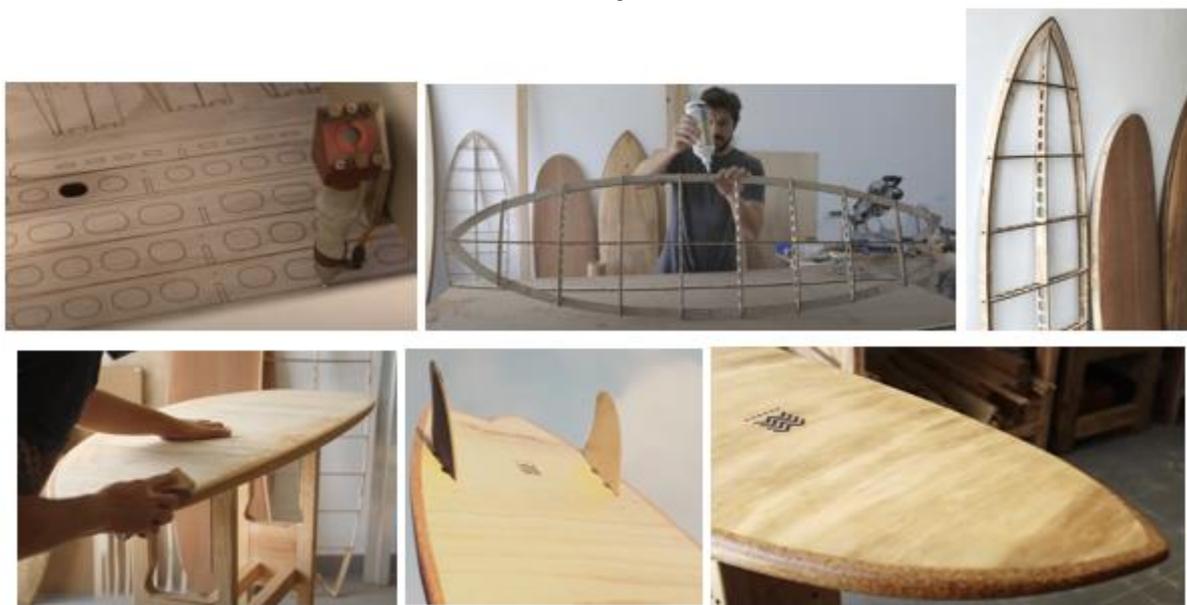
Web Shaping Bay é um software de modelagem de pranchas totalmente paramétrico. Baseado na Web, fácil de usar e acessível, ele permite que os usuários gerem facilmente modelos de pranchas de surfe e exportem arquivos de produção. O WSB tem como objetivo apoiar os shapers que desejam empregar maneiras ambientalmente e socialmente responsáveis de construir pranchas de surf. No

momento, os recursos mais poderosos são direcionados à produção de skin on frame - pranchas de surf de madeira oca (Webshapingbay, 2021).

Ao criar esse modelo paramétrico de prancha com o Grasshopper, têm-se muito mais dados e compreensão da prancha modelada com todas as informações sobre o modelo, passando pelas etapas envolvidas no shape e as partes que constituem o shape da prancha, tamanho, contorno, rocker, foil, rails, deck e bottom. Dessa forma, ao mudar qualquer parâmetro da prancha, a estrutura interna muda instantaneamente de acordo com o formato (Shapediver, 2022).

Lopes (2018) ainda considera criticamente os materiais utilizados na indústria do surf, com o objetivo de desenvolver produtos que utilizem materiais menos nocivos ao meio ambiente e com maior capacidade de controle e alteração em relação às capacidades de desempenho, explorando, desta forma, a madeira e a Cortiça. Para o autor, a priorização do material madeira e Cortiça seria feita devido às suas propriedades físicas e mecânicas.

Figura 62 - Contraplacado flexível é usado no esqueleto e no fechamento da prancha com borda de Cortiça.



Fontes: Webshapingbay e Shapediver (2022).

Este capítulo foi um breve apanhado sobre o estado da arte atual sobre pranchas de surf alternativas sustentáveis, que mesclam a abordagem da fabricação digital com processos manuais e artesanato. Também foi visto como surgiram as primeiras pranchas de Agave que é um objeto de estudo desta pesquisa, um ponto de partida para a investigação biológica das estratégias de leveza e resistência. Assim

como diversas técnicas e métodos de construção de empresas referência na área de estudo, a exemplo das pranchas de construção oca de madeira. Os materiais sustentáveis também foram apresentados como as madeiras bordas de Cortiça e de materiais recicláveis 100% de PET. Esse campo de estudo é bastante dinâmico e de experimentação.

### 3.2 ABSTRAIR IDEIAS BIOLÓGICAS - MICROSCOPIA DE *Agave sisalana* (ANATOMIA VEGETAL)

O segundo momento desta pesquisa está na fase de abstração das estratégias biológicas para princípios de design. Nesta fase, buscamos uma área de aplicação para as estratégias do Agave. Após identificar um conjunto aceitável de possibilidades, é crucial seguir adiante. Segundo Baumeister (2014), embora o processo de criação pareça fácil e óbvio ao ler um estudo de caso, emular uma estratégia natural com uma solução humana exige um entendimento da biologia, uma tradução para princípios de design e uma dose considerável de criatividade. Por esse motivo, a prática da biomimética requer uma equipe interdisciplinar e a consultoria de biólogos é indispensável.

Nesta pesquisa, contamos com o apoio da professora Emília Arruda, uma bióloga doutora em anatomia vegetal, coordena o Laboratório de Anatomia Vegetal - LAVeg (UFPE). Amostras de Agave coletadas em seu habitat natural foram obtidas para o estudo. Através de entrevistas, orientações e laudos técnicos, ela tem contribuído objetivamente para fundamentar as estratégias que buscamos na pesquisa e nos procedimentos laboratoriais. Além disso, ela nos orientou na pesquisa da literatura sobre anatomia vegetal, o que nos permitiu entender os elementos presentes nas amostras e visualizar como essas estratégias podem oferecer soluções tecnológicas e sustentáveis para o problema de pesquisa. A biologia é intrinsecamente interessante, mas a fase de tradução, ou seja, a abstração das informações, é fundamental para tornar esses conhecimentos aplicáveis no contexto do design.

Para abstrair estratégias biológicas no cumprimento desta fase, a revisão bibliográfica realizada sobre anatomia vegetal para entendimento de como são as estruturas celulares dos tecidos vegetais em escala micro foram de grande relevância. Em seguida foram realizados experimentos para identificação e análise dos elementos

que compõem as paredes celulares do Agave para que se possa aprender suas estratégias e convertê-las em design por um processo de abstração e criatividade.

Segundo Maier *et al.* (2013) o processo de abstração de características de estruturas biológicas leves e complexas em um componente técnico produtivo deve ser adaptado à realidade local. Um obstáculo importante para a transferência das estratégias de estruturas leves naturais para soluções técnicas é a sua geometria peculiar. Uma vez que as estruturas de leveza natural possuem irregularidades e muitas vezes têm formas extremamente complexas, em síntese é necessário simplificar e adaptar estes princípios para o design. Esta abstração e simplificação da forma têm sido usadas em diferentes métodos biomiméticos, mas até então possui um componente arbitrário, ou seja, depende da criatividade e competência do pesquisador que executa a abstração.

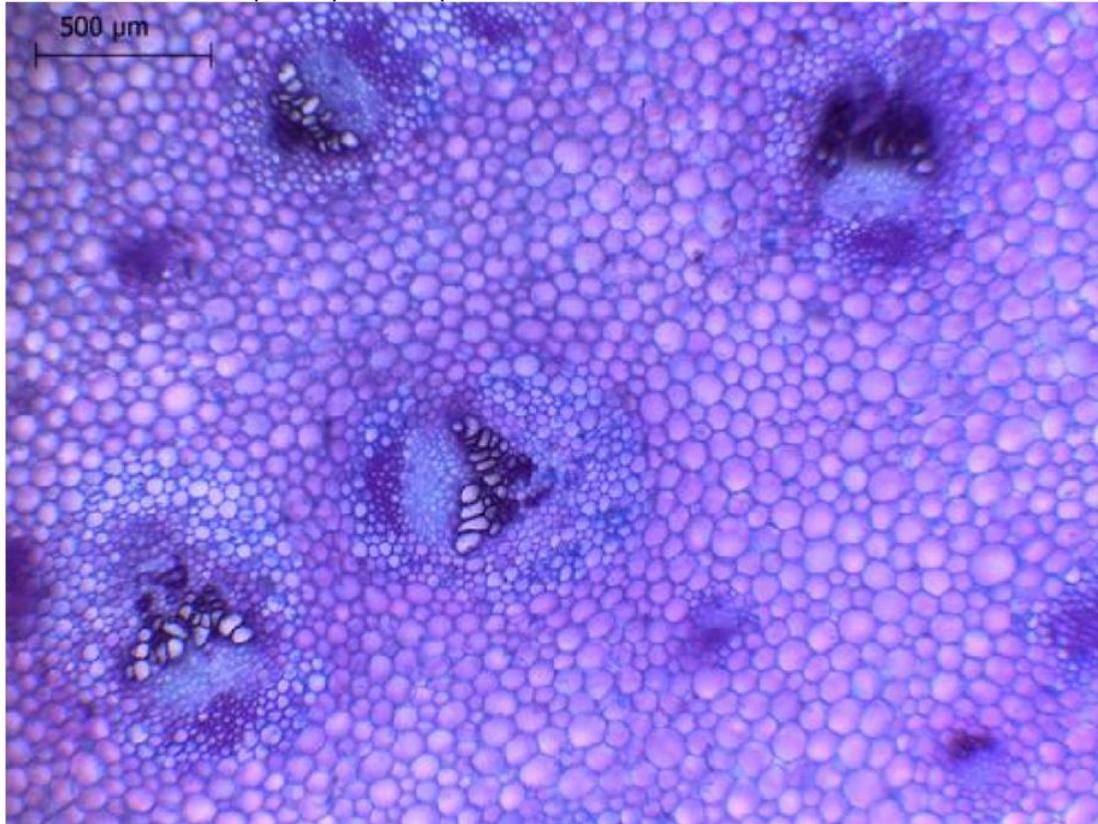
Foram realizados experimentos de dissociação, microtomia e de lâmina utilizando amostras de Agave para identificação dos tipos de células presentes nos tecido vegetal através de microscopia óptica. Foram identificados elementos xilemáticos dissociados. A dissociação dos elementos xilemáticos revelou a presença de elementos do metaxilema, apresentando pontoações do tipo pontoada bem como algumas fibras e traqueídes. Células especializadas, tais como fibras e traqueídes possuindo paredes secundárias, indicando o caminho a seguir na investigação em anatomia vegetal sobre a estrutura e composição das paredes celulares do tecido parenquimático e do sistema condutor do escapo floral do Agave.

As amostras em cortes transversais e longitudinais, submetidos à coloração e montados em lâminas apresentam imagens bidimensionais da estrutura celular do Agave, porém dando ideia da sua forma tridimensional. A análise e registro das principais características anatômicas foram realizados no LAVeg UFPE por meio de técnicas de microscopia. Esta fase do diagrama dialoga de forma muito intensa com a revisão bibliográfica da anatomia vegetal, que forneceu o conhecimento necessário para leitura das imagens microscópicas, caracterização e análise dos elementos presentes nas amostras de Agave. O entendimento do conteúdo das imagens possibilitou abstrair e se aprofundar nas estratégias biológicas do Agave.

A imagem microscópica do Agave (Figura 63) revela características estruturais importantes. No corte transversal, observa-se o tecido fundamental, composto pelo parênquima de preenchimento. O sistema vascular é composto por feixes colaterais, nos quais o periciclo é multisseriado e contínuo, e apresenta células espessadas. Em

contraste, as células parenquimáticas são mais abundantes, possuem diâmetros maiores e suas paredes celulares são finas, constituídas apenas por paredes primárias.

Figura 63 - O corte transversal do Agave apresenta o tecido fundamental, que é representado pelo parênquima de preenchimento e sistema vascular.



Fonte: Araújo (2015).

O xilema no Agave está diretamente envolvido na sustentação e no armazenamento de substâncias, fornecendo suporte mecânico. Os feixes vasculares estão distribuídos de forma aleatória, o que pode ser interpretado como uma estratégia do vegetal para distribuir as tensões mecânicas.

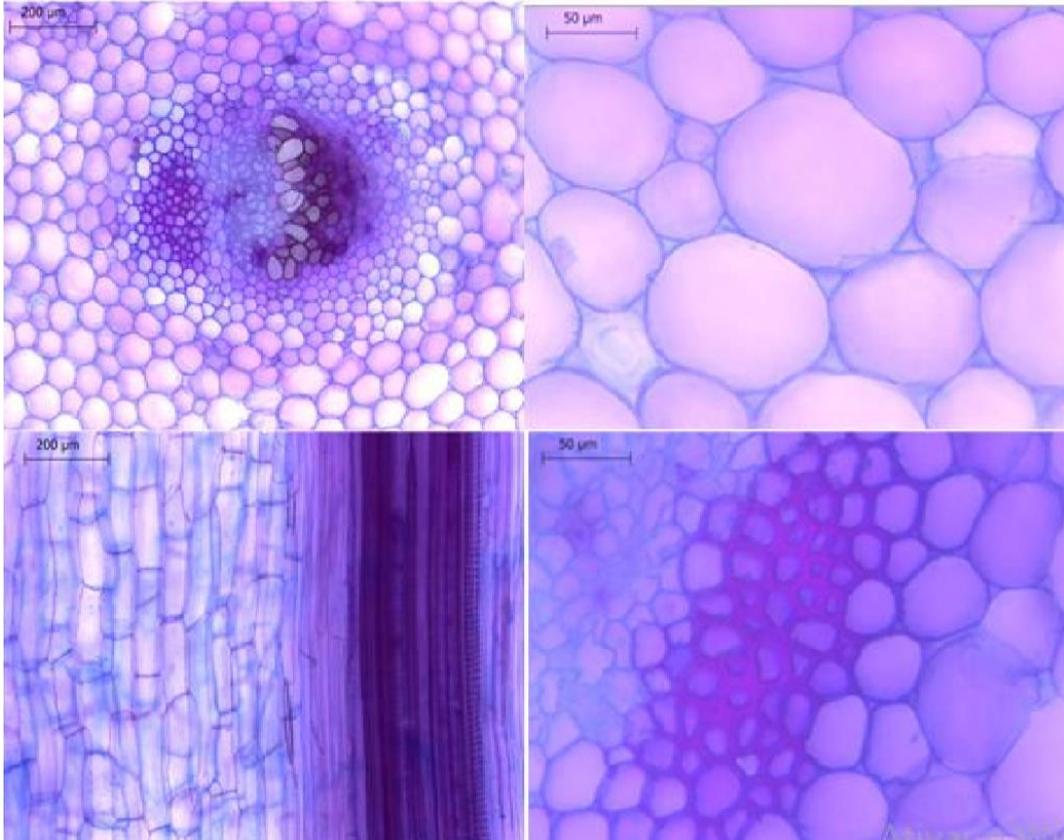
As células que apresentam elementos de coloração mais intensa são indícios de presença de lignina, ou seja, paredes secundárias, o que representa que estas células possuem a estrutura da parede mais espessa. A estratégia que o vegetal aplica na geometria apresentada neste corte transversal, o diâmetro e espessura das paredes celulares variam numa transição das células de preenchimento (paredes primárias) para as células condutoras (paredes secundárias).

Quanto mais próximo do parênquima as células possuem somente a parede primária que tem propriedades elásticas, possuem uma configuração mais

arredondada com maior diâmetro, porém com espessura das paredes mais delgadas. Ao passo que se aproxima do xilema, as células tornam-se mais poligonais, com diâmetros menores e paredes mais espessas, mais rígidas. Desta forma, acredita-se que a planta distribui suas tensões mecânicas de forma equilibrada por todo o corpo da planta.

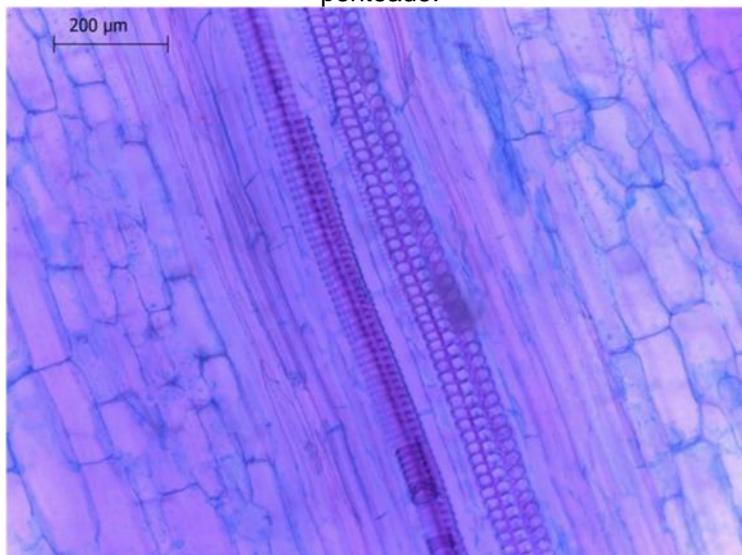
A Figura 64 apresenta cortes transversais e longitudinal do Agave, diferentes elementos do tecido vegetal são observados. O xilema, composto por células especializadas chamadas de fibras e traqueídes, apresenta uma organização em filas verticais sobrepostas. Essas células são fusiformes e alongadas, possuindo parede secundária. As fibras e traqueídes desempenham um papel crucial na sustentação da planta, conferindo propriedades de rigidez e flexibilidade. Além desses elementos, também é possível identificar o parênquima, que consiste em células parenquimáticas com diferentes geometrias e espessuras. Essas estruturas são essenciais para o funcionamento e desenvolvimento adequado do Agave.

Figura 64 - Cortes transversais e longitudinal do tecido parenquimático do Agave apresentando diferentes geometrias.



Fonte: Araújo (2015).

Figura 65 - Corte Longitudinal. O crescimento e alongamento intenso do Agave formam muitos elementos traqueais com espessamentos anelares e espiralados, escalariforme, reticulado e pontoado.



Fonte: Araújo (2015).

A orientação das fibras depositadas paralelamente é significado decisivo para as propriedades mecânicas, e deste modo, resulta em uma maior resistência à tração. Como o Agave trabalha com a estratégia de leveza e rápido crescimento, o vegetal acaba por adicionar quantidades mínimas de lignina para que não perca sua elasticidade, aplicando-a somente onde é necessário. A maturação tanto de traqueídes quanto de elementos de vaso envolve a ‘morte’ da célula. O que permanece é a estrutura a qual é formada por paredes celulares lignificadas grossas, formando tubos ocios.

Quando a planta morre e seca por completo, fica somente a estrutura das paredes com os lumes vazios, preenchidos com ar. Esta estrutura de paredes celulares é justamente o que se enxerga nas imagens microscópicas do Agave. A resposta para a leveza do caule do Agave pode estar justamente na menor proporção de tecidos lignificados, já que apresentam poucos elementos lignificados, e conforme descrito nas análises, células espessadas ocorrem apenas no periciclo e no xilema primário, representadas por fibras, traqueídes e elementos de vaso (Araújo, 2015).

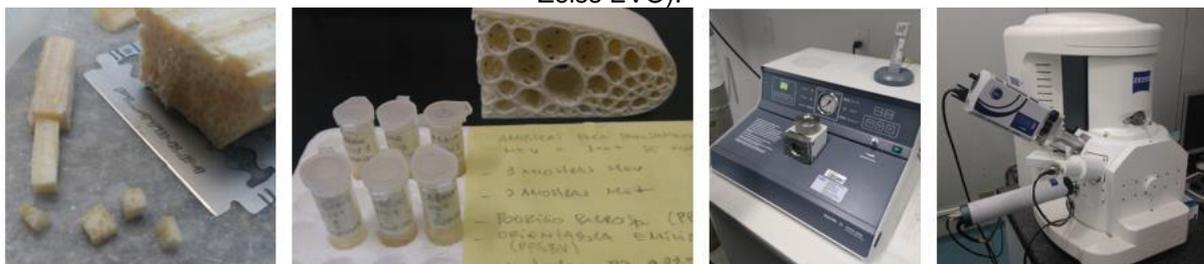
Em momentos de abstração, vale ressaltar que na visão do design: o Agave atua em um optimum de matéria e energia; Deposição de lignina somente onde é necessário, mantendo assim, a leveza e resistência necessária com economia de matéria e energia; Pontoações, por serem áreas vazadas na estrutura da parede

celular também atuam como economia de matéria, porque estas áreas sem matéria (orifícios) não comprometem a resistência da estrutura, e contribuem para a leveza.

Estes conceitos foram convertidos em uma solução de design de uma estrutura bioinspirada, podendo aplicar estas estratégias para soluções em estruturas de qualquer artefato. A solução resultante é então, adaptada ao desempenho necessário e aos processos de produção. Podem ser criadas em uma grande variedade de alternativas de aplicação das estratégias da natureza que podem ser otimizadas, por exemplo, usando ferramentas de modelagem paramétrica.

As imagens a seguir serviram de inspiração para extrair as estratégias de Agave e posteriormente, realizar a fase de emulação auxiliado por processos de design paramétrico. As imagens abaixo são ilustrativas de algumas etapas do processo de preparação de amostras para extração de dados e serão todas comentadas e detalhadas no desenvolvimento desta pesquisa na etapa de análise de dados.

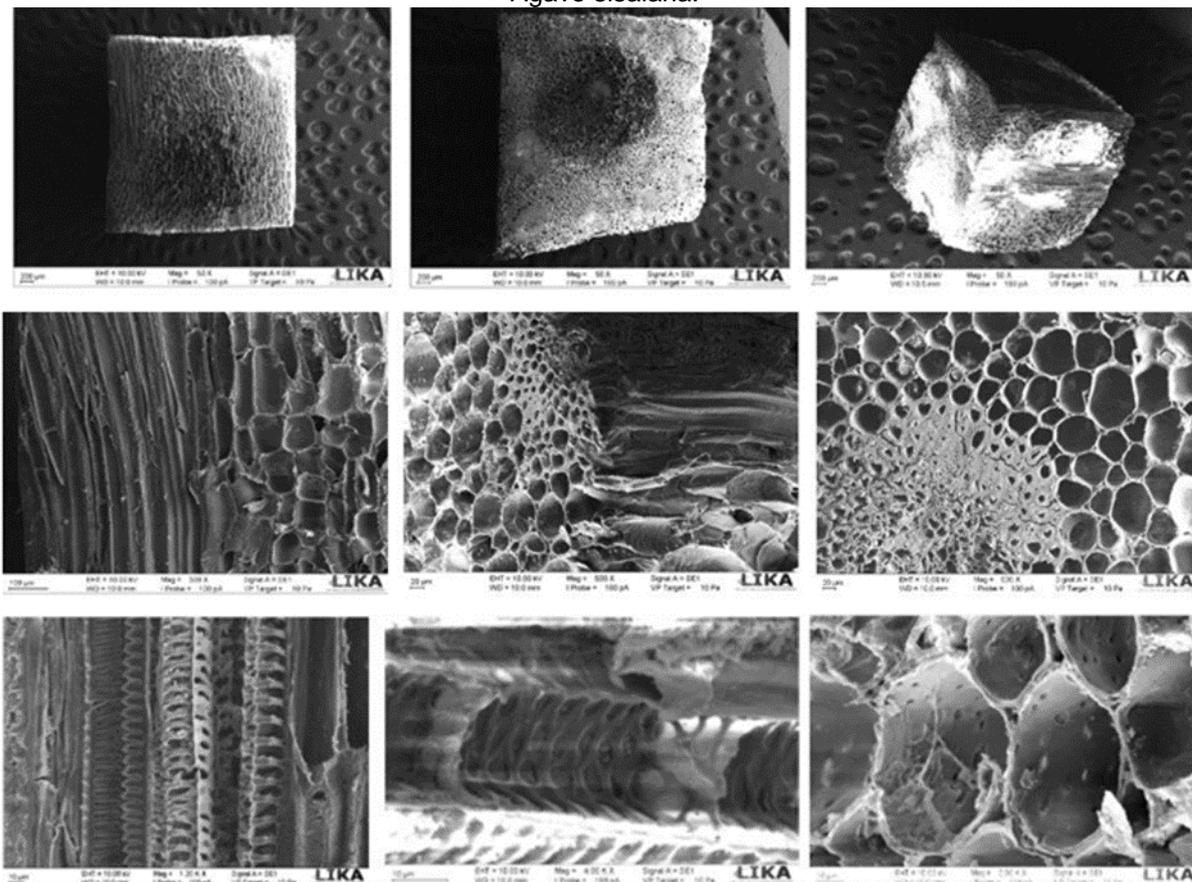
Figura 66 - Preparação das amostras para MEV e alguns equipamento utilizados (ponto crítico e MEV Zeiss EVO).



Fonte: Autor (2019).

A Figura 67 apresenta imagens geradas por MEV. Primeira linha: Visão geral das amostras utilizadas, já posicionadas nos stubs dentro do equipamento de microscopia. Segunda linha: Padrões geométricos da estrutura celular de *Agave sisalana*. Terceira linha: Detalhes dos tipos de células e padrões geométricos da estrutura celular de *Agave sisalana*.

Figura 67 - Micrografias eletrônicas de varredura de amostras do tecido vegetal do escapo floral da *Agave sisalana*.



Fonte: Autor (2019).

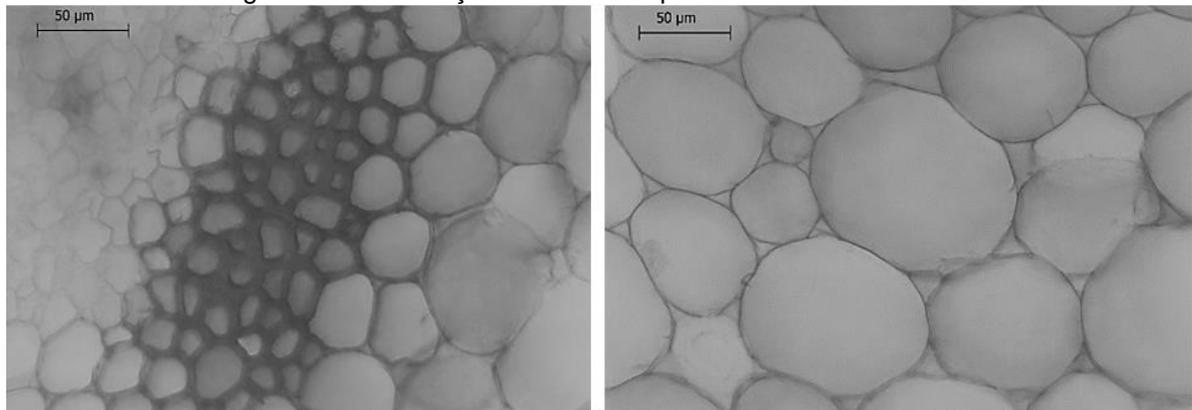
### 3.3 IDENTIFICANDO FUNÇÃO - ESTRATÉGIA DE LEVEZA E RESISTÊNCIA

#### 3.3.1 Análise da variação dos padrões Voronoi identificados

Esta etapa consiste em identificar a função dos padrões Voronoi presentes na estrutura celular do Agave e sua relação com a estratégia de leveza e resistência. Os padrões Voronoi observados apresentam **dois tipos principais de células**: aquelas com **paredes delgadas** e aquelas com **paredes espessas**. As células com paredes mais espessas são responsáveis por conferir maior rigidez e resistência mecânica à estrutura. Por outro lado, as células com paredes mais finas são mais leves e flexíveis. Essa diferenciação nas propriedades das células sugere uma estratégia de projeto que visa obter uma combinação de leveza e resistência, utilizando diferentes tipos de células para atender a esses requisitos. Em resumo, a análise dos padrões Voronoi revela que as células com paredes mais espessas contribuem para a resistência

mecânica, enquanto as células com paredes mais finas proporcionam leveza e flexibilidade à estrutura (Figura 68).

Figura 68 - Distribuição variada à esquerda e uniforme à direita.

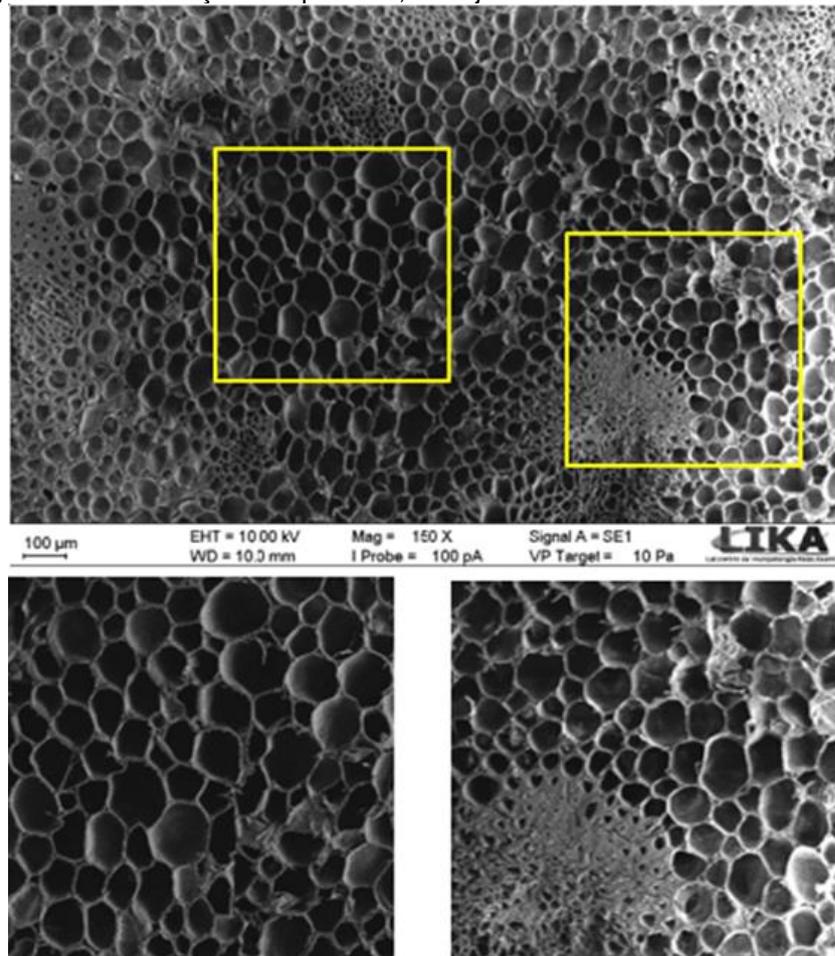


Fonte: Autor (2019).

A análise visual das imagens permitiu identificar duas formas principais de distribuição dos padrões de arranjos celulares: distribuição uniforme e distribuição variada. Na Figura 69 é apresentada a **distribuição dos padrões**, incluindo **arranjos celulares uniformes e variados**. Nessa análise, foram identificadas duas abordagens principais relacionadas às funções de leveza e resistência, com base na anatomia vegetal.

As células parenquimáticas são associadas ao conceito de leveza e flexibilidade. Essas células têm uma estrutura mais delicada e fina, contribuindo para reduzir o peso e conferir flexibilidade à estrutura. Por outro lado, as fibras presentes no xilema são associadas à resistência e rigidez. Essas fibras possuem paredes mais espessas e são responsáveis por conferir maior resistência mecânica à estrutura. Portanto, a análise visual dos arranjos celulares revelou a presença dessas duas características principais: células parenquimáticas para leveza e flexibilidade, e fibras do xilema para resistência e rigidez.

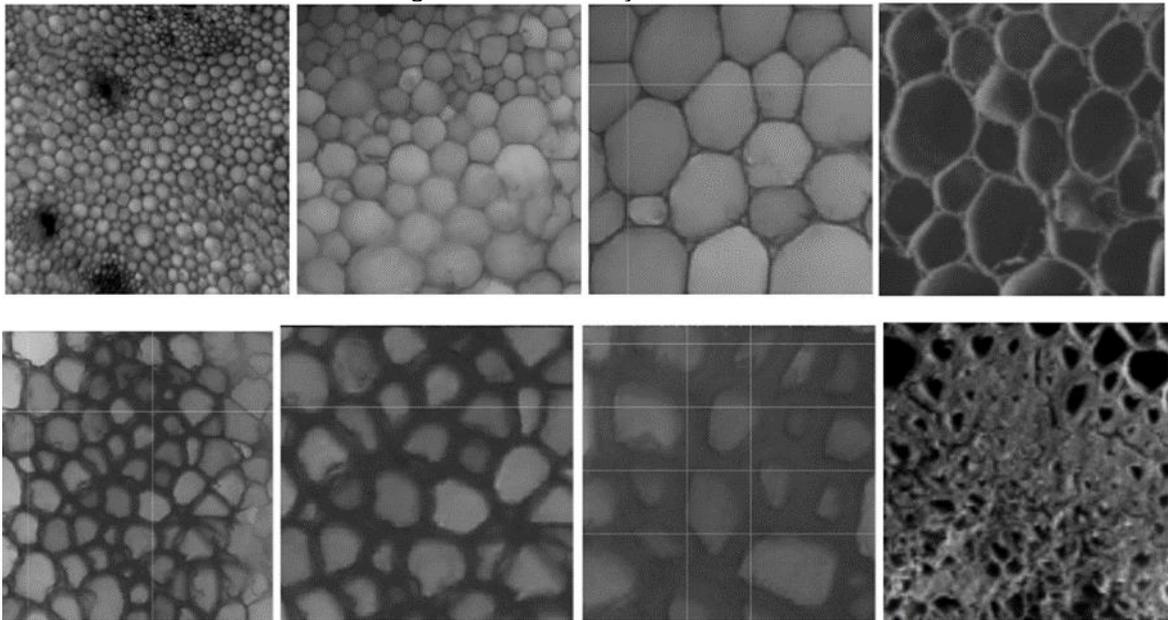
Figura 69 - Distribuição dos padrões, arranjos celulares uniformes e variados.



Fonte: Autor (2019).

1. Na **distribuição uniforme** dos padrões de arranjos celulares, as células de preenchimento possuem o aproximadamente mesmo tamanho, independentemente de terem paredes finas ou grossas. Isso significa que todas as células têm um tamanho uniforme. No entanto, apesar do tamanho uniforme das unidades celulares, há a possibilidade de variação de tamanho ou escala em relação à estrutura em que estão presentes. Isso significa que as células podem se repetir em diferentes escalas ou tamanhos dentro da estrutura, mantendo a distribuição uniforme das células de preenchimento, mas com variação de tamanho em relação ao todo. Essa distribuição uniforme e a possibilidade de variação de tamanho ou escala podem contribuir para a obtenção de características específicas, como a leveza e a resistência, dependendo da função desejada na estrutura em questão.

Figura 70 - Distribuição uniforme.



Fonte: Autor (2019).

A Figura 70 descreve diferentes estruturas uniformes compostas por células e paredes com características distintas:

1 - A primeira estrutura é composta por células menores, e a espessura da parede celular é fina. Isso sugere uma configuração que visa leveza e flexibilidade.

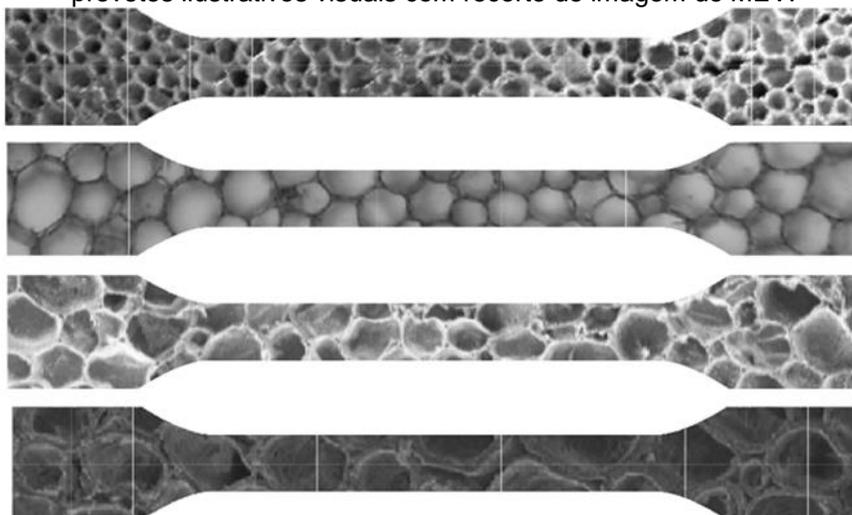
2 - A segunda estrutura também é uniforme, mas as células são intermediárias em tamanho, com parede celular fina. Essa configuração pode buscar um equilíbrio entre leveza e resistência.

3 - A terceira estrutura também é uniforme, com células intermediárias em tamanho e parede celular fina. É semelhante à segunda estrutura, indicando a possibilidade de diferentes abordagens para obter características de leveza e resistência.

4 - A quarta estrutura é composta por células maiores, com parede celular mais espessa. Essa configuração sugere uma busca por maior resistência e rigidez, devido à presença de células com paredes mais espessas.

Essas diferentes estruturas uniformes, com variações na espessura da parede celular e no tamanho das células, representam abordagens distintas para obter diferentes combinações de leveza e resistência nas estruturas estudadas.

Figura 71 - Padrões com estrutura de distribuição de células e paredes uniformes. Amostras visuais - provetes ilustrativos visuais com recorte de imagem de MEV.

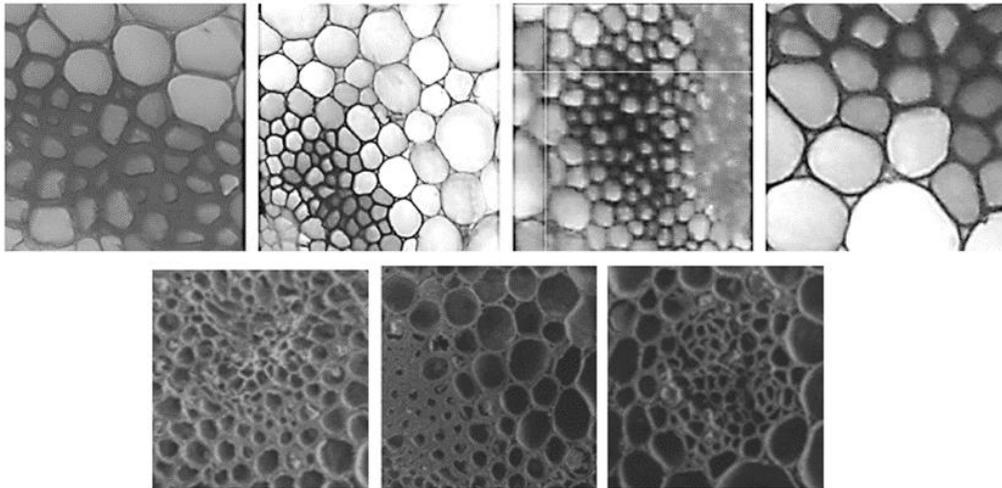


Fonte: Autor (2019).

2. Na **distribuição variada**, observamos variações nas áreas de aplicação das unidades celulares, que podem ter tamanhos diferentes e paredes celulares de espessuras variadas. Além disso, há uma variação entre tamanho e escala na distribuição das células (Figura 72).

O estudo de simulação da distribuição variada/ combinada é representado por estruturas compostas pela combinação de células maiores e menores, com paredes celulares finas e espessas. Essa combinação de células de diferentes tamanhos e espessuras de parede visa obter características específicas, como leveza e resistência, em diferentes partes da estrutura. Além disso, o tipo de distribuição variada pode apresentar variação de densidade ou concentração de células, com células maiores e menores localizadas em regiões específicas da estrutura. Essa variação na distribuição contribui para a obtenção de propriedades desejadas, como resistência em áreas específicas ou flexibilidade em outras partes. É importante ressaltar que nesse tipo de distribuição variada, existe a possibilidade de variação na espessura das paredes celulares, o que pode influenciar ainda mais nas propriedades mecânicas da estrutura.

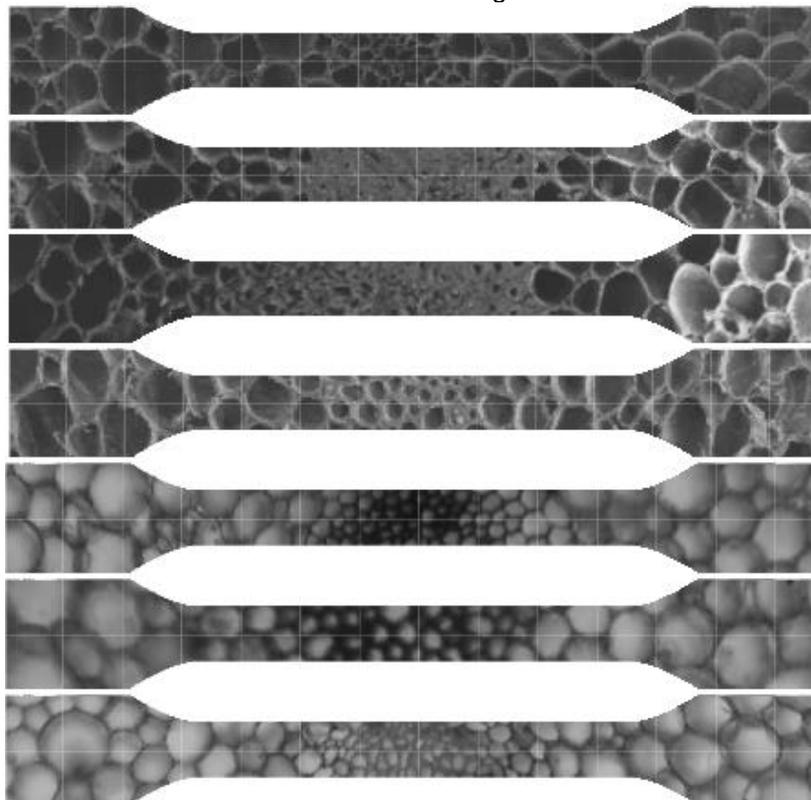
Figura 72 - Distribuição variada.



Fonte: Autor (2019).

Em resumo, a distribuição variada envolve a combinação de células de diferentes tamanhos e espessuras de parede, com variação na distribuição das células em termos de tamanho, concentração e localização. Essa variedade de distribuição tem como objetivo alcançar propriedades específicas, como leveza, resistência e flexibilidade, de acordo com as necessidades da estrutura.

Figura 73 - Concentração de densidade no centro das peças. Amostras visuais - provetes ilustrativos visuais com recorte de imagem de MEV.



Fonte: Autor (2019).

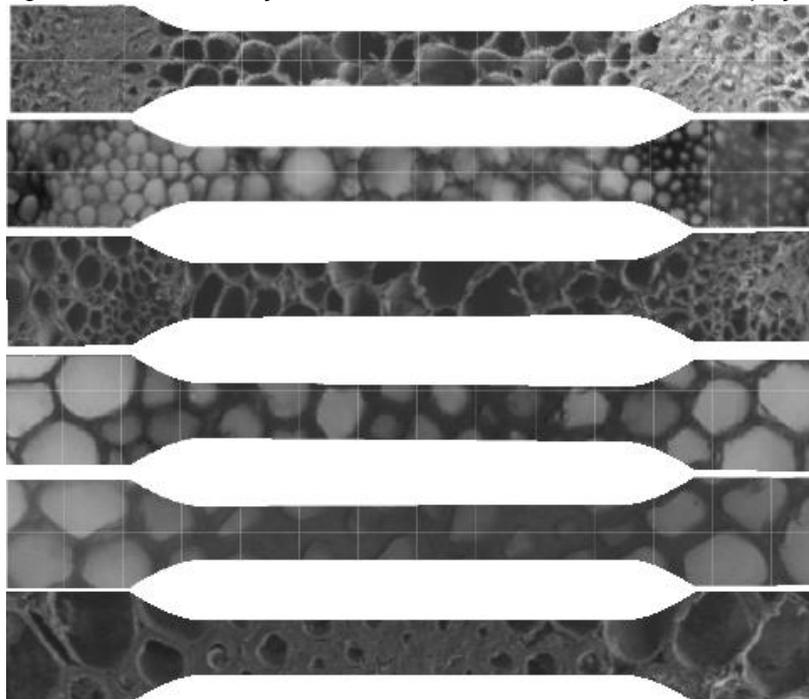
A Figura 73 apresenta as estruturas compostas pela combinação de distribuição de células maiores e menores, com espessura de parede celular fina e espessa, apresentam um tipo de distribuição com densidade ou concentração central, onde as células maiores estão localizadas no centro da estrutura.

Nessa distribuição, as células maiores ocupam a região central da estrutura, enquanto as células menores estão presentes nas áreas periféricas. Isso cria uma gradiente de tamanho das células, com uma ampliação progressiva das células menores para as células maiores.

Além da variação de tamanho das células, existe a possibilidade de variação na espessura das paredes celulares. Isso significa que tanto as células maiores como as células menores podem apresentar variação na espessura das paredes, o que contribui para a obtenção de diferentes propriedades mecânicas ao longo da estrutura.

Essa combinação de distribuição de células, com células maiores no centro e células menores nas áreas periféricas, juntamente com a variação na espessura das paredes celulares e a gradiente de ampliação, proporciona uma configuração que busca um equilíbrio entre leveza, resistência e rigidez em diferentes partes da estrutura (Figura 74).

Figura 74 - Concentração de densidade nas extremidades das peças.



Fonte: Autor (2019).

### 3.4 EMULAÇÃO DA ESTRATÉGIA - DESIGN PARAMÉTRICO - EMULAÇÃO GENÉRICA DE ESTRUTURAS BIOINSPIRADAS LEVES E RESISTENTES.

Este capítulo foi desenvolvido com base no manual para documentação de códigos generativos utilizando o Grasshopper desenvolvido pelo arquiteto e designer paramétrico Paulo Carvalho, que forneceu o suporte técnico necessário para desenvolvimento dos códigos nesta tese. Paulo Carvalho é um Arquiteto e Designer Computacional Brasileiro, especialista em metodologias computacionais de projeto e fabricação digital e fundador da SELVAGEN (<https://www.instagram.com/selvagenerativa/>) startup que combina natureza e tecnologia no desenvolvimento de artefatos de Design e Arquitetura. É um especialista certificado e treinador autorizado (ART) dos softwares Rhino3D e Grasshopper3D, além de ministrar cursos, workshops e palestras em eventos e instituições acadêmicas do Brasil e Portugal. E forneceu todo suporte no desenvolvimento das etapas de design paramétrico desta investigação.

Esta descrição (manual) tem como objetivo estabelecer parâmetros de organização de algoritmos desenvolvidos no plug-in Grasshopper, com o objetivo de facilitar a documentação de projetos generativos, com enfoque em trabalhos acadêmicos e sob uma ótica metodológica, a fim de buscar uma maior normatização das apresentações, facilitando o entendimento dos processos, ferramentas e soluções desenvolvidas pelo autor, além de melhor demonstrar as capacidades computacionais do seu algoritmo.

É importante ressaltar uma documentação e apresentação apropriada dos projetos paramétricos/ generativos, que deve ser desenvolvido com devido aprofundamento sobre o Algoritmo que gerou o projeto (objeto do trabalho) seu processo de criação, parâmetros, componentes e saídas, e evitando deste modo focar somente em apresentar um determinado resultado obtido a partir do uso de ferramentas como o Grasshopper, dedicando assim boa parte do trabalho científico à contextualização do projeto e ao resultado final obtido. Considera-se o processo computacional uma das partes mais relevantes em projetos que abordam essa temática, levando em consideração a relação entre o contexto e a aplicação, ou seja, toda estrutura do algoritmo e suas possibilidades de customização, pois, cada projeto generativo tem um conhecimento computacional que pode ser compartilhado sob a ótica da programação, não apenas do design.

Sendo assim, com base no manual para documentação de códigos generativos (CARVALHO, P. 2022), a apresentação foi estruturada para que se possa contribuir cientificamente também para o desenvolvimento do design computacional, em especial, do design paramétrico e generativo, utilizando ferramentas como o Grasshopper.

Tendo em vista que os softwares mudam com frequência e sem os devidos plug-ins e versões o algoritmo pode não funcionar corretamente, é importante o registro para o entendimento temporal do trabalho, Abaixo a informações da versão do software Rhino3D e a versão (Build) do Grasshopper utilizada para desenvolvimento do algoritmo:

Quadro 3 - Informações de software.

|                |   |
|----------------|---|
| Software:      | Rhino 7   |
| Grasshopper:   | Versão 7 SR22 - (7.22.22255.5001, 2022-09-12)                                   |
| Plug-in usado: | Weaverbird - análise topológica do modelo com base em superfícies do tipo mesh. |

Fonte: Autor (2022).

A imagem do código é essencial para a leitura de sua estrutura e é apresentada como um dos produtos do trabalho, pois representa o algoritmo do projeto. Para que se possa melhor visualizar o nome dos componentes, a aparência da interface do algoritmo foi customizado para facilitar o entendimento. As conexões estão organizadas de forma fluida e sequenciada para evitar o efeito emaranhado que dificulta o fluxo de informação dentro do código.

O Workflow do código foi construído em uma lógica de fácil assimilação. Da esquerda para a direita de forma horizontal, organizando as conexões alinhadas, mantendo um certo afastamento entre as etapas do código para evitar maior adensamento das informações, textos e conexões. As ações do código estão agrupadas e nomeadas diferenciando as etapas.

Os parâmetros customizáveis que o algoritmo utiliza estão explícitos e agrupados no início do algoritmo de forma a poder manipular todos os parâmetros em um só lugar, sem precisar navegar pelo algoritmo.

As ações realizadas pelos componentes e como elas afetam o projeto são descritas em cada etapa (grupo criado) das ações do algoritmo e mostram como os componentes se associam e que funções realizam.

Através da manipulação dos parâmetros customizáveis foram gerados outputs pelo algoritmo e estão documentados como possibilidades de uma variedade de resultados. Deste modo foram gerados diversos modelos generativos que são levados do Grasshopper para o Rhino através da opção Bake sobre o output, materializando o arquivo 3D passível de prototipação. As imagens e aplicações dos modelos generativos mostram diversidade e o potencial de customização do algoritmo

O sistema de input/output (I/O) é a base da computação e é a lógica de funcionamento das metodologias de design generativo, onde o input são as informações que entram no sistema e output os resultados que saem dele. Fazendo um exercício de analogia, temos, além do input e do output, um terceiro fator entre eles, o que é chamado de CODE, ou seja: o Código “ak” algoritmo. De acordo com o designer Paulo Carvalho, projetos computacionais precisam ter as **3 fases da computação (input, code, output)** claras e descritas no trabalho, com tópicos aprofundados sobre cada fase para que possam ser devidamente analisados, avaliados e utilizados por terceiros como instrumento de aprendizagem.

O processo de emulação faz uso do conceito de Voronoi como uma ferramenta que tem capacidade de simular os padrões dos arranjos celulares do Agave com base na anatomia vegetal. É importante ressaltar que a utilização do Voronoi não se trata de uma mera escolha estética, ou por ser uma representação gráfica bastante difundida no meio digital e no design.

O desenvolvimento desta etapa foi realizado através do design paramétrico com experimentações no Grasshopper para emulação das estratégias de leveza e resistência do Agave utilizado um algoritmo que simula os processos de conformação naturais com os princípios de Voronoi. As formas resultantes são verificadas em termos de estruturas genéricas como exemplificação das possibilidades de padrões apresentados. Tanto a distribuição uniforme, como a distribuição variada.

Deste modo, foram aplicados dois métodos de modelagem paramétrica para emulação das estruturas na forma de diagramas de Voronoi. Cada método tem uma técnica diferente de criação. Entretanto, o código foi desenvolvido de forma que atendesse aos dois principais arranjos celulares identificados, diferenciando-se em algumas etapas do código, porém fazendo uso basicamente dos mesmos inputs.

Onde o **primeiro método** parametrizou a estratégia de células homogêneas com diâmetros mais ou menos uniformes, variando apenas a densidade de células na estrutura. No primeiro método que é mais tradicional, o padrão é gerado a partir de

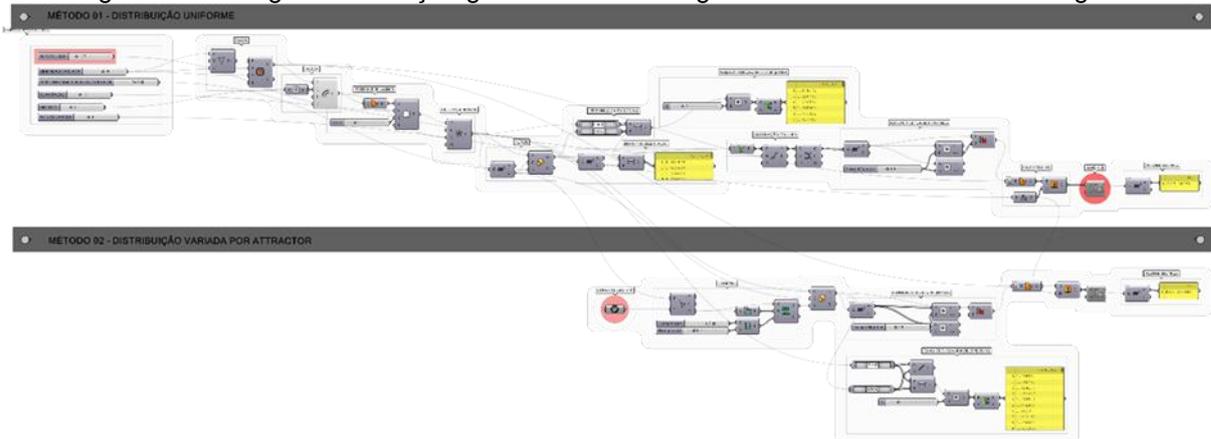
uma divisão randômica de pontos, o Voronoi se forma a partir dos pontos randômicos, tendem a ser células de mesmo tamanho, células mais homogêneas, sem grandes variações no tamanho das células.

O **segundo método** foi trabalhado para emular as variações dos tipos de células e obter estruturas com variação de densidade, variação no diâmetro das células e espessura da parede celular. Para tal efeito o algoritmo utiliza uma curva atratora para mudar a posição do adensamento das células.

Atratores são pontos/curvas que agem como ímãs virtuais - atraindo ou repelindo outros objetos. No Grasshopper, qualquer geometria referenciada no Rhino ou criada no Grasshopper pode ser usada como um atrator. Os atratores podem influenciar qualquer número de parâmetros de objetos ao redor, incluindo escala, rotação, cor e posição. Esses parâmetros são alterados com base em sua relação com a geometria do atrator (Modelab.Design, 2022)

O segundo método utiliza atratores, onde é possível obter variações, adicionar pontos de tensão onde as células se tornam mais densas, ou mais afastados dos pontos. Para variar essas células do padrão existem diversos caminhos, um deles usando atratores, que é um ponto para distanciar ou aproximar as outras células.

Figura 75 - Código da emulação genérica da estratégia de leveza e resistência do Agave.



Fonte: Autor (2021).

Ambas as técnicas apresentadas fazem uso dos mesmos inputs, tais como: número de células; dimensão da placa; porcentagem da espessura da parede; suavização; margem; e altura da peça. Os quais podem ser manipulados e gerar inúmeros padrões. Entretanto existem diferenças no segundo método onde uma curva atratora é associada ao código para direcionar a densidade do arranjo celular.

Neste caso ainda pode-se alterar as espessuras das paredes celulares através de domínios associados.

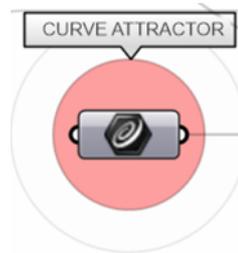
### 3.4.1 Inputs

Os inputs são compostos pelos parâmetros que controlam o algoritmo. São os parâmetros que serão utilizados como entrada de informação no algoritmo. Localizados na caixa de parâmetros no início do código que atende aos dois métodos desenvolvidos, e a curva atratora aplicada ao segundo método que é gerada no Rhino. Os parâmetros se dividem entre parâmetros estático e customizáveis, estes inputs são associados aos componentes.

#### 3.4.1.1 Parâmetros estáticos / fixos

Parâmetros que não sofrem modificações ao longo do algoritmo e nem durante seu uso. Esses parâmetros normalmente são dados não mutáveis relacionados à cálculos matemáticos feitos ao longo do algoritmo, como divisões, fatores de escalonamento, ou geometrias importadas que não são paramétricas, como curvas construídas no Rhino ou dados importados de outros softwares, por exemplo.

Figura 76 - Curva atratora relacionada ao método 02 - distribuição variada por atrator.

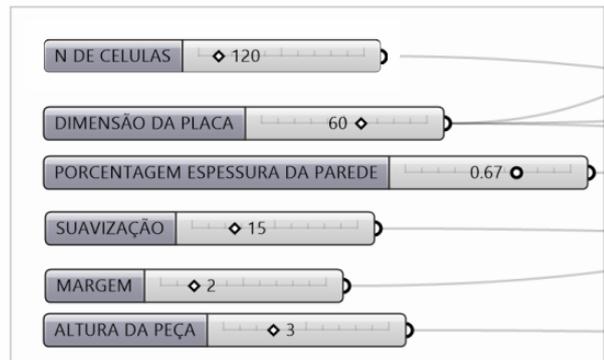


Fonte: Autor (2021).

#### 3.4.1.2 Parâmetros customizáveis / editáveis

Todos os parâmetros básicos de manipulação são efetuados nesta caixa, todas as variações são visualizadas com a manipulação. A visualização do código é mostrada no Rhino.

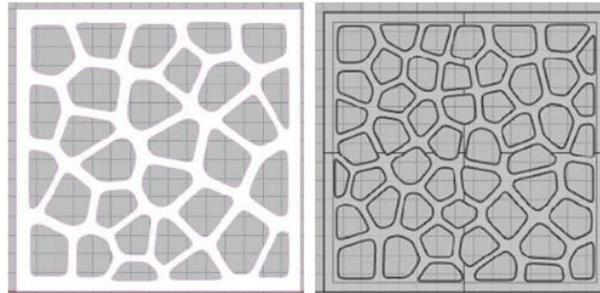
Figura 77 - A caixa de parâmetros atende aos dois métodos.



Fonte: Autor (2021).

1. **NÚMERO DE CÉLULAS:** Também se pode controlar o número de células, ou seja, a densidade do padrão, o que resulta em células com maiores ou menores diâmetros.

Figura 78 - Exemplo de efeito gerado pela alteração do número de células. O padrão à esquerda apresenta 30 células enquanto à direita apresenta 50.



Fonte: Autor (2021).

2. **DIMENSÃO DA PLACA:** Foram definidas as medidas do artefato milímetros, onde os parâmetros com os slides de valores podem ser editados e definidos os limites das dimensões, e dentro desse limite pode-se manipular os valores que irão refletir visualmente na peça.
3. **PORCENTAGEM ESPESSURA DA PAREDE:** Este parâmetro controla a porcentagem da espessura da parede das células, está relacionado a um domínio de 0 a 1 (sendo 0 mais fechado, e 1 mais aberto) e basta relacionar no intervalo o valor que se quer.
4. **SUAVIZAÇÃO:** É a borda interna das células. A suavização está relacionado com o nível de *filled* (visualmente é um preenchimento interno da borda da célula, efeito visual que torna a célula mais orgânica ou poligonal, quanto menor esse valor menos pontos de controle vai ter na célula, significa que ela vai ficar

mais suavizada, e quanto maior, mais pontos de controle vai ter, logo, ela vai ficando mais poligonal.

5. **MARGEM:** Controle da espessura da borda do interior da placa para maior ou menor.
6. **ALTURA DA PEÇA:** Controle da altura da placa no eixo Z. Efeito de extrusão da placa bidimensional tornando um artefato tridimensional.

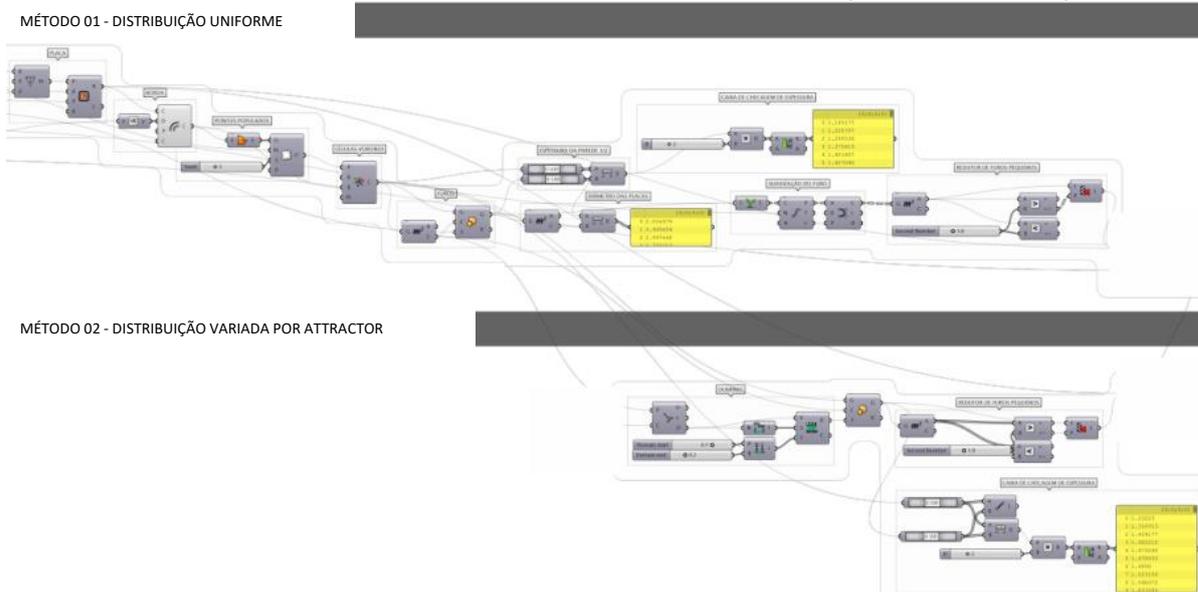
#### 3.4.1.3 Code

Code são ações realizadas no algoritmo a partir de parâmetros associados à componentes. Neste tópico são destrinchadas as ações que o algoritmo realiza a partir dos inputs inseridos, e como essas ações foram estruturadas com os componentes do Grasshopper. O código é apresentado e explicado, etapa por etapa, desde as associações realizadas, ao caminho que a informação percorre e os possíveis resultados que podem ser obtidos. A exemplo de rotacionar uma forma, mover, dividir etc. Logo, o Code abrange desde:

. Estrutura do Algoritmo - Como ele é organizado e sistematizado. O algoritmo tem uma sequência de ações associadas, que combinadas entre si geram resultados diversos, e esse processo é detalhado de forma ilustrativa apresentando quais os elementos que compõe o seu algoritmo, e as etapas que ele cumpre. De forma que as etapas ajudem no entendimento da estrutura do algoritmo.

. As funções do Algoritmo - O que ele faz. Cada algoritmo, ou trecho de código, desempenha uma função, tem um propósito por trás de modo que fique claro qual a contribuição do algoritmo na resolução do problema projetual, geométrico ou matemático, Por exemplo, umas das etapas da emulação genérica de estratégia de leveza e resistência do Agave dentro do código, é a geração de estruturas com base em estratégia bioinspirada de divisão celular, utilizando a função Voronoi. Estas padrões podem ser direcionadas para solucionar otimizações estruturais de artefatos bi ou tridimensionais.

Figura 79 - Code: sequência de etapas e ações realizadas no algoritmo a partir de parâmetros associados à componentes. Parte de cima do código é referente ao método 01, enquanto a parte de baixo é referente ao método 02. Ambos fazem uso da caixa de parâmetros dos inputs.



Fonte: Autor (2021).

### 3.4.2 Estrutura e função do algoritmo

A estrutura do algoritmo é organizada e sistematizada da seguinte forma:

#### - Método 01 - Distribuição uniforme

- Placa
- Borda
- Distribuição dos pontos populados
- Células Voronoi
- Furos
- Dimensão da placa
- Suavização do furo
- Redutor de furos pequenos
- Espessura da parede 1/2
- Caixa de checagem de espessura
- Peça final
- Bake
- Volume da peça

## - Método 02 - Distribuição variada por atrator

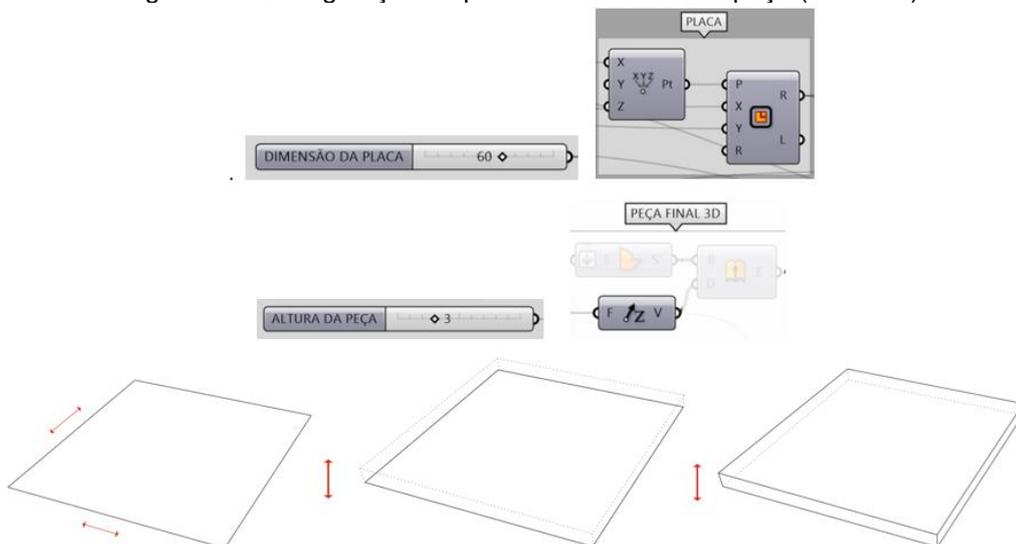
- Placa
- Borda: Criar / definir margem da Borda
- Distribuição dos pontos populados
- Células Voronoi
- Furos
- Curve attractor
- Domínio
- Redutor de furos pequenos
- Caixa de checagem de espessura
- Volume da peça

### 3.4.2.1 Método 01 - Distribuição uniforme

#### Placa

A ação realizada no algoritmo por este grupo de componentes tem a função de configurar as dimensões do artefato no plano bidimensional à partir do parâmetro DIMENSÃO DA PLACA associado ao grupo PLACA. A extrusão, ou seja, a altura da placa é definida pelo componente de eixo Z localizada no final do código dentro do grupo PEÇA FINAL 3D, que por sua vez está associado ao parâmetro ALTURA DA PEÇA.

Figura 80 - Configuração da placa mais a altura da peça (extrusão).

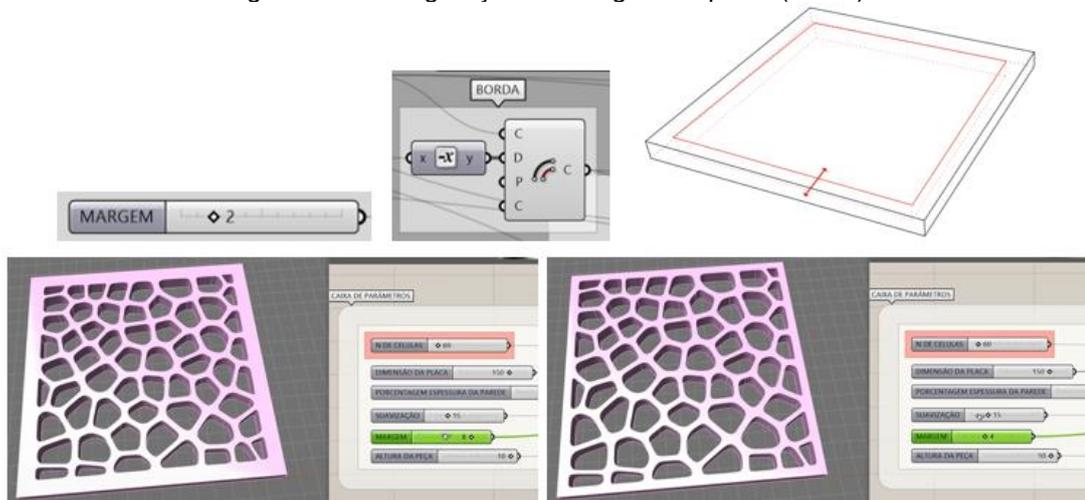


Fonte: Autor (2021).

## Borda

Componentes para criar / definir a margem da borda do artefato. Está associado ao parâmetro MARGEM para controle da espessura da borda para o interior da placa.

Figura 81 - Configuração da margem da placa (borda).

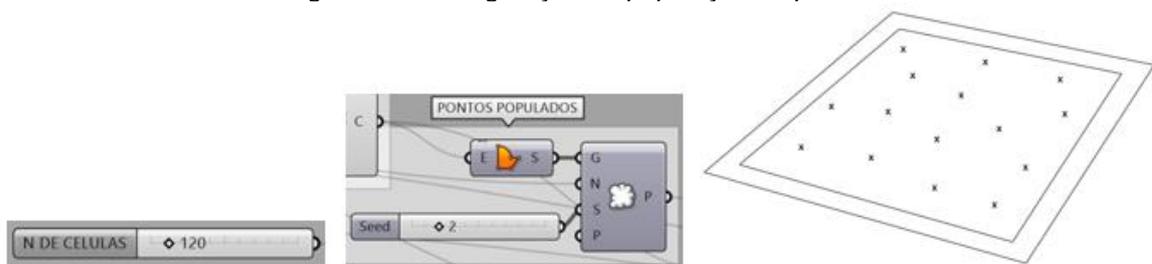


Fonte: Autor (2021).

## Distribuição dos pontos populadas

Randomização da posição original dos pontos. Esta função é definida através do grupo de componentes PONTOS POPULADOS, o qual está associado ao parâmetro NÚMERO DE CÉLULAS e os limites dimensionais da placa. Primeiramente foi realizada a distribuição randômica dos sítios geradores, que podem ser chamados de sementes. Os pontos geradores têm mesmo peso na configuração do diagrama de Voronoi e sua constituição depende da distância entre eles para dividir o plano em espaços geométricos segmentados.

Figura 82 - Configuração da população de pontos.

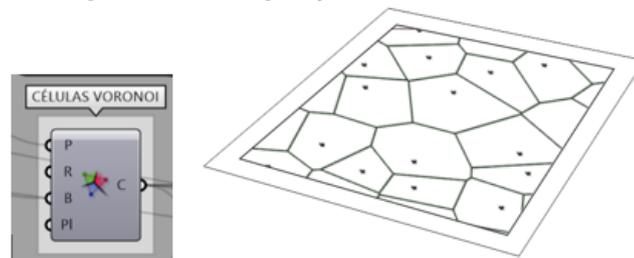


Fonte: Autor (2021).

## Células Voronoi

A ação realizada no código pelo componente CÉLULAS VORONOI define a configuração inicial das células do diagrama de Voronoi. Após a definição dos pontos são geradas retas equidistantes entre si, tendo em conta um conjunto de pontos não colineares na superfície da placa que irão formar as bordas dos polígonos com número de arestas variáveis. Cada célula adjacente à outra contém apenas um ponto gerador. Modificando a distribuição dos pontos resulta em uma variedade de configurações visuais ao alterar a estrutura e estética do padrão.

Figura 83 - Configuração das células Voronoi.



Fonte: Autor (2021).

## Furos

Estes componentes denominados FUIROS tem a função de realizar os furos na superfície do artefato e tornar a superfície vazada conforme a área delimitada. Estão associados ao componente CÉLULAS VORONOI. Também apresenta conexões com outros componentes relacionados à ESPESSURA DA PAREDE e SUAVIZAÇÃO DO FURO.

Figura 84 - Configuração dos componentes denominados Furos, que atende aos dois métodos de distribuição uniforme e variada.



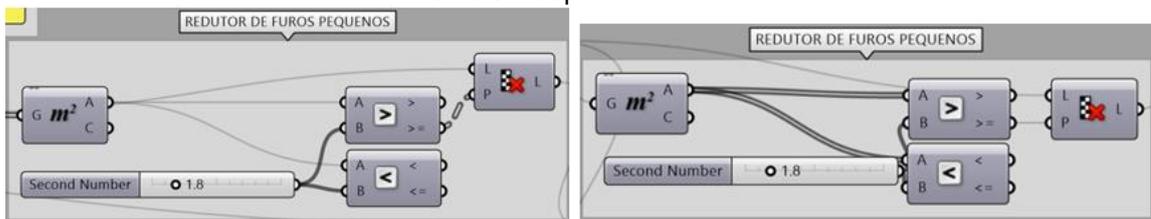
Fonte: Autor (2021).

## Redutor de furos pequenos

Os grupos de componentes denominados REDUTOR DE FUIROS PEQUENOS estão presentes nos dois métodos. Estes grupos de componentes realizam a

operação de reduzir ou eliminar a geração de furos muito pequenos quando se aplica uma maior densidade na população de células que possam comprometer a capacidade de impressão, qualidade do acabamento da peça ou até mesmo a sua integridade durante o processo. Dentro do grupo, os objetos deslizantes possibilitam relacionar algum valor dentro dos limites pré estabelecidos por meio de um seletor de área, que faz uma seleção de furos muito pequenos através de um controle que tem um alcance definido para viabilizar a materialização nos processos de fabricação que podem ser explorados, como CNC ou impressão 3D, a depender o do material e aplicação.

Figura 85 - Configuração do recurso para redução de furos demasiados pequenos. Atende ao método 01 e 02 respectivamente.

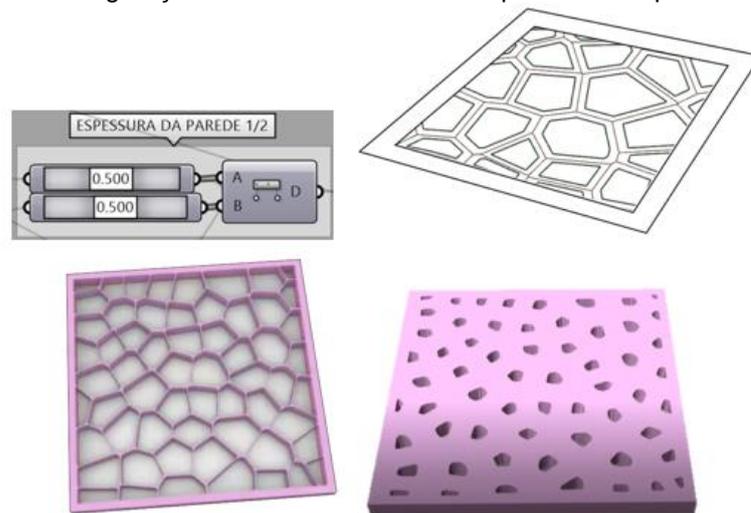


Fonte: Autor (2021).

### Espessura da parede 1/2

Este componente tem a função de definir a espessura das paredes das células, são as bordas internas. Tem conexões com os componentes para criação dos FUROS e com as CÉLULAS DE VORONOI. As espessuras podem ser controladas e modificadas, entretanto ficaram definidas como metade para cada lado da aresta adjacente.

Figura 86 - Configuração do escalonamento da espessura das paredes celulares.

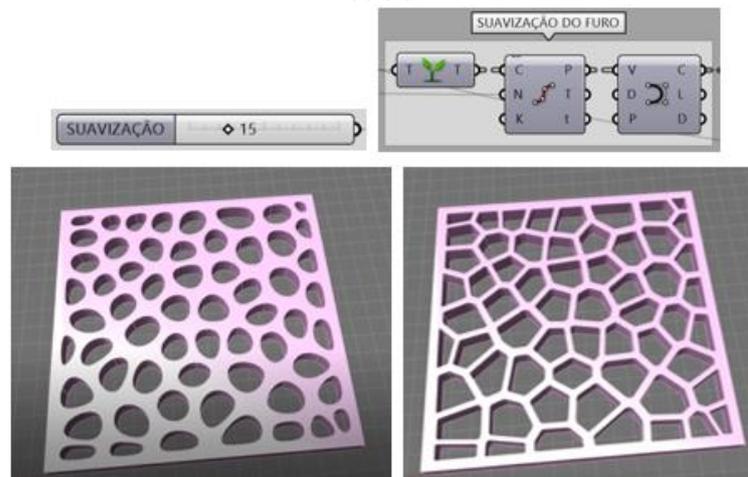


Fonte: Autor (2021).

## Suavização

O componente SUAVIZAÇÃO DO FURO está associado diretamente ao parâmetro SUAVIZAÇÃO e realiza a ação no algoritmo de suavização das bordas internas da célula, trazendo variações estéticas e estruturais, ou seja, permite variar a forma da célula de poligonal à orgânica gradativamente através de pontos adicionados na curva da célula, que causa o efeito de arredondamento, conseqüentemente ocorre uma variação no tamanho da área do artefato.

Figura 87 - Configuração do efeito de arredondamento que suaviza a forma das quinas internas da célula.



Fonte: Autor (2021).

## Dimensão da placa

Componentes que estão associados ao parâmetro DIMENSÃO DA PLACA que define o tamanho do artefato, o volume da área externa do objeto. Inclui uma caixa de texto ao lado onde se pode verificar as medidas dos objetos.

Figura 88 - Configuração do dimensionamento das placas.



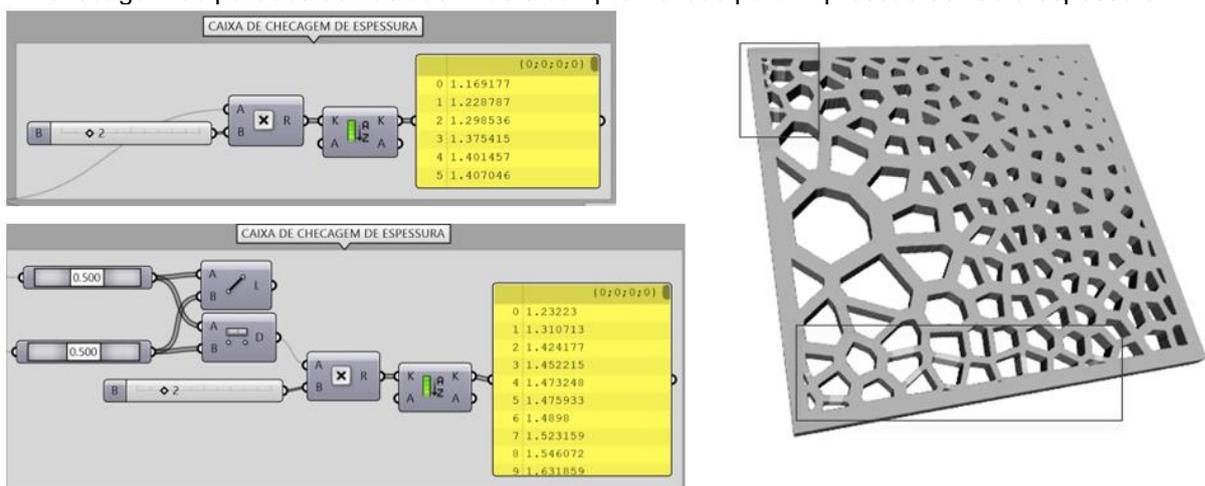
Fonte: Autor (2021).

## Caixa de checagem de espessura

O restante do código é mais para ter a informação de que se consegue checar as espessuras. É um recurso importante para verificação da espessura das paredes, por exemplo, pois assim têm-se todos os dados necessários relacionados às medidas

dos artefatos. Outro ponto positivo deste recurso serve para evitar problemas de impressão com peças pequenas ou ter alguma região da estrutura fragilizado que possa ser evitado, para isto foi incluído uma CAIXA DE CHECAGEM DA ESPESSURA, que possui os valores das espessuras das paredes de cada célula, consequentemente se a espessura for alterada na caixa de parâmetros, os valores na caixa de checagem irão mudar também. A caixa de checagem de espessuras também está associada ao segundo método 02.

Figura 89 - Caixa de checagem referente ao método 01 e 02. Imagem de um modelo gerado com checagem de paredes demasiado finas e comprometidas para impressão devido à espessura.



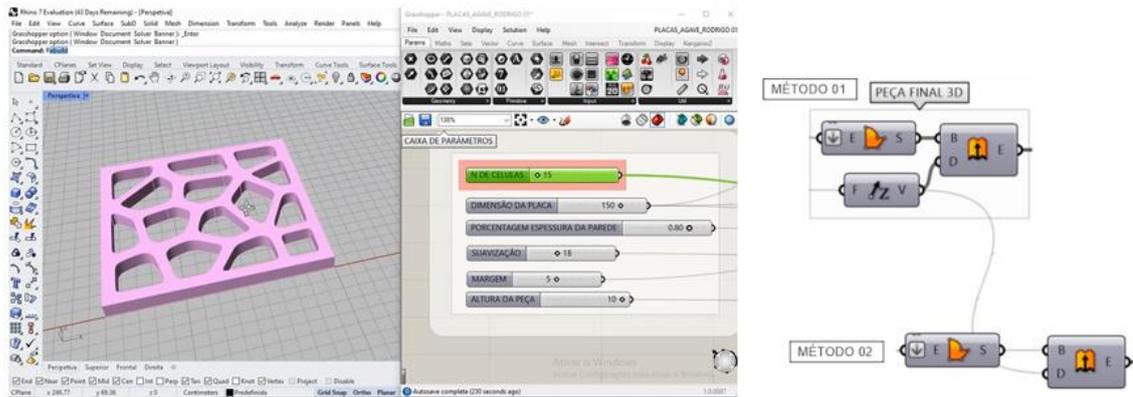
Fonte: Autor (2021).

A depender do processo de fabricação digital, algumas espessuras podem não ser suportadas durante o processo. Por exemplo, nestas peças algumas as partes identificadas contém paredes muito finas com menos de 1mm de espessura, o que pode comprometer a sua integridade para o processo de impressão. Por outro lado com processo de SLA, este não seria um problema pois estas espessuras são suportadas.

### Peça final

O grupo de componentes PEÇA FINAL 3D mais localizado ao final do algoritmo tem a ação de gerar a visualização da geometria da peça final, a conexão que se faz entre estes objetos no Grasshopper com o que se visualiza no Rhino é instantânea, uma representação leve da solução que é atualizada automaticamente ao se modificar os parâmetros editáveis.

Figura 90 - Visualização instantânea da peça final no Rhino ao manipular os parâmetros. O componente Z para transformação em objeto tridimensional está contido no grupo da PEÇA FINAL 3D.

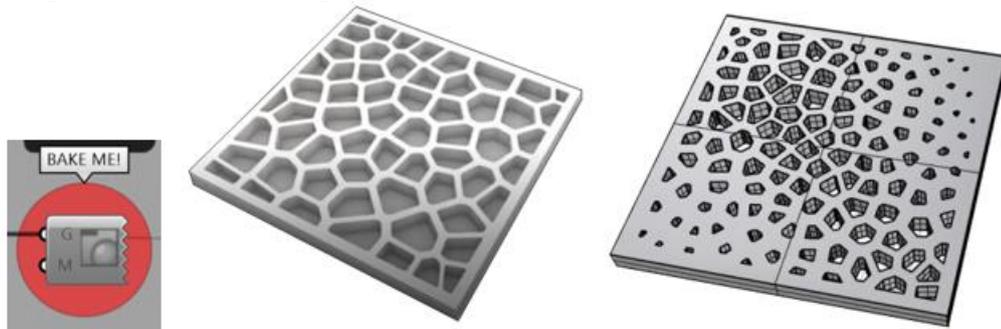


Fonte: Autor (2021).

### Bake

O componente BAKE atua em geometrias regulares do Grasshopper e insere os objetos no Rhino com os atributos especificados. Também aplicado ao método 02, o componente BAKE gera o artefato final.

Figura 91 - Artefatos 3D gerados pelo comando BAKE ME! na interface do Rhino.



Fonte: Autor (2021).

### Volume da peça

O componente VOLUME DA PEÇA fornece o volume do artefato que está sendo mostrado na interface do Rhino. Também aplicado ao método 02.

Figura 92 - Volume da peça.



Fonte: Autor (2021).

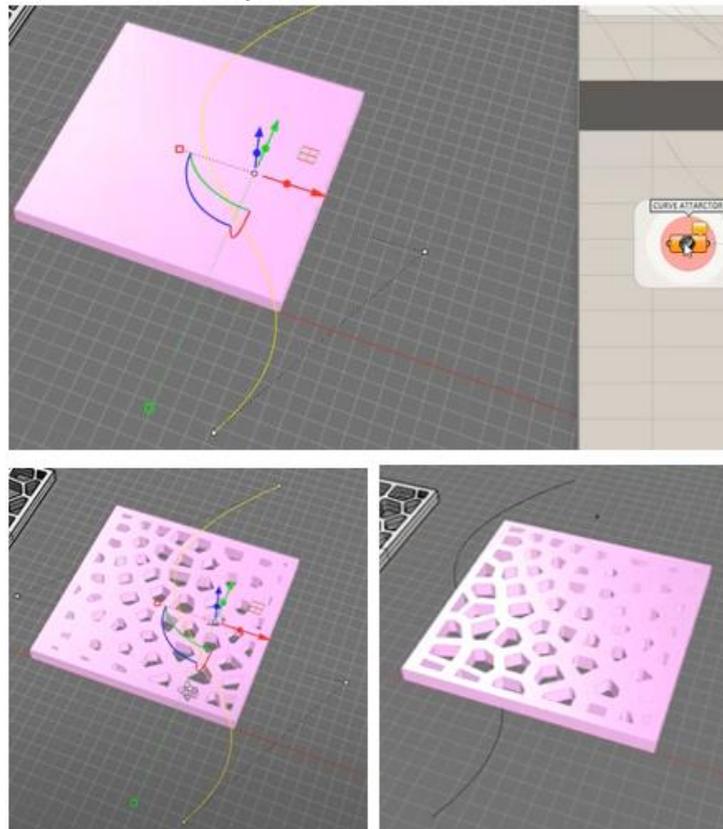
### 3.4.2.2 Método 02 - Distribuição variada por atrator

A distribuição variada por atrator é relativo ao segundo método. Os grupos de componentes do segundo método estão associado aos mesmos parâmetros do primeiro, é a mesma caixa de parâmetros, o que muda é a relação da abertura das células, em vez de ser linear (primeiro método), onde as células possuem um offset proporcional, no segundo método tem que associar uma curva de atrator ao código para se obter variações.

#### **Curve attractor**

Nesse método o diferencial é a curva de atração que não está no código, entretanto é gerada no Rhino e em seguida referenciada no Grasshopper para então atuar como um atrator. Toda alteração que for efetuada na curva, inclusive sua posição, vai alterar a estética do Voronoi no código.

Figura 93 - CURVE ATTRACTOR relacionado ao método 02 - Distribuição variada por atrator. Ao se modificar a forma curva ou a posição da mesma, ocasiona em diferentes resultados no padrão de distribuição da densidade do artefato.

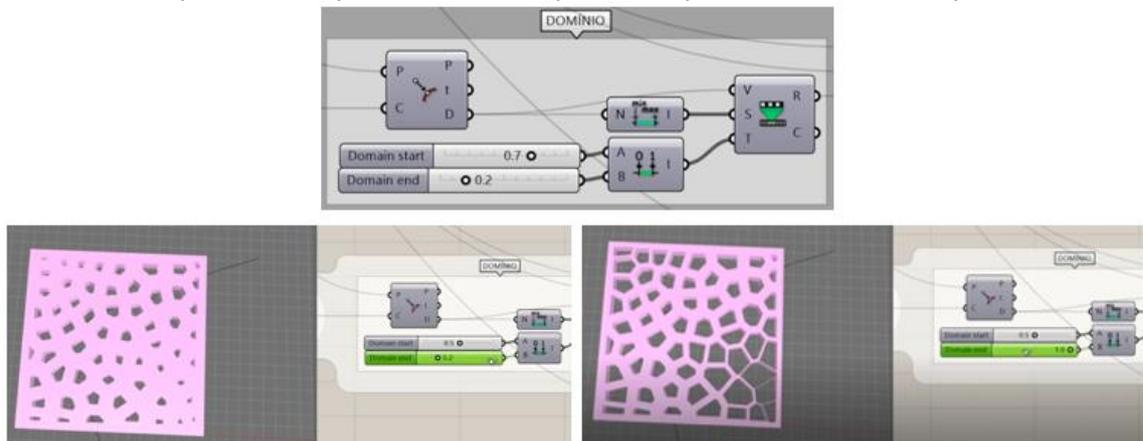


Fonte: Autor (2021).

## Domínio

Pode-se ainda controlar o DOMÍNIO dessa atração através de dois valores, variando as espessuras (offset) das paredes da célula, possibilitando ter mais controle sobre a variação da estrutura.

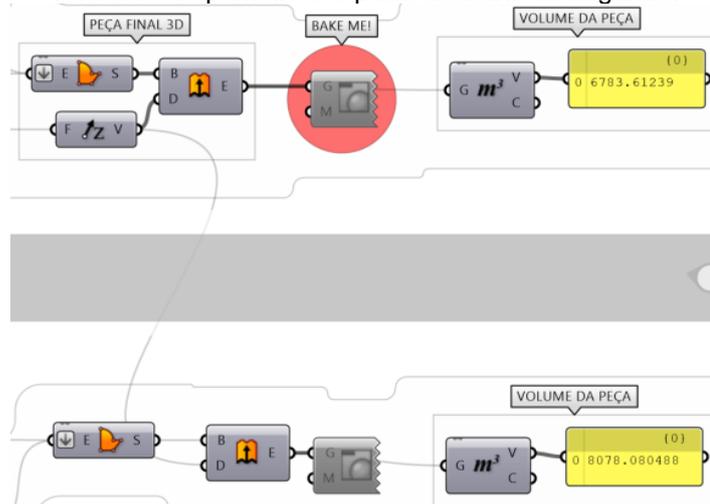
Figura 94 - Alterando os valores do domínio se consegue ter controle sobre as espessuras da parede, apresentando paredes finas e espessas no padrão ao mesmo tempo.



Fonte: Autor (2021).

O output é apresentado no Rhino, entretanto a cada resultado obtido é possível gerar um modelo 3D (passível de ser exportado para impressão) acionando o comando BAKE localizado no final do código. Basicamente para gerar inúmeros artefatos é só configurar os parâmetros para gerar o arquivo de impressão. A caixa PEÇA FINAL 3D também contém as mesmas informações do objeto final para visualização e a caixa VOLUME DA PEÇA fornece o volume do artefato final.

Figura 95 - O componente BAKE gera o artefato final, atende aos dois métodos, a parte de cima referente ao primeiro e a parte de baixo ao segundo.

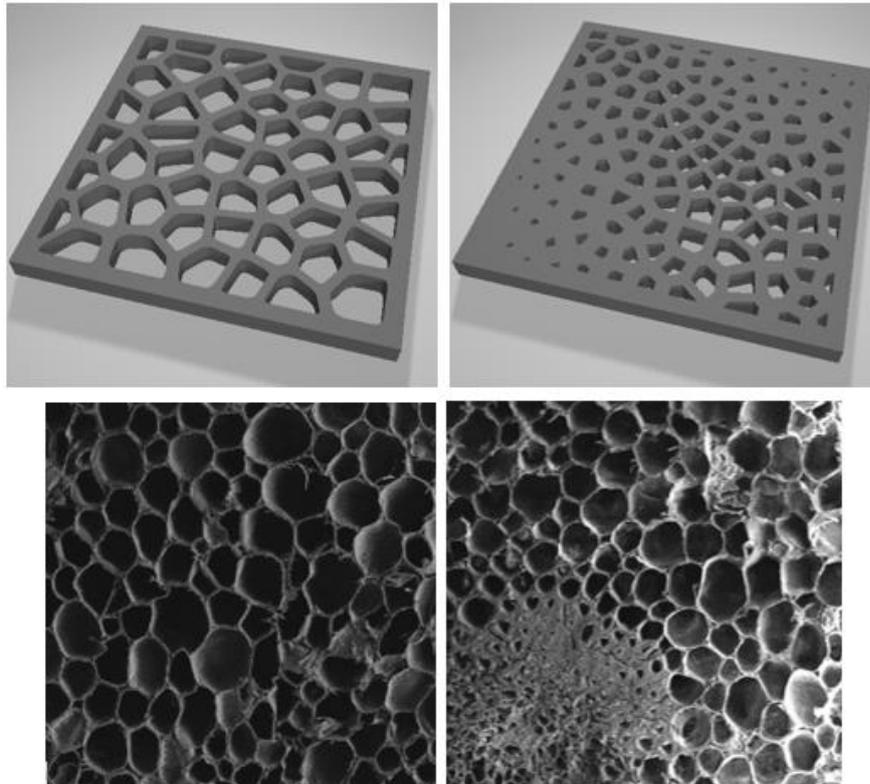


Fonte: Autor (2021).

### 3.4.3 Outputs

Neste tópico são apresentados alguns resultados obtidos na saída do algoritmo, possibilidades generativas do algoritmo, o potencial de variação de saídas e os respectivos resultados obtidos, mostrando de forma visual as características morfológicas, estéticas e dados que o algoritmo gerou. Nessa etapa o projeto é apresentado, não como um produto único, mas sim como uma amostra dentre múltiplas opções possíveis dentro do sistema desenvolvido com o algoritmo através dos dois métodos de distribuição de emulação da estratégia genérica do Agave nos modelos apresentados abaixo, os quais representam a distribuição uniforme e distribuição variada.

Figura 96 - Modelos genéricos representativos dos dois métodos de distribuição, uniforme e variada; e micrografias de Agave referentes aos dois princípios de padrões de distribuição de células com arranjos uniformes e variados, os quais representam o conceito de leveza e resistência.



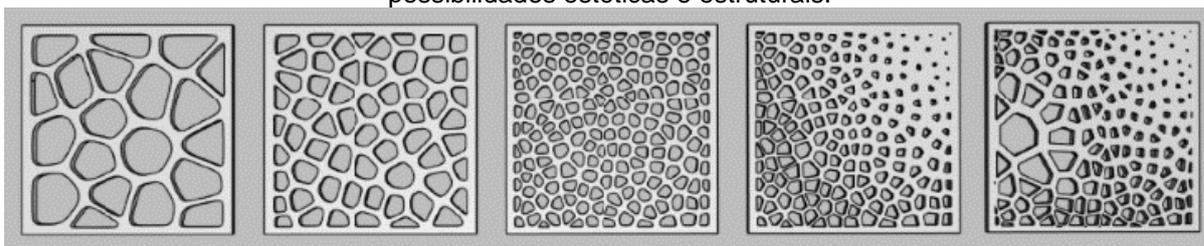
Fonte: Autor (2021).

Os resultados obtidos mais representativos da emulação da estratégia de leveza e resistência do Agave foram analisados e selecionados. Tendo definido as duas abordagens de arranjos celulares.

Para representação das possibilidades de **distribuição uniforme** foi definido três modelos onde se trabalhou apenas a variação de densidade;

Na **distribuição variada por atratores** foram definidas duas possibilidades de variação da densidade da estrutura. Tais configurações foram obtidas variando o diâmetro das células e a espessura das paredes, direcionando a variação da densidade para a regiões influenciadas pela curva atratora.

Figura 97 - Estruturas paramétricas como alternativas de emulação dos padrões e gerando inúmeras possibilidades estéticas e estruturais.



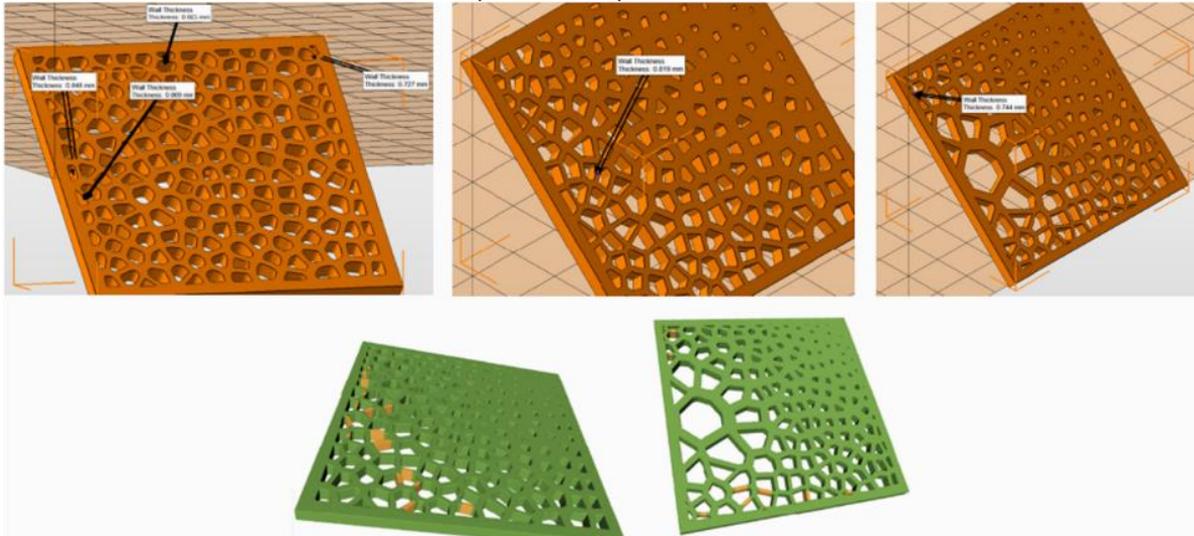
Fonte: Autor (2021).

Deste modo foram definidas cinco variações de padrões de organização celular para prototipação. O objetivo foi de realizar uma primeira materialização tridimensional para que fossem realizadas análises e reflexões a respeito dos modelos para impressão.

Alguns dados relevantes de saída do projeto podem ser extraídos do código para que possam ser visualizados e analisados, como por exemplo: a área de superfície, o volume do material, espessura das paredes, peso, etc. Podendo comparar o volume da área das placas impressas e seus respectivos pesos.

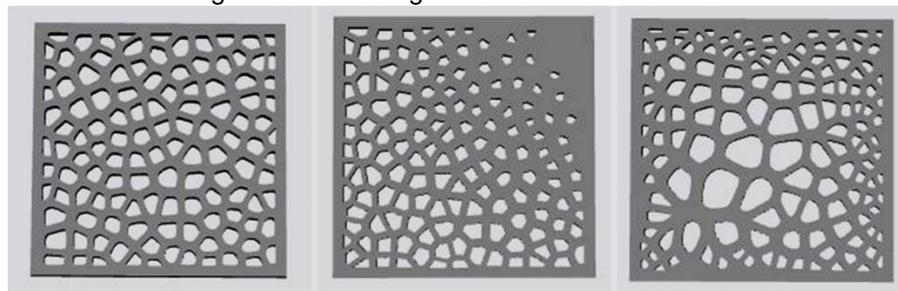
Nesta fase tentou-se atingir espessuras mínimas de impressão das paredes mais finas. As placas encaminhadas para impressão 3D foram todas configuradas com as dimensões 60 x 60 x 30 milímetros. Durante o processo de impressão, houve a necessidade de redesign de três modelos. As zonas dos modelos que precisaram de revisão e novo outputs gerados destacados na sequência.

Figura 98 - Problemas identificados na fase de pré impressão, algumas partes apresentaram paredes com menores que 1 mm e precisaram ser revistas.



Fonte: Autor (2021).

Figura 99 - Redesign dos modelos revisados.



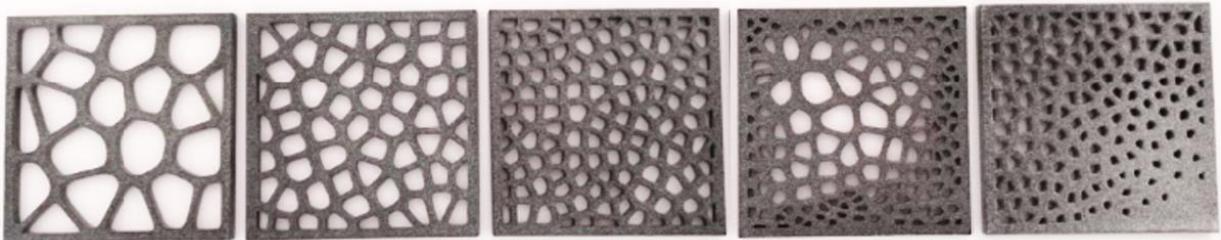
Fonte: Autor (2021).

Os problemas de rejeição das peças ocorreram devido à presença de paredes muito finas. As áreas destacadas na imagem eram adequadas para impressão, mas havia o risco de quebra nas partes mais finas devido à geometria atual e a possibilidade de não suportar o processo de fabricação. Portanto, o projeto obteve melhores resultados com o design das áreas reforçadas ao aumentar ligeiramente a espessura. Isso assegurou uma impressão bem-sucedida, estabelecendo uma espessura mínima de 1,0 mm. Para modelos maiores, deve-se sempre considerar o tamanho da peça e reforço nas paredes que forem necessárias. A impressão dos modelos foi realizada pelo processo com tecnologia de fusão em leito de pó Seletiva Laser Sintering (SLS) que possibilita níveis de acabamento superiores em relação a outros processos. O material de impressão utilizado nesta etapa da pesquisa foi um plástico versátil de nylon durável que pode ser usado em uma ampla gama de aplicações, tanto para prototipagem quanto para produtos finais de qualidade industrial. Este material quando é fino, é flexível o suficiente para dobradiças e molas

e quando espesso, é forte o suficiente para componentes estruturais. Apresenta acabamento fosco com uma superfície ligeiramente áspera. Este acabamento remove algum material para criar uma superfície mais lisa.

Através de uma reflexão a respeito da análise dos dados obtidos com as impressões dos modelos, foi possível observar fatores que reforçam a motivação da investigação das estratégias de leveza e resistência do Agave. Com base na literatura da anatomia vegetal e nas análises e reflexões sobre a estrutura do arranjo celular das fibras de Agave, fica evidente que a mesma lógica observada no sistema natural, se aplica no design de estruturas bioinspiradas emuladas através dos diagramas de Voronoi.

Figura 100 - Modelo de impressão 3D (SLS) com dimensões 60x60x03mm.



Fonte: Autor (2021).

A seguir são apresentados os dados obtidos com a impressão dos modelos.

Tabela 4 - Dados dos modelos de impressão 3D.

| <b>Modelo</b>                            | <b>01</b> | <b>02</b> | <b>03</b> | <b>04</b> | <b>05</b> |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Volume do modelo (cm<sup>3</sup>)</b> | 4,33      | 5,77      | 6,78      | 8,06      | 7,44      |
| <b>Peso (g)</b>                          | 4,18      | 5,52      | 6,25      | 8,11      | 7,19      |

Fonte: Autor (2021).

. Os modelos 01, 02 e 03 apresentam padrão de distribuição uniforme.

Comparando os dados dos três modelos e realizando uma breve reflexão tátil/sensorial. O modelo 01 representa menor densidade de células, tem a estrutura mais leve e menor volume de material, também se apresentou como o modelo mais flexível. O modelo 02 representa densidade intermediária, aumentando um pouco o volume de material e o peso. O modelo 03 apresenta o padrão de maior densidade, conseqüentemente, maior volume e peso, resultando em maior resistência e rigidez da peça.

. Os modelos 04 e 05 apresentam o padrão de distribuição variado. Comparando os dois modelos, o modelo 04 representa uma grande densidade de células em destaque no canto com paredes espessas, este é o modelo que apresentou maior volume de material, maior peso e maior rigidez e resistência. O modelo 05 apesar de apresentar uma menor densidade no centro, as paredes são bastante espessas, o que faz com que apresente menor peso e volume que o modelo 04. Entretanto, este representa uma situação em que a estrutura precisa maior reforço sem aumentar demasiado o seu peso e volume de material, atingindo um equilíbrio entre a resistência e leveza.

Também foi gerado um outro modelo impresso apresentando maiores dimensões pelo processo FFF com filamento de PLA, para efeitos de comparação em relação à exploração de processos e materiais diferentes, assim como serviu para observar acabamentos diferentes.

Figura 101 - Modelo de impressão 3D (FE) com dimensões 150x150x10mm.



Fonte: Autor (2021).

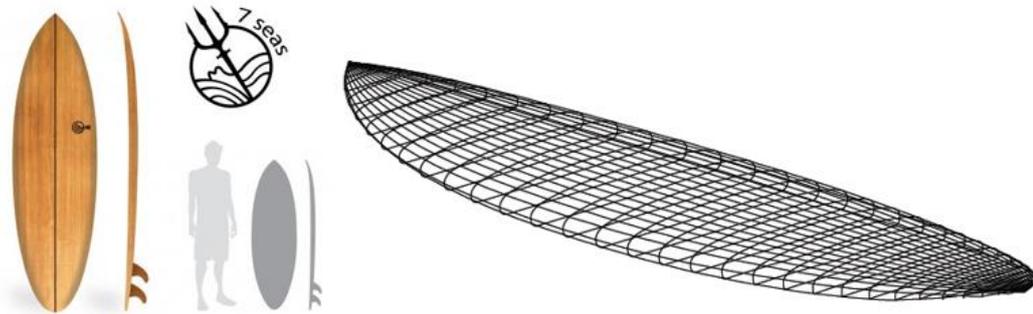
### 3.5 DESIGN PARAMÉTRICO - CRIANDO IDEIAS BIOINSPIRADAS

#### 3.5.1 Emulação bioinspirada no design de artefatos (leveza e resistência).

Em um primeiro momento foi definida a estratégia a ser seguida. Como estudo de caso, foram feitas aplicações na prancha de surf e na quilha. A princípio foi definido o recorte de aplicação em um prancha inspirado no modelo 7Seas - David Weber - com as seguintes medidas: comprimento 5' 11" x largura 20 1/4" x espessura 2 5/8"

e volume 34,9 litros. O método de construção oca utilizado foi o método desenvolvido por David Weber.

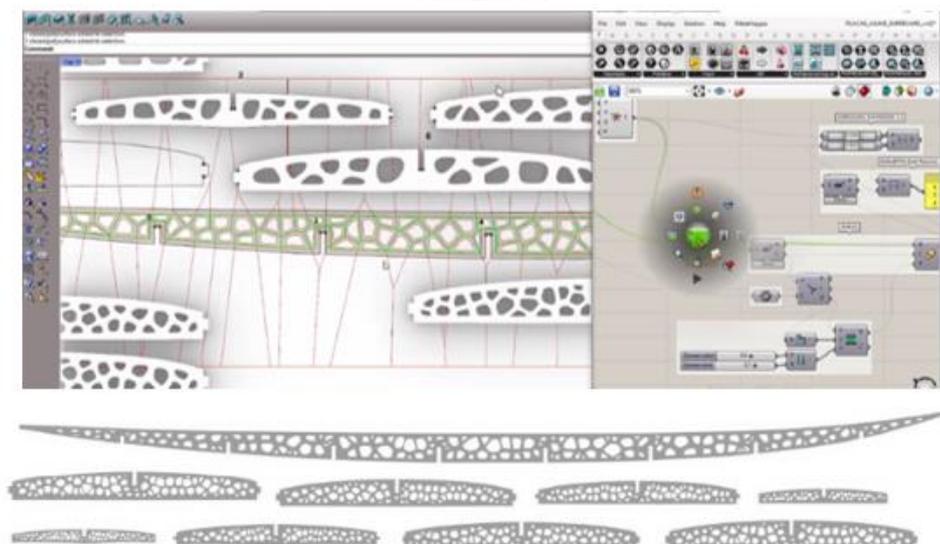
Figura 102 - Projeto original do modelo de prancha oca de madeira “7Seas” David Weber Surfboards.



Fonte: <https://davidweber.com.br/pranchas/surf/7-seas> (2022).

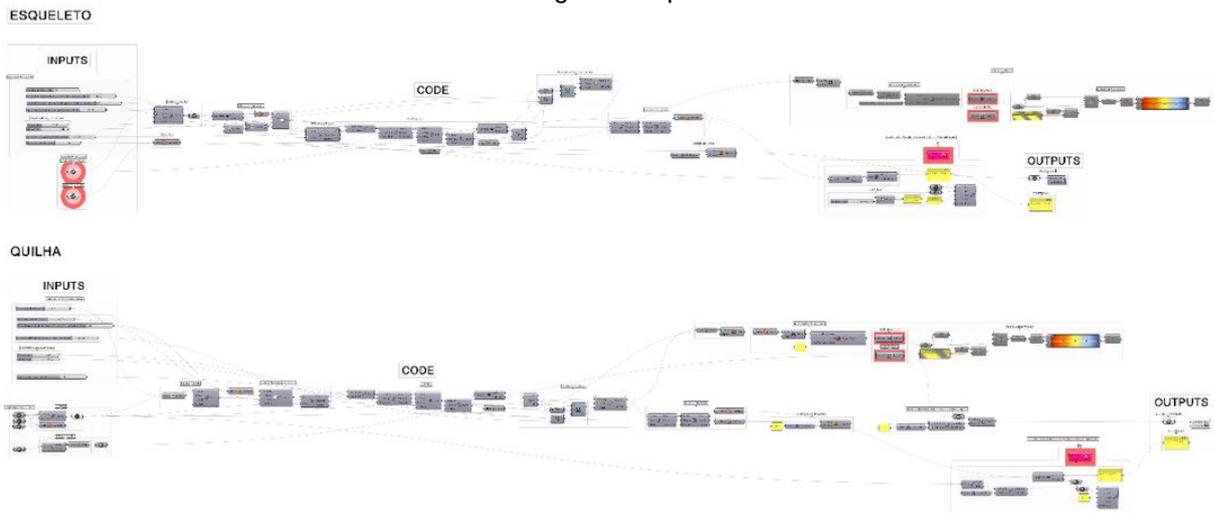
O processo de design paramétrico é um campo amplo de exploração e dentre muitos caminhos que podem ser seguidos como estratégia de desenvolvimento do código, inicialmente foram realizadas duas aplicações algorítmicas, uma para estabelecer os padrões de Voronoi internos para a perfuração das secções do esqueleto da prancha, e outra vai para estabelecer o padrão aplicado ao núcleo das quilhas. A fase de experimentação paramétrica para desenvolvimento do código e dos modelos passou por várias etapas e otimização, sendo gerados modelos durante os processos de evolução do algoritmo.

Figura 103 - Emulação da estratégia de leveza e resistência com base na estrutura das paredes celulares de Agave usando o padrão de diagrama de Voronoi como meio de distribuição de unidades celulares e manipulação paramétrica. Em cada frame do esqueleto obteve-se os padrões mais otimizados.



Fonte: Autor (2022).

Figura 104 - Códigos do Grasshopper da configuração do esqueleto e da quilha com a aplicação da estratégia bioinspirada.

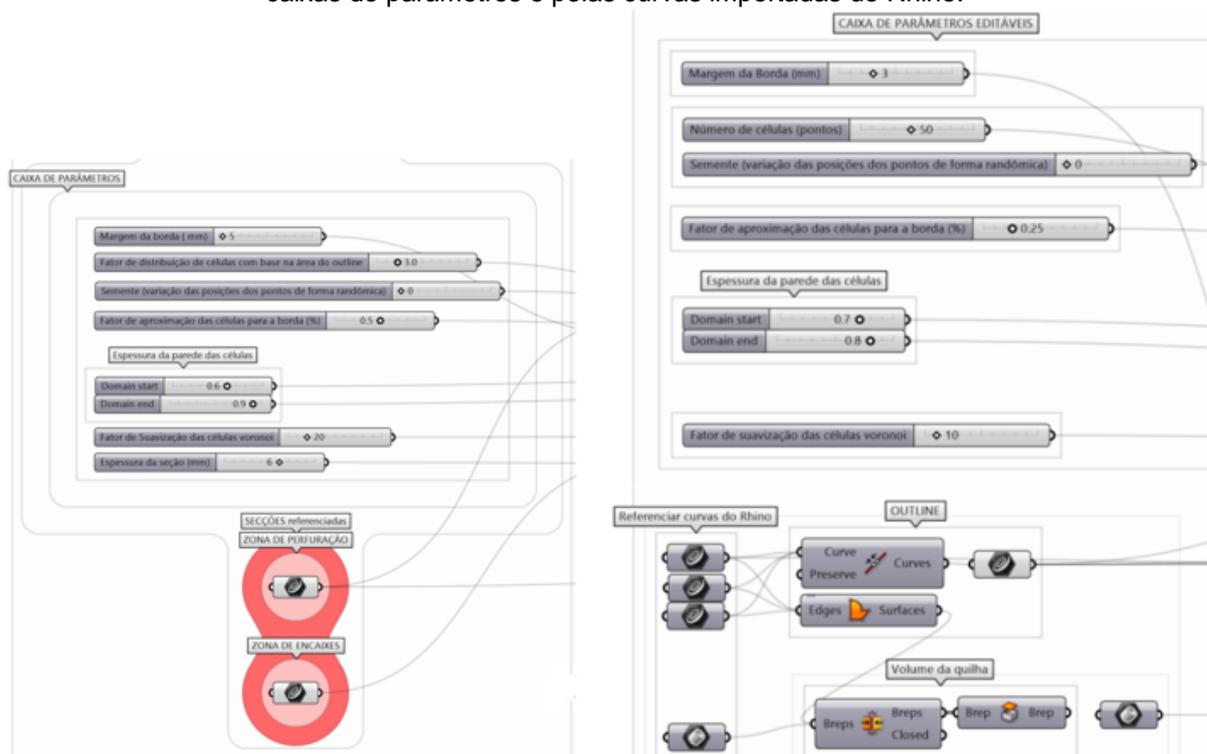


Fonte: Autor (2022).

### 3.5.2 Inputs

Parâmetros no algoritmo. Os inputs são compostos pelos parâmetros que controlam o algoritmo e que serão utilizados como entrada de informação. Basicamente a diferença entre os dois códigos desenvolvidos para esqueleto da prancha de surf e para a quilha é a caixa de parâmetros separada de forma que pode-se modificar todas funções do algoritmo. Também fazem parte dos inputs as curvas e geometrias geradas no Rhino.

Figura 105 - INPUTS do esqueleto da prancha (esquerda) e da quilha (direita), compostos pelas caixas de parâmetros e pelas curvas importadas do Rhino.



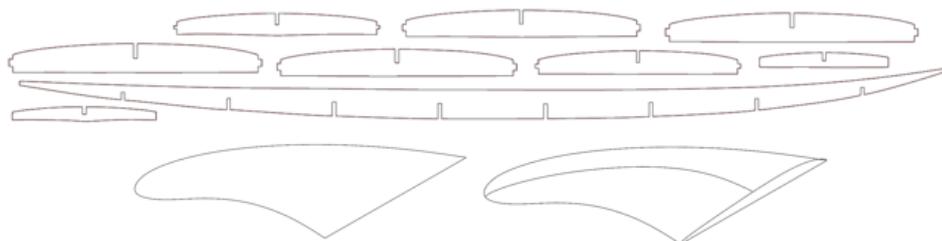
Fonte: Autor (2022).

### 3.5.2.1 Parâmetros Estáticos / Fixos

Parâmetros que não sofrem modificações ao longo do algoritmo e nem durante seu uso. Esses parâmetros normalmente são dados não mutáveis relacionados à cálculos matemáticos feitos ao longo do algoritmo, como divisões, fatores de escalonamento, ou geometrias importadas que não são paramétricas, como curvas construídas no Rhino ou dados importados de outros softwares, por exemplo.

1. Outline das seções da estrutura da prancha (esqueleto)– Foram importadas curvas do software Rhino como Parâmetro de input fixo das seções (estrutura / esqueleto) da prancha.
2. Outline da quilha – Foram importadas curvas do software Rhino como Parâmetro de input fixo do shape (forma) da quilha (modelado pelo autor)
3. Frame / seção da quilha – Curvas que determinam a tridimensionalidade (volume) da quilha, ou seja. A altura da seção e curvatura da forma

Figura 106 - Curvas de input. Outline do esqueleto, da quilha, e curva do volume da quilha.



Fonte: Autor (2022).

### 3.5.2.2 Parâmetros Customizáveis / Editáveis

Ao contrário dos dados fixos, esses são parâmetros que podem sofrer modificações ao longo do algoritmo e durante seu uso. Ou seja, são os parâmetros customizáveis do projeto, aqueles que modificam os resultados a partir de sua edição.

#### Esqueleto

1. **Margem da borda:** Esse parâmetro controla a espessura da margem de segurança para que as células não ultrapassem um limite do outline.
2. **Fator de distribuição de células com base na área do outline:** Número de células. Quantidade de pontos que povoarão a área delimitada do outline do esqueleto com base na área da seção para a geração das células Voronoi.
3. **Semente:** Valor de randomização da posição original dos pontos geradores das células do Voronoi.
4. **Fator de aproximação das células para a borda (%):** Fator que controla a movimentação dos pontos para a borda com base na porcentagem da distância.
5. **Espessura da parede das células:** Domínio de controle dos valores da espessura da parede das células Voronoi.
6. **Fator de suavização das células voronoi:** Valor que controla o nível de suavização das células com base em pontos de controle do polígono gerado pela função Voronoi.
7. **Espessura da seção:** Valor da espessura da seção correspondente à espessura do material.

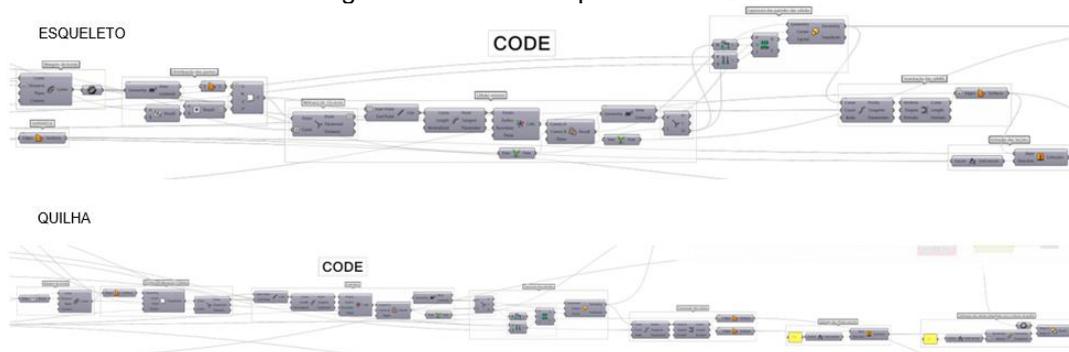
## Quilha

1. **Margem da borda:** Esse parâmetro controla a espessura da margem de segurança para que as células não ultrapassem um limite do outline.
2. **Número de células:** Quantidade de pontos que povoarão o outline da quilha para a geração das células Voronoi.
3. **Semente:** Valor de randomização da posição original dos pontos.
4. **Fator de aproximação das células para a borda:** Fator que controla a movimentação dos pontos para a borda com base na porcentagem da distância.
5. **Espessura da parede das células:** Domínio de controle dos valores da espessura da parede das células.
6. **Fator de suavização das células voronoi:** Valor que controla o nível de suavização das células com base em pontos de controle do polígono gerado pela função Voronoi.

### 3.5.2.3 CODE

Segundo Carvalho (2022), CODE é a receita do código, as ações realizadas no algoritmo a partir de parâmetros associados à componentes. Este tópico destrincha as ações que o algoritmo realiza a partir dos inputs inseridos, e como essas ações são estruturadas utilizando componentes do Grasshopper. Também apresenta e explica, etapa por etapa, desde as associações realizadas, ao caminho que a informação percorre e os possíveis resultados que podem ser obtidos. Esta parte aborda detalhadamente tanto a estrutura do algoritmo como as suas funções (o que ele faz).

Figura 107 - Primeira parte do CODE.



Fonte: Autor (2022).

O algoritmo, ou trecho de código, desempenha uma ou mais funções, e tem um propósito por trás. É importante que fique claro a contribuição do algoritmo na resolução do problema projetual, seja geométrico ou matemático, por exemplo. Foram realizadas duas aplicações algorítmicas, uma para estabelecer os padrões de Voronoi internos para a perfuração das seções do esqueleto da prancha, e outra vai para estabelecer o padrão aplicado ao núcleo das quilhas com mesmo princípio.

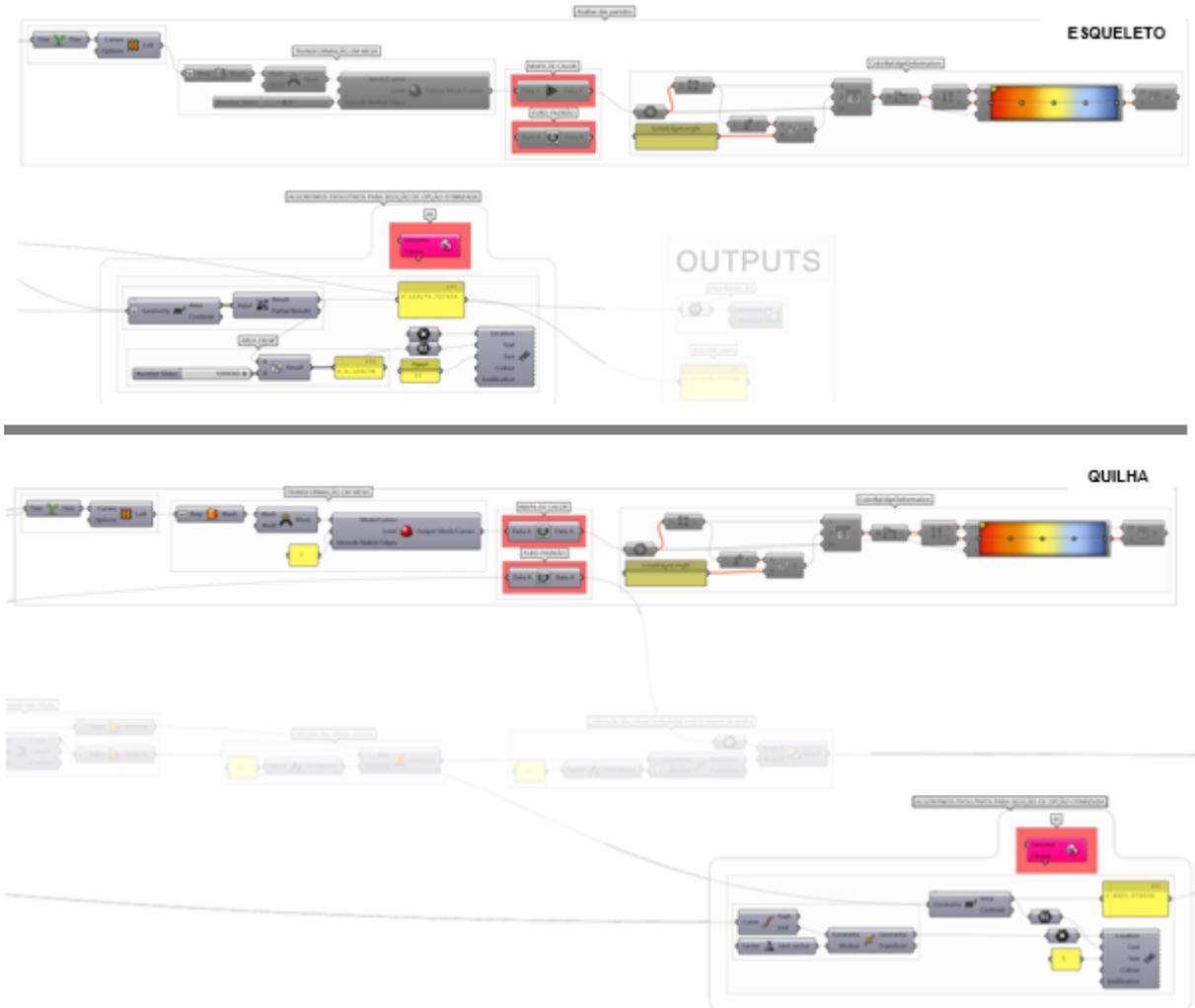
Esta **primeira parte do CODE** é composta pelos componentes responsáveis por toda configuração do artefato e emulação bioinspirada da estratégia do Agave. Ambos os códigos desenvolvidos tem a mesma função, tanto o desenvolvimento do esqueleto como da quilha. Entretanto existem particularidades entre os eles. Neste caso a contribuição segue para:

- Geração de esqueleto de pranchas e quilhas com base em estratégia bioinspirada de divisão celular, utilizando a função Voronoi;

A **segunda parte do CODE** é composta por dois parâmetros que foram incorporados para seleção de modelos otimizados e análise da resistência das paredes.

- Análise e otimização dos modelos com base na área (densidade da estrutura), e análise dos pontos de tensão presentes na estrutura.

Figura 108 - Segunda parte do CODE. Dois parâmetros que foram incorporados - otimização e análise.



Fonte: Autor (2022).

### 3.5.3 Estrutura e função do algoritmo

Este tópico apresenta como o algoritmo é organizado e sistematizado, tem uma sequência de ações associadas que combinadas entre si geram resultados diversos, a seguir são explicados quais os elementos que compõe o código e as etapas que cumpre.

#### Esqueleto

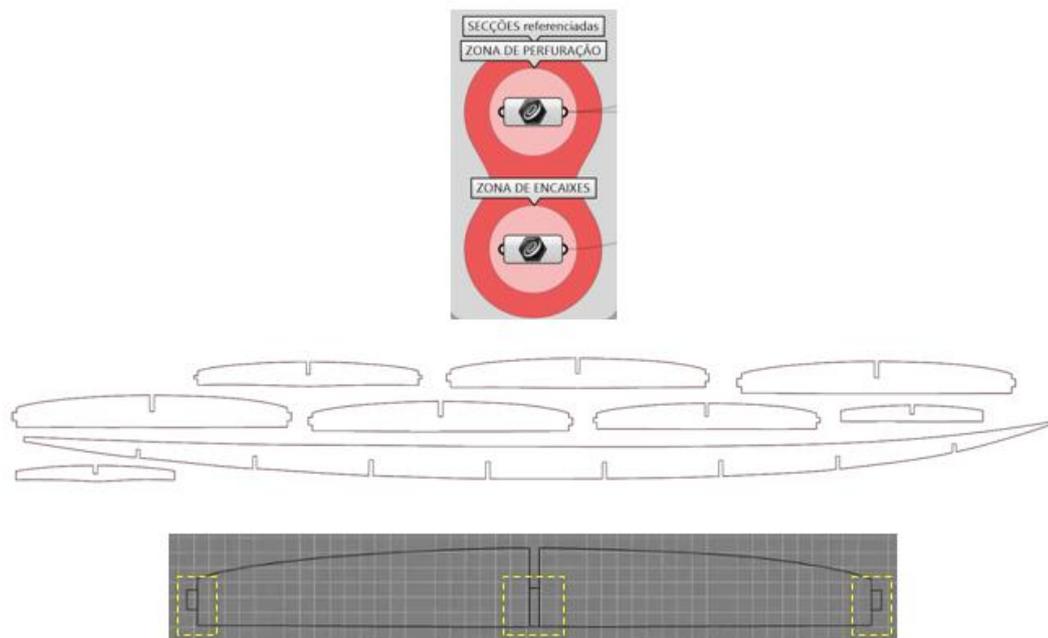
- Referenciar a curva / outline do Rhino
- Criar / definir margem da Borda
- Distribuição dos pontos (núcleo das células)

- Criação das células Voronoi
- Espessura das paredes com base no escalonamento das células Voronoi
- Suavização das células Voronoi
- Extrusão das seções

### Referenciar a curva / outline do Rhino

A ação realizada no algoritmo por estes parâmetros estáticos tem a função de referenciar as curvas que foram geradas no Rhino. Neste caso utilizou-se como base o outline do esqueleto da prancha. Contém a delimitação das ZONAS DE PERFURAÇÃO, onde será aplicada a população de células. E também as ZONAS DE ENCAIXE que não recebem aplicação de células.

Figura 109 - Parâmetros das curvas referenciadas. Outline do esqueleto. Seção do outline mostrando as ZONAS DE PERFURAÇÃO e ZONAS DE ENCAIXES.



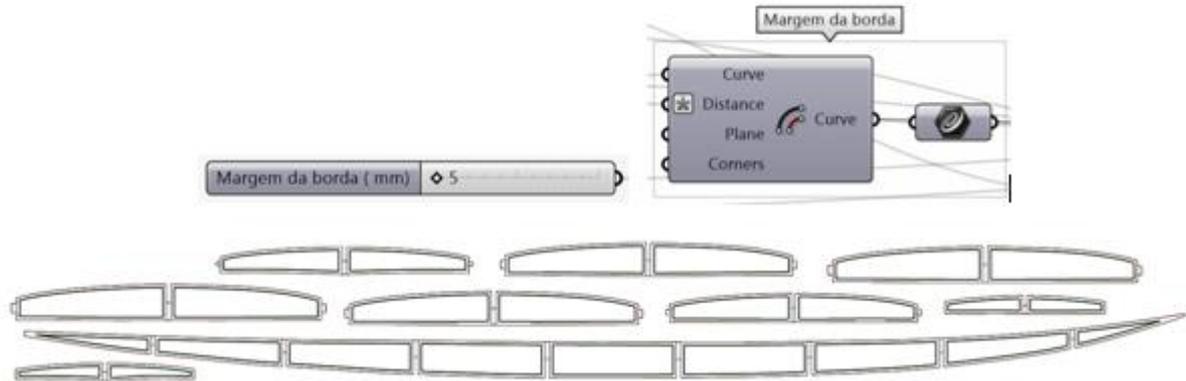
Fonte: Autor (2022).

### Criar / definir margem da Borda

A ação realizada no algoritmo por estes componentes tem a função de definir a MARGEM DA BORDA. Está associado diretamente ao parâmetro editável de mesmo nome. Foi definido um afastamento da borda para ter um controle evitando

qualquer perfuração região da borda, esse limite do afastamento pode ser aumentado ou diminuído.

Figura 110 - Secção margem do outline (definidas entre as zonas de perfuração e as zonas de encaixe).

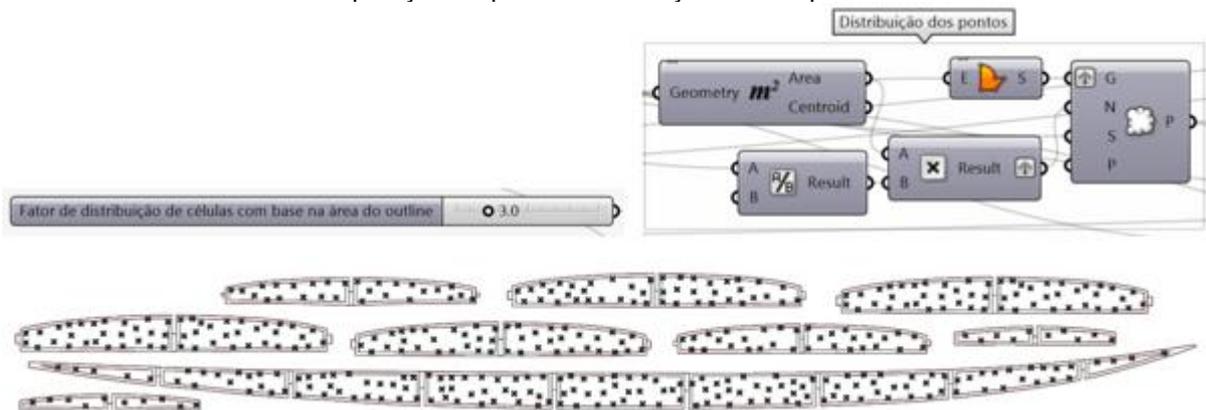


Fonte: Autor (2022).

### Distribuição dos pontos (núcleo das células)

A população de células foi dada com base na área de cada seção do esqueleto, pois cada peça tem uma dimensão específica. Este grupo de componentes realiza a ação de DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS geradores, está associado ao parâmetro FATOR DE DISTRIBUIÇÃO DE CÉLULAS COM BASE NA ÁREA DO OUTLINE. É possível alterar a

Figura 111 - Componente de distribuição dos pontos associado ao parâmetro fator de distribuição. População de pontos nas secções do esqueleto.

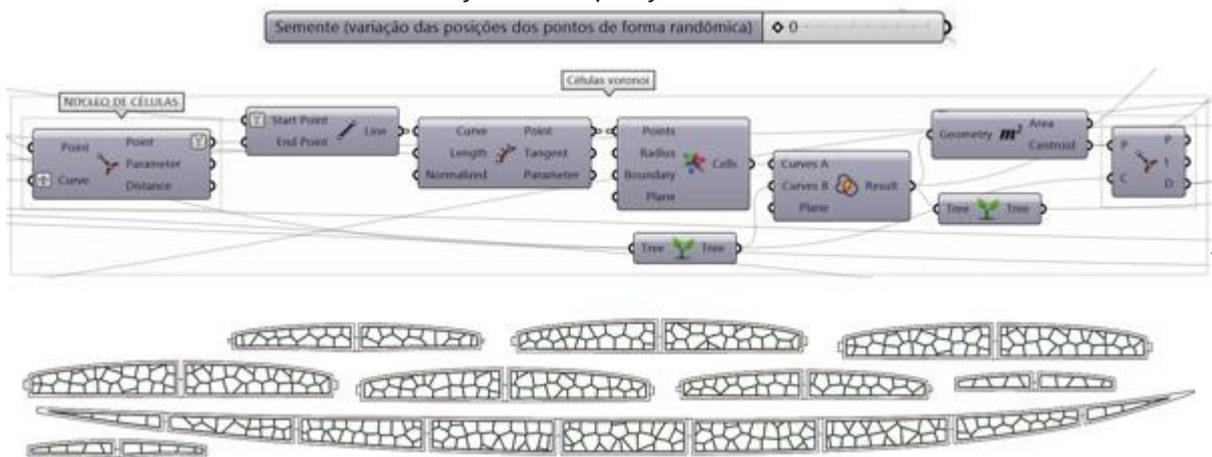


Fonte: Autor (2022).

## Criação das células Voronoi

Primeiramente foi realizada a distribuição randômica dos sítios geradores, que podem ser chamados de sementes. Depois o grupo de componentes CÉLULAS VORONOI, realiza a ação de configurar o diagrama de Voronoi, onde está contido o componente NÚCLEO DE CÉLULAS. Estes componente tem conexão com o parâmetro SEMENTE, alterando o valor obtém-se variação estrutural na forma do padrão de distribuição das células.

Figura 112 - Divisão celular (Voronoi) que está associado ao parâmetro semente para permitir alterações na disposição das células.

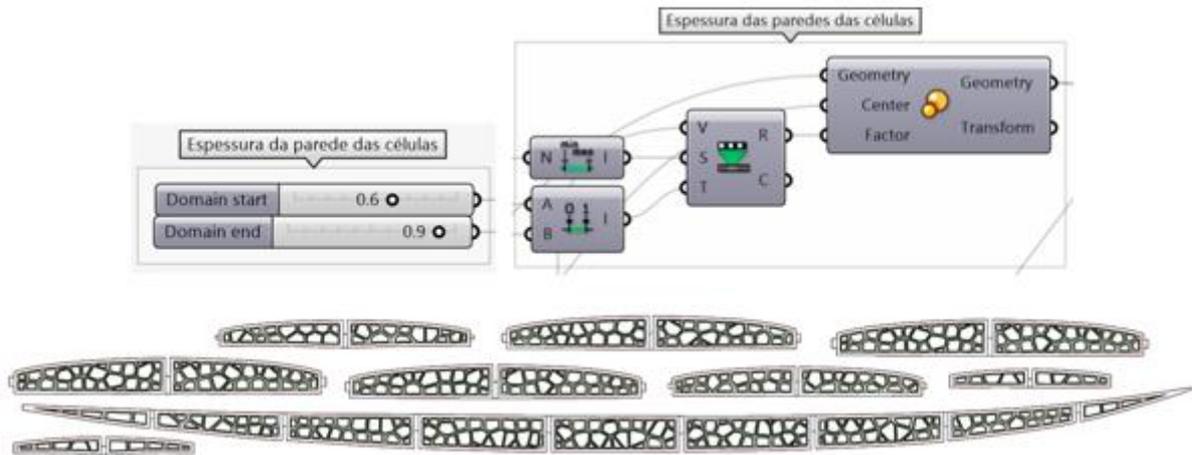


Fonte: Autor (2022).

## Espessura das paredes

Os componentes que compõem este grupo realiza a ação de perfuração das secções, que possibilita ajustar e controlar a espessura das paredes com base no escalonamento das células Voronoi, possibilitando ter mais controle sobre a variação da estrutura.

Figura 113 - Escalonamento das células através do controle do domínio para alterar a espessura das paredes.

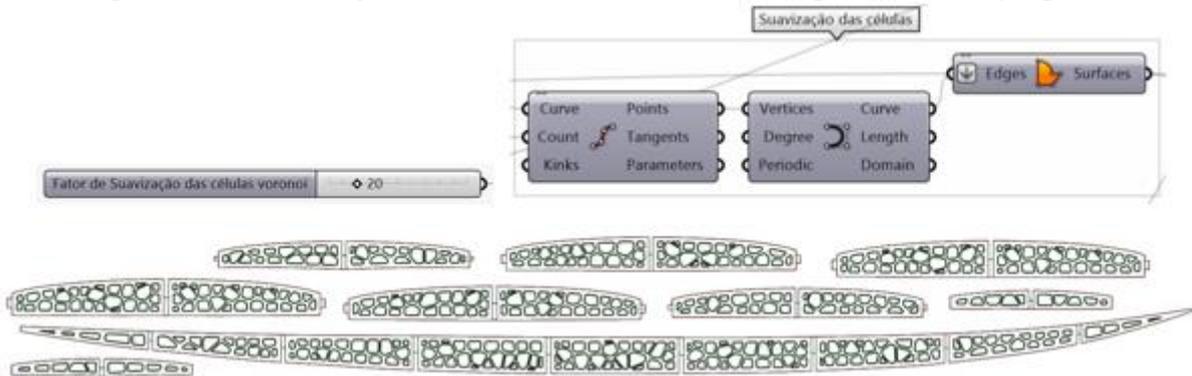


Fonte: Autor (2022).

### Suavização das células Voronoi

Os componentes que compõem o grupo SUAVIZAÇÃO DAS CÉLULAS são responsáveis por realizar a ação da variação da estrutura da célula tornando as paredes mais suavizadas. Está associado ao parâmetro FATOR DE SUAVIZAÇÃO DAS CÉLULAS VORONOI, onde é possível alterar os valores e variar de forma gradual a geometria da célula desde a forma poligonal à forma orgânica.

Figura 114 - A suavização da célula torna a estrutura mais orgânica ou mais poligonal.

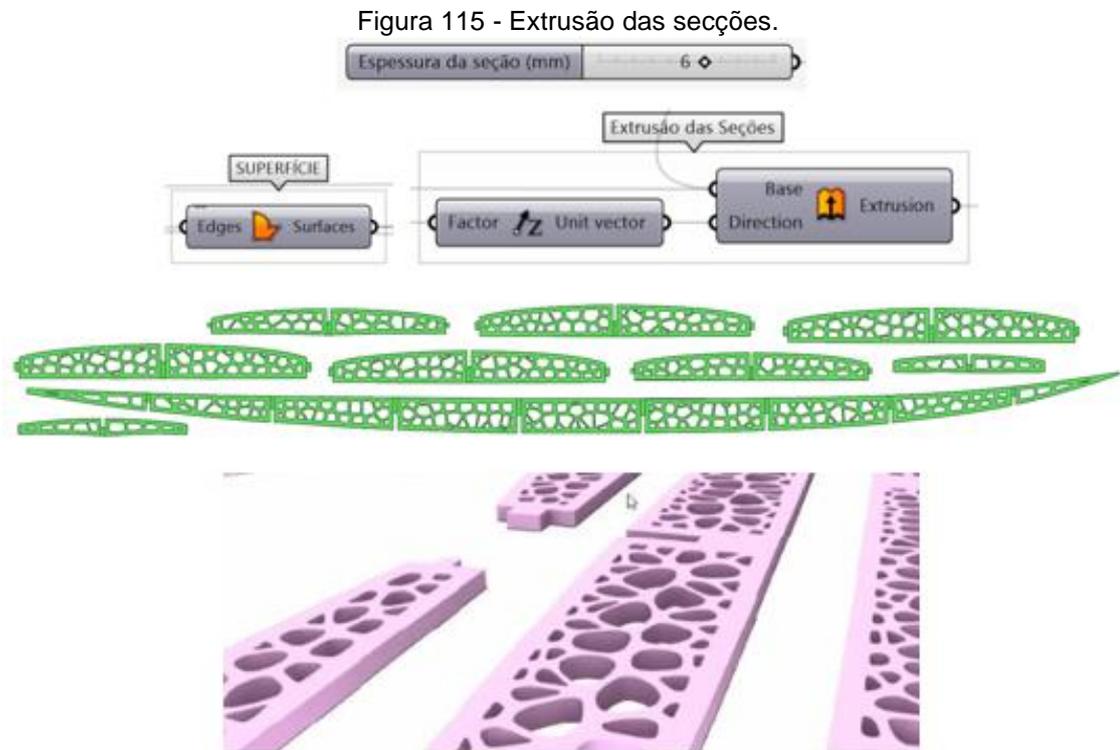


Fonte: Autor (2022).

### Extrusão das seções

A ação realizada no algoritmo pelo grupo de componentes EXTRUSÃO DAS SESSÕES tem a função de configurar a extrusão do artefato a partir do plano bidimensional ou seja, a altura da peça é definida pelo componente de eixo Z, que por

sua vez, tem conexão o com componente SUPERFÍCIE e está associado ao parâmetro ESPESSURA DA SESSÃO. Pode-se definir o valor da espessura da seção correspondente à espessura do material.



Fonte: Autor (2022).

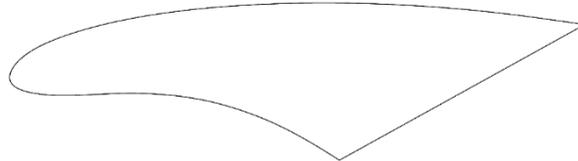
## QUILHA

- Definição do outline
- Referenciar a curva do Rhino
- Definição do Volume da quilha
- Criar / definir margem da Borda
- Distribuição dos pontos (núcleo das células)
- Criação das células Voronoi
- Espessura das paredes com base no escalonamento das células Voronoi
- Suavização das células Voronoi
- Extrusão das células Voronoi
- Subtração das células extrudadas no volume da quilha

## Definição do outline

O primeiro INPUT é a curva gerada no Rhino no plano bidimensional referente ao outline do artefato. A qual teve sua geometria incorporada ao código.

Figura 116 - Outline da quilha.

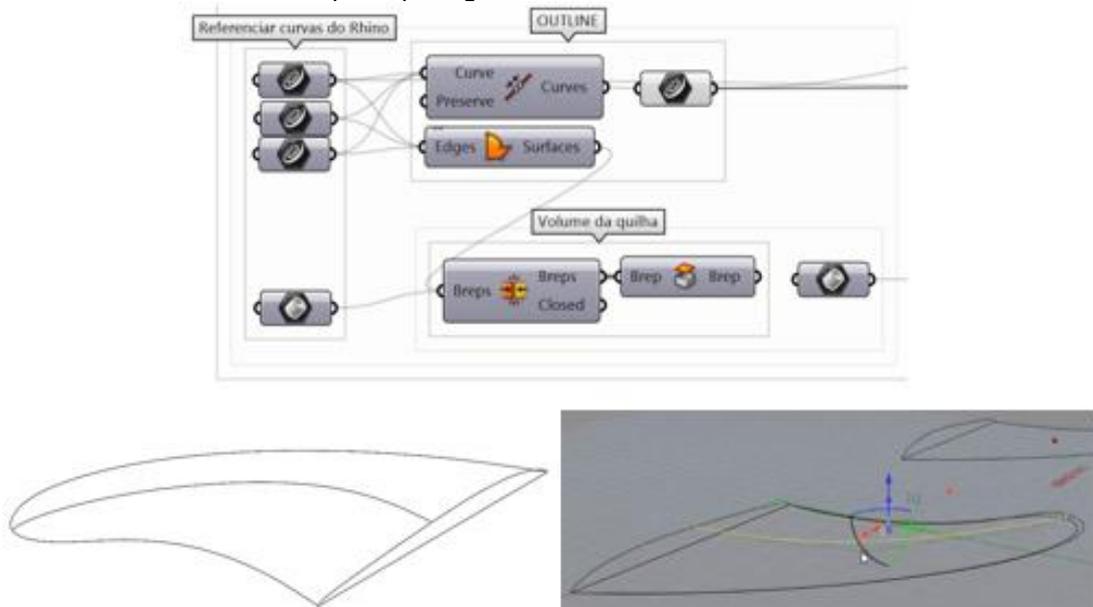


Fonte: Autor (2022).

## Referenciar a curva do Rhino

As curvas que determinam a tridimensionalidade do artefato, ou seja, o volume da quilha, a curva que determina a altura do artefato. As curvas geradoras foram criadas no Rhino e referenciadas aos componentes OUTLINE e VOLUME DA QUILHA, que são os parâmetros estáticos dos INPUTS do código.

Figura 117 - Inputs iniciais contendo as curvas que são os parâmetros estáticos do código. Curvas da quilha para gerar o volume do artefato.

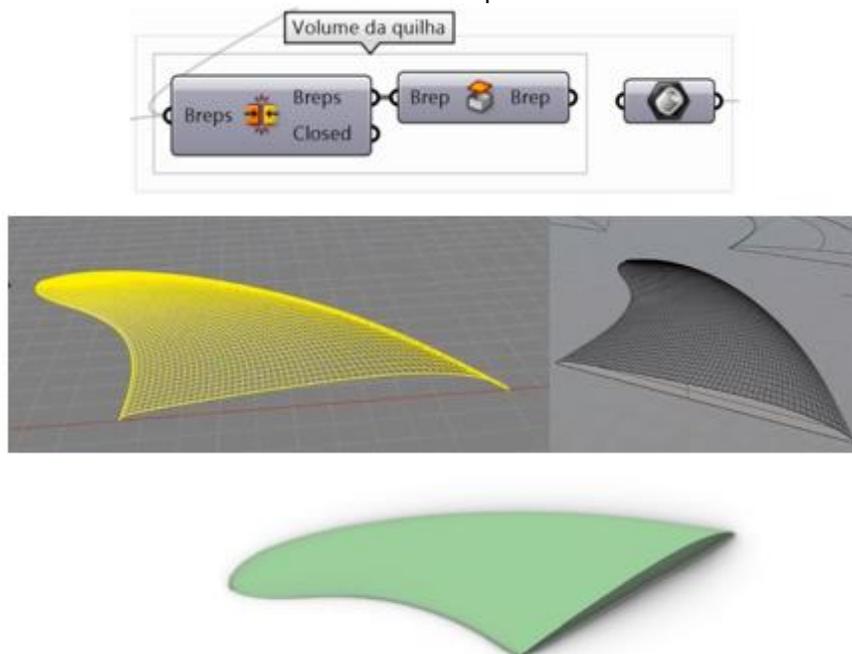


Fonte: Autor (2022).

## Definição do volume da quilha

Estes componentes estão associados aos INPUTS do artefato como parâmetros estáticos para gerar o VOLUME DA QUILHA através das curvas criadas no Rhino para fazer o 3D do volume da quilha. Deste modo foram programadas as superfícies do quilha, e partir daí se obteve o objeto sólido. Esta parte do código tem relação com outros grupos de componentes que realizam as ações de extrusão das células Voronoi e subtração das células extrudadas no volume da quilha.

Figura 118 - Componentes para geração do 3D da quilha. Superfície de composição do volume da quilha (superfícies são unidas em suas bordas para descrever o limite externo de um objeto sólido).  
Sólido 3d da quilha.

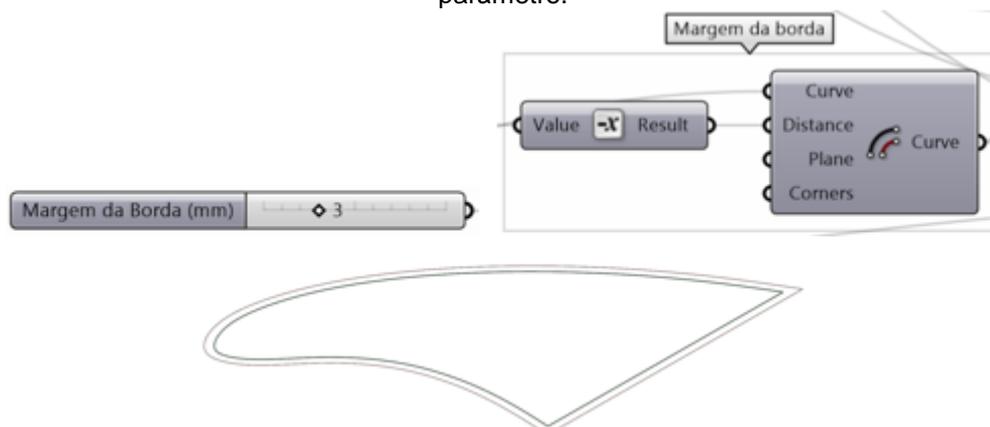


Fonte: Autor (2022).

## Criar / definir margem da Borda

Os componentes que compõem a MARGEM DA BORDA realiza a ação no algoritmo de definir uma borda circunscrita associada ao parâmetro do OUTLINE da quilha, o espaço delimitado para receber a população de pontos que irão gerar o padrão Voronoi. Estes componentes estão associados aos parâmetros de inputs MARGEM DA BORDA e ZONA DE PERFURAÇÃO. Também apresenta conexão com os componentes de DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS.

Figura 119 - Os componentes de geração da margem estão associados ao parâmetro de input que controla a margem da borda; A borda do outline pode ser aumentada ou reduzida alterando o parâmetro.

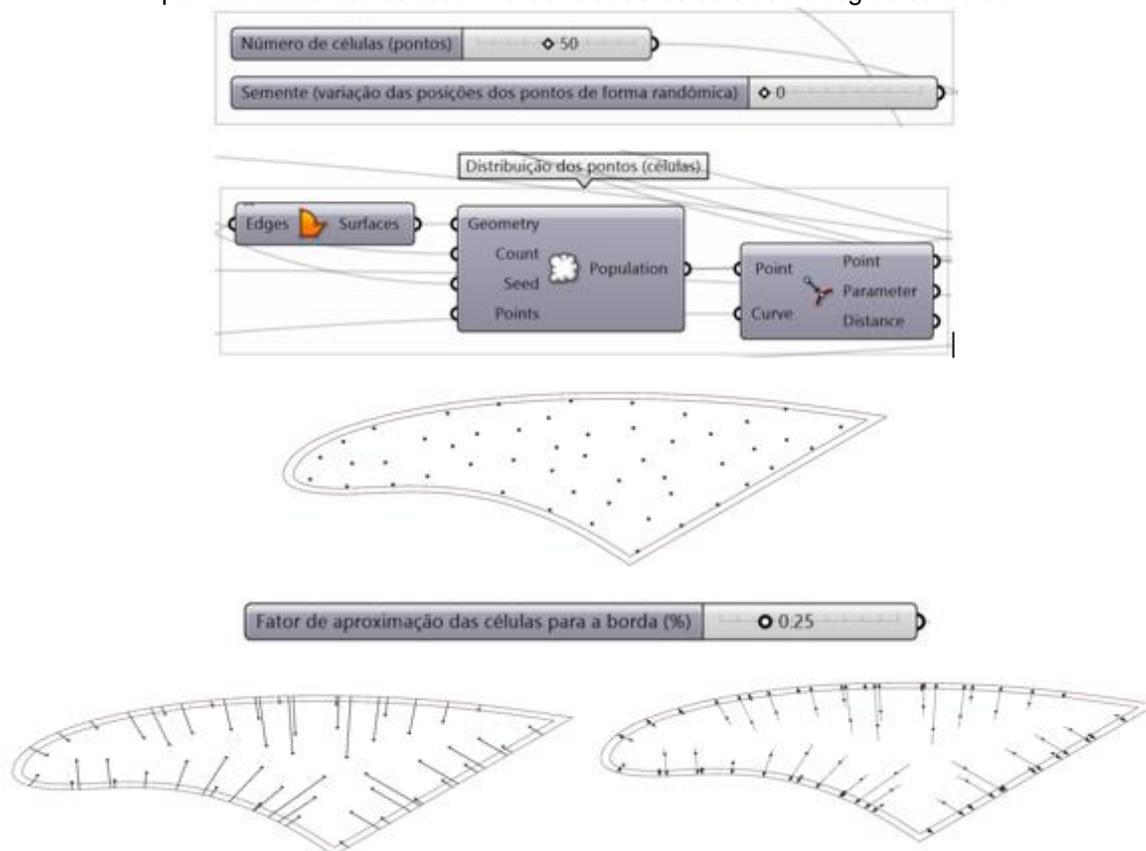


Fonte: Autor (2022).

### Distribuição dos pontos (núcleo das células)

Randomização da posição original dos pontos. Esta função é definida através do grupo de componentes DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS das células, o qual está associado ao parâmetro NÚMERO DE CÉLULAS, dentro dos limites dimensionais da margem da borda. Primeiramente foi realizada a distribuição randômica dos sítios geradores, que estão associados ao parâmetro SEMENTES, que controla a posição dos pontos no plano de forma aleatória. Depois a DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS também foi associado ao parâmetro FATOR DE APROXIMAÇÃO DAS CÉLULAS PARA A BORDA, que é o fator que controla a movimentação dos pontos para a borda com base na porcentagem da distância. Estes componentes tem conexão com o grupo de geração das células VORONOI.

Figura 120 - População de células (pontos); A movimentação dos pontos para borda permite ir permitir aumentar ou reduzir a densidade de células na região da borda.

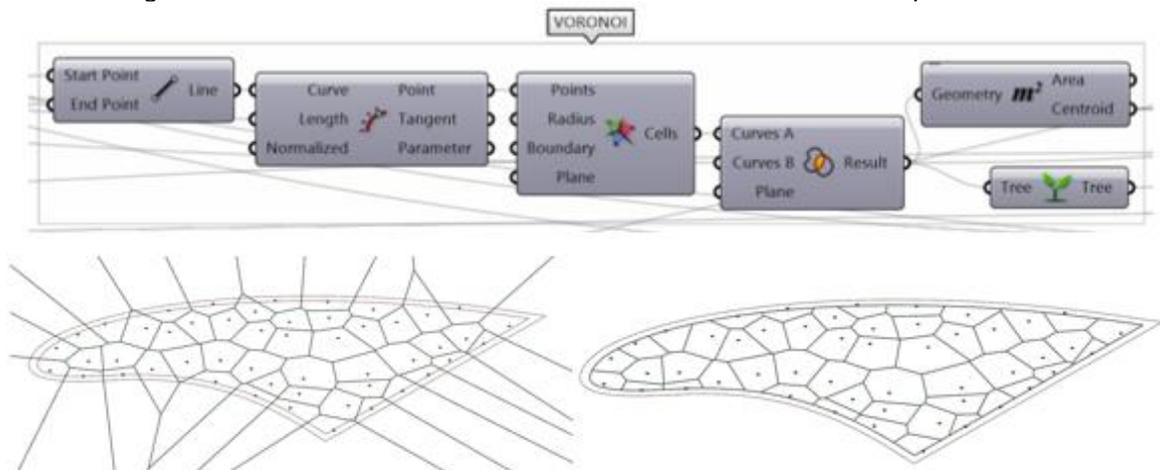


Fonte: Autor (2022).

### Criação das células Voronoi

A ação realizada no código pelos componentes do grupo VORONOI define a configuração inicial das células do diagrama de Voronoi. Após a definição dos pontos são geradas retas equidistantes entre si, tendo em conta um conjunto de pontos não colineares que irão formar as bordas dos polígonos com número de arestas variáveis convertendo o plano da quilha em espaços geométricos segmentados. O VORONOI tem conexão com os componentes que geram a espessura das paredes e com o parâmetro da segunda parte do código para seleção de modelos otimizados.

Figura 121 - Divisão celular e recorte do Voronoi no limite definido para borda.

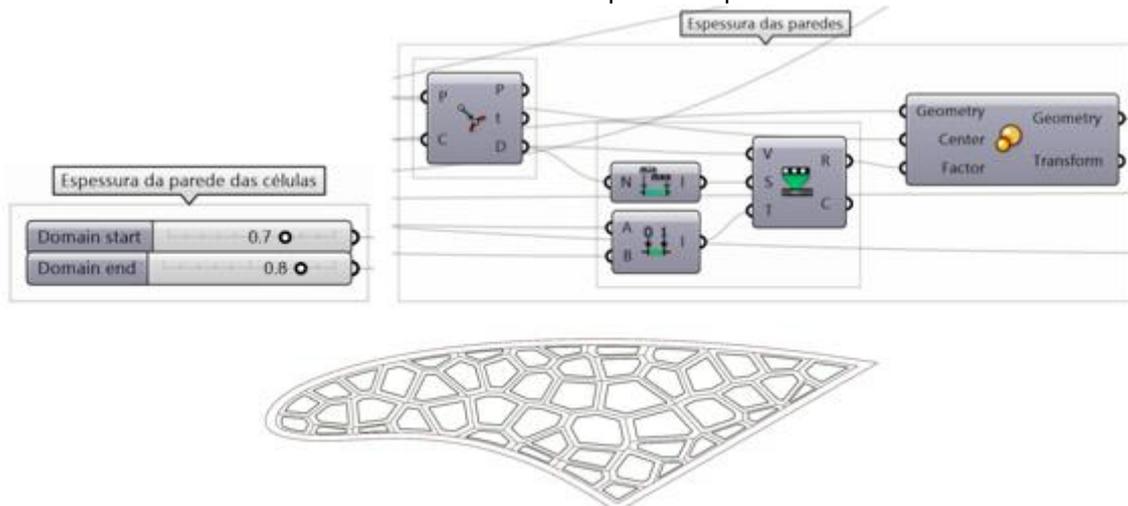


Fonte: Autor (2022).

### Espessura das paredes com base no escalonamento das células Voronoi

Os componentes ESPESSURA DAS PAREDES tem a função de definir a espessura das paredes das células (bordas internas). Está associado aos parâmetros de ESPESSURA DA PAREDE DAS CÉLULAS, onde é possível alternar as espessuras selecionando os valores dentro do domínio preestabelecido. Tem conexões com os componentes de suavização das células e com o parâmetro de seleção de modelos otimizados da segunda parte do CODE.

Figura 122 - Escalonamento de células Voronoi. As espessuras podem ser controladas e modificadas.

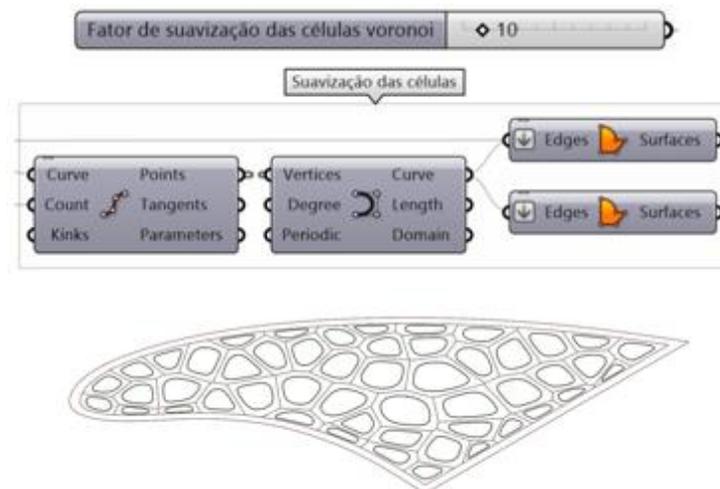


Fonte: Autor (2022).

## Suavização das células Voronoi

Os componentes de SUAVIZAÇÃO DAS CÉLULAS realizam a ação no algoritmo de configurar o efeito de suavização das bordas internas da célula. Estão associados diretamente ao parâmetro FATOR DE SUAVIZAÇÃO DAS CÉLULAS VORONOI, onde ao se manipular os valores, permite variar a forma da célula de poligonal à orgânica gradativamente através de pontos adicionados na curva da célula, trazendo variações estéticas e estruturais.

Figura 123 - O efeito de suavização das células Voronoi é gerado pelos componentes e manipulado pelo parâmetro de input. Quanto maior o valor do arredondamento mais área e mais material é adicionado ao artefato.

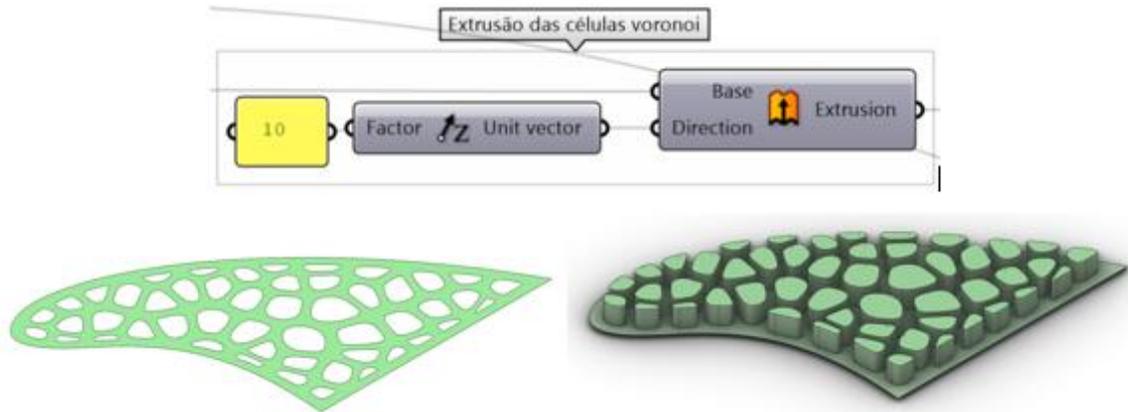


Fonte: Autor (2022).

## Extrusão das células Voronoi

Estes componentes realizam a EXTRUSÃO DAS CÉLULAS VORONOI, tem o objetivo de gerar objetos sólidos com o formato do interior das células extrudados. Através da conexão com os componentes do volume da quilha, vai ocorrer a operação de subtração do sólido das células no sólido da quilha e tornar o artefato final vazado.

Figura 124 - Extrusão das células Voronoi; Superfície furada e furos transformados em sólidos extrudados.

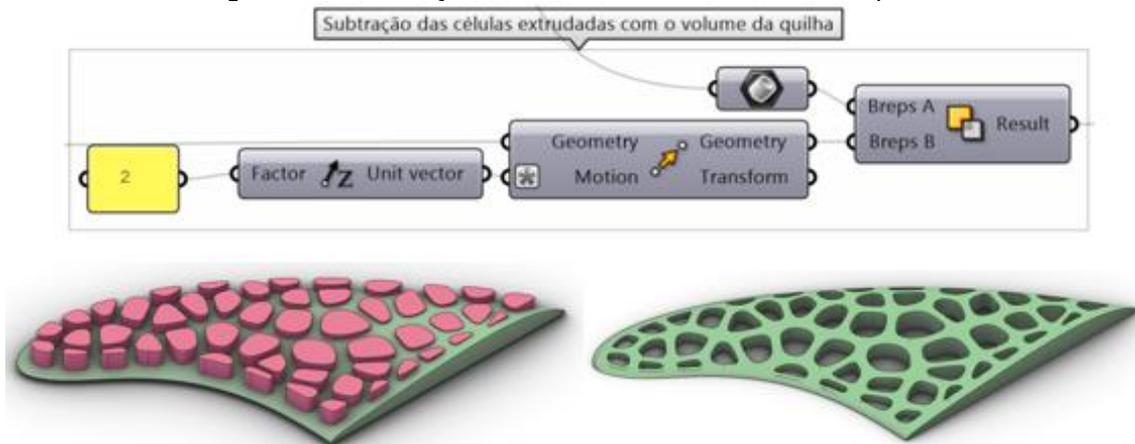


Fonte: Autor (2022).

### Subtração das células extrudadas no volume da quilha

Os componentes que compõem o grupo SUBTRAÇÃO DAS CÉLULAS EXTRUDADAS COM O VOLUME DA QUILHA, realizam a ação no algoritmo de subtrair o sólido das células que foram extrudados do volume 3D da quilha. Todas as alterações que são efetuadas nos inputs resultam em efeitos diversos no padrão Voronoi, independente da configuração, o padrão tem efeito imediato nos outputs do artefato 3D final.

Figura 125 - Subtração furos extrudados e sólido 3d da quilha.



Fonte: Autor (2022).

Também foram exploradas várias possibilidades de outputs com a manipulação dos inputs, onde pode-se observar as principais alterações na geometria do padrão Voronoi ao emular a estratégia de leveza e resistência do Agave, como por exemplo: Distribuição uniforme, distribuição de densidade direcionada, variação no

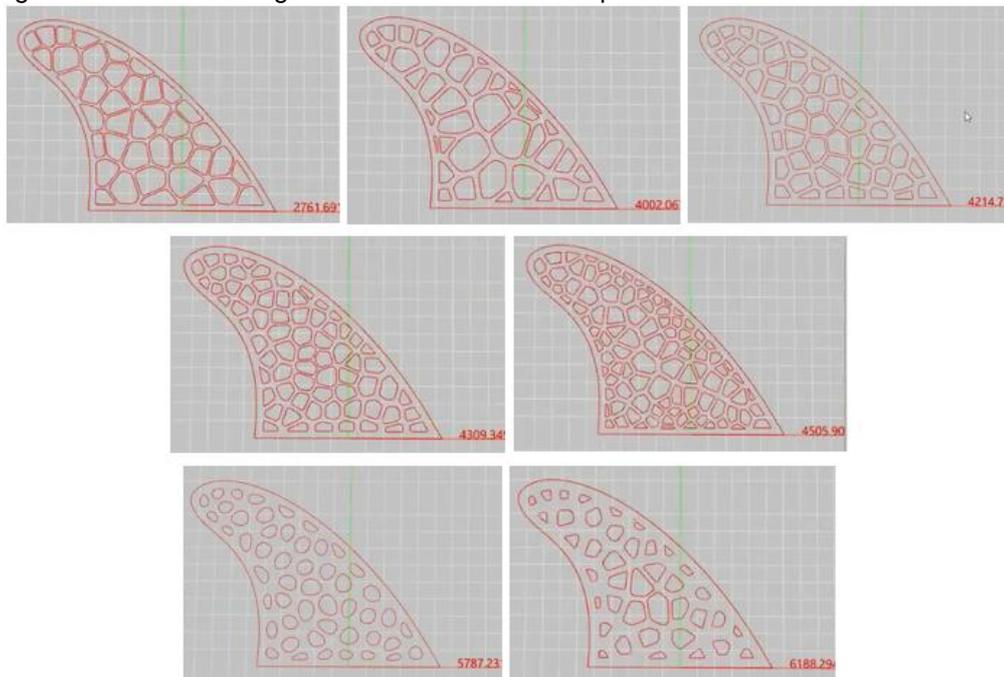
escalonamento das células, assim como variação da espessura da parede celular. A Tabela 5 contém os valores referentes a área da estrutura de cada modelo da Figura 126, pode-se verificar que quanto mais densa é a estrutura, e maior a espessura das paredes, será também maior, a área do artefato.

Tabela 5 - Área da estrutura dos modelos em mm<sup>2</sup>. Os valores foram fornecidos pelo código gerado no Grasshopper.

| Modelos                 | 01      | 02      | 03      | 04      | 05      | 06      | 07      |
|-------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Área (mm <sup>2</sup> ) | 2761,69 | 4002,06 | 4214,73 | 4309,34 | 4505,90 | 5787,23 | 6188,29 |

Fonte: Autor (2022).

Figura 126 - Variedade genética. Os valores correspondem a área do artefato em mm<sup>2</sup>.



Fonte: Autor (2022).

Os valores indicam a área das quilhas, por exemplo, a primeira tem menor área, e a última apresenta maior área. Deste modo existem inúmeras possibilidades de se obter equilíbrio entre leveza, resistência e flexibilidade, tornando o artefato mais leve e flexível ou mais pesado e rígido conforme o objetivo. Sempre que algum parâmetro for alterado, ou manipulado algum componente que tenha efeito na alteração da distribuição celular geradora da forma, a quantidade de células irão variar também para mais ou para menos, conseqüentemente a área, influenciando também o peso do artefato.

Na Figura 127, são apresentados os efeitos obtidos ao alterar os valores da quantidade de células em uma estrutura. Existem três quilhas mostradas: uma à esquerda com 30 células e área de 2760 mm<sup>2</sup>, uma central com 40 células e área de 2759 mm<sup>2</sup>, e uma à direita com 50 células e área de 2761 mm<sup>2</sup>.

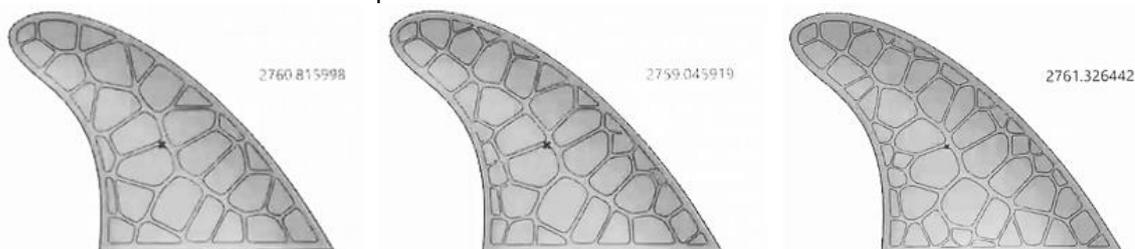
Observando os dados fornecidos na Tabela 6, é possível perceber que, embora as áreas das quilhas sejam muito próximas, a quantidade de células varia entre elas. Essa variação na quantidade de células resulta em uma distribuição diferente dos recursos celulares na estrutura. Uma maior quantidade de células pode contribuir para um aumento na rigidez e na resistência mecânica, deste modo, a alteração na quantidade de células afeta propriedades como a densidade e a resistência da estrutura.

Tabela 6 - Área da estrutura dos modelos em mm<sup>2</sup>. Os valores foram fornecidos pelo código gerado no Grasshopper.

| <b>Modelos</b>               | <b>01</b> | <b>02</b> | <b>03</b> |
|------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Número de células</b>     | 30        | 40        | 50        |
| <b>Área (mm<sup>2</sup>)</b> | 2760,81   | 2759,04   | 2761,32   |

Fonte: Autor (2022).

Figura 127 - Efeitos obtidos ao alterar os valores da quantidade células. A quilha da esquerda apresenta 30 células e área de 2760 mm<sup>2</sup>, a central apresenta 40 células e área de 2759 mm<sup>2</sup>, a direita apresenta 50 células e área de 2761 mm<sup>2</sup>.



Fonte: Autor (2022).

A partir de toda a lógica do padrão Voronoi aplicado com base na bioinspiração apresentado, foi em seguida, adicionada mais uma camada de complexidade, que é a segunda parte do CODE. Desta forma foi agregada uma nova camada de programação para otimização estrutural com base na área do artefato. Foi incluído no código um algoritmo de inteligência artificial, para que sejam definidas as variações dentre inúmeras opções possíveis, por exemplo, qual a estrutura que gera o menor peso do artefato, conseqüentemente, menor volume de material. Sendo balanceado por outro parâmetro relacionado à resistência da estrutura.

Dois parâmetros que foram incorporados tanto no código do esqueleto como no código da quilha:

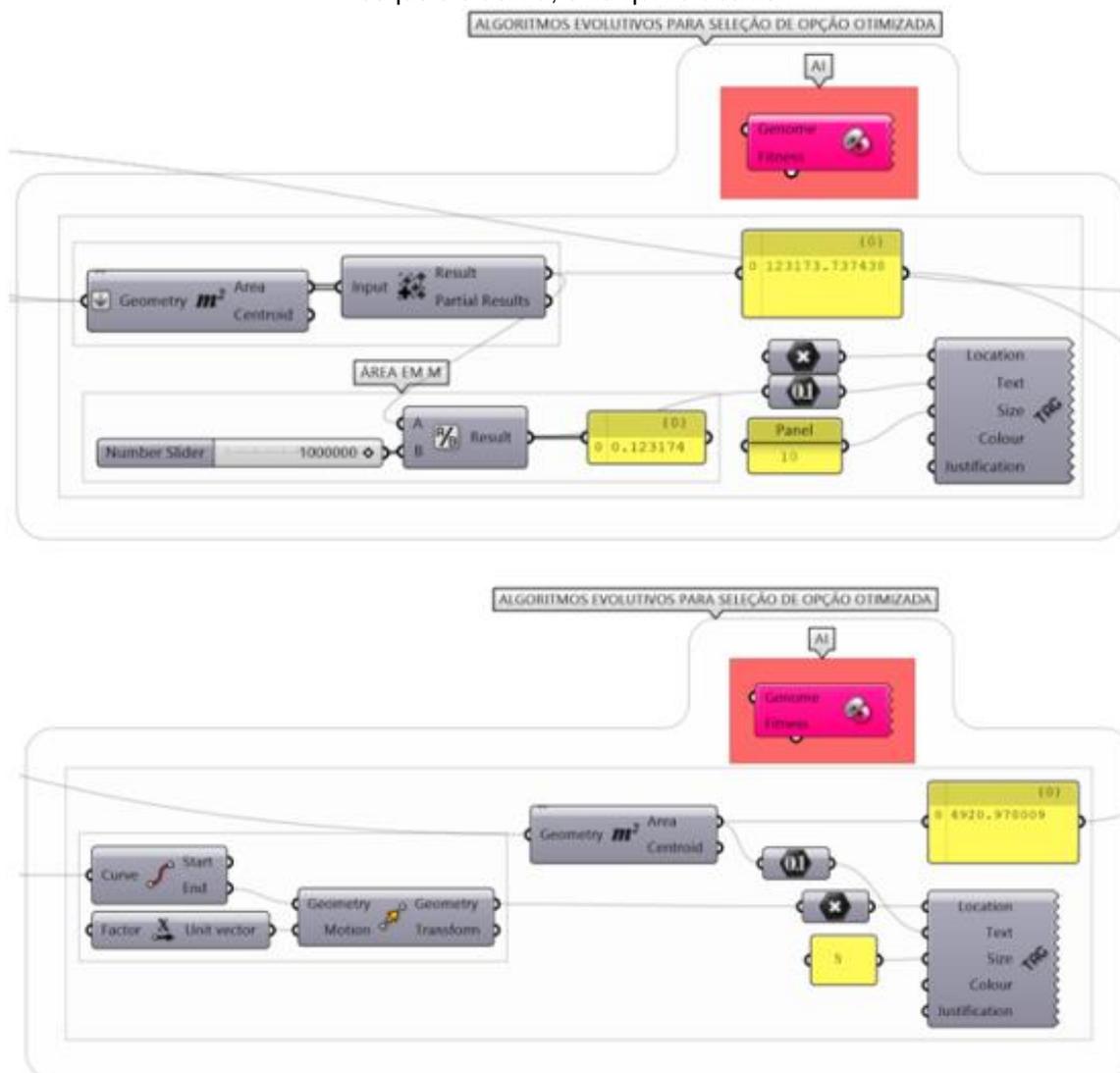
- . **Otimização por inteligência artificial (IA)**. Cria opções otimizadas que são geradas do ponto de vista de volume de material, logo, peso da estrutura, o que vai resultar em um artefato mais leve, que é um dos objetivos do uso da bioinspiração, reduzir o peso e o volume da estrutura.
- . **Mapa gradiente de cor** para análise da parede das células. Verificação por deformação das arestas. Análise dos pontos de tensão com base na curvatura relacionado com a questão da integridade das paredes e os pontos de tensão através de mapas gradientes de cor.

### **Etapa de otimização e análise: (esqueleto ou quilha)**

#### **Otimização da estrutura**

Utilização de algoritmos evolutivos para escolha da geometria mais leve. São dois elementos definidos para o projeto, o genoma que são os parâmetros variáveis, e o complementar que é a otimização, chama-se fitness. O algoritmo possui uma programação interna tem duas entradas que é o genoma e o fitness, onde o genoma apresenta uma variedade genética de possibilidades e o fitness é a solução mais otimizada com base nos limites projetuais estabelecidos nos parâmetros de controle.

Figura 128 - Algoritmos evolutivos para seleção de opção otimizada Galápagos. Aplicação no esqueleto acima, e na quilha abaixo.



Fonte: Autor (2022).

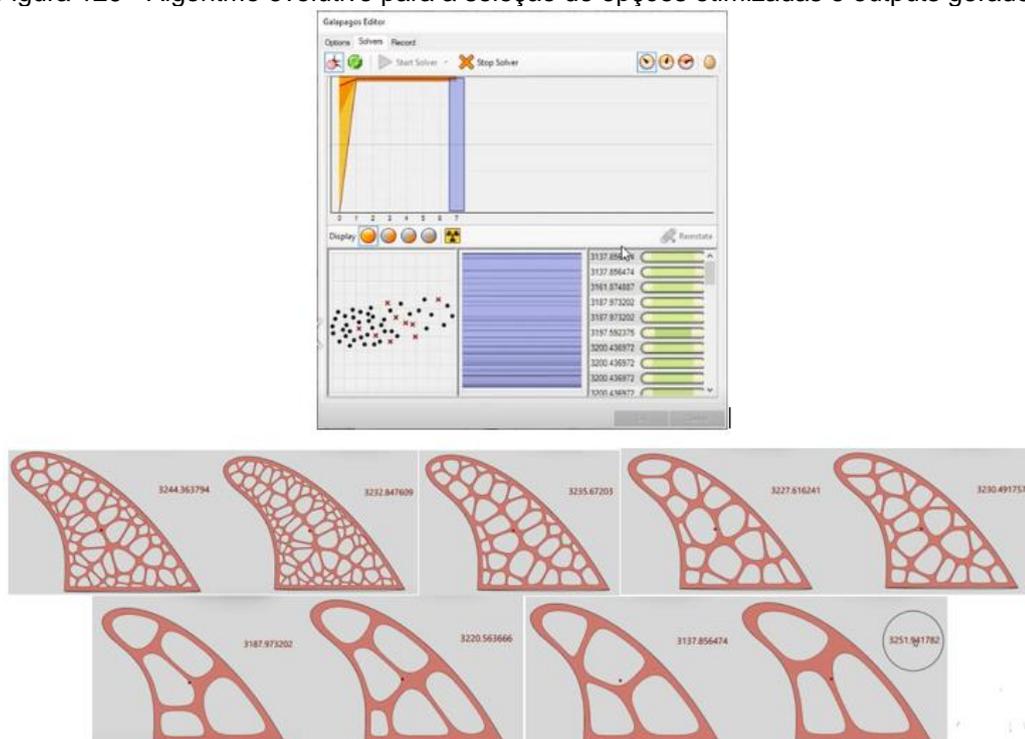
A lógica de funcionamento desse componente é baseada na alteração da randomização dos pontos, buscando otimizar o consumo de material ou minimizar a área utilizada. Enquanto um algoritmo pode favorecer padrões com células muito pequenas ou poucas unidades celulares, o design considera outros fatores, como processos de fabricação, tempo de produção, desempenho do artefato e viabilidade material. É importante levar em conta essas considerações adicionais, pois os extremos podem não ser adequados em termos de viabilidade e eficiência do projeto. Pode-se ainda determinar o tempo de cálculo, onde vão sendo apresentadas variações da estrutura de Voronoi, permitindo identificar qual a divisão mais otimizada, conforme os parâmetros que se deseja, como por exemplo, determinar limites do

número de células, para que não inclua padrões com densidades elevadas ou reduzidas demais.

- Cálculo do volume da estrutura.

Ativando a busca de resultados com a inteligência é possível encontrar o melhor ajuste desta aplicação, a melhor opção. Esse processo é generativo. Emitem um fluxo interminável de respostas, onde as respostas iniciais geralmente apresentam uma qualidade superior às respostas mais antigas logo têm-se múltiplos resultados e diferentes outputs. Durante a execução o tempo de processamento é progressivo, onde podem ser obtidos outputs intermediários praticamente a qualquer momento. Todas as opções produzirá algo que poderia ser chamado de resultado. Pode não ser um resultado muito bom, mas não deixará de ser um resultado. Após a execução do algoritmo evolutivo para a seleção de opções otimizadas ao longo de um período de tempo específico, são apresentadas as soluções mais otimizadas. Algumas das principais variações são exibidas, e ao lado de cada artefato está indicada sua área. Todos os modelos gerados pelo algoritmo são salvos e é possível acessar cada um deles (Figura 129).

Figura 129 - Algoritmo evolutivo para a seleção de opções otimizadas e outputs gerados.

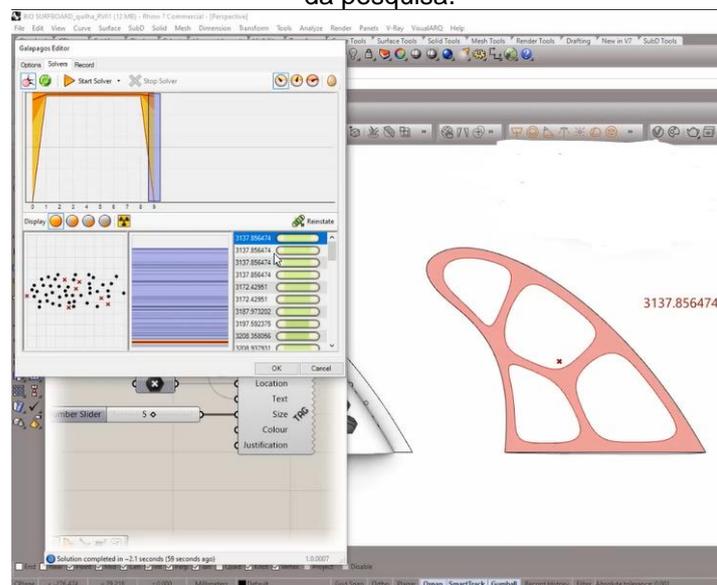


Fonte: Autor (2022).

- Análise evolutiva da variedade de populações possíveis e seleção do fitness de menor volume.

Entre as opções mais otimizadas foram identificados padrões com maior quantidade de células, entretanto o padrão mais otimizado foi apresentado com a menor quantidade de células com paredes mais grossas, ou seja, células maiores. As células são grandes e as paredes grossas, porém apresenta uma área menor do que as opções subsequentes.

Figura 130 - Este modelo foi identificado como sendo o “fitness”, ou seja, o mais otimizado. Entretanto o modelo apresenta pouca células no padrão, O que não quer dizer que seja adequado aos objetivos da pesquisa.



Fonte: Autor (2022).

Utilizando a mesma técnica para o design do esqueleto da prancha, consegue-se reduzir a quantidade de matéria, tornando a prancha mais leve e ao mesmo tempo associa à resistência. Deste modo foram estabelecidos os parâmetros, a estratégia do Agave, agora se tem as métricas e os parâmetros. Mexendo nos parâmetros ao usar a inteligência artificial, dentro das métricas que foram estabelecidas, tem-se a validação. Usando os algoritmos que tomam proveito como o diagrama do Voronoi, a divisão celular presente no Agave, e a partir disso estabelecendo diretrizes para otimização do peso do esqueleto da prancha com base na redução de uso do material, e utilizando uma inteligência artificial para escolher o design através dessa estratégia, o resultado vai ser o mais otimizado possível, que tem a característica de utilizar menos material dentro da estratégia escolhida.

Dessa forma foram inseridas as informações ao genoma, que no caso, são os parâmetros, podendo ser mais de um parâmetro, deixar mais leve, menor gasto de material, e manipula-se os parâmetros para tentar atingir o objetivo que se quer, que é o fitness. Neste exemplo só foi definido um genoma, que é a variação randômica dos pontos do artefato, e o fitness é a menor área.

Um detalhe importante a ser considerado é que a inteligência artificial foi executada utilizando a estrutura em duas dimensões. Caso fosse ativada diretamente com o objeto tridimensional extrudado, as análises levariam mais tempo, uma vez que o processamento em 3D demanda mais recursos da máquina. Seria necessário identificar variações significativamente maiores nesse caso. A estratégia utilizada para a construção tridimensional é baseada em uma extrusão tridimensional de uma superfície estática. Nesse caso, o volume final é influenciado pela área da base, que é a área que será extrudada. Para relacionar essa área ao modelo tridimensional, basta multiplicar o valor da área bidimensional pela espessura desejada. Dessa forma, o volume é obtido sem a necessidade de uma representação completa em 3D, resultando em uma economia de tempo e recursos computacionais.

### **Análise da parede das células**

Um outro parâmetro foi incorporado tanto no código do esqueleto como no código da quilha, relacionado à resistência da estrutura. Nessa etapa é feita a análise da espessura das paredes com base em um gradiente de cores onde pode-se observar os pontos de tensão com base na curvatura. Foi utilizado um plug-in modelador topológico denominado Weaverbird, que contém muitos operadores de subdivisão e transformação e reconstrói a forma subdividindo a malha do Voronoi enquanto estrutura.

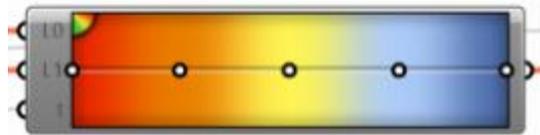
Este plug-in realiza a ação no código de verificação da integridade das paredes celulares utilizando componentes que atuam através da geração de um gráfico de cores, onde é possível identificar quais partes da estrutura estão mais fragilizadas e quais estão com boa integridade física,

Com isto se consegue analisar a integridade a partir da curvatura e espessura da parede, dado que existe a presença de ângulos mais ou menos acentuados e paredes mais finas ou mais grossas, e o gradiente indica qual a parede ou a área do artefato sofre mais tensão, dependendo da fragilidade ou da resistência, pode-se

definir ainda métricas, e alterar os parâmetros para otimização do modelo, seja para resistir ao processo de fabricação, ou ainda mais para o fim que foi projetado o artefato.

Também se pode usar o gradiente para visualizar a distribuição da densidade e consequentemente a rigidez e flexibilidade do artefato com base na bioinspiração da estratégia do Agave. No caso da aplicação da estratégia nas quilhas, podemos concentrar uma maior densidade na área da base e uma menor densidade na ponta, tornando a base mais rígida e a ponta mais flexível, nesta lógica a ponta será apresentada com a coloração específica indicada no gráfico que indica a maior fragilidade em comparação com maior densidade na área da base que vai apresentar a coloração específica relacionada a maior resistência. O que não necessariamente é algo negativo, pois esta é apenas uma das possibilidades de aplicação da estratégia.

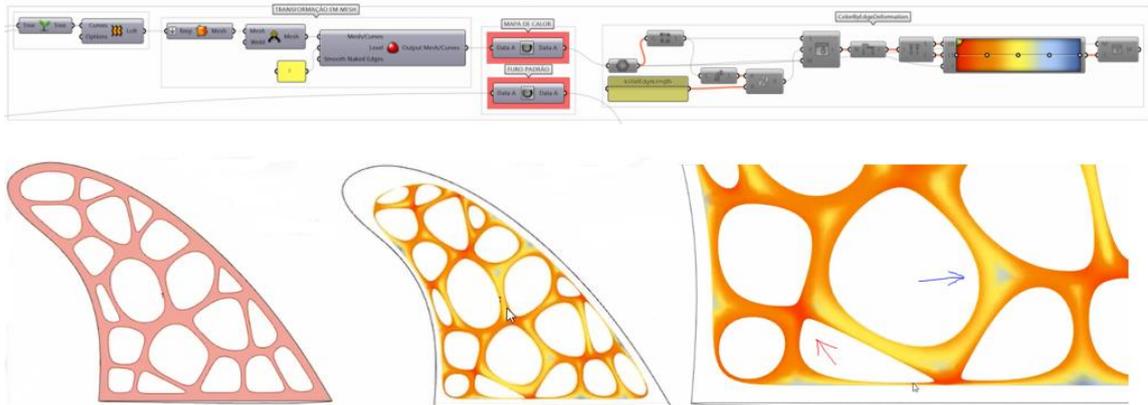
Figura 131 - Gradiente de cor. As cores do gradiente podem ser selecionadas.



Fonte: Autor (2022).

Este procedimento serve como exemplo de uma breve análise visual das tensões da estrutura. Considerando que a inteligência artificial chegou em uma solução, é possível associar a geometria a uma curva que se torna uma geometria com cor. Neste caso quanto mais vermelho representa uma maior tensão na resistência da estrutura, nas regiões mais para o azul representa que uma maior integridade e menor tensão na estrutura. Neste caso o parâmetro da tensão foi definido com base na curvatura da estrutura. Nas hastes que apresentam ângulos mais abertos, estes sofrem menor tensão do que as que apresentam curvaturas mais anguladas. Esta é mais uma estratégia para análise que reforça a argumentação da resistência do artefato com base nesses parâmetros.

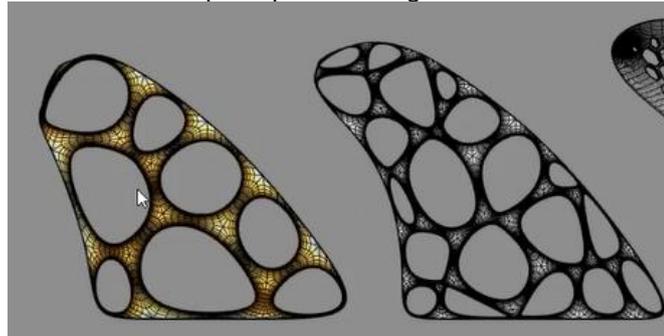
Figura 132 - Os componentes usados para esta ação atuam na transformação das paredes em superfícies do tipo mesh e realiza a análise da curvatura utilizando um gráfico de cores do tipo gradiente.



Fonte: Autor (2022).

Grupo de componentes adicionados como parâmetros para análise da estrutura. O exemplo apresenta um modelo otimizado identificado pela inteligência artificial e apresenta a análise da curva das paredes mostrando os pontos que sofrem maior tensão com base na curva.

Figura 133 - Modelo 3D da mesh que representa o gradiente de cores do padrão analisado.



Fonte: Autor (2022).

### 3.5.4 Output

Os outputs são os resultados obtidos na saída do algoritmo, sejam eles: formas, modelos, dados quantitativos etc. No capítulo de output, são exploradas as possibilidades generativas do algoritmo, o potencial de variação de saídas e os respectivos resultados obtidos, mostrando de forma visual as características morfológicas, estéticas, ou de dados que o algoritmo gera. É nessa etapa onde os resultados do projeto são apresentados, não como um produto único, mas sim como uma amostra dentre múltiplas opções possíveis dentro do sistema desenvolvido.

Sendo assim, o capítulo contém a definição de quais são os outputs do algoritmo, a partir de três perspectivas: Variedade Genética, Banco de Dados e Análise e Seleção.

É importante ter em mente que projetos generativos não podem se limitar a apresentar apenas uma amostra de output, visto que não é possível avaliar a funcionalidade do algoritmo sem a perspectiva da customização dos parâmetros e sua respectiva variedade de resultados. Como mecanismo de escolha dos artefatos trabalhados (esqueleto e quilha), foram usados os métodos de otimização com algoritmos evolutivos, onde os modelos apresentam os dados referentes à área da estrutura. Sendo balanceado pelos critérios de análise e seleção através do gradiente de cor para justificar as escolhas.

Os componentes que geram os outputs são compostos pela geometria final e pelo volume do artefato. Vários outputs foram gerados tanto durante o processo de desenvolvimento e aperfeiçoamento do código como ao final, quando estava concluído.

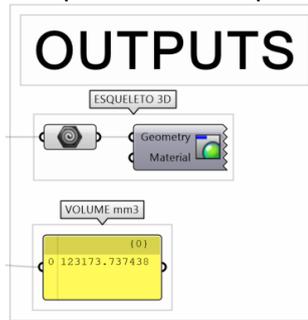
Na **distribuição variada por atratores** foram definidas duas possibilidades de variação da densidade da estrutura. Tais configurações foram obtidas variando o diâmetro das células e a espessura das paredes, direcionando a variação da densidade para as regiões influenciadas pela curva atratora.

Foram materializados modelos 3D com variações nos parâmetros de forma a mostrar o potencial de variabilidade do algoritmo, dentro dos domínios e limites projetuais do código.

## **ESQUELETO**

O estudo envolveu a prototipagem de modelos em escalas diversas, explorando ferramentas e processos de fabricação digital. Durante essa etapa, foram utilizados componentes do Grasshopper para gerar os outputs do esqueleto da prancha. Esses outputs foram fundamentais para visualizar e avaliar o design e a estrutura do esqueleto, auxiliando no processo de tomada de decisões. A Figura 134 ilustra os componentes do Grasshopper utilizados nessa etapa.

Figura 134 - Componentes de outputs do esqueleto.



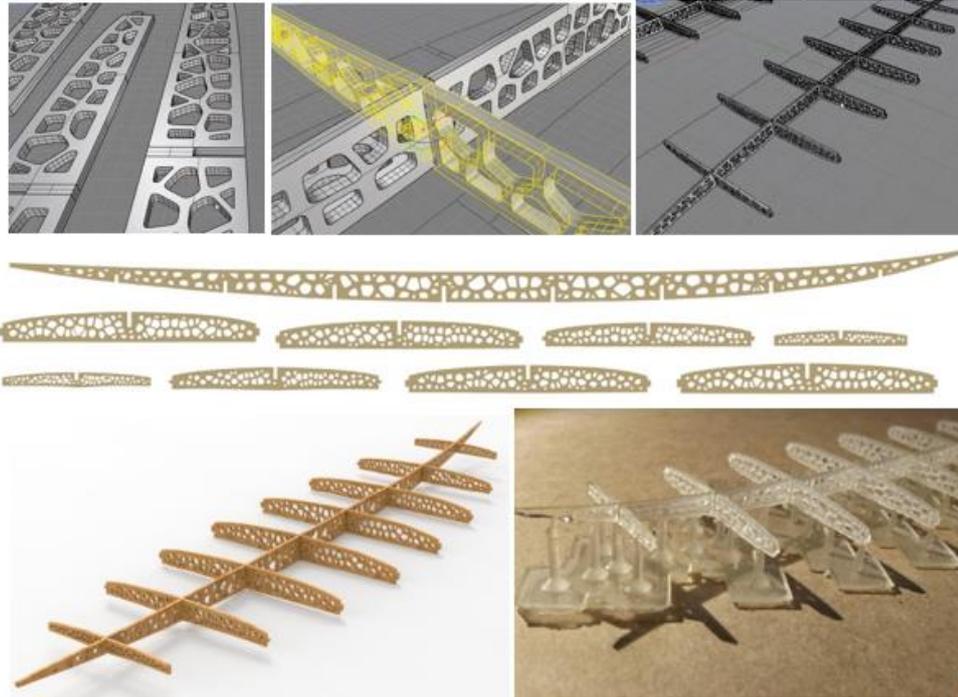
Fonte: Autor (2022).

Além da prototipagem digital, o estudo também incluiu a fabricação física de um protótipo em escala reduzida da prancha. Para isso, foi utilizada uma impressora 3D desktop Elegoo MarsPro 2, que utilizou uma resina fotossensível à base de soja. Essa impressão 3D permitiu visualizar o esqueleto montado na íntegra e proporcionou uma melhor compreensão do design. A Figura 135 mostra o rendering digital e o modelo impresso em escala reduzida.

Outra etapa do estudo envolveu o uso de uma máquina CNC no Fab Lab Selvagen para usinar vários esqueletos em escala real com diferentes configurações de densidade, utilizando padrões de Voronoi. Cada seção foi otimizada com base na área do artefato, visando obter leveza e resistência. A máquina CNC utilizada foi o modelo RMC 3000 PLUS - RHINO MAQUINAS, com uma área de trabalho de  $X = 1850 \text{ mm} / Y = 2750 \text{ mm} / Z = 150 \text{ mm}$ . Esse processo de usinagem foi fundamental para a materialização do esqueleto da prancha. A Figura 136 ilustra esse processo.

Por fim, o estudo também incluiu a construção de um protótipo da prancha de surf oca de madeira com o método David Weber Surfboards, utilizando madeira de Paulownia e laminado com resina epóxi de base biológica. Esse protótipo foi um estudo de caso para aplicar a estratégia bioinspirada do Agave no esqueleto interno da prancha. Essa abordagem bioinspirada visou explorar novas possibilidades de design e construção, levando em consideração os materiais e processos sustentáveis. A Figura 137 mostra esse protótipo de prancha. A combinação de prototipagem digital, fabricação física e a aplicação de estratégias bioinspiradas foi fundamental para a exploração das possibilidades de design e construção do esqueleto da prancha. Esse estudo destacou a importância de utilizar ferramentas e processos de fabricação digital para obter resultados mais precisos e eficientes, além de ressaltar a relevância de considerar materiais sustentáveis e inspirações da natureza para a criação de produtos inovadores no campo do design.

Figura 135 - Rendering digital e impressão 3D em escala reduzida do esqueleto da prancha.



Fonte: Autor (2021).

Figura 136 - Máquina CNC do Fab Lab Selvagen a usinar esqueletos com diferentes configurações de densidade nos padrões de Voronoi; e protótipo do esqueleto em escala real.



Fonte: Autor (2021).

Figura 137 - Protótipo de uma prancha de surf de madeira de Paulownia, construída com o método David Weber Surfboards, como estudo de caso e aplicação da estratégia bioinspirada do Agave no esqueleto interno.



Fonte: Autor (2022).

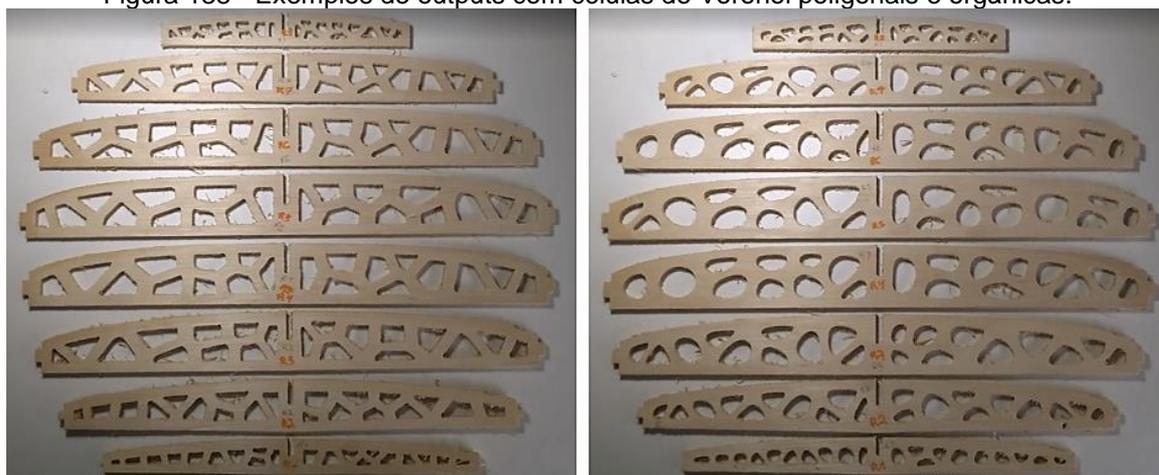
### **Variedade Genética**

A variedade genética é uma expressão da diversidade de formas alternativas de um mesmo gene encontradas nos indivíduos de uma espécie. Essa diversidade genética resulta em diferenças morfológicas entre os indivíduos e permite que eles respondam de maneiras diferentes às mudanças em sua forma. No contexto da emulação da estratégia de leveza e resistência do Agave, foram analisados e selecionados os resultados mais representativos obtidos pelo algoritmo.

Nesse sentido, foram gerados dois outputs diferentes com o mesmo outline. À esquerda, temos o Voronoi com um design mais poligonal, resultando em uma estrutura mais leve em comparação ao da direita, que apresenta um design mais orgânico. No entanto, é importante notar que o Voronoi poligonal possui vários pontos de tensão devido aos ângulos de curvatura das células. Por outro lado, o Voronoi com design mais orgânico demonstra maior resistência devido aos parâmetros de curvatura das células, resultando em menos pontos de tensão.

Essa diversidade de outputs e as características distintas de cada um permitem explorar as possibilidades de design e encontrar o equilíbrio entre leveza e resistência desejado. A análise e seleção dos resultados são importantes para identificar as soluções mais adequadas e eficientes para o projeto em questão. A Figura 138 ilustra esses dois outputs com diferentes características morfológicas e suas considerações de leveza e resistência.

Figura 138 - Exemplos de outputs com células de Voronoi poligonais e orgânicas.



Fonte: Autor (2021).

A Tabela 7 apresenta os dados dos modelos comparados na Figura 138, especificando o peso de cada seção e o peso total de cada modelo. Os modelos são identificados como "01 Poligonal" e "02 Orgânico". Para o modelo "01 Poligonal", os pesos das seções variam de 21,2 g a 54,8 g, com um peso total de 310,3 g. Já para o modelo "02 Orgânico", os pesos das seções variam de 20,6 g a 56,4 g, com um peso total de 322,1 g. Esses dados fornecem uma medida objetiva da diferença de peso entre os modelos e podem ser utilizados como base para avaliar a leveza de cada estrutura. No entanto, é importante considerar que outros fatores, além do peso, também podem influenciar a eficiência e a resistência do esqueleto da prancha, como por exemplo a densidade e espessura da parede e do material. Além do material a ser utilizado.

Tabela 7 - Dados dos modelos comparados (Figura 138).

| Modelos      | Seção 01 | Seção 02 | Seção 03 | Seção 04 | Seção 05 | Seção 06 | Seção 07 | Seção 08 | Peso (g) Total |
|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------------|
| 01 Poligonal | 21,2     | 34,7     | 46,1     | 50,4     | 54,8     | 50,0     | 36,3     | 16,8     | 310,3          |
| 02 Orgânico  | 20,6     | 33,7     | 50,6     | 56,4     | 54       | 52,8     | 39,1     | 14,9     | 322,1          |

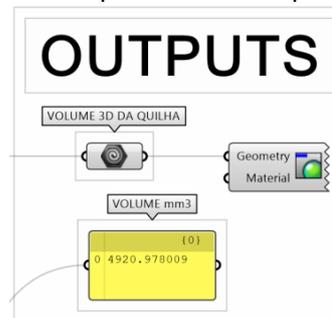
Fonte: Autor (2021).

## QUILHA

Durante o projeto, foi realizada a prototipagem de modelos de quilhas em escala real, utilizando ferramentas e processos de fabricação digital. A Figura 139 apresenta os componentes de outputs do algoritmo. Já a Figura 140 mostra o

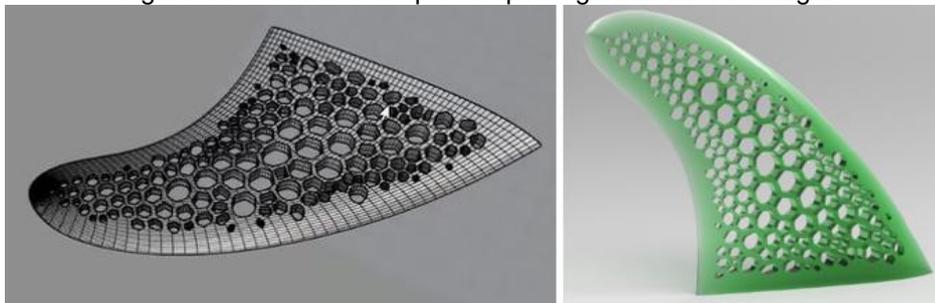
resultado do primeiro quilha gerada pelo código, por meio de um rendering digital com destaque para estrutura da quilha. Essas etapas de prototipagem e geração de outputs são fundamentais para aprimorar o código, o design e a funcionalidade do artefato.

Figura 139 - Componentes de outputs da quilha.



Fonte: Autor (2022).

Figura 140 - Primeiro output da quilha gerada com o código.

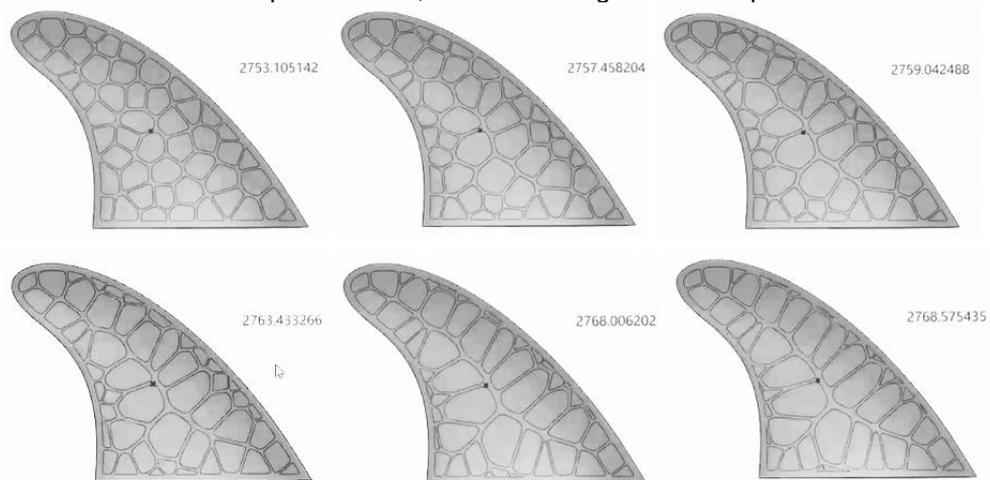


Fonte: Fonte: Autor (2022).

## Variedade Genética

Os resultados obtidos mais representativos da emulação da estratégia de leveza e resistência do Agave foram analisados e selecionados alguns exemplos gerados pelo algoritmo evolutivo para seleção de modelos otimizados. Pode-se observar a distribuição homogênea e a distribuição variada em diferentes densidades.

Figura 141 - Variedade genética da estratégia de distribuição das densidades do Agave. Da esquerda para a direita, de cima para baixo, com os dados gerados pelos outputs da área dos artefatos (mm<sup>2</sup>), consequentemente, maior área é igual a maior peso.



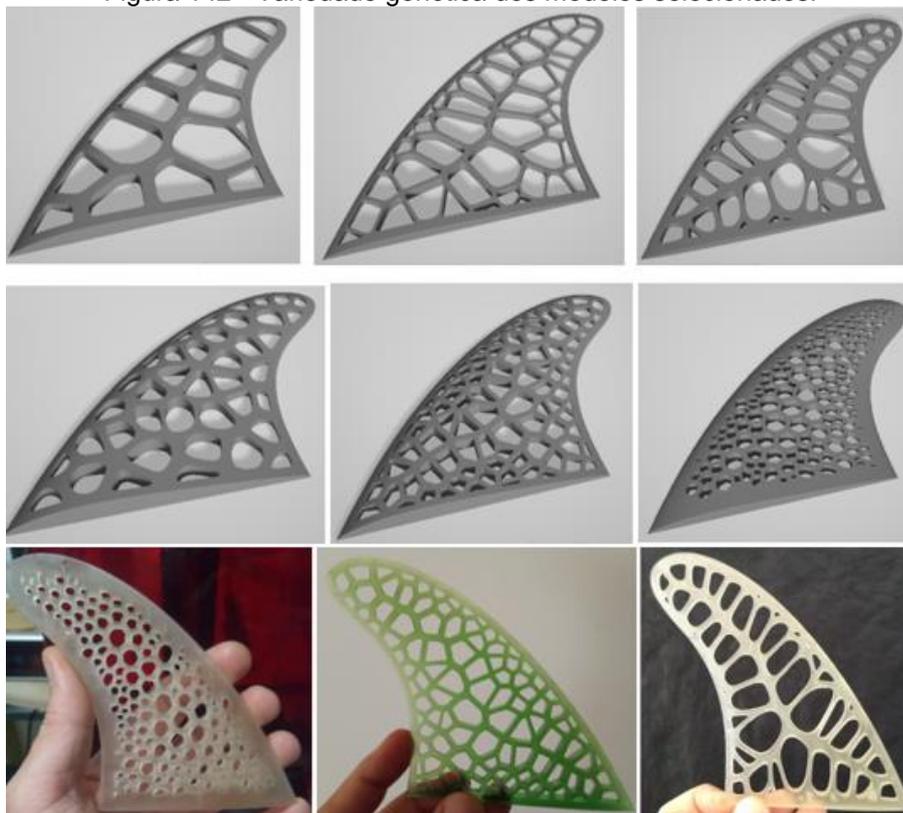
Fonte: Autor (2022).

Tabela 8 - Dados gerados pelos outputs com a área dos artefatos em (mm<sup>2</sup>) referentes à Figura 141.

| Modelos              | 01      | 02      | 03      | 04      | 05      | 06      |
|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Área mm <sup>2</sup> | 2753,10 | 2757,45 | 2759,04 | 2763,43 | 2768,00 | 2768,57 |

Fonte: Autor (2022).

Figura 142 - Variedade genética dos modelos selecionados.



Fonte: Autor (2022).

**Banco de Dados** - Explicitar os dados relevantes de saída do sistema.

Apresentação dos dados relevantes do projeto para que possam ser visualizados e analisados, como por exemplo: a área de superfície, o volume do material, peso, custo, etc.

Tabela 9 - Dados gerados pelos outputs com a área dos artefatos em (mm<sup>3</sup>) dos modelos virtuais referentes à Figura 142.

| <b>Modelos</b>             | <b>01</b> | <b>02</b> | <b>03</b> | <b>04</b> | <b>05</b> | <b>06</b> |
|----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Área mm<sup>3</sup></b> | 13573,28  | 8152,52   | 15826,65  | 18490,31  | 17797,40  | 20907,27  |

Fonte: Autor (2022).

**Análise e seleção** - Analise os resultados obtidos e escolha os mais aptos.

Foi com base nesta investigação que foram escolhidos o design dos artefatos com a justificativa de serem soluções encontradas com grande validade e relevância para a exploração das estruturas mais otimizadas. Pode-se justificar que o padrão foi gerado com uma ferramenta de inteligência artificial, que otimizou o menor uso de material para um maior equilíbrio entre leveza e resistência.

Neste sentido foi utilizada esta metodologia de análise e otimização para escolher dentre uma gama de outputs quais são os modelos mais adequados para o projeto. Como a proposta, a argumentação não é desenvolver a configuração mais resistente ou mais leve, e sim obter variações de opções para se balancear leveza e resistência. Se quiser aumentar um pouco mais a resistência perde um pouco mais de leveza assim como o inverso. Encontrar sempre um equilíbrio que possa ser aplicado no design de artefatos digitais bioinspirados através da criação de um algoritmo generativo para geração de inúmeras possibilidades.

### 3.6 DESIGN DE MATERIAIS BIOINSPIRADOS - EXPERIMENTAÇÃO COM FIBRAS DE AGAVE EM MATRIZES DE MATERIAIS BIODEGRADÁVEIS.

#### 3.6.1 Experimentação com materiais de base biológica.

Esta etapa da investigação visa a exploração das potencialidades da utilização das fibras de Agave resultantes dos resíduos gerados na produção de blocos e

pranchas de Agave, na forma de compósitos com materiais de base biológica. Sendo a biodegradabilidade uma opção promissora com a introdução de polímeros biodegradáveis, que em contrapartida aos sintéticos derivados do petróleo, sofrem biodegradação com relativa facilidade e são integrados novamente à natureza.

Foram realizados estudos e testes com materiais como: PLA e dois tipos de resinas de mamona, elastômera rígida; e resina expansiva rígida, visando diferentes possibilidades de aplicação em processos adequados ao tipo de material. O PLA foi pensado para a tentativa de desenvolvimento de um filamento composto por partículas de Agave + PLA, e posteriormente utilização do filamento em impressoras de fabrico por extrusão, o que acabou por não se concretizar devido a limitações de processos.

A alternativa foi utilizar resinas de mamona misturadas com as fibras de Agave em diferentes composições e tamanhos variados. Foram pensadas para se trabalhar com moldes e produção de artefatos passíveis de usinagem, dentre outras formas de aplicação, como adesivo e ainda uso da resina elastômera rígida para laminação com tecidos/malhas de reforço. A pesquisa também visava explorar outras possibilidades de utilização de resinas de base biológica, como resinas epóxi mas que não foram possíveis serem abordadas neste trabalho.

#### 3.6.1.1 Fibras Agave

No contexto específico das fibras naturais, as microfibras de Agave podem ser incorporadas como reforço em uma matriz polimérica para formar um compósito reforçado por dispersão. Essa configuração permite aproveitar as propriedades mecânicas das fibras naturais, como leveza, resistência e rigidez, em conjunto com as propriedades da matriz polimérica.

Nesta etapa da pesquisa, estamos explorando o potencial das fibras de Agave, que são resíduos da produção de blocos e pranchas de Agave. Nosso objetivo é experimentar materiais de base biológica e explorar as possibilidades dessas fibras para criar novas aplicações. Após triturar as fibras, utilizamos o processo de peneiramento para separá-las em diferentes tamanhos. Esse método emprega peneiras com diferentes graduações de granulometria, permitindo obter fibras com variados dimensionamentos.

Assim, os compósitos reforçados por partículas por dispersão, incluindo a utilização de microfibras de Agave, representam uma abordagem interessante para o

desenvolvimento de materiais com propriedades únicas e melhoradas, combinando as características dos diferentes componentes em uma única estrutura.

A Figura 143 apresenta o processo de redução das fibras em partículas menores, obtidas por meio da utilização de uma grosa japonesa. Essa ferramenta é comumente utilizada para desbastar madeira, mas também é empregada na produção de pranchas de Agave, simulando os resíduos gerados durante o processo de fabricação dessas pranchas e blocos de Agave. A trituração das fibras é um passo importante na preparação dos materiais utilizados nesse tipo de produção.

Figura 143 - Fibras de Agave trituradas.



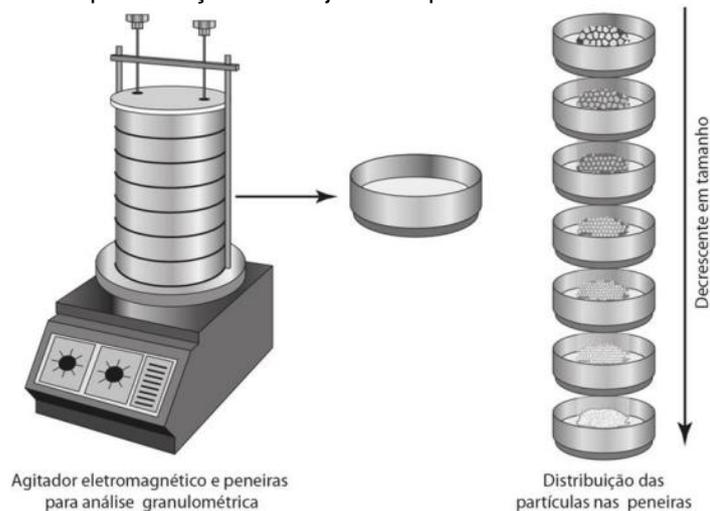
Fonte: Autor (2021).

As fibras foram trituradas, simulando o processo de geração de resíduos da produção de blocos e pranchas de Agave. Na sequência foram encaminhadas para separação das fibras obtendo-se diversos dimensionamentos. Essa separação realizou-se por processo de peneiramento, obtendo fibras de tamanhos variados. O processo de peneiramento consiste em utilizar diversas peneiras com gradação na granulometria e desta forma consegue-se obter variados dimensionamentos.

A técnica de peneiramento consiste em passar uma quantidade de material através de uma série de peneiras padronizadas (Figura 144), pesando o material retido em cada peneira. Quando uma certa quantidade de amostra alimenta a primeira peneira, uma certa quantidade de material poderá ou não ficar retida, enquanto boa parte a atravessa e se deposita na segunda peneira, a qual, por sua vez, poderá reter uma certa quantidade de material proveniente da primeira peneira, enquanto outra parte atravessará a segunda peneira, para alimentar a terceira peneira, e assim sucessivamente. Na base do

conjunto de peneiras encaixa-se uma peneira "cega", denominada "panela", destinada a receber as partículas menores que atravessaram toda a coluna sem serem retidos em nenhuma das peneiras. Trata-se de um processo passa não passa, em que as barreiras são constituídas pelos fios da malha de cada peneira (Cremasco, M.A, 2012).

Figura 144 - Representação de conjunto de peneiras em escala de laboratório.



Fonte: Cremasco (2009).

Este processo foi realizado no INEGI. Obteve-se 7 tamanhos gradativos: 45  $\mu\text{m}$ ; 75  $\mu\text{m}$ ; 106  $\mu\text{m}$ ; 250  $\mu\text{m}$ ; 425  $\mu\text{m}$ ; 600  $\mu\text{m}$ ; e 850  $\mu\text{m}$ . Os quais foram analisados e avaliados quais os mais apropriados para experimentação, testes e realização dos ensaios mecânicos. Os de 45  $\mu\text{m}$  e 75  $\mu\text{m}$  são pós muito finos, o de 106  $\mu\text{m}$  já se percebe a olho nu pequenas fibras, mas ainda é um pó, o de 250  $\mu\text{m}$  em diante já se apresenta em formato de fibras maiores, não sendo adequadas para desenvolvimento de filamentos com diâmetros de 0,75 mm para impressoras FE, sendo o ideal as partículas mais finas. Porém também foi selecionada uma fibra maior para experimentação com outras possibilidades de materiais, como as resinas à base de mamona. Neste caso foi selecionado a de tamanho 600  $\mu\text{m}$ .

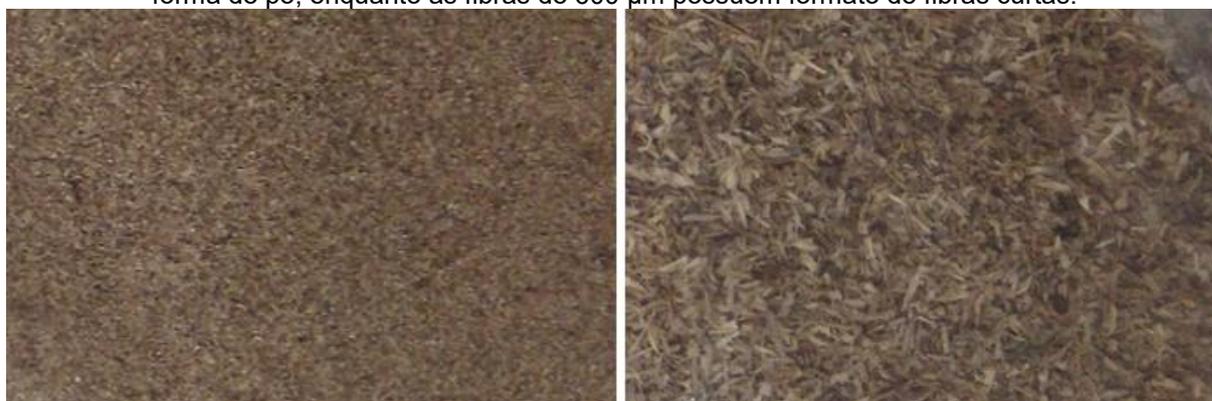
Figura 145 - Fibras obtidas através do processo de peneiramento realizado no INEGI - FEUP.



Fonte: Autor (2021).

Foram selecionadas fibras com dimensionamentos adequados para os propósitos de pesquisa. As fibras escolhidas foram de 106  $\mu\text{m}$  e 600  $\mu\text{m}$ , sendo a primeira na forma de partículas e a segunda na forma de microfibras. Essas diferentes configurações das fibras possibilitam diversas aplicações, dependendo de suas características morfológicas, seja na forma de pó ou microfibras.

Figura 146 - Seleção de fibras para o desenvolvimento de amostras. Foram utilizadas fibras de Agave com tamanhos de 106  $\mu\text{m}$  e 600  $\mu\text{m}$ . As fibras de 106  $\mu\text{m}$  apresentam-se predominantemente na forma de pó, enquanto as fibras de 600  $\mu\text{m}$  possuem formato de fibras curtas.



Fonte: Autor (2021).

A adição de microfibras de Agave em compósitos pode melhorar as propriedades mecânicas, como resistência à tração, rigidez e resistência ao impacto. Além disso, as fibras de Agave são de origem natural e renovável, contribuindo para

a sustentabilidade dos materiais. Assim, as microfibras de Agave com tamanhos de 106 microns e 600 microns podem ser usadas como reforço em compósitos reforçados por dispersão, oferecendo benefícios em termos de desempenho mecânico e sustentabilidade.

### 3.6.1.2 Fibras Agave + PLA

A primeira escolha de material foi o PLA por ser um material biodegradável bastante difundido na manufatura aditiva que permite misturar-se a outros materiais, podendo ser produzido extrudado na forma de filamento. Foram utilizados pellets de PLA Monofilamento de Impressão 3D - Grau de Uso Geral - da Natureworks. Este material apresenta grau de extrusão multiuso que resulta em monofilamento de impressão 3D com excelentes características de impressão. Este material é adequado para impressão 3D usando diferentes impressoras FE e para uma ampla gama de aplicações de impressão.

Este memorial descritivo apresenta e descreve as principais etapas do processo de manipulação dos materiais e tentativa de desenvolvimento do compósito composto com PLA + fibras de Agave. Para preparação dos provetes com as fibras selecionadas foram desenvolvidas **04 composições** diferentes na mistura com o PLA: as quais foram adicionadas quantidades de 5 e 10% de fibra nas composições. Composições: **600 µm 5%**; **600 µm 10%**; **106 µm 5%**; e **106 µm 10%**. Os materiais são pesados e misturados conforme porcentagens definidas. Em seguida os pellets de PLA são depositados em um refratário para ser aquecido e posteriormente misturado com as fibras e vazado em moldes de silicone. Após arrefecimento foram usinados, retirados as rebarbas e selecionados para análise da qualidade do provete. Os moldes utilizados foram disponibilizados pelo LDPS - FEUP, os quais foram produzidos para flexão e tração, com dimensões referentes às normas de flexão (ASTM D790-17) e tração (ASTM D638). Sendo as dimensões dos provetes de flexão 12,7mm de largura; 3,2mm de espessura; e 127mm de comprimento. E para tração os provetes possuem as seguintes dimensões 13mm de largura; 4mm de espessura; e 165mm de comprimento.

Figura 147 mostra os pellets de PLA (ácido polilático) utilizados para o compósito reforçado com fibras de Agave. Nessa etapa, os materiais PLA e as fibras de Agave foram separados e pesados. O compósito bioinspirado foi manipulado e vertido nos moldes de silicone. Os corpos de prova foram moldados com uma seção transversal retangular uniforme, resultando em uma consistência sólida.

Figura 147 - Processo de preparação e moldagem do compósito bioinspirado de PLA com fibras de Agave.



Fonte: Autor (2021).

Provetes com diferentes teores e tamanhos de fibras de Agave estão representados na Figura 148. À esquerda, temos provetes com 5% de Agave, enquanto à direita, os provetes contêm 10% de Agave. Na parte superior da imagem, os provetes foram reforçados com fibras de Agave de 600  $\mu\text{m}$ , enquanto na parte inferior, os provetes possuem fibras de 106  $\mu\text{m}$ . Essas variações permitem avaliar o efeito do teor e do tamanho das fibras de Agave nas características visuais do material compósito.

Figura 148 - Provetes à esquerda contém 5% de Agave e a direita 10% Agave. Os de cima são fibras de 600  $\mu\text{m}$  e os dois de baixo têm fibras de 106  $\mu\text{m}$ .



Fonte: Autor (2021).

Durante o processo de aquecimento do PLA (ácido polilático) e a incorporação das fibras de Agave, desafios significativos relacionados ao controle preciso da temperatura foram identificados. Essa combinação frequentemente resultou em problemas críticos, afetando adversamente a qualidade e a consistência do compósito. A falta de controle rigoroso da temperatura, devido a limitações nos equipamentos utilizados, deu origem a duas principais preocupações:

Primeiramente, a carbonização parcial das fibras de Agave foi observada durante a etapa de adição das fibras ao processo de aquecimento, quando o controle de temperatura não estava adequado. Isso ocorreu quando a temperatura ultrapassou o limite de estabilidade térmica das fibras, resultando em sua degradação e perda de resistência. Essa ocorrência teve um efeito negativo nas propriedades mecânicas e estruturais do compósito.

Além disso, a degradação do próprio PLA também foi um problema. O PLA é sensível a variações de temperatura, e um superaquecimento levou à degradação molecular. Isso levou à redução das propriedades mecânicas do PLA, incluindo resistência e rigidez. Além disso, a aderência entre o PLA e as fibras de Agave pode ter sido comprometida, impactando a integridade geral do compósito.

Os limites de temperatura suportados por esses materiais desempenham um papel crucial na prevenção de problemas como degradação e carbonização.

Normalmente, o PLA possui um ponto de fusão entre 160°C e 180°C, com um limite superior de temperatura em torno de 200°C a 220°C, acima dos quais ocorre a degradação. Por outro lado, as fibras de Agave resistem a temperaturas de cerca de 150°C a 200°C, mas a exposição prolongada a altas temperaturas pode comprometer suas propriedades.

A otimização do processo é vital para garantir a integridade do compósito. É fundamental adotar um controle rigoroso da temperatura durante a etapa de aquecimento, empregando equipamentos de aquecimento precisos e tecnologias de monitoramento contínuo. Além disso, é essencial desenvolver métodos que permitam uma incorporação uniforme e eficaz das fibras de Agave no PLA, possivelmente por meio de técnicas de pré-tratamento da fibra para melhor aderência e distribuição.

Neira (2005) conduziu ensaios que avaliaram o limite de resistência ao calor das fibras de sisal, utilizando análise termogravimétrica (TGA). As curvas de perda de massa em relação à temperatura revelaram dois patamares distintos de decomposição nas fibras tratadas e in natura. O primeiro patamar, até 105°C, correspondia à perda de umidade das fibras, enquanto estudos anteriores (Bismarck *et al.*, 2001 *apud* Neira, 2005) sugeriram que a degradação polimérica da fibra ocorre somente acima de 160°C. Entretanto, temperaturas superiores a 200°C resultaram em uma considerável perda de massa (aproximadamente 30%) devido à degradação. Um segundo patamar foi identificado entre 240°C e 340°C, relacionado à degradação da celulose e seus derivados, seguido pela degradação da lignina e outras substâncias entre 340°C e 600°C, culminando na formação do resíduo de cinzas.

Embora as curvas de TGA tenham apresentado comportamento similar, as fibras de sisal tratadas com 2% de NaOH exibiram maior estabilidade térmica na faixa de 220°C a 320°C. Comparativamente, as fibras in natura apresentaram um limite de resistência ao calor em torno de 200°C, enquanto as fibras tratadas atingiram 220°C (Neira, 2005). De acordo com um estudo de Kalia *et al.* (2009), as fibras de sisal tratadas com NaOH fizeram com que as fibras também ficassem mais leves com menor absorção de umidade e apresentaram maior resistência. Além disso, quando essas fibras foram aquecidas, elas conseguiram suportar melhor o calor. Isso sugere que o tratamento com NaOH pode melhorar as propriedades das fibras de sisal (Kalia, *et al.*, 2009).

No entanto, experimentos conduzidos por Velarde *et al.* (2021) ao desenvolverem filamentos de Agave e PLA identificaram, em alguns casos, perda de

resistência mecânica em comparação com amostras de PLA puro. Isso ocorreu devido à carbonização das fibras durante o aquecimento da matriz de PLA para a fusão da carga de reforço. O autor também apresentou resultados de tratamento químico das fibras para melhorar a adesão à matriz, destacando que as fibras não tratadas não apresentavam o mesmo desempenho nas propriedades mecânicas em comparação com as fibras tratadas.

Esforços foram feitos para produzir um filamento com Agave e PLA. Um levantamento de diversos modelos de máquinas extrusoras foi realizado, seguido de testes de extrusão em PLA para determinar as variáveis de temperatura e obter a espessura correta do filamento. No entanto, testes com os equipamentos disponíveis resultaram em entupimentos recorrentes e dificuldades para obter um filamento homogêneo. Se a produção do filamento fosse bem-sucedida, a ideia era realizar testes de impressão 3D de modelos de artefatos e estruturas bioinspiradas. No entanto, devido aos desafios enfrentados com a adição de calor ao PLA e à falta de controle preciso da temperatura, resultando em carbonização das fibras e falta de homogeneidade nas amostras, os ensaios mecânicos com essas amostras não foram prosseguidos. Embora os testes realizados tenham servido como base e experimentação inicial para esta tese, a problemática central permaneceu centrada na busca por condições ideais de processamento e temperatura. Lamentavelmente, a fusão adequada do PLA e a integração eficiente das fibras de Agave não puderam ser alcançadas. Esse cenário culminou em questões de degradação e impacto negativo na qualidade e uniformidade do compósito final.

Diante das complexidades identificadas no processamento do PLA e da incorporação das fibras de Agave, direcionou-se para a exploração de alternativas. Em virtude dessas dificuldades, a atenção voltou-se para experimentações com materiais e abordagens distintas. Optou-se, então, pela utilização de resinas bicomponentes de mamona em conjunto com as fibras de Agave. Esse novo enfoque ofereceu a vantagem de evitar os desafios associados ao controle de temperatura durante a adição das fibras, apresentando-se como uma rota promissora para a obtenção de resultados mais consistentes e de maior qualidade no desenvolvimento de compósitos.

### 3.6.1.3 Fibras Agave + resinas de mamona bicomponente

#### Experimentação inicial

Esta etapa busca potenciais aplicações com as propriedades desejadas, com foco no equilíbrio entre leveza e resistência. Ao escolher uma combinação apropriada de matriz tendo como material de reforço fibras trituradas de Agave com tamanhos diversos, se busca quesitos de biodegradação, leveza e resistência. Quanto aos materiais e métodos, foram realizadas as etapas iniciais de desenvolvimento e manipulação do compósito bioinspirado, com diferentes composições, utilizando dois tipos de resina bicomponente derivada do óleo de mamona, a elastômera rígida, e a poliuretana expansiva rígida, com as seguintes proporções:

- . Resina elastômera rígida (Resina 3002) (A) + (B). 1 parte do componente (A) para 0,75 partes do componente (B).
- . Resina expansiva rígida (Respan) (A) + (B). 1 parte do componente (A) para 1 parte do componente (B).

Figura 149 - Amostras das resinas.



Fonte: Autor (2021).

Foram realizados vários testes para identificar quantidades de fibras e óleos na composição. Foram obtidos diferentes resultados e aspectos positivos com potenciais de exploração.

Figura 150 - Visão e aspecto do volume de fibra e resina na mistura. Fibra de Agave 600  $\mu\text{m}$ . Exemplo de proporção obtida 50% peso de fibra 50% peso de resina (2 gramas de fibra + 2 gramas de resina).



Fonte: Autor (2022).

Na (Figura 151) a amostra (1) foi produzida com 50% do peso de fibra 600  $\mu\text{m}$  + 50% peso de resina elastômera rígida (2 gramas de fibra + 2 gramas de resina). Tem boa estabilidade dimensional, material leve, apresenta boa aglomeração e compactação das fibras, maleável, entretanto, frágil (que se parte facilmente; quebradiço; pouco resistente; pouco sólido, que é pouco firme). Peso aprox. do provete 4g. A amostra (2) foi produzida com a mistura de 1,6g (40% peso do peso total) fibra 600  $\mu\text{m}$  + 2,4g resina expansiva rígida em molde fechado para controlar a expansão. Resultado é um material mais firme, sólido e consistente. Peso aprox. do provete 4g.

Figura 151 - Testes iniciais das fibras com as resinas de mamona.



Fonte: Autor (2022).

Na (Figura 152) a amostra (3) apresenta 20% fibra 600  $\mu\text{m}$  + 80% resina elastômera rígida em molde aberto. Total peso 5g (1g fibra + 4g resina). Provete apresenta solidez e flexibilidade. Na amostra (4) - 55% fibra + 45% resina. Total peso 5,5g - 3g fibra 600  $\mu\text{m}$  + 2,5g resina elastômera rígida (máxima quantidade de fibra que foi possível inserir na mistura, a resina é a quantidade suficiente somente para unir as fibras). Material leve e frágil. Molde aberto.

Figura 152 - Provetes testes iniciais com Resina 3002 e fibra de 600  $\mu\text{m}$ .



Fonte: Autor (2022).

Para essa amostra foi utilizado 40% do peso de fibra de 600  $\mu\text{m}$  + 60% do peso de resina expansiva. Composição com 20 gramas, total para 5 provetes, sendo 12 gramas de resina + 8 gramas de fibra. Expansão limitada ao formato do molde que foi fechado e prensado para conter a expansão e proporcionar mais rigidez aos provetes que ficaram bem compactados. Entretanto já se sente uma maior dificuldade em misturar a fibra na resina. Peso aproximado do provete 4g (1,6g fibra 600  $\mu\text{m}$  [40%] + 2,4g resina expansiva [20%]).

Figura 153 -Acima, fibras já incrementadas à resina que foi misturada previamente, depois postas no molde, que foi prensado. Abaixo, detalhe dos amostras.



Fonte: Autor (2022).

A (Figura 154) apresenta uma amostra contendo 20% do peso de fibra de 600  $\mu\text{m}$  + 80% do peso de resina expansiva rígida. O que durante a manipulação se apresentou como sendo uma proporção que resultou em uma amostra bastante homogênea. Expansão limitada ao formato do molde que foi fechado e prensado para conter a expansão e proporcionar mais rigidez ao provete.

Figura 154 - Amostra que apresenta bons resultados táteis e visuais na consistência do material.



Fonte: Autor (2022).

Provetes com 20% do peso de fibra de 106  $\mu\text{m}$  + 80% do peso de resina expansiva. Expansão limitada ao formato do molde que foi fechado e prensado para conter uma expansão excessiva, e permitir uma expansão controlada (preenchimento até a metade da altura da profundidade do molde). Resultado é um material com característica de uma espuma compacta e flexível.

Figura 155 - Esta amostra apresenta com características bastante homogênea na mistura da fibra de 106  $\mu\text{m}$  com a espuma poliuretana.



Fonte: Autor (2022).

Esta mistura de resina expansiva com as fibras no formato de pó (106  $\mu\text{m}$ ), também se apresenta potencialmente com a função de adesivo de juntas para colar madeira, os testes resultaram em boa adesão aparente. Foram então definidas amostras de comparação desta composição e outras que são apresentadas no tópico ensaios de cisalhamento para verificar a resistência desta aplicação como adesivo, e os resultados se apresentaram positivos. Foram definidas amostras para comparação com as resinas de mamona e com um adesivo comercial de espuma de poliuretano para madeira. Todas as amostras estudadas contendo resina de mamona, seja elastômera ou expansiva, apresentaram melhor desempenho mecânico e maior resistência em comparação com o adesivo PU comercial (cola poliuretana expansiva D4 para madeira). Estas análises são abordadas na etapa 7 desta investigação.

Figura 156 - Provetes de madeira de Paulownia colados com a mistura da fibra de Agave em pó com a resina poliuretana.



Fonte: Autor (2022).

Figura 157 - Amostras diversas resultado de experimentos.



Fonte: Autor (2022).

Esta etapa permitiu perceber como é o comportamento das resinas, assim como, verificar as quantidades máximas de fibra que se conseguiu inserir na resina. Por vezes o peso da resina na composição é maior, entretanto o volume é menor, assim como o volume de fibras na composição é consideravelmente maior. O que foi possível verificar qual a menor quantidade necessária para aglomerar e manter as fibras unidas com boa estabilidade dimensional. Os teste que foram feitos para adicionar maiores quantidades de fibras foram realizados antes de definir as composições que iriam ser estudadas. Justamente para se ter uma ideia da quantidade máxima (%) de fibra adicionada nas resinas. O máximo que se conseguiu atingir foi 55% de fibra. Sendo que a quantidade de resina era somente suficiente para

agregar as fibras, contudo o material se desfazia somente manipulando com as mãos. E nesta análise tátil e sensorial, observando-se a textura e a resistência manual e visualmente, a porcentagem que se identificou como de maior potencial de exploração para realização de ensaios mecânicos que apresentasse alguma consistência, foi o percentual de 20%.

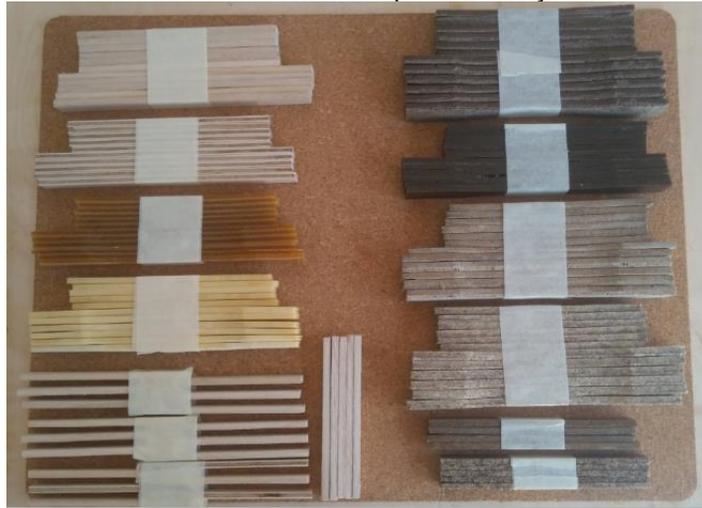
A etapa seguinte busca definir as amostras e confecção dos provetes com as composições definidas que apresentaram potencial de exploração e aplicação. Depois serão realizados ensaios mecânicos para explorar as propriedades dos compósitos bioinspirados. Tem como objetivo apresentar os dados obtidos de ensaios de tração e flexão em comparação a outros materiais naturais, como Agave e a madeira de Paulownia, pois apresentam baixas densidades.

A ideia central não é desenvolver o material mais leve ou o material mais resistente, mas sim, identificar um equilíbrio entre leveza e resistência que possa ser aplicado no design de artefatos sustentáveis. Os resultados qualitativos obtidos com a experiência tátil e sensorial através da manipulação dos materiais indica potencial de aplicação, entretanto os ensaios de tração e flexão em comparação uns com os outros irão representar em dados quantitativos, as hipóteses de investigação.

#### 3.6.1.4 Definição das amostras

Foi definido a amostra de Agave como ponto de partida para comparações por ser objeto de estudo nesta pesquisa, e também foi incluído a madeira de Paulownia como material natural similar, para termos de comparação com os compósitos bioinspirados.

Figura 158 - Provetes das amostras definidas para realização dos ensaios mecânicos.



Fonte: Autor (2022).

Em síntese, no processo de separação das fibras, obteve-se variados dimensionamentos, 7 tamanhos gradativos. 45  $\mu\text{m}$ ; 75  $\mu\text{m}$ ; 106  $\mu\text{m}$ ; 250  $\mu\text{m}$ ; 425  $\mu\text{m}$ ; 600  $\mu\text{m}$ ; 850  $\mu\text{m}$  (Figura 135). Os quais foram analisados e selecionados os mais apropriados para realização dos ensaios.

As fibras selecionadas foram: 106  $\mu\text{m}$  e 600  $\mu\text{m}$ , podem ter aplicações diversas de acordo com sua configuração formal, em pó ou em microfibras. Também foi testada uma combinação de 4 tamanhos de fibra (106  $\mu\text{m}$ ; 250  $\mu\text{m}$ ; 425  $\mu\text{m}$ ; 600  $\mu\text{m}$ ) nas mesmas proporções (25% de cada) para verificar o desempenho em comparação com as outras amostras contendo apenas um tamanho de fibra. Na definição das amostras foi utilizada uma proporção de 20% de fibra nas composições, com exceção de uma composição que leva 10% de fibras de 600  $\mu\text{m}$ . As amostras definidas são apresentadas no quadro 4.

Quadro 4 - Definição das amostras.

| <b>Amostras</b> |  |  |
|-----------------|--|--|
| 01              | <b>Agave</b>   | 100% Agave natural   |
| 02              | <b>Paulownia</b>   | 100% Paulownia natural   |
| 03              | <b>Resina 3002</b>   | (100% resina elastômera rígida)  |
| 04              | <b>Respan</b>  | (100% resina poliuretana expansiva rígida)   |
| 05              | <b>Resina 3002 e 20% de fibras de 106 µm</b>                             | (80% resina elastômera rígida + 20% de fibras de 106 µm)   |
| 06              | <b>Respan e 20% de fibras de 106 µm</b>                                  | (80% resina poliuretana expansiva rígida + 20% de fibras de 106 µm)  |
| 07              | <b>Respan e 10% de fibras de 600 µm</b>                                  | (90% resina poliuretana expansiva rígida + 10% de fibras de 600 µm)  |
| 08              | <b>Respan e 20% de fibras de 600 µm</b>                                  | (80% resina poliuretana expansiva rígida + 20% de fibra de 600 µm)   |
| 09              | <b>Respan e 20% de mix de fibras de (106 µm; 250 µm; 425 µm; 600 µm)</b> | (80% resina poliuretana expansiva rígida + 20% de fibras misturadas, sendo 25 % de cada: 106 µm; 250 µm; 425 µm; 600 µm). * Primeiro foi pesada cada quantidade de fibra (25% de cada - 4 tipos de fibra), depois misturadas e desse total, foi usado 20% na amostra |

Fonte: Autor (2022).

O Agave como sendo o objeto de estudo, é o material que vai servir de parâmetro para comparação com as outras amostras. A confecção dos provetes de Agave usinados (material natural) para verificação das suas propriedades mecânicas serviu de referência/ parâmetro de comparação. Para os provetes dos compósitos, os métodos foram seletivamente adequados para uso com compósitos termofixos e termoplásticos reforçados com fibra que incorporam reforços. As amostras de teste estavam livres de torção e com as partes perpendiculares de superfícies paralelas. As amostras foram verificadas quanto à conformidade com esses requisitos por observação visual em relação a arestas retas, quadrados e placas planas. Observação: os provetes de tração tiveram que ser adaptados para se adequarem ao equipamento de teste sem fugir as especificações da norma (ASTM D638).

Figura 159 - Provetes de Agave.



Fonte: Autor (2022).

Figura 160 - Algumas etapas de confecção de diferentes amostras. Os provetes foram moldados, possuem seção transversal uniformemente retangular, e as amostras estavam sólidas e consistentes.



Fonte: Autor (2022).

Figura 161 - Amostras.



Fonte: Autor (2022).

### 3.7 ENSAIOS MECÂNICOS (ANÁLISE DOS DADOS E DESEMPENHO DOS MATERIAIS)

#### 3.7.1 Flexão

Neste tópico, apresentamos análises individuais comparativas das amostras e discutimos o módulo de elasticidade e a tensão máxima. O objetivo é identificar, dentro da dispersão, a composição em que as amostras apresentam a menor variação. Isso é fundamental para encontrar um equilíbrio entre o tamanho e a porcentagem de fibra, proporcionando leveza, resistência e baixa variação, tornando o material confiável para aplicações.

Todo o processo de manipulação dos corpos de prova foi realizado manualmente, resultando em pequenas variações nas dimensões. No entanto, isso não afeta a conformidade nos ensaios, pois a equivalência é baseada na tensão, que é a relação entre a força aplicada e a área da seção transversal. Uma vez que os ensaios foram conduzidos na mesma máquina, usando a mesma célula de força, os corpos de prova resistiram de forma proporcional. Quaisquer diferenças nas áreas das seções transversais dos corpos de prova foram devidamente registradas nas tabelas do Excel e os cálculos foram realizados considerando essas medidas. Portanto, justificamos nossa análise com base na tensão máxima das amostras, calculando a

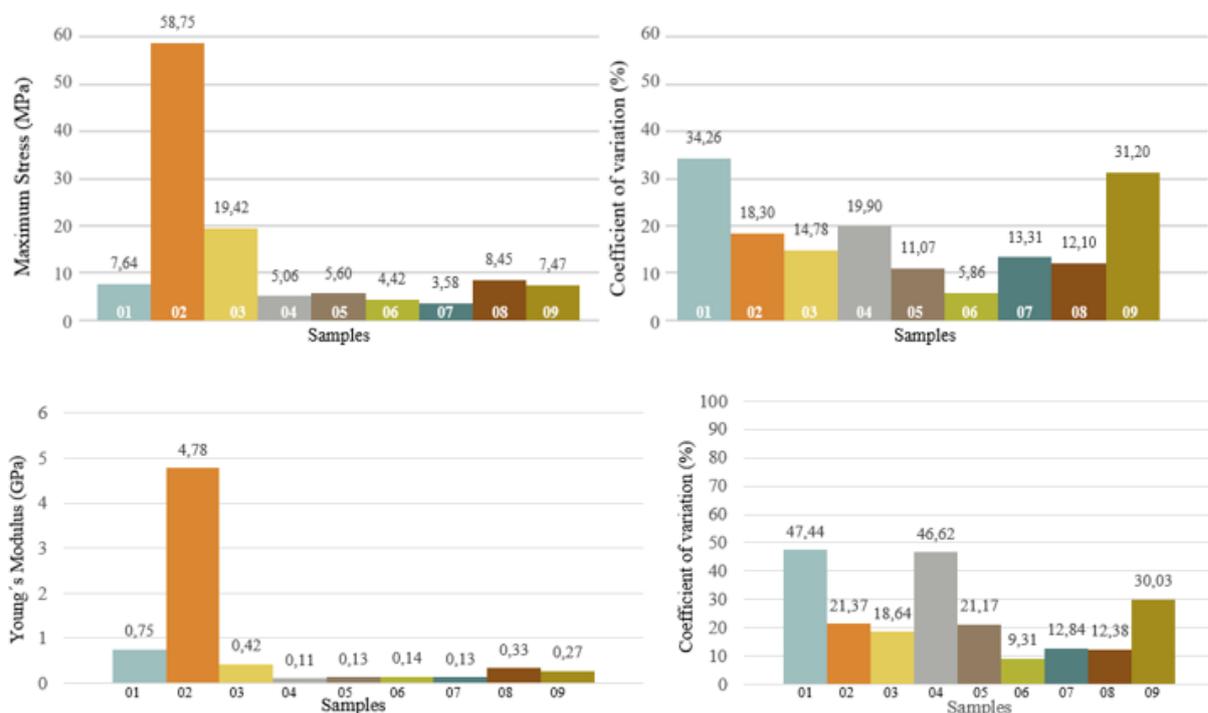
média da tensão máxima das cinco amostras e seu desvio padrão. Por essa razão, é mais apropriado analisar a tensão em vez de se concentrar na força, uma vez que a tensão já incorpora a variação na área, mantendo os parâmetros da máquina constantes.

Tabela 10 - Tabela comparativa entre os valores de tensão máxima e módulo de elasticidade das amostras.

| Amostras |                     | Tensão máxima [MPa] |         |        | Módulo de elasticidade [GPa] |         |        |
|----------|---------------------|---------------------|---------|--------|------------------------------|---------|--------|
|          |                     | Média               | Desv P. | CV (%) | Média                        | Desv P. | CV (%) |
| 01       | Agave               | 7,64                | 2,62    | 34,26  | 0,75                         | 0,36    | 47,44  |
| 02       | Paulownia           | 58,75               | 10,75   | 18,30  | 4,78                         | 1,02    | 21,37  |
| 03       | Resina 3002         | 19,42               | 2,87    | 14,78  | 0,42                         | 0,08    | 18,64  |
| 04       | Respan              | 5,06                | 1,01    | 19,90  | 0,11                         | 0,05    | 46,62  |
| 05       | Resina 3002+20% 106 | 5,60                | 0,62    | 11,07  | 0,13                         | 0,03    | 21,17  |
| 06       | Respan 106 20%      | 4,42                | 0,26    | 5,86   | 0,14                         | 0,01    | 9,31   |
| 07       | Respan 600 10%      | 3,58                | 0,48    | 13,31  | 0,13                         | 0,02    | 12,84  |
| 08       | Respan 600 20%      | 8,45                | 1,02    | 12,10  | 0,33                         | 0,04    | 12,38  |
| 09       | Respan mix 20%      | 7,47                | 2,33    | 31,20  | 0,27                         | 0,08    | 30,03  |

Fonte: Autor (2022).

Gráfico 2 - Resultados do teste de flexão em três pontos: tensão máxima (MPa), módulo de elasticidade (GPa) e respectivos coeficientes de variação.



Fonte: Autor (2022).

## 1 Agave

Agave (natural): O Agave apresentou uma variação maior na tensão máxima e no módulo de elasticidade, com as amostras atingindo um ponto de pico e, em seguida, ocorrendo uma leve queda seguida de fratura. Observou-se que o Agave, ao iniciar a fratura, possui baixa resistência. Este é o material mais leve entre as amostras testadas. A estrutura celular de baixa densidade, a organização estrutural porosa e a composição do material são características das fibras dispostas em feixes distribuídos aleatoriamente no parênquima, e esse fator explica o comportamento de ruptura. O Agave possui poucos feixes com pequenas quantidades de lignina presentes no xilema. Ele possui um maior volume de células do parênquima compostas basicamente de celulose, que é mais leve e flexível do que a lignina. Dessa forma, é possível explicar o tipo de comportamento mecânico das amostras, tanto do ponto de vista mecânico quanto biológico, e o comportamento da forma e função das células.

## 2 Paulownia

Paulownia (natural): A Paulownia possui um mecanismo diferente em comparação ao Agave; ela se decompõe em estágios até a fratura. No caso da Paulownia, com maior resistência em comparação ao Agave e outras amostras, a diferença se deve à quantidade consideravelmente maior de fibras e lignina. A tensão máxima e o módulo de elasticidade apresentam variação na homogeneidade das amostras, resultando no desvio padrão apresentado, provavelmente devido à formação da estrutura celular desse sistema natural e à distribuição das fibras na madeira, o que causa uma maior variação na homogeneidade das amostras. Nesse caso, observou-se a maior tensão entre os materiais, o que justifica o uso da madeira de Paulownia em objetos de maior resistência que requerem leveza. Essa madeira possui baixa densidade, sendo uma das madeiras mais leves utilizadas na construção de pranchas de surfe ocas de madeira. As fibras de madeira alinhadas e organizadas em feixes quebram em blocos até a quebra final. Em artefatos que exigem maior resistência na região de quebra, a madeira é a mais adequada para esse propósito devido à sua região plástica.

Tabela 11 - Comparação entre os valores das propriedades mecânicas da madeira de Paulownia Cotevisa 2, fornecidos pelo iPaulownia, e os resultados obtidos neste estudo com amostras provenientes do mesmo produtor.

| <b>Autor</b>        | <b>Espécie</b>   | <b>Propriedade</b>            | <b>Valor</b> | <b>Unidade</b> |
|---------------------|--|-------------------------------|--------------|----------------|
| Neste estudo (2023) | <i>(P. elongata x P. fortunei - Cotevisa 2 iPaulownia Espanha)</i> | Módulo de Elasticidade Flexão | 4,78         | GPa            |
|                     |  | Tensão Máxima Flexão          | 58,75        | MPa            |
| iPaulownia (2023)   | <i>(P. elongata x P. fortunei - Cotevisa 2 iPaulownia Espanha)</i> | Módulo de Elasticidade Flexão | 5,60         | GPa            |
|                     |  | Tensão Máxima Flexão          | 28,00        | MPa            |

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Os dados indicam que a amostra avaliada pela iPaulownia apresenta um Módulo de Elasticidade em Flexão ligeiramente maior do que a amostra avaliada nesse estudo, ambas provenientes do mesmo fornecedor. No entanto, é importante notar que a Tensão Máxima em Flexão da iPaulownia é consideravelmente menor em comparação com a amostra deste estudo. Essas discrepâncias podem refletir variações nas condições de teste ou nas características específicas das amostras.

### 3 Resina 3002

Resina 3002 (100%): A resina 3002 possui um baixo módulo de elasticidade e desvio padrão, com um comportamento inicialmente elástico e contínuo, onde, em seguida, o material deforma ao entrar no regime plástico, quebrando em uma região que não é muito dúctil.

### 4 Respan

Respan (100%): com a resina expansiva de poliuretano, houve uma queda no máximo de tensão; trata-se de um material leve com pouca resistência, formado por cavidades de ar, onde não há controle sobre a formação da estrutura interna. O desvio padrão é alto em oposição à resina elastômera. O módulo de elasticidade apresenta uma flutuação maior, indicando que há uma alta variação no regime elástico entre as amostras, portanto, o poliuretano atua com mais sucesso no regime elástico. Esse é um material mais direcionado para absorção de impactos.

## **5 Resina 3002 e 20% de fibras de 106 $\mu\text{m}$**

Resina 3002 (20% 106 $\mu\text{m}$ ): o comportamento de falha não ocorre em estágios, após o regime elástico, perde resistência e quebra abruptamente. Apresenta um comportamento mais similar aos materiais cerâmicos do que a um polímero propriamente dito. As cargas máximas estão logo abaixo da Resina 3002. No entanto, quando comparado com outras amostras, houve um aumento na resistência em termos de deformação. Os padrões de fratura foram semelhantes, mas essa composição mostrou uma menor dispersão, indicando uma distribuição uniforme das partículas de Agave na matriz de resina elastômera.

## **6 Respan e 20% de fibras de 106 $\mu\text{m}$**

No caso das amostras com 20% de fibras de 106 $\mu\text{m}$ , observou-se um comportamento bem definido no regime elástico, sem transição para o regime plástico até o momento da ruptura. No entanto, em termos de resistência, notamos uma redução tanto na tensão como no módulo de elasticidade. O compósito contendo fibras de 106 $\mu\text{m}$  apresentou um baixo desvio padrão e uma distribuição mais homogênea das propriedades nas amostras.

Comparando com outras fibras, podemos levantar a hipótese de que talvez fibras de maior tamanho ofereçam uma resistência maior, enquanto fibras menores proporcionam uma resistência inferior, mas com um comportamento mais homogêneo, como indicado pelo baixo desvio padrão. No entanto, é importante ressaltar que o comportamento mecânico da resina de poliuretano expandida também desempenha um papel significativo.

Nesse contexto, as fibras menores tendem a tornar o comportamento do compósito mais homogêneo, mas a propriedade mecânica da matriz de resina prevalece em relação à resistência global. Em contraste, fibras maiores podem contribuir de alguma forma para fortalecer a matriz e aumentar a resistência geral. Essas observações são consistentes com comparações entre diferentes amostras.

## **7 Respan e 10% de fibras de 600 µm**

Respan (10% 600 µm): Essa composição apresentou uma queda significativa na tensão em comparação com a amostra com 20% de fibra de 600 µm. Dois fatores podem ser observados: primeiro, o controle do comprimento da fibra resultou em uma diferença menor no desvio padrão entre a tensão e módulo de elasticidade. É possível relacionar o controle da fibra com um comportamento mais homogêneo; o segundo ponto, a redução de 10% da fibra causou uma queda na tensão máxima e no módulo de elasticidade. Portanto, observa-se que a alteração da porcentagem de fibra pode resultar em variação na resistência mecânica. Dessa forma, verificou-se que adicionar uma quantidade maior de fibra aumentou a resistência da amostra.

## **8 Respan e 20% de fibras de 600 µm**

Respan (20% 600 µm): Este material apresentou um ganho significativo em termos de resistência e uma menor variação na tensão máxima, bem como uma menor variação no desvio padrão e no módulo de elasticidade, o que significa que oferece uma maior resistência e um comportamento mais homogêneo. Sua região elástica é definida com uma região plástica menor, devido ao fato de ser uma resina de poliuretano expansível. A amostra se rompe na transição da região elástica para a região plástica devido às cavidades presentes na matriz de poliuretano expandido e nas partículas de fibra oca. Ao comparar os gráficos com a amostra de Respan, é possível observar um aumento na resistência sem alterar o comportamento de fratura, devido ao controle da fibra utilizada na composição.

## **9 Respan e 20% de mix de fibras de (106 µm; 250 µm; 425 µm; 600 µm - 1/4 partes de cada).**

Respan (20% mistura: 106µm; 250 µm; 425 µm; 600 µm | ¼ cada): Neste caso, a situação é um tanto incomum. Embora as quantidades corretas de fibras sejam controladas, não há um padrão definido de como as fibras são distribuídas nas amostras. Como resultado dessa aleatoriedade, há uma perda na tensão e os valores de resistência obtidos são inferiores aos da amostra com 20% de fibra de 600µm, com uma variação muito maior. Isso ocorre porque não é possível controlar a distribuição

dessa variação de fibras dentro da matriz de poliuretano expandido. Embora a resistência da amostra seja maior do que a da amostra de Respan, o intervalo de confiança é menor, o que significa que a variação nos resultados é maior, o que aumenta as chances de pontos fracos e rupturas.

Após a análise detalhada das amostras envolvendo PU expandido de mamona, e diferentes proporções de fibras de Agave, é possível observar que os resultados variam consideravelmente com base nas composições utilizadas. O comportamento mecânico desses compósitos é afetado pela concentração e tamanho das fibras, bem como pela natureza da resina de poliuretano expandido (PU). As fibras de Agave, em particular, apresentam um comportamento interessante, onde fibras menores tendem a promover uma homogeneidade no comportamento do compósito, enquanto fibras maiores têm um impacto mais significativo na resistência global, mas também podem afetar a variação nos resultados.

Agora, ao comparar esses resultados com o estudo de Paula *et al.* (2022), observamos semelhanças e diferenças intrigantes. Em ambos os estudos, a composição dos materiais, incluindo a adição de fibras, desempenhou um papel crucial na determinação das propriedades mecânicas dos compósitos. A Tabela 12 compara dois compósitos em termos de densidade, resistência à flexão, módulo de elasticidade de flexão e resistência à tração paralela à fibra, conforme relatado por Paula *et al.* (2022).

Tabela 12 - Dados dos estudos realizados com PU expandido de mamona, fibras de Sisal (Agave sisalana) e serragem de madeira.

| <b>Paula <i>et al.</i> (2022)</b>                              | <b>Densidade (kg/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Resistência à flexão (Mpa)</b> | <b>Módulo de elasticidade de flexão (GPa)</b> | <b>Resistência à tração paralela à fibra (MPa)</b> |
|--|-------------------------------------|-----------------------------------|---|--|
| <i>50% de espuma e 50% de fibras de Sisal (2mm)</i>            | 458,56                              | 2,76                              | 0,167   | 0,16   |
| <i>50% de espuma, 37,5% de serragem e 12,5% de Sisal (2mm)</i> | 644,76                              | 11,31                             | 0,692   | 0,29   |

Fonte: Paula *et al.* (2022).

No primeiro compósito (50% espuma e 50% fibras de Sisal), a densidade é de 458,56 kg/m<sup>3</sup>, com resistência à flexão de 2,76 MPa, módulo de elasticidade de flexão de 0,167 GPa e resistência à tração de 0,16 MPa. Vale ressaltar que este compósito apresenta uma densidade menor, tornando-o mais leve, o que pode ser relevante para

certas aplicações. O segundo compósito (50% espuma, 37,5% serragem e 12,5% fibras de Sisal) possui densidade mais alta (644,76 kg/m<sup>3</sup>). No entanto, apresenta notável resistência à flexão (11,31 MPa), módulo de elasticidade de flexão (0,692 GPa) e resistência à tração (0,29 MPa). Esses dados indicam que o segundo compósito, com maior proporção de serragem e fibras de Sisal, possui propriedades mecânicas superiores ao primeiro, composto principalmente por espuma e fibras de Sisal. A adição de serragem parece ter contribuído para o aumento da densidade e das propriedades mecânicas, tornando-o mais resistente e rígido.

Uma observação interessante é que, em nosso estudo, as fibras menores contribuíram para uma homogeneidade no comportamento do compósito, o que se alinha com a ideia de que fibras de menor tamanho podem promover um comportamento mais consistente. Por outro lado, as fibras maiores parecem ter um papel mais proeminente na resistência global, assim como em seu estudo, onde uma maior proporção de fibras resultou em maior resistência.

#### 3.7.1.1 Considerações e conclusões sobre os ensaios de flexão

No âmbito da aplicação prática, obtivemos resultados positivos, o que é particularmente relevante para a discussão desta tese interdisciplinar. Esta discussão não se restringe à análise do material, mas também incorpora elementos biológicos para fundamentar o comportamento de um material de origem natural.

Todo o processo, desde a manipulação do material até a aquisição de imagens, desenvolvimento e ensaios, foi validado tanto qualitativa quanto quantitativamente. Essa abordagem abrangente enriquece a discussão, pois os dados quantitativos oferecem suporte objetivo para as observações qualitativas iniciais. Por exemplo, em vez de simplesmente afirmar que há uma alta dispersão nas tensões, realizamos uma análise numérica dessa dispersão.

Ao calcular a média das tensões máximas e o desvio padrão, o coeficiente de variação se torna uma métrica útil, indicando o grau de variação das amostras em relação à média. Um coeficiente de variação abaixo de 10% é considerado muito bom, sugerindo que as amostras apresentam uma variação de até 10%. Valores abaixo de 5% são considerados excelentes, indicando uma correlação estatisticamente significativa.

No caso de um coeficiente de variação de 34% para a tensão máxima do Agave, observamos uma variação relativamente ampla entre as amostras. É importante destacar que esta foi uma observação, e não estávamos avaliando se essa variação era adequada ou inadequada neste contexto. Estávamos conduzindo um estudo em um sistema natural e documentando seu comportamento. O coeficiente de variação desempenhou um papel significativo nesta discussão, pois estávamos considerando a aplicação prática dos materiais em pesquisa, antecipando possíveis falhas. Portanto, optamos por analisar a tensão máxima como uma métrica relevante.

A comparação das amostras permitiu verificar se o coeficiente de variação também ocorria da mesma maneira. Foi investigado se a manipulação e os ensaios com os compósitos de fibras com resinas de mamona já haviam melhorado a dispersão da tensão máxima. Em relação à amostra Respan 600 20%, foi observada uma dispersão significativamente menor. Uma vez que o compósito foi submetido a manipulações e influência do operador, mesmo que a direção das fibras não tenha sido perfeitamente controlada, isso resultou em uma maior homogeneidade na tensão máxima das amostras.

A apresentação das amostras junto com a análise dos gráficos possibilita uma avaliação detalhada dos ensaios. Para fins de comparação, as tabelas de dados dos ensaios fornecem uma visualização quantitativa resumida, destacando os principais pontos de comparação da variação das amostras.

Nos testes, fica evidente que há variações nas amostras, seja para mais ou para menos, o que levanta questões sobre como esses fatores podem influenciar na aplicação. A dispersão das amostras, medida pelo coeficiente de variação, diminui à medida que há um maior controle da homogeneidade das amostras. Por exemplo, o coeficiente de variação do Agave foi alto devido à sua natureza como um sistema natural. Ao observar a anatomia vegetal, nota-se que as fibras estão distribuídas aleatoriamente pelos tecidos vegetais, o que contribui para uma ruptura abrupta, diferente das resinas.

Ao analisar as resinas com fibras, observamos se o coeficiente de variação se mantém, aumenta ou diminui. Se os coeficientes se aproximam, significa que o processo realizado encontrou um equilíbrio em que a dispersão das amostras é menor. A análise da tabela do módulo de elasticidade também permite comparações entre as amostras e mostra que as propriedades no regime elástico mantêm uma variação constante.

Não realizamos análises da ruptura, pois os mecanismos de ruptura são muito diferentes entre as amostras e provavelmente resultariam em alta dispersão em todas elas. Nesta análise, optamos por focar nas propriedades dos materiais antes da ruptura das amostras, abordando os regimes elástico e plástico.

Em suma, essas análises destacam a complexidade do comportamento dos compósitos, onde a combinação de diferentes materiais e proporções desempenha um papel fundamental na obtenção de propriedades desejadas. Embora nossos estudos tenham focado em materiais específicos, como fibras de Agave e PU expandido, essas investigações oferecem valiosas informações sobre como manipular e otimizar compósitos para aplicações específicas.

### 3.7.2 Ensaio de tração

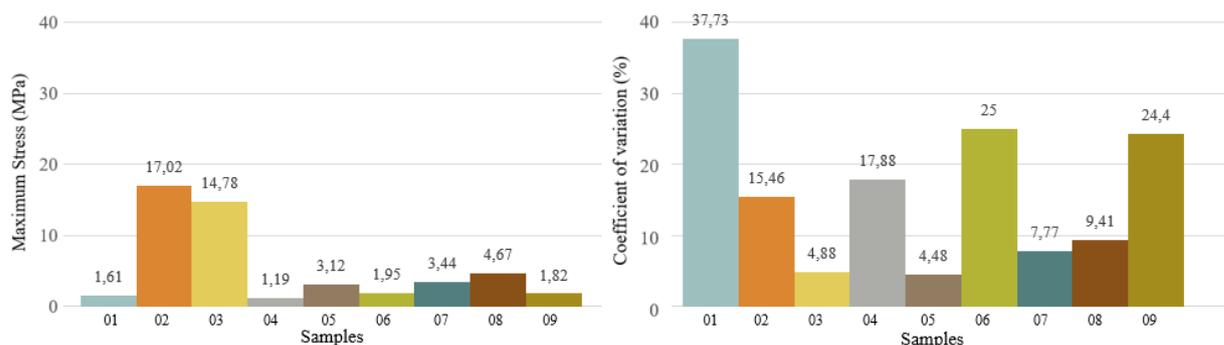
No ensaio de tração, diversas propriedades mecânicas podem ser avaliadas. A zona elástica é onde o material deforma temporariamente sob carga, retornando à sua forma original quando a carga é removida. O limite de escoamento marca a transição para deformações permanentes. À medida que a carga aumenta, a tensão pode aumentar até atingir a tensão máxima de ruptura, onde ocorre a falha abrupta. A curva de deslocamento durante o ensaio de tração reflete o comportamento do material sob tensão longitudinal, permitindo avaliar sua fragilidade ou tenacidade. Esse ensaio é essencial para caracterizar materiais em diversas aplicações, proporcionando insights sobre seu desempenho mecânico.

Tabela 13 - Tabela comparativa entre a tensão máxima das amostras.

| Amostras |                     | Tensão máxima [MPa] |         |        |
|----------|---------------------|---------------------|---------|--------|
|          |                     | Média               | Desv P. | CV (%) |
| 01       | Agave               | 1,61                | 0,60    | 37,73  |
| 02       | Paulownia           | 17,02               | 2,63    | 15,46  |
| 03       | Resina 3002         | 14,78               | 0,72    | 4,88   |
| 04       | Respan              | 1,19                | 0,21    | 17,88  |
| 05       | Resina 3002+20% 106 | 3,12                | 0,14    | 4,48   |
| 06       | Respan 106 20%      | 1,95                | 0,49    | 25,00  |
| 07       | Respan 600 10%      | 3,44                | 0,27    | 7,77   |
| 08       | Respan 600 20%      | 4,67                | 0,44    | 9,41   |
| 09       | Respan mix 20%      | 1,82                | 0,44    | 24,40  |

Fonte: Autor (2022).

Gráfico 3 - Gráfico Comparativo do ensaio de tração mostrando a tensão máxima (MPa) e o coeficiente de variação.



Fonte: Autor (2022).

No ensaio de tração, a madeira de Paulownia apresentou a maior tensão máxima, sendo a mais resistente entre as amostras, seguida pela Resina 3002, que possui um nível semelhante em relação às demais amostras. Dos materiais reforçados com fibras, a composição Respan (20% 600  $\mu\text{m}$ ) é a mais resistente em termos de tensão máxima, devido ao aumento da resistência com a adição de 20% de fibras em comparação com a composição Respan (10% 600  $\mu\text{m}$ ). As demais amostras com fibras de 106  $\mu\text{m}$  não apresentaram ganhos significativos de resistência, sendo destacado que a inserção de fibras de 106  $\mu\text{m}$  em resina elastômera causou uma queda considerável na tensão máxima. Por outro lado, a espuma de poliuretano apresentou um aumento na resistência à tração com a inserção de fibras. Na amostra Respan (20% mix), embora haja controle sobre a quantidade de fibras, não há controle sobre a homogeneidade da disposição das fibras na matriz. O ganho em valores em relação à amostra Respan (100%) é insignificante quando comparado aos valores da amostra Respan (20% 600 $\mu\text{m}$ ).

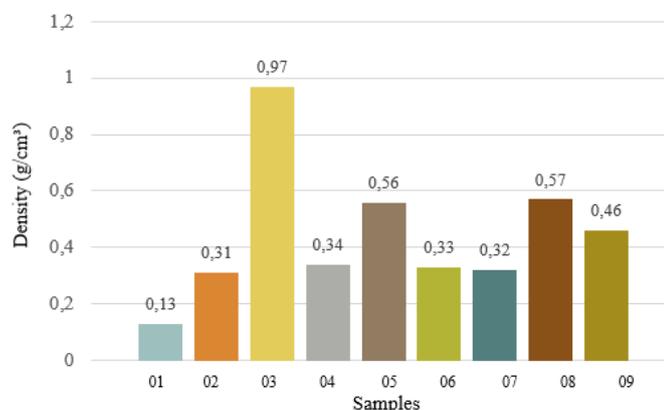
Em comparação com a amostra de Agave, esta apresentou a segunda menor tensão máxima, ficando apenas acima da amostra de Respan. Portanto, o Agave, sendo o material mais leve de todos, ainda é mais resistente do que a resina expansiva pura. Nos materiais naturais (Agave e Paulownia), a Paulownia apresentou uma resistência quase 11 vezes maior que o Agave ao observar a tensão máxima de tração, no entanto, em relação ao peso, a Paulownia é aproximadamente três vezes mais pesada que o Agave. O comportamento do Agave é devido à sua anatomia vegetal, que apresenta a maior dispersão na tensão de tração, o mesmo também ocorreu na flexão.

Verificou-se que a tensão máxima está próxima do ponto de escoamento, na transição da zona elástica para a zona plástica, também existe o próprio ponto de escoamento. As amostras, ao atingirem a tensão máxima, também alcançam a zona plástica, imediatamente após isso, ocorre a ruptura. Dessa forma, as tensões máximas acabaram coincidindo com as tensões de falha. Ao comparar com a Paulownia, que é mais densa, verificou-se que o Agave e os materiais compostos, devido à sua leveza e menor densidade, apresentam baixa resistência à tração de acordo com o comportamento da curva sob tensão.

### 3.7.3 Densidade

A densidade é uma das propriedades mais importantes a serem analisadas em materiais, especialmente aqueles para aplicações estruturais. A densidade é uma propriedade fundamental a ser considerada em relação à leveza e resistência dos materiais. Nesta análise comparativa, foram consideradas amostras de diferentes materiais, e a densidade de cada um foi avaliada juntamente com outras propriedades mecânicas, como tensão máxima (flexão), módulo de elasticidade (flexão) e tensão máxima (tração). A partir dessa análise, foi possível avaliar a relação entre densidade e resistência dos materiais, bem como identificar materiais que apresentam uma combinação equilibrada de propriedades.

Gráfico 4 - Comparativo da densidade das amostras.



Fonte: Autor (2022).

Paula *et al.* (2022) também destacam a relevância da densidade na caracterização de materiais. Suas análises revelaram que a variação nas proporções de espuma, serragem e sisal tem um impacto significativo na densidade dos materiais.

Por exemplo, o compósito com 50% de espuma e 50% de fibras de sisal demonstrou ser mais leve, com uma densidade de 0,45 g/cm<sup>3</sup>, enquanto o compósito com maior teor de serragem e sisal atingiu uma densidade de 0,64 g/cm<sup>3</sup>.

Tabela 14 - Densidades de compósitos de PU mamona e fibras naturais: serragem e Sisal.

| <b>Paula et al. (2022)</b>                                     | <b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b> |
|--|-------------------------------------|
| <i>50% de espuma e 50% de fibras de Sisal ≅ 2mm</i>            | 0,45                                |
| <i>50% de espuma, 37,5% de serragem e 12,5% de Sisal ≅ 2mm</i> | 0,64                                |

Fonte: Paula et al. (2022).

Neste estudo, a amostra com menor densidade é a Agave, com 0,13 g/cm<sup>3</sup>, enquanto a amostra com maior densidade é a Resina 3002 (100%), com 0,97 g/cm<sup>3</sup>. As outras amostras variam em densidade entre esses dois extremos. Outras amostras, como a Paulownia, têm uma densidade de 0,31 g/cm<sup>3</sup>, maior que a amostra de Agave, mas ainda relativamente baixa quando comparada à Resina 3002. Por sua vez, a amostra de Respan (100%) possui uma densidade de 0,34 g/cm<sup>3</sup>, o que a coloca próxima à densidade da amostra de Paulownia. Com base na análise comparativa das densidades das amostras, é possível identificar algumas tendências em relação ao equilíbrio entre leveza e resistência.

A amostra de Agave é a mais leve (0,13 g/cm<sup>3</sup>), mas apresenta uma resistência máxima relativamente baixa (1,61 MPa), indicando potencial como material leve. Isso pode limitar seu uso em aplicações que requerem alta resistência mecânica. No entanto, o Agave pode ser considerado uma opção promissora em aplicações onde a leveza é prioritária e a demanda por resistência mecânica é moderada, como em peças estruturais leves. Por outro lado, a amostra de Paulownia é mais densa (0,31 g/cm<sup>3</sup>), mas possui uma resistência consideravelmente maior (17,02 MPa), indicando um bom equilíbrio entre leveza e resistência. Amostras como Paulownia e resinas puras têm maior resistência à flexão, mas também maior densidade em comparação com Agave. Amostras contendo resinas misturadas com fibras de Agave têm valores intermediários em termos de densidade e resistência à flexão.

Essas análises comparativas podem ser úteis para compreender as características das diferentes amostras em relação à sua leveza e resistência, e podem ser consideradas em futuras aplicações em pranchas de surfe ou outros

artefatos, levando em conta as necessidades específicas de cada aplicação e requisitos de desempenho desejados.

Com base nesses dados, pode-se observar que as amostras de Agave (01) e Resina 3002 (100%) (03) possuem as densidades mais baixas e mais altas em  $\text{g/cm}^3$ , com valores de 0,13 e 0,97, respectivamente. Por outro lado, a amostra de Paulownia (02) possui um valor de densidade de 0,31  $\text{g/cm}^3$ . As amostras de Respan (04) e Resina 3002 com fibras de Agave (05) possuem densidades intermediárias, com valores de 0,34 e 0,56  $\text{g/cm}^3$ , respectivamente.

Em relação à resistência à flexão, a amostra de Paulownia (02) apresenta os maiores valores de tensão máxima (58,75 MPa) e módulo de elasticidade (4,78 GPa), indicando boa capacidade de suportar cargas de flexão. As amostras de Resina 3002 (100%) (03) e Respan (100%) (04) possuem valores mais baixos de tensão máxima de flexão, com valores de 19,42 MPa e 5,06 MPa, respectivamente. As amostras de Respan com fibras de Agave (05 e 06) possuem valores intermediários de tensão máxima de flexão, com valores de 5,60 MPa e 4,42 MPa, respectivamente. Em relação ao módulo de elasticidade na flexão, todas as amostras possuem valores muito baixos, sendo que a amostra de Paulownia (02) se destaca com o valor mais alto de 4,78 GPa.

Em relação à tensão máxima de tração, a amostra de Paulownia (02) apresenta o maior valor, com 17,02 MPa, enquanto a amostra de Respan (10% 600  $\mu\text{m}$ ) (07) apresenta o valor mais baixo, com 3,44 MPa. As outras amostras possuem valores intermediários.

Quando relacionamos esses dados às características de leveza e resistência, podemos observar que a amostra de Agave (01) possui a menor densidade e valores intermediários de resistência, indicando que pode ser uma boa opção para aplicações que requerem materiais leves. A amostra de Paulownia (02) possui uma densidade mais alta em comparação com Agave, mas também apresenta os valores mais altos de resistência, indicando que pode ser uma opção para aplicações que exigem maior resistência mecânica. As amostras de Resina 3002 (100%) (03) e Respan (100%) (04) possuem densidades intermediárias e valores mais baixos de resistência à flexão, o que pode limitar sua aplicação em algumas situações. As amostras de Respan com fibras de Agave apresentam valores intermediários de densidade e resistência à flexão, o que indica que podem ser uma opção interessante para aplicações que exigem um equilíbrio entre leveza e resistência.

### 3.7.4 Ensaio de cisalhamento de adesivos com materiais bioinspirados.

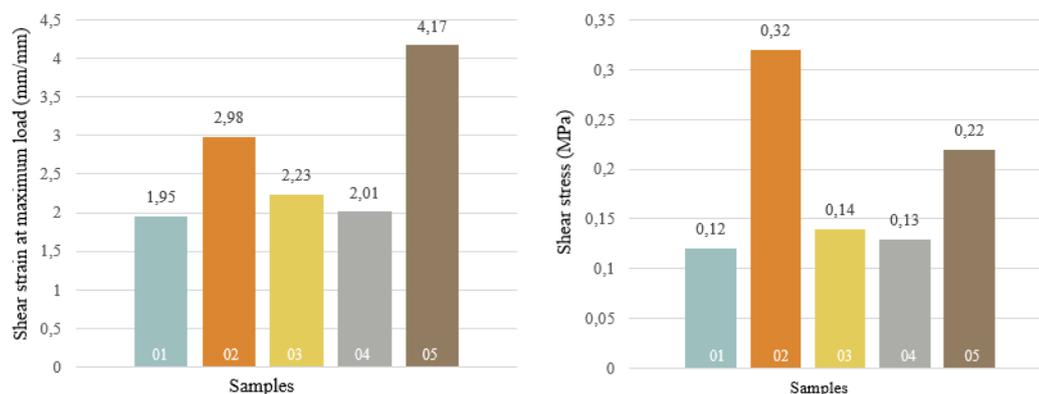
Os ensaios de cisalhamento de juntas coladas realizados apresentam algumas respostas. No teste foram obtidos dados de carga (N) e extensão (mm), e as amostras foram testadas até o ponto de ruptura. Com esses dados, foram obtidas as deformações por cisalhamento na Carga Máxima (mm/mm) e as tensões de cisalhamento (MPa). Os dados são apresentados na Tabela 15, e mostrados em um gráfico comparativo do desempenho das amostras.

Tabela 15 - Dados do teste de cisalhamento de juntas coladas. Carga máxima (N); Extensão máxima (mm); Deformação por cisalhamento (mm/mm) e Tensão de cisalhamento (MPa).

| Amostras                    | Carga máxima (N)                    |               |        | Extensão máxima (mm)         |               |        |
|-----------------------------|-------------------------------------|---------------|--------|------------------------------|---------------|--------|
|                             | Média                               | Desvio Padrão | CV (%) | Média                        | Desvio Padrão | CV (%) |
| 01 Cola PU (100%)           | 586,75                              | 186,93        | 31,86  | 3,78                         | 2,98          | 78,72  |
| 02 Respan (100%)            | 896,04                              | 81,89         | 9,14   | 9,90                         | 1,59          | 16,03  |
| 03 Respan (20% 106 µm)      | 669,94                              | 192,29        | 28,70  | 4,30                         | 2,12          | 49,36  |
| 04 Respan (20% 600 µm)      | 605,65                              | 55,73         | 9,20   | 4,15                         | 1,36          | 32,68  |
| 05 Resina 3002 (20% 106 µm) | 1253,98                             | 206,28        | 16,45  | 6,85                         | 1,97          | 28,74  |
| Amostras                    | Deformação por cisalhamento (mm/mm) |               |        | Tensão de cisalhamento (MPa) |               |        |
|                             | Média                               | Desvio Padrão | CV (%) | Média                        | Desvio Padrão | CV (%) |
| 01 Cola PU (100%)           | 0,12                                | 0,10          | 81,22  | 1,95                         | 0,63          | 32,05  |
| 02 Respan (100%)            | 0,33                                | 0,06          | 16,86  | 2,98                         | 0,27          | 9,16   |
| 03 Respan (20% 106 µm)      | 0,14                                | 0,07          | 50,00  | 2,23                         | 0,64          | 28,55  |
| 04 Respan (20% 600 µm)      | 0,14                                | 0,05          | 33,80  | 2,01                         | 0,18          | 9,03   |
| 05 Resina 3002 (20% 106 µm) | 0,22                                | 0,07          | 29,81  | 4,18                         | 0,69          | 16,49  |

Fonte: Autor (2022).

Gráfico 5 - Comparativo da tensão de cisalhamento (MPa) e deformação por cisalhamento (mm/mm) nos testes de cisalhamento.



Fonte: Autor (2022).

Os dados apresentados permitem uma breve análise comparativa das propriedades dos adesivos testados. Seguem algumas observações:

1 A Resina 3002 (20% 106  $\mu\text{m}$ ) apresentou a maior tensão média de cisalhamento (4,17 MPa), seguida pela Respan (100%) (2,98 MPa) e Respan (20% 106  $\mu\text{m}$ ) (2,23 MPa). A cola de poliuretano teve a menor tensão média de cisalhamento (1,95 MPa).

2 A Resina 3002 (20% 106  $\mu\text{m}$ ) também apresentou a maior deformação média por cisalhamento (0,22 mm/mm), seguida pela Respan (20% 106  $\mu\text{m}$ ) (0,14 mm/mm) e Respan (100%) (0,32 mm/mm). A cola de poliuretano teve a menor deformação média por cisalhamento (0,12 mm/mm).

3 Diferentes tipos de adesivos (resina elastômera, cola de poliuretano e adesivo rígido de poliuretano expandido) podem ter propriedades distintas em termos de resistência adesiva, tempo de cura, resistência à umidade, temperatura de aplicação, flexibilidade e resistência à tração.

4 O tamanho das partículas também pode ser um fator importante na resistência adesiva, com a Resina 3002 e a Respan (20% 106  $\mu\text{m}$ ) apresentando tamanhos de partículas similares, e a Respan (20% 600  $\mu\text{m}$ ) não exibindo uma resistência tão alta quanto a Respan (20% 106  $\mu\text{m}$ ).

A resistência adesiva na união de pranchas de surfe ocas de madeira é afetada pela escolha do adesivo e pelo tamanho das partículas. Respan e Resina 3002 têm alta resistência ao cisalhamento, sendo a Resina 3002 mais adequada para a estrutura interna e a Respan para a união de bordas e outras partes. As amostras de PU apresentaram os valores mais baixos em comparação com as outras amostras.

Respan (20% 106  $\mu\text{m}$ ), Respan (20% 600  $\mu\text{m}$ ) e Resina 3002 (20% 106  $\mu\text{m}$ ) são adequados para a união de pranchas de surfe ocas de madeira devido à boa resistência mecânica e flexibilidade, além de serem produzidos a partir de fontes renováveis e serem não tóxicos. Conclui-se que as resinas de mamona têm grande potencial para substituir materiais tóxicos usados na união de peças de madeira, permitindo maior conformidade com os requisitos de sustentabilidade, conforme os Princípios da Vida (Baumeister, 2014) e a metodologia de biodesign utilizada neste estudo.

### 3.8 APLICAÇÕES E EXPERIMENTAÇÕES EM ARTEFATOS DE SURF COM MATERIAIS BIOINSPIRADOS.

Este tópico se dedica a explorar as possíveis aplicações de materiais bioinspirados em artefatos de surf. A pesquisa envolvendo as resinas de mamona e as fibras de Agave proporcionou insights valiosos sobre como esses materiais podem ser empregados na fabricação de pranchas de surf e quilhas bioinspiradas, com base nas propriedades físicas e mecânicas estudadas. Essa investigação não se limitou a identificar o potencial de um material específico, mas revelou diversas aplicações viáveis. Um dos materiais que se destacou foi o Respan com 20% de fibras de 600  $\mu\text{m}$ , desenvolvido para criar componentes leves, resistentes, capazes de absorver impactos e flexíveis. Esses componentes podem ser utilizados nas bordas das pranchas de surf como alternativa a materiais tradicionais, como a Cortiça. A Figura 162 ilustra o material em processo de moldagem manual.

Figura 162 - Molde manual com uma amostra da composição Respan com 20% de fibras de 600  $\mu\text{m}$ .



Fonte: Autor (2022).

Devido as propriedades de leveza e resistência, assim como, flutuação, também foi pensada uma outra aplicação em quilhas para pranchas de surf como desenvolvimento de artefato bioinspirado com a aplicação da estratégia de leveza e resistência do ponto de vista da estrutura como do material. Foi desenvolvido um protótipo com um dos modelos de quilha paramétricos, o qual foi impresso em uma impressora 3D de resina Elegoo modelo Mars Pro2 com resina de base biológica de soja. A quilha impressa é o núcleo interno, a estrutura de suporte. As partes vazadas com as células de Voronoi são então preenchidas com o material bioinspirado Respan com 20% de fibras de 600  $\mu\text{m}$ . Depois é lixado para nivelar com a estrutura interna, depois laminadas com fibra de vidro e a Resina elastômera 3002, para impermeabilização e aumento da resistência mecânica. Por fim a quilha é lixada e instalada na prancha. A aplicação foi uma forma criativa de integrar os diferentes conceitos abordados na tese. Devido à presença de ar na espuma, quando impermeabilizada a quilha flutua, não afunda se por acaso soltar da prancha. Esta aplicação também é uma forma de abordagem estética atrativa que explora as dimensões sensoriais e bioinspiradas em artefatos de surf.

Figura 163 - Etapas de desenvolvimento de um protótipo de quilha bioinspirada em estruturas celulares com padrão aplicação do padrão de Voronoi com base nas estratégias de leveza e resistência do Agave, e aplicação de material bioinspirado com fibras de Agave e resinas de mamona.



Fonte: Autor (2022).

Outras possibilidades de incorporação dos materiais utilizados na experimentação em artefatos foram exploradas na pesquisa. Tradicionalmente, as pranchas de surf de madeira ou Agave são laminadas com resinas epóxi para garantir a impermeabilização e fornecer o reforço necessário à resistência da prancha. Neste contexto, considerou-se a utilização da resina de mamona elastômera rígida (Resina 3002), que foi aplicada em conjunto com fibra de vidro para a laminação. Realizou-se um teste em madeira de Paulownia para avaliar o aspecto final e a aderência à madeira, o que aparentemente obteve resultados positivos. Isso sugere que é viável laminar uma prancha com essa resina.

Figura 164 - Laminação de fibra de vidro de 4oz em matriz de resina elastômera de mamona (Resina 3002).



Fonte: Autor (2022).

### 3.8.1 Outras experimentações com a fibra de Agave e impressão 3D.

Outras experimentações foram ainda realizadas com objetivo de explorar um pouco mais as possibilidades estéticas e sensoriais bioinspiradas nas texturas da natureza. Os modelos foram impressos na impressora de resina Elegoo modelo Mars Pro 2 com resina fotossensível a base de soja com adição de 3% da fibra de Agave de 40  $\mu\text{m}$ . Esta fibra não foi utilizada nos experimentos nas etapas de ensaios mecânicos, por ser um pó muito fino, entretanto foi misturado na resina fotossensível e enquanto o modelo era impresso e as camadas eram curadas, as partículas suspensas na resina ficam então incorporadas ao material. Provavelmente esta inserção possa alterar as propriedades mecânicas da resina reduzindo sua resistência, entretanto, uma análise tátil sensorial com o acabamento e cura da peça parece muito similar a uma impressão em resina sem cargas, deste modo, os modelos apresentam um aspecto sólido na sua cura. Neste caso este artefato mesmo que tenha perdido alguma porcentagem de sua resistência com relação às propriedades mecânicas, estas podem ser reforçadas com a laminação da quilha com fibra de vidro e resina epóxi, ou até mesmo com a resina elastômera de mamona. As possibilidades

de laminação são muitas. Entretanto a fibra de vidro trás o aspecto transparente valorizando o diferencial estético e atrativo da estrutura com padrão de Voronoi e estética bioinspirada nas texturas do Agave.

Figura 165 - Quilhas impressas em SLA com resina a base vegetal de soja com inserção de carga de fibra de Agave (3% em peso) para obtenção de uma estética bioinspirada nas texturas e fibras do escapo floral do Agave.



Fonte: Autor (2022).

#### 4 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES

A incorporação das estratégias de modelos naturais nos processos de fabricação digital e manufatura representa um grande potencial de inovação em sustentabilidade. Isso abre caminho para a exploração de aplicações em diversos setores e para a criação de artefatos sustentáveis. Informações sobre a anatomia celular do Agave contribuíram sobremaneira para que se atinja um optimum em concepção de estruturas leves e resistentes aliado ao uso de materiais sustentáveis. Com base nestes dados, a escolha do Agave como sistema natural e fonte de bioinspiração estrutural e material se justifica alinhado aos princípios da biomimética e da sustentabilidade na produção de artefatos de surf. Deste modo, a hipótese de

tese foi respondida através de uma abordagem teórica, técnica e metodológica multidisciplinar bioinspirada, onde foi possível sistematizar o processo e dialogar com as áreas de conhecimento envolvidas na pesquisa.

Através do Agave, objeto de estudo desta investigação, foi possível entender porque esse sistema natural é leve e resistente, quais as estratégias biológicas de leveza e resistência da estrutura das suas paredes celulares. Foi verificada a importância de projetar estruturas biomiméticas com base nos padrões de arranjos celulares de estruturas biológicas, além do embasamento em anatomia vegetal e estudo do Agave, com foco nos tipos de células presentes, sua configuração, forma, e composição material.

Os tópicos abordados no referencial bibliográfico permitiram ter uma ampla visão do campo de atuação da biomimética e como analogias bioinspiradas podem contribuir sobremaneira para a sustentabilidade, seja através de processos, estruturas eficientes ou materiais bioinspirados. Também permitiu ter uma ampla visão a respeito de como as tecnologias de fabricação digital podem trazer benefícios e possibilidades de experimentação com diversos materiais com foco na sustentabilidade. O campo do design de materiais também tem contribuído fortemente para exploração de novas possibilidades de desenvolvimento de materiais bioinspirados aliados à fabricação digital em diversos campos de aplicação, incluindo a incorporação de fibras naturais em matrizes de bases biológicas na exploração das propriedades mecânicas de compósitos biodegradáveis. Também foi verificado na literatura que a exploração de estratégias de design computacional com a exploração paramétrica no Grasshopper, permite a realização de emulações bioinspiradas mais fiéis de sistemas naturais. A utilização de diagramas de Voronoi como meio de emulação de padrões de estruturas da natureza também foi verificada, e como esses padrões podem otimizar a eficiência de estruturas mecânicas também aliado à fabricação digital.

A abordagem metodológica em biomimética Biomimicry Thinking do Instituto de Biomimética 3.8 utilizada nesta investigação teve os Princípios da Vida como diretrizes sustentáveis de projeto, guiando o processo de desenvolvimento de projeto e pesquisa associado a métodos de analogia e transferência de função das estratégias biológicas, que foram emuladas em princípios de design auxiliado por processos de modelagem paramétrica e pesquisa de material.

Foi possível ainda, explorar de forma ampla e bioinspirada a manipulação de estruturas paramétricas de padrões de Voronoi. Neste caso não foi uma mera

manipulação deste recurso. Na verdade os diagramas de Voronoi foi usado como uma ferramenta para emulação dos princípios de leveza e resistência do Agave. Com isto foram desenvolvidos três códigos, um para emulação genérica da estratégia do Agave, outro com aplicação no desenvolvimento do esqueleto para pranchas de surf de madeira de construção oca, e um outro para geração de quilhas. Todo o detalhamento apresentado desta fase contribui para se compreender como foram programadas as estratégias de computação paramétrica com base na bioinspiração. E como cada fase foi pensada para se alcançar os objetivos. E com os códigos podem ser gerados infinitos outputs com base nos parâmetros que se deseja explorar.

Ao incorporar algoritmos evolutivos para seleção de opções otimizadas, foi possível obter modelos otimizados com base em uma variedade genética, onde os parâmetros podem ser definidos para se encontrar soluções bastante eficazes. Uma das perguntas do problema desta tese que buscava resposta de quais configurações estruturais atendem aos requisitos de leveza e resistência, e desse modo o algoritmo incorporado ao código apresenta essa configuração da forma mais otimizada. Outro parâmetro que também foi incorporado ao código, permitiu verificar e analisar pontos fragilidade na estrutura de modelos gerados, e como o processo é paramétrico, permite retornar passos sempre que preciso, e selecionar outra possibilidade ou até mesmo correção da fragilidade, que neste foi definido com base no ângulo da curvatura das paredes celulares do artefatos.

Foram abordados diferentes processos de impressão 3D, os quais são apresentados no referencial teórico, e foram os métodos de impressão escolhidos para experimentação e prototipagem dos modelos de estudo. Para as quilhas o processo escolhido foi o SLA devido às dimensões do artefato, disponibilidade de equipamento, rapidez na fabricação, melhor acabamento da impressão, assim como, permite se obter impressão de artefatos mais detalhados e vazados com maior qualidade e possibilidades explorações estéticas diferenciadas. O método de fabricação escolhido para prototipação do esqueleto das pranchas de construção oca foi o método de usinagem por CNC, tecnologia que já está bem consolidada nos processos de construção de pranchas ocas de surf de madeira, seja para usinagem em 2D com cortes bidirecionais, ou nos processos de usinagem 3D através de blocos sólidos, onde a prancha é esculpida. Entretanto, como intuito era trabalhar com estruturas vazadas, foi pensado em utilizar o método de construção oca de pranchas

de surf de madeira, e aplicar a estratégia do Agave na estrutura do esqueleto para otimizar a leveza e resistência dessa parte do artefato.

Outro fator a ser levado em consideração está relacionado ao processo de fabricação, dimensões do artefato e processos adequados ao tipo de aplicação, custos, tempo de produção, dentre outros. O esqueleto da prancha é impresso por usinagem na CNC, alguns fatores podem ser levados em consideração, embora se tenha uma maior otimização na leveza de uma estrutura com uma densidade maior, isto irá refletir em um maior tempo de utilização da máquina e seu gasto energético aumenta, por exemplo. Dentre as opções de otimização das estruturas, estas podem ser balanceadas para que o processo de fabricação se torne mais rápido, alterando a distribuição do padrão de Voronoi para uma menor densidade tornando o processo mais rápido sem comprometer a resistência ou perda de leveza consideráveis. A seleção de determinada opção gerada pela inteligência pode ser guiada pelo equilíbrio de muitas variantes envolvidas quando se pensa na produção do artefato, também levando em consideração os inputs dos parâmetros definidos.

Em relação aos materiais, não foram identificados trabalhos científicos que tenham investigado especificamente as propriedades mecânicas do tecido vegetal do escapo floral do Agave. Portanto, não foi possível realizar comparações diretas dos resultados obtidos com estudos similares. Embora existam numerosos estudos sobre as fibras de sisal provenientes das folhas do Agave, é importante destacar que as características do escapo floral podem diferir significativamente em termos de organização celular, proporção de tecidos, densidade e outros fatores em comparação com as folhas. O escapo floral, muitas vezes subestimado e descartado devido à falta de exploração comercial pela indústria de sisal, pode conter informações valiosas que merecem uma investigação mais aprofundada.

Concluiu-se que as fibras naturais (incluindo as de Agave) podem ser introduzidas no desenvolvimento de materiais compósitos bioinspirados em novos ciclos de produção, e agir como carga de reforço ou de melhoramento de propriedades mecânicas de compósitos poliméricos biodegradáveis, seja na indústria, manufatura ou na fabricação digital. Nesta tese ao incorporar as fibras de Agave nos experimentos concluiu-se que a presença de fibras podem melhorar ou reduzir as propriedades mecânicas dos compósitos, entretanto resultados positivos foram alcançados, embora não se tenha tido êxito na tentativa de produção de um filamento para FFF com fibras de Agave e PLA, e algumas conclusões foram pensadas a

respeito da falta de tratamento das fibras. O que pode ter resultado em um desempenho aquém do que poderia resultar, conforme foi verificado na literatura existente em estudos que comparam a adição de fibras naturais não tratadas em compósitos e com fibras tratadas quimicamente, as que foram tratadas apresentaram melhores resultados. De fato os materiais que foram investigados são materiais classificados como pouco resistentes se comparado com outros materiais desenvolvidos nessa área de estudo. Entretanto o conceito de Leveza e Resistência tratado nesta pesquisa, não diz respeito ao desenvolvimento de um material que seja o mais leve, ou o mais resistente, mas a questão da resistência e da leveza é que independente de qualquer propriedade física ou mecânica de qualquer material, esse determinado material tem uma relação entre seu peso e sua resistência. Portanto não se trata de desenvolver o material mais leve e resistente, e sim realizar estudos e buscar respostas de como esses materiais e estruturas se comportam, um relato de como se comportam dentro desse conceito de leveza e resistência sendo o comportamento das amostras estudados, e como estes podem ser aplicados para as funções específicas conforme as potencialidades de cada material. Por tanto as resinas de mamona trouxeram boas possibilidades de reduzir os impactos ambientais de artefatos de surf bioinspirados e trazer leveza e resistência. As análises dos ensaios mecânicos de tração e flexão mostraram que a adição das fibras de Agave nas dimensões e porcentagens controladas melhoram a resistência e homogeneidade na dispersão das amostras comparadas, assim como foi visto que aumentando o tamanho da fibra, têm-se um ganho na resistência. Nos ensaios de cisalhamento com aplicação dos materiais como adesivos para madeira, estes também mostraram bons resultados em comparação ao adesivo de poliuretano expansivo proveniente de fontes não renováveis e que emitem gases poluentes. Em comparação as resinas de mamona que não são contaminantes e de base biológica, apresentaram melhores resultados.

Em relação aos artefatos explorados e a aplicação dos materiais estudados, estes podem ser aplicados em várias partes e processos no desenvolvimento de uma prancha de surf oca de madeira, em substituição aos materiais como resina epóxi e a cola poliuretana, que são usadas para unir todas as peças e impermeabilizar a prancha. Sendo assim, as composições Resina 3002 e 20% de fibras de 106  $\mu\text{m}$  podem ser aplicadas para colagem do esqueleto nas placas de madeira que revestem a prancha, assim como a composição Respan e 20% de fibras de 600  $\mu\text{m}$  pode ser

aplicado para compor as bordas da prancha e ocasionando ainda a redução de custos de produção, assim como podem ser aplicados nas quilhas como material de preenchimento sem adição de peso extra. Já a Resina 3002 tem potencial de aplicação na laminação da prancha em substituição da resina epóxi. Por fim a fibra de vidro poderia ser substituída por uma fibra natural, de cânhamo, ou de linho, por exemplo, e desse modo obter uma prancha de surf com impactos ambientais mínimos, entretanto, não foi abordado nesta tese e fica como sugestão de estudos e desdobramentos futuros.

De fato muitas outras possibilidades e caminhos poderiam ter sido seguidos, e outros testes realizados, entretanto, foi verificado que os artefatos foram validados através da otimização com algoritmos de inteligência artificial balanceado por parâmetros de verificação de integridade da estrutura/artefato gerado. Assim como, foi verificado nos ensaios mecânicos que o comportamento das amostras atua de forma muito similar ao comportamento mecânico das amostras de Agave. Os materiais compostos por fibras de Agave em matrizes de resina de mamona apresentam grande potencial de aplicação e foram incorporados no projeto de pranchas e quilhas de surf bioinspiradas onde materiais e as estruturas contribuem para o desempenho técnico e ambiental dos artefatos gerados.

Por fim, para sugestão de desenvolvimentos futuros estudos propõe-se a parametrização do shape da prancha e do outline do esqueleto interno, assim como, o shape e o outline das quilhas. O escopo de abordagem desta tese teve recorte de parametrização focado apenas na aplicação da estrutura de Voronoi bioinspirado na estratégia de leveza e resistência, mas no geral os resultados foram alcançados de forma satisfatória.

## REFERÊNCIAS

Ahmar, *et al.* A Methodology for Computational Architectural Design Based on Biological Principles. Computation and Performance – Proceedings of the 31st eCAADe Conference – Volume 1, Stouffs, Rudi and Sariyildiz, Sevil (eds.), Faculty of Architecture, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 18-20 September 2013, pp. 539-548. <https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2013.1.539>. 2013.

Agarwal, B.D.; Broutman, L.J. Analysis and Performance of Fiber Composites, Nova York: John Wiley e Sons, ISBN: 978-81-265-3636-8. 2006.

Akos, G; Parsons, R. Grasshopper primer 3º ed. Studio Mode, LLC. 2014.

Apezato-Da-Glória, Beatriz; Carmello-Guerreiro, Sandra Maria. Anatomia Vegetal. Viçosa: Ed. UFV, 2006.

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

Ashby, M.; Johnson, K. (2011). Materiais e Design: Arte e Ciências da Seleção de Materiais do Design do Produto. 2. ed. Rio de Janeiro: Campus.

ASTM D638. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.

ASTM D790-17. Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials.

Aurenhammer, F. (1991). Voronoi diagrams - a survey of a fundamental geometric data structure. Institute fur Informationsverarbeitung Technische Universitat Graz, Schiet stattgasse 4a, Austria.

Ayrilmis *et al.* Effect of printing layer thickness on water absorption and mechanical properties of 3D-printed wood/PLA composite materials. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology - doi: 10.1007/s00170-019-03299-9. 2019.

Barauna, *et al.* "Design de materiais como uma demanda da ciência e da tecnologia à inovação", p. 4188-4199. In: Anais do 12º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Design [Blucher Design Proceedings, v. 9, n. 2]. São Paulo: Blucher, 2016. ISSN 2318-6968, DOI 10.5151/despro-ped2016-0360

Barbu, M.C.; Buresova, K.; Tudor, E.M.; Petutschnigg, A. "Physical and Mechanical Properties of *Paulownia tomentosa x elongate* Sawn Wood from Spanish, Bulgarian and Serbian Plantations." *Florestas* 2022, 13, 1543. <https://doi.org/10.3390/f13101543>.

Borrega, M., Ahvenainen, P., Serimaa, R. *et al.* (2015). Composition and structure of Balsa (*Ochroma pyramidale*) wood. *Wood Science and Technology*, 49(3), 403-420. <https://doi.org/10.1007/s00226-015-0700-5>

Barros, A. M. Fabricação Digital: sistematização metodológica para o desenvolvimento de artefatos com ênfase em sustentabilidade ambiental. Dissertação de mestrado. PPGD – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011.

Barros, K.D.S. Identification of the Environmental Impacts Contributors Related to the Use of Additive Manufacturing Technologies. Ph.D. Thesis, Université Grenoble Alpes (ComUE), Saint-Martin-d'Hères, France, 2017.

Baumeister, D. (2014). Biomimicry Resource Handbook. A seed of Best Practices. Ed. Biomimicry 3.8 - Missoula, Montana.

Benyus, J. (2003) Biomimética: Inovação inspirada pela natureza. Ed. Pensamento-Cultrix.

Bismarck, A.; Mohanty, A. K.; Askargorta, I. A.; Czaplá, S.; Misra, M.; Hinrichsen, G.; Springer, J. Surface characterization of natural fibers; surface properties and the water up-take behavior of modified sisal and coir fibers. Green Chemistry, v. 3, p. 100-107, 2001. doi:10.1039/B100365H.

Blüchel, Kurt G. Biônica: como podemos usar a engenharia da natureza a nosso favor. 1 ed. São Paulo: PHL, 2009.

Bonsiepe, G. (1978). Teoria y Práctica del Diseño Industrial. Barcelona, Editorial Gustavo Gilli.

Byrne, G.; Dimitrov, D.; Monostori, L.; Teti, R.; Houten, F.; Wertheim, R. (2018). Biologicalisation: Biological Transformation in Manufacturing. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. Volume 21, May 2018, Pages 1-32. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2018.03.003>

Callister, William D. Ciência e engenharia dos materiais – Uma introdução. 5ed. Rio de Janeiro, LTC Ed. 2000.

Cangemi, J. M., A. M. Santos, S. Claro Neto, and G. O. Chierice. Biodegradation of polyurethane derived from castor oil. Polímeros: Ciência e Tecnologia 18 (3):201–06. 2008 doi:10.1590/S0104-14282008000300004.

Carneiro, J. Caracterização de acessos de sisal usando descritores da planta e da fibra. Tese doutorado. Programa de pós-graduação em recursos genéticos vegetais - Universidade Estadual de Feira de Santana - BA. 2017.

Celani, G., Pupo, R. T. Prototipagem rápida e fabricação digital para arquitetura e construção: Definições e estado da arte no Brasil. Cadernos de pós-graduação em arquitetura e urbanismo – Unicamp. Campinas, 2008.

Chen, R., Wan, Y., Wu, W., Yang, C., He, J.-H., Cheng, J., Chen, Y. A lotus effect-inspired flexible and breathable membrane with hierarchical electrospinning micro/nanofibers and ZnO nanowires. Materials & Design, 162, 246–248. 2019.

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

Compton, B.G., Lewis, J.A.: 3D-printing of lightweight cellular composites. *Adv. Mater.* 26, 5930–5935 (2014).

Conab - Companhia Nacional de Abastecimento. Conjuntura Mensal. 2018. Acesso em: 11/2018 Disponível em: [https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuário-e-extrativista/analises-do-mercado/historico-mensal-de-fibras/item/download/22582\\_c625a2e446783a366275711d8d78f08d](https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuário-e-extrativista/analises-do-mercado/historico-mensal-de-fibras/item/download/22582_c625a2e446783a366275711d8d78f08d)

CreMASCO, M. A. (2012). Operações Unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos. Blucher, 423p.

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

Daya, T. Facilitating Sustainable Material Decisions: A Case Study of 3D Printing Materials. PhD. thesis. UC Berkeley Electronic Theses and Dissertations. 2017

Delfis, C. Bav Boards. Disponível em: <https://bav-boards.de/>. Acesso em: 12 nov. 2022.

Dogu, D.; Tuncer, F.D.; Bakir, D.; Candan, Z. Characterizing Microscopic Changes of Paulownia Wood under Thermal Compression. *BioResources*, 2017, vol. 12, pp. 5279–5295.

Esteves, B., Cruz-Lopes, L., Viana, H., Ferreira, J., Domingos, I., & Nunes, L. J. R. (2022). The Influence of Age on the Wood Properties of *Paulownia tomentosa* (Thunb.) Steud. *Forests*, 13(5), 700. <https://doi.org/10.3390/f13050700>

Gil, A. C. Métodos e técnicas de pesquisa social. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

Gleich, A.; Pade, C.; Petschow, U.; Pissarskoi, E. Potentials and Trends in Biomimetics. Springer. New York. 2002.

Gonçalves, F. G., Segundinho, P. G. de A., Paes, J. B., Chaves, I. L. S., Martins, R. S. F., Santiago, S. B., Souza, S. F., Silva, L. F., Oliveira, R. G. E., & Oliveira, J. G. L. (2019). Eficiência da colagem em madeira de kiri japonês (*Paulownia tomentosa*). *Revista de Ciências Agroveterinárias*, 18(1), 95-102. DOI: 10.5965/223811711812019095.

Gondim, T. M. S.; Souza, L. C. Caracterização de Frutos e Sementes de Sisal - Circular técnica 127 - Embrapa, Campina Grande, 2009.

Grainsurfboards. Disponível em: <https://grainsurfboards.com/>. Acesso em: 5 jan. 2023. Growblanks Surfboards. Disponível em: <https://growblanks.com/>. Acesso em: 10 jan. 2023.

Guimarães, A. M. Novo conceito de juntas adesivas utilizando laminados de fibras e metal. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica e Gestão Industrial) - Instituto Politécnico de Viseu, Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, 2016. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10400.19/3319>.

Howard, J. Grow Your Own Board: Agave Surf Environmentally Friendly Concept to the Surfboard Business <https://www.sanclementetimes.com/grow-board-agave-surf-environmentally-friendly-concept-surfboard-business/>. 2018. Acessado em 05/01/2023.

Helms, M., Swaroop, S. V., & Goel, A. K. (2009). Biologically inspired design: process and products. Elsevier, 606-622. (2009)

Holanda, E. B. N. Morfologia e propriedades mecânicas da fibra de sisal unidirecional e em sobreposição de compósito com resina epóxi. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2013.

Hsuan-Na, T. Design: Conceitos e Métodos. Ed. Blucher. São Paulo, 2018.

Imani, M.; Donn, M.; Vale, B. Biomimicry as Innovation: A Systematic Review. Back to the Future: The Next 50 Years. In Proceedings of the 51st International Conference of the Architectural Science Association (ANZAScA), Wellington, New Zealand, 29 November–2 December. 2017.

iPaulownia. 2023. Disponível em: <https://www.ipaulownia.com/en/> Acesso em: 25/08/2023.

ISSG - Global Invasive Species Database. Species profile: *Agave sisalana*. <http://www.iucngisd.org/gisd/speciesname/Agave+sisalana>. Acessado em 20/04/2020.

ISO (18458-2015). Biomimetics — Terminology, concepts and methodology. 2015. ISO 527-1. Plastics - Determination of tensile properties - Part 1: General principles. 2019.

Jakubowski, M. (2022). Cultivation Potential and Uses of Paulownia Wood: A Review. *Forests*, 13(5), 668. <https://doi.org/10.3390/f13050668>

Jesus, José Manoel Henriques de. Estudo do adesivo poliuretano à base de mamona em madeira laminada colada (MLC). 2000. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Ciência e Engenharia de Materiais, University of São Paulo, São Carlos, 2000. doi:10.11606/T.88.2016.tde-16092016-161024

Johnson, *et al.* Recent advances in biomimetic sensing technologies. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 367(1893), 1559–1569. doi:10.1098/rsta.2009.0005. 2009

Kalia, S.; Kaith, B. S.; Kaur, I. Pretreatments of natural fibres and their application as reinforcing material in polymer composites - a review. *Polym Eng Sci*, v. 49, p. 131-135, 2009.

Kapsali, V. Biomimetics for Designers - Applying Nature's Processes & Materials in the Real World. Ed. James & Hudson, London, 2016.

Knippers J. Building and Construction as a Potential field for the Application of Modern Bio mimetic Principles. In International Biona Symposium. Stuttgart 2009

Koabär Surf/Skate. Disponível em: <https://koabaer.de/>. Acesso em: 12 nov. 2022.

Koman, S.; Feher, S. Physical and mechanical properties of Paulownia clone in vitro 112. Eur. J. Wood Prod. v. 78, p. 421–423, 2020. DOI: 10.1007/s00107-020-01497-x.

Kopparthy, S.; Netravali, A. (2021) Review: Green composites for structural applications. Composites Part C: Open Access, Volume 6, 100169, ISSN 2666-6820, <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100169>.

Lachowicz, H.; Giedrowicz, A. Características das propriedades técnicas da madeira de Paulownia COTE-2. Sylwan, v. 164, p. 414-423, 2020.

Lakatos, E. M.; Marconi, M. de A. Fundamentos de metodologia científica. 6. ed. 5. reimp. São Paulo: Atlas, 2007.

Leidenfrost, D. Development of a Nature Inspired Hull Structure for a 46m Sailing Yacht. Master thesis. Department: Naval Architecture and Ocean Engineering. Bremen, 2015.

Leite, R.; Fernandes A.; Rangel, B.; Alves, J. PLAegg - Composto Verde de Casca de Ovo e Ácido Poliláctico. Mater Circ Econ 3, 22 <https://doi.org/10.1007/s42824-021-00032-4>. 2021.

Lepora, N. F.; Verschure, P.; Prescott, T. J. The state of the art in biomimetics. Bioinspiration & Biomimetics, 8(1), 013001–. doi:10.1088/1748-3182/8/1/013001. 2013.

Lima, Marco Antonio M. Introdução aos materiais e processos para designers. Rio de Janeiro. Ciência Moderna LTDA Ed. 2006;

Lopes, Rodrigo Aranha Pereira - Computational strategies applied to product design: a surfboard study. - Lisboa: FA, 2018. Dissertação de Mestrado.

Modelab.Design. Disponível em: <https://www.modelab.design/>. Acesso em: 4 ago. 2022.

Maier, M.; Siege, D L.; Thoben, K.-D.; Niebuhr, N.; Hamm, C. Transfer of Natural Micro Structures to Bionic Lightweight Design Proposals – Journal of Bionic Engineering, v. 10, ed. 4, p. 469-478, 2013

Marcus, B. The Surfboard Art, Styer, Stoke. MBI Publishing Company. Minneapolis. 2007.

Markose *et al.* (2022). Design and Fabrication 3D Printer. International Journal of Research Publication and Reviews, Vol 3, no 5, pp 463-467, Maio, 2022. ISSN 2582-7421 - <https://doi.org/10.55248/gengpi>

Martin, A.; Martins. M.; Mattoso, L.; Silva, O. Caracterização química e estrutural de fibra de sisal da variedade *Agave sisalana* - Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 19, nº 1, p. 40-46, SP. 2009.

Martins, M A.; Kiyohara, P. K.; Joeques, I. Scanning electron microscopy study of raw and chemically modified sisal fibers. 94(6), 2333–2340. doi:10.1002/app.21203 .2004. McDonough, W.; Braugart, M. Cradle to cradle: criar e reciclar ilimitadamente. São Paulo: 2013, Editorial Gustavo Gili. 2013.

McGregor, S. L. Transdisciplinarity and biomimicry. Transdisciplinary Journal of Engineering & Science, 4, 57-65. Doi: 10.22545/2013/00042. 2013.

Müller, R.; Abaid, N.; Boreyko, J. B.; Fowlkes, C.; Goel, A. K.; Grimm, C.; Jung, S.; Kennedy, B.; Murphy, C.; Cushing, N. D.; Han, J.(2018). Biodiversifying Bioinspiration. Bioinspiration & Biomimetics - IOP Science, Volume 13, Number 5. doi: 10.1088/1748-3190/aac96a

Munari, Bruno. Das coisas nascem as coisas. São Paulo, Martins Editora. 1981.

Mwaikambo, L. & Ansell, M. Chemical modification of hemp, sisal, jute, and kapok fibers by alkalization. Journal of Applied Polymer Science, 2002. 84(12), 2222-2234. <https://doi.org/10.1002/app.10460>

Neira, D. S. M. Fibras de Sisal (*Agave sisalana*) como Isolante Térmico de Tubulações. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Natal, RN, 2005.

Neves de Sá, D. Avaliação do potencial de *Paulownia sp.* para produção de biomassa e de madeira em Portugal (Dissertação de Mestrado em Engenharia Florestal). Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 2022.

Neto, Israel L. C.; MARTINS, F. M.; MACHADO, F. Anatomia dos órgãos vegetativos de *Agave sisalana* PERRINE ex EN-GELM (AGAVACEAE) Revista Caatinga, Mossoró, v. 25, n. 2, p. 72-78, mar.-jun, 2012.

Nkandu & Alibaba. Biomimicry as an Alternative Approach to Sustainability. Bulletin of the Polytechnic Institute of Jassy, CONSTRUCTIONS. ARCHITECTURE Section, vol. 8, Jan. 2018, doi:10.5923/j.arch.20180801.01

Nowak, A. (2015). Application of Voronoi diagrams in contemporary architecture and town planning - Challenges of Modern Technology. vol. 6, no. 2. 30-34

Nultsch, W. Botânica geral. 10.ed. Porto Alegre: ArtMed, 2000.

Öncel, A; Yaman, U. Generation of Optimized Voronoi Based Interior Structures for Improved Mechanical Properties, *Procedia Manufacturing*, Volume 38, Pages 42-51, ISSN 2351-9789. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.006>. 2019.

Oxman, N. Material-based design computation. Thesis (Ph.D.)-Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Architecture, 2010.

Oxman, N.; Ortiz, C.; Gramazio, F.; Kohler, M. *Computer-Aided Design*. Elsevier, Volume 60. 2015.

Papanek, Victor. *Design for the real world*. New York Ed. Bantam books, 1971.

Paula, C. R. P.; Trianoski, R.; Azevedo, E. Development and characterization of sawdust and sisal fiber reinforced vegetable based polyurethane foam hybrid composites. *Journal of Natural Fibers*, v. 19, n. 9, p. 3265-3274, 2022. DOI: 10.1080/15440478.2020.1841067.

Pawlyn, M. *Biomimicry in architecture*. Routledge. (2016).

Pokojski, W. & Pokojska, P. Voronoi diagrams – inventor, method, applications *Polish Cartographical Review*, vol.50, no.3, and pp.141-150. 2018. <https://doi.org/10.2478/pcr-2018-0009>

Prodanov, C.; Freitas, E. *Metodologia do trabalho científico [recurso eletrônico]: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico*. – 2. ed. – Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

Queiroz, N., Rattes, R., Araújo, R. *Biônica e Biomimética no Contexto da Complexidade e Sustentabilidade em Projeto*. In: *Design Contexto: ensaios sobre design, cultura e tecnologia - Design & Complexidade*. Org. Amilton Jose Vieira de Arruda. Vol. 1. Cap.7. p.127-144. Ed. Universitária: Recife – PE, 2015.

Rael, R. & Fratello, V. *Printing Architecture - Innovate Recipes for 3D printing - of emerging objects*. Princeton Architectural Press; Illustrated edition. 2018.

Rattes, R. *Biomimética aplicada ao Metadesign: Geração de Máquinas Abstratas com base no estudo do Mandacaru*. Dissertação para obtenção de Grau de Mestre em Design. Universidade Federal de Pernambuco. Recife. 2015

Raven, P.H., Evert, R.F. & Eichhorn, S.E. *Biologia Vegetal*, 7a ed. Coord. Trad. J.E.Kraus. Editora Guanabara Koogan, Rio de Janeiro. 2007.

Rao, R. *Biomimicry in Architecture*. *International Journal of Advanced research in Civil, Structural, Environmental and Infrastructure Engineering and Developing*, 1(3), 101-107. ISSN: 2320-723X. 2014.

Reed, P. A paradigm shift: biomimicry: biomimicry is a new way of linking the human-made world to the natural world. *The Technology Teacher*, vol. 63, no. 4, Dec. 2003, pp. 23.

Reap, J.; Baumeister, D.; & Bras, B. "Holism, Biomimicry and Sustainable Engineering." Proceedings of the ASME 2005 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Energy Conversion and Resources. Orlando, Florida, USA. November 5–11, 2005. pp. 423-431. ASME. <https://doi.org/10.1115/IMECE2005-81343>

Sapuan, S.M.; *et al.* Mechanical properties of woven banana fiber reinforced epoxy composites. *Mat. Des.* v. 27, pag. 689-693. 2006

Seely, J. C. K. Digital fabrication in the architectural design process. Dissertação (Master of Science in Architecture Studies) - Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Architecture, Massachusetts. 2004.

Schumacher, P. "Patrik Schumacher on parametricism – 'Let the style wars begin' 2010." Disponível em: <https://www.architectsjournal.co.uk/practice/culture/patrik-schumacher-on-parametricism-let-the-style-wars-begin>. Acesso em maio de 2021.

Shapediver. Disponível em: <https://shapediver.com/>. Acesso em: 10 dez. 2022.

Silva, R. V. Compósito de resina poliuretano derivada de óleo de mamona e fibras vegetais. Tese doutorado. Universidade de São Paulo, São Carlos 2003.

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

Soares & Arruda (2018). Novas estratégias da biomimética: as analogias no biodesign e na bioarquitetura. *Mix Sustentável*. Florianópolis. v.4 - n.1 - p.73-82 – março.

Stern, K. R.; Bidlack, J.; Jansky, S. *Introductory Plant Biology*. McGraw-Hill Comp., 2010.

Stuart, A. R. Towards High-Performance Bioinspired Composites. , 24(37). doi:10.1002/adma.201201471. 2012.

Suinaga, F. A. *et al.* Cultivo de sisal na região semi-árida do Nordeste brasileiro. Campina Grande: Embrapa Algodão. (Sistema de Produção, 5). 2006.

Surflin (2016). Disponível em: <https://www.surflin.com>. Acesso em: 10 dez. 2022

Taiz, L.; Zeiger, E. *Fisiologia vegetal*. Porto Alegre: Artmed 2004

Tedeschi, A.. *AAD Algorithms-Aided Design. Parametric strategies using grasshopper*. ed. Le Penseur. 2014

Ulysséa, M., Silvestro, M.: Pranchas de Surf Ambientalmente Corretas, Utilizando Madeira da Agave, Espécie Exótica e Invasora de Vegetação Nativa Brasileira. 1º Congresso de Inovação, Tecnologia e Sustentabilidade - Santa Catarina, 2010.

Velarde *et al.* (2021). Mechanical and Physicochemical Properties of 3D-Printed Agave Fibers/Poly(lactic) Acid Biocomposites. *Materials* 2021, 14, 3111. <https://doi.org/10.3390/ma14113111>

Vincent, J.; Mann, D. Systematic technology transfer from biology to engineering. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 360(1791), 159–173. doi:10.1098/rsta.2001.0923. 2002.

Wahl, D. C. Bionics vs. biomimicry: from control of nature to sustainable participation in nature. In C. A. Brebbia (Ed.), *Design and Nature III: Comparing Design in Nature with Science and Engineering*, v. 87. P.289-298, WIT Press, 2006.

Weber, D. David Weber Surfboards. Disponível em: <https://davidweber.com.br/br/>. Acesso em: 12 dez. 2022.

Webshapingbay. Disponível em: <https://www.webshapingbay.com/>. Acesso em: 10 dez. 2022.

Wimmer, R.; Koddenberg, T.; Steyrer, B. 3D Printing and Wood. *International Conference Wood Science and Engineering in the Third Millennium - ICWS*, DOI: 10.13140/RG.2.1.2483.6563. 2015.

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

Zari, M. P. Biomimetic Approaches to Architectural Design for Increased Sustainability. *Sustainable Building. Conference*, Auckland. 2007.

Ziemińska, K. Wood under the microscope. *Arnoldia*, v. 76, n. 2, p. 18-23, 2018. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/26604240>. Acesso em: 14/09/2023

Zhu, Z. H., *et al.* *Paulownia in China: cultivation and utilization*. Beijing: Chinese Academy of Forestry. 65p. 1986. Disponível em: <https://idl-bnc-idrc.dspacedirect.org/bitstream/handle/10625/8226/71235.pdf?sequence=1>. Acesso em 24/08/2023. ISBN 9971-84-546-6

## BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

Angrizani, C.; Vieira, C.; Zattera, A.; Freire, E. Influência do comprimento da fibra de sisal e do seu tratamento químico nas propriedades de compósitos com poliéster. 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Foz do Iguaçu, PR, 2006.

Annandarajah C, Li P, Michel M, Chen Y, Jamshidi R, Kiziltas A, Hoch R, Grewell D, Montazami R. Study of Agave Fiber-Reinforced Biocomposite Films. *Materials*; 12(1):99. <https://doi.org/10.3390/ma12010099>. 2019.

Ashwath, M.N.; Deepthi Dechamma, N.L.; Dalip, Singh; Lalitkumar L. M. Biomimetics: An Approach to Enhance Sustainability - An Overview. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)* ISSN: 2321-9653; Volume 9 Issue VII July. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2021.36947>. 2021.

Bianciardi *et al.* Biomimicry thinking: methodological improvements and practical implementation. *Bioinspired, Biomimetic and Nanobiomaterials* 6:2, 87-101 - <https://doi.org/10.1680/jbibn.16.00007> 2017.

Bianciardia, A.; Becattinib, N.; e Cascinib, G. How would nature design and implement nature-based solutions? *Nature-Based Solutions* Volume 3, December - <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2022.100047>. 2023

Bhushan, B. Lessons from nature – an overview. Disponível em: <http://rsta.royalsocietypublishing.org> 2009

Correa, D.; Poppinga, S.; Mylo, M.; Westermeier, A.; Bruchmann, B; Menges, A.; Speck T. 4D pine scale: biomimetic 4D printed autonomous scale and flap structures capable of multi-phase movement. *Phil. Trans. R. Soc. A* 378: 20190445. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2019.0445>. 2020.

Diegel, O., Kristav, P., Motte, D., & Kianian, B. Additive Manufacturing and its Effect on Sustainable Design. *Environmental Footprints and Eco-Design of Products and Processes*, 73–99. doi:10.1007/978-981-10-0549-7\_5 2016.

Ferreira, I.; Machado, M.; Alves, F.; Marques, A. A review on fibre reinforced composite printing via FFF. *Rapid Prototyping Journal*, 25(6), 972–988. doi:10.1108/rpj-01-2019-0004. 2019.

Fernhaber, S. A. & Alyssa Y. S. Biomimicry: New insights for entrepreneurship scholarship. *Journal of Business Venturing Insights*, 12(), e00137–. doi:10.1016/j.jbvi.2019.e00137 2019.

Gesser, J. *et al.* Desenvolvimento e Construção de uma Fresadora CNC de Baixo Custo Destinada à Confecção de Pranchas de Surf. In: *Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricacao--COBEF, Estancia de Sao Pedro, SP, Brasil*. 2007.

Gopal M, Lemu HG, Gutema EM. Sustainable Additive Manufacturing and Environmental Implications: Literature Review. *Sustainability*; 15(1):504. <https://doi.org/10.3390/su15010504>. 2023

Júnior, W.; Bressan, F.; Palombini, F. A importância do STEAM frente aos desafios da formação do ensino superior e da pesquisa multidimensional em Design. *Estudos em Design*. 29. 116-130. 10.35522/eed.v29i1.1152. 2021.

Kariz, M., Sernek, M.; Kuzman, M.K. Use of wood powder and adhesive as a mixture for 3D printing. *Eur. J. Wood Prod.* 74, 123–126. <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0987-9>. 2016.

Liebrand, T. 3D printed fiber reinforced lignin: Exploring the options to use wood in an additive manufacturing process. Master thesis. TU Delft Architecture and the Built Environment, Delft University of Technology. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:2856a86c-d862-48b1-924e-1f3ce74647b3>. 2018.

Lopes, S. C. Avaliação de um material compósito polimérico bioinspirado reforçado com fibra de bagaço de cana-de-açúcar. 2019. 106f. Dissertação (Mestrado em Agroenergia) – Universidade Federal do Tocantins, Programa de Pós-Graduação em Agroenergia, Palmas, 2019.

Marques de Sá, A.; Viana, D. Design e Biomimética: uma revisão sistemática da literatura. DOI: 10.13140/RG.2.2.18766.208082020. 2020.

Matsuzaki, R. *et al.* Three-dimensional printing of continuous-fiber composites by in-nozzle impregnation. *Sci. Rep.* 6, 23058; doi: 10.1038/srep23058 2016.

Murr, L. E. Biomimetics and Biologically Inspired Materials. *Handbook of Materials Structures, Properties, Processing and Performance*, 521–552. doi:10.1007/978-3-319-01815-7\_30. 2015.

Pauw I. Nature-Inspired Design - Strategies for Sustainable Product Development. PhD thesis Delft University of Technology, Delft, the Netherlands. 2015.

Rosada Silva, I. C.; Freire de Oliveira, A. K. Ecocompósito de resina vegetal e resíduos de fibra de piaçava: Estudos de usinagem e sensorialidade para aplicações no campo do design. *Design e Tecnologia*, 11(23), 24-37. <https://doi.org/10.23972/det2021iss23pp24-37>. 2021.

Rowland, R. Biomimicry step-by-step. *Bioinspired Biomimetic. Nanobiomaterials.*, 6, 102–112. [https://doi.org/10.1680/jbibn.16.00019\\_2017](https://doi.org/10.1680/jbibn.16.00019_2017).

Serra-Parareda, F.; Vilaseca, F.; Espinach, F.X.; Mutjé, P.; Delgado-Aguilar, M.; Tarrés, Q. Stiffening Potential of Lignocellulosic Fibers in Fully Biobased Composites: The Case of Abaca Strands, Spruce TMP Fibers, Recycled Fibers from ONP, and Barley TMP Fibers. *Polymers* 2021, 13, 619. <https://doi.org/10.3390/polym13040619>

Tončíková, Z. & Csúzová, K. The Emulation Of Biomimetic Properties Of Wood By Creating A Database Of Abstracted Design Principles *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen*, 64(2): 97–108, Zvolen, Technical University in Zvolen 2022. DOI: 10.17423/afx.2022.64.2.10 97

Yu, Zhi-Long; Yang, Ning; Zhou, Li-Chuan; Ma, Zhi-Yuan; Zhu, Yin-Bo; Lu, Yu-Yang; Qin, Bing; Xing, Wei-Yi; Ma, Tao; Li, Si-Cheng; Gao, Huai-Ling; Wu, Heng-An; Yu, Shu-Hong. Bioinspired polymeric woods. *Science Advances*, 4(8), eaat7223–. 2018. doi:10.1126/sciadv.aat7223.

Zhang *et al.* Thermal-comfort design of personalized casts. In *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '17)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 243–254. 2017. <https://doi.org/10.1145/3126594.3126600>

## APÊNDICE A – ENSAIO FLEXÃO

### Agave

**Marca:** Amostra colhida em meio natural - (Campina Grande, Nordeste do Brasil)

**Material:** Parênquima do escapo floral de *Agave sisalana* perrine.

**Condição:** Provetes usinados manualmente.

**Peso da amostra:** 0,73 g (média)

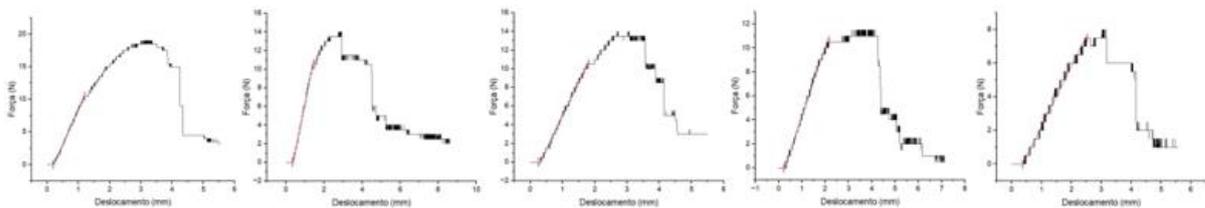
Dados das medições, tensão máxima, módulo de elasticidade e gráficos das amostras de Agave.



| Amostras | Eixo | Medição 1 [mm] | Média [mm] | Massa [g] |
|----------|------|----------------|------------|-----------|
| AM1      | x    | 128,66         | 128,66     | 0,74      |
|          | y    | 3,61           | 3,61       |           |
|          | z    | 12,27          | 12,27      |           |
| AM2      | x    | 128,79         | 128,79     | 0,76      |
|          | y    | 3,53           | 3,53       |           |
|          | z    | 11,95          | 11,95      |           |
| AM3      | x    | 128,08         | 128,08     | 1,01      |
|          | y    | 3,45           | 3,45       |           |
|          | z    | 12,55          | 12,55      |           |
| AM4      | x    | 128,57         | 128,57     | 0,63      |
|          | y    | 4,27           | 4,27       |           |
|          | z    | 12,17          | 12,17      |           |
| AM5      | x    | 128,21         | 128,21     | 0,54      |
|          | y    | 3,48           | 3,48       |           |
|          | z    | 11,81          | 11,81      |           |

| Desvio padrão |             |
|---------------|-------------|
| X             | 0,30326556  |
| Y             | 0,341935666 |
| Z             | 0,287402157 |
| Massa         | 0,177002825 |

| Agave               | 1     | 2    | 3    | 4    | 5    | Média | Desvio padrão |
|---------------------|-------|------|------|------|------|-------|---------------|
| Tensão max.         | 10,96 | 8,67 | 8,65 | 4,78 | 5,16 | 7,64  | 2,62          |
| Módulo elasticidade | 1,07  | 1,12 | 0,81 | 0,35 | 0,42 | 0,75  | 0,36          |



Fonte: Autor (2022).

## Paulownia

**Marca:** iPaulownia - Espanha

**Material:** Madeira de *Paulownia elongata/fortunei* (Hybrid Paulownia tree Cotevisa 2®)

**Condição:** Provetes usinados manualmente.

**Peso da amostra:** 2,30 g (média)

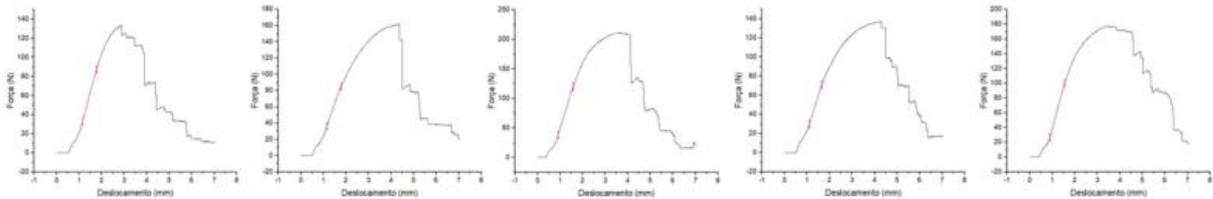
Dados das medições, tensão máxima, módulo de elasticidade e gráficos das amostras de madeira Paulownia.



| Amostras | Eixo | Medição 1 [mm] | Média [mm] | Massa [g] |
|----------|------|----------------|------------|-----------|
| AM1      | X    | 129,28         | 129,28     | 2,04      |
|          | Y    | 4,55           | 4,55       |           |
|          | Z    | 12,75          | 12,75      |           |
| AM2      | X    | 128,62         | 128,62     | 2,36      |
|          | Y    | 4,51           | 4,51       |           |
|          | Z    | 12,53          | 12,53      |           |
| AM3      | X    | 127,87         | 127,87     | 2,62      |
|          | Y    | 4,53           | 4,53       |           |
|          | Z    | 12,74          | 12,74      |           |
| AM4      | X    | 128,52         | 128,52     | 2,09      |
|          | Y    | 4,49           | 4,49       |           |
|          | Z    | 12,19          | 12,19      |           |
| AM5      | X    | 128,59         | 128,59     | 2,41      |
|          | Y    | 4,48           | 4,48       |           |
|          | Z    | 13,00          | 13,00      |           |

| Desvio padrão |             |
|---------------|-------------|
| X             | 0,499829971 |
| Y             | 0,028635642 |
| Z             | 0,302605354 |
| Massa         | 0,239645572 |

| Paulownia           | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | Média | Desvio padrão |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------|
| Tensão max.         | 46,66 | 58,46 | 74,45 | 51,43 | 62,76 | 58,75 | 10,75         |
| Módulo elasticidade | 4,28  | 3,92  | 6,09  | 3,94  | 5,65  | 4,78  | 1,02          |



Fonte: Autor (2022).

## Resina 3002

**Marca:** Unipol - Brasil

**Material:** Resina elastômera rígida de mamona bicomponente

**Condição:** Proveteis confeccionados em molde de silicone aberto.

**Peso da amostra:** 5,62 g (média).

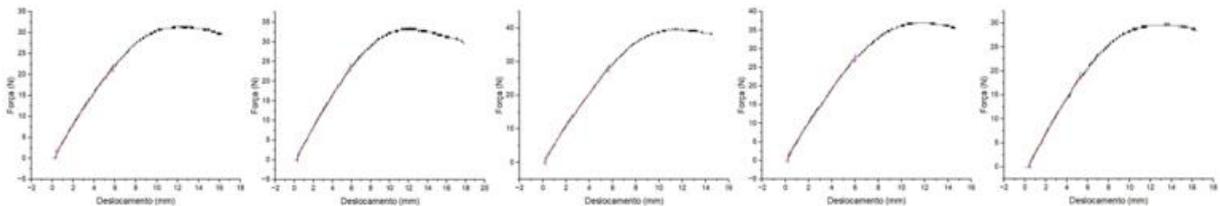
Dados das medições, tensão máxima, módulo de elasticidade e gráficos das amostras de resina elastômera 100%.



| Amostras | Eixo | Medição 1 [mm] | Média [mm] | Massa [g] |
|----------|------|----------------|------------|-----------|
| AM1      | X    | 126,60         | 126,60     | 5,60      |
|          | Y    | 3,57           | 3,57       |           |
|          | Z    | 12,66          | 12,66      |           |
| AM2      | X    | 126,85         | 126,85     | 5,39      |
|          | Y    | 3,43           | 3,43       |           |
|          | Z    | 12,79          | 12,79      |           |
| AM3      | X    | 126,54         | 126,54     | 5,54      |
|          | Y    | 3,48           | 3,48       |           |
|          | Z    | 12,79          | 12,79      |           |
| AM4      | X    | 126,83         | 126,83     | 5,90      |
|          | Y    | 3,84           | 3,84       |           |
|          | Z    | 12,64          | 12,64      |           |
| AM5      | X    | 126,95         | 126,95     | 5,69      |
|          | Y    | 3,66           | 3,66       |           |
|          | Z    | 12,60          | 12,60      |           |

| Desvio padrão |             |
|---------------|-------------|
| x             | 0,175299743 |
| y             | 0,162265215 |
| z             | 0,088487287 |
| Massa         | 0,189023808 |

| Resina 3002         | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | Média | Desvio padrão |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------|
| Tensão max.         | 18,01 | 20,54 | 23,82 | 18,31 | 16,40 | 19,42 | 2,87          |
| Módulo elasticidade | 0,38  | 0,45  | 0,54  | 0,37  | 0,35  | 0,42  | 0,08          |



Fonte: Autor (2022).

## Respan

**Marca:** Unipol - Brasil

**Material:** Resina poliuretana expansiva rígida de mamona bicomponente

**Condição:** Provetes confeccionados em molde de silicone fechado.

**Peso da amostra:** 2,17 g (média)

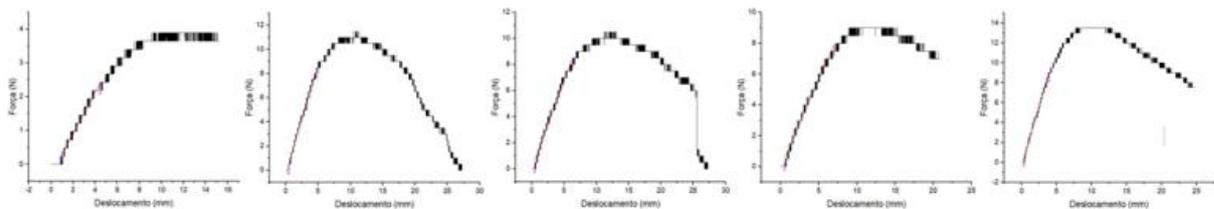
Dados das medições, tensão máxima, módulo de elasticidade e gráficos das amostras de resina poliuretana expandida.



| Amostras | Eixo | Medição 1 [mm] | Média [mm] | Massa [g] |
|----------|------|----------------|------------|-----------|
| AM1      | X    | 127,27         | 127,27     | 2,11      |
|          | Y    | 3,85           | 3,85       |           |
|          | Z    | 12,81          | 12,81      |           |
| AM2      | X    | 128,32         | 128,32     | 1,96      |
|          | Y    | 3,79           | 3,79       |           |
|          | Z    | 12,78          | 12,78      |           |
| AM3      | X    | 127,25         | 127,25     | 1,94      |
|          | Y    | 3,97           | 3,97       |           |
|          | Z    | 12,81          | 12,81      |           |
| AM4      | X    | 127,20         | 127,20     | 2,44      |
|          | Y    | 3,83           | 3,83       |           |
|          | Z    | 12,76          | 12,76      |           |
| AM5      | X    | 127,10         | 127,10     | 2,42      |
|          | Y    | 3,89           | 3,89       |           |
|          | Z    | 12,93          | 12,93      |           |

| Desvio padrão |             |
|---------------|-------------|
| x             | 0,502961231 |
| y             | 0,068410526 |
| z             | 0,066105976 |
| Massa         | 0,242857983 |

| Respan              | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | Média | Desvio padrão |
|---------------------|------|------|------|------|------|-------|---------------|
| Tensão max.         | 3,89 | 5,78 | 4,80 | 4,44 | 6,37 | 5,06  | 1,01          |
| Módulo elasticidade | 0,05 | 0,15 | 0,10 | 0,09 | 0,18 | 0,11  | 0,05          |



Fonte: Autor (2022).

## Resina 3002 e 20% de fibras de 106 $\mu\text{m}$

**Marca:** Unipol - Brasil

**Material:** Resina elastômera de mamona bicomponente + fibra de Agave 106  $\mu\text{m}$  (20%)

**Condição:** Provetes confeccionados em molde de silicone fechado.

**Peso da amostra:** 4,63 g (média)

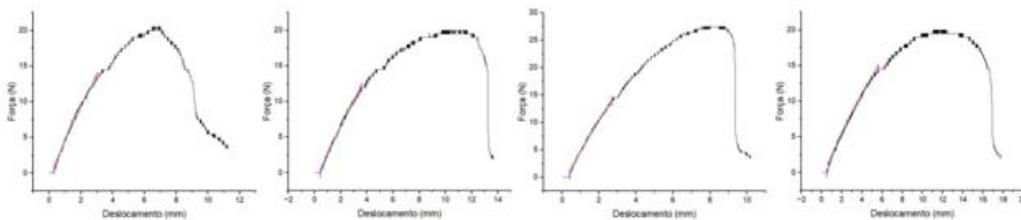
Dados das medições, tensão máxima, módulo de elasticidade e gráficos das amostras do compósito resina 3002 106 20%.



| Amostras | Eixo | Medição 1 [mm] | Média [mm] | Massa [g] |
|----------|------|----------------|------------|-----------|
| AM1      | X    | 126,94         | 126,94     | 5,10      |
|          | Y    | 3,98           | 3,98       |           |
|          | Z    | 12,72          | 12,72      |           |
| AM2      | X    | 126,78         | 126,78     | 4,58      |
|          | Y    | 5,41           | 5,41       |           |
|          | Z    | 12,70          | 12,70      |           |
| AM3      | X    | 126,73         | 126,73     | 4,34      |
|          | Y    | 5,18           | 5,18       |           |
|          | Z    | 12,77          | 12,77      |           |
| AM4      | X    | 126,73         | 126,73     | 4,69      |
|          | Y    | 5,54           | 5,54       |           |
|          | Z    | 12,71          | 12,71      |           |
| AM5      | X    | 126,73         | 126,73     | 4,45      |
|          | Y    | 5,19           | 5,19       |           |
|          | Z    | 12,63          | 12,63      |           |

| Desvio padrão |             |
|---------------|-------------|
| x             | 0,09093954  |
| y             | 0,622615451 |
| z             | 0,050299105 |
| Massa         | 0,293035834 |

| Resina 3002 106     | 1 | 2    | 3    | 4    | 5    | Média | Desvio padrão |
|---------------------|---|------|------|------|------|-------|---------------|
| Tensão max.         |   | 5,09 | 5,38 | 6,50 | 5,42 | 5,60  | 0,62          |
| Módulo elasticidade |   | 0,14 | 0,12 | 0,15 | 0,09 | 0,13  | 0,03          |



Fonte: Autor (2022).

## Respan e 20% de fibras de 106 $\mu\text{m}$

**Marca:** Unipol - Brasil

**Material:** Resina poliuretana expansiva de mamona bicomponente + fibra de Agave 106  $\mu\text{m}$  (20%)

**Condição:** Provetes confeccionados em molde de silicone fechado

**Peso da amostra:** 2,58 g (média).

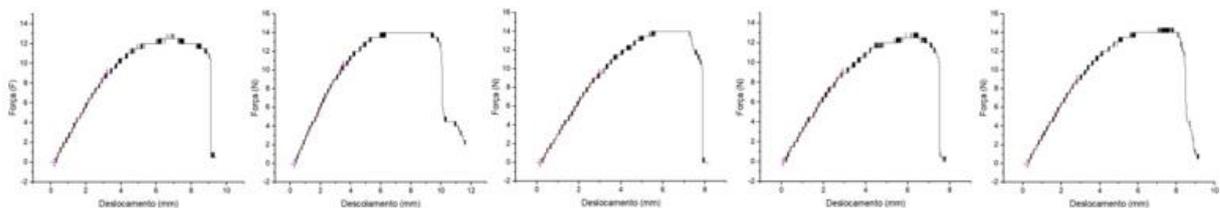
Dados das medições, tensão máxima, módulo de elasticidade e gráficos das amostras do compósito Respan 106 20%.



| Amostras | Eixo | Medição 1 [mm] | Média [mm] | Massa [g] |
|----------|------|----------------|------------|-----------|
| AM1      | X    | 127,28         | 127,28     | 2,50      |
|          | Y    | 4,68           | 4,68       |           |
|          | Z    | 12,87          | 12,87      |           |
| AM2      | X    | 128,21         | 128,21     | 2,56      |
|          | Y    | 4,82           | 4,82       |           |
|          | Z    | 13,10          | 13,10      |           |
| AM3      | X    | 128,30         | 128,30     | 2,69      |
|          | Y    | 4,64           | 4,64       |           |
|          | Z    | 13,29          | 13,29      |           |
| AM4      | X    | 127,60         | 127,60     | 2,54      |
|          | Y    | 4,68           | 4,68       |           |
|          | Z    | 12,83          | 12,83      |           |
| AM5      | X    | 128,00         | 128,00     | 2,65      |
|          | Y    | 4,60           | 4,60       |           |
|          | Z    | 13,07          | 13,07      |           |

| Desvio padrão |             |
|---------------|-------------|
| x             | 0,429557912 |
| y             | 0,082945765 |
| z             | 0,186868938 |
| Massa         | 0,063442888 |

| Respan 106 (20%)    | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | Média | Desvio padrão |
|---------------------|------|------|------|------|------|-------|---------------|
| Tensão max.         | 4,25 | 4,24 | 4,51 | 4,27 | 4,84 | 4,42  | 0,26          |
| Módulo elasticidade | 0,13 | 0,13 | 0,15 | 0,14 | 0,16 | 0,14  | 0,01          |



Fonte: Autor (2022).

## Respan e 10% de fibras de 600 $\mu\text{m}$

**Marca:** Unipol - Brasil

**Material:** Resina poliuretana expansiva de mamona bicomponente + fibra de Agave 600  $\mu\text{m}$  (10%)

**Condição:** Provetes confeccionados em molde de silicone fechado.

**Peso da amostra:** 2,56 g (média).

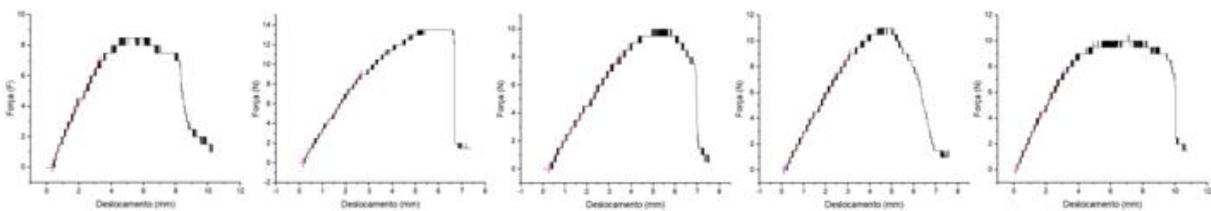
Dados das medições, tensão máxima, módulo de elasticidade e gráficos das amostras do compósito Respan 600 10%.



| Amostras | Eixo | Medição 1 [mm] | Média [mm] | Massa [g] |
|----------|------|----------------|------------|-----------|
| AM1      | X    | 129,30         | 129,30     | 2,40      |
|          | Y    | 4,50           | 4,50       |           |
|          | Z    | 13,26          | 13,26      |           |
| AM2      | X    | 128,03         | 128,03     | 2,79      |
|          | Y    | 4,74           | 4,74       |           |
|          | Z    | 13,47          | 13,47      |           |
| AM3      | X    | 127,59         | 127,59     | 2,56      |
|          | Y    | 4,30           | 4,30       |           |
|          | Z    | 12,96          | 12,96      |           |
| AM4      | X    | 128,67         | 128,67     | 2,62      |
|          | Y    | 4,54           | 4,54       |           |
|          | Z    | 13,15          | 13,15      |           |
| AM5      | X    | 129,69         | 129,69     | 2,43      |
|          | Y    | 4,67           | 4,67       |           |
|          | Z    | 13,52          | 13,52      |           |

| Desvio padrão |             |
|---------------|-------------|
| x             | 0,967801821 |
| y             | 0,17        |
| z             | 0,230802946 |
| Massa         | 0,157321327 |

| Respan 106 (20%)    | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | Média | Desvio padrão |
|---------------------|------|------|------|------|------|-------|---------------|
| Tensão max.         | 2,92 | 4,12 | 3,85 | 3,74 | 3,29 | 3,58  | 0,48          |
| Módulo elasticidade | 0,11 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,11 | 0,13  | 0,02          |



Fonte: Autor (2022).

## Respan e 20% de fibras de 600 $\mu\text{m}$

**Marca:** Unipol - Brasil

**Material:** Resina poliuretana expansiva de mamona bicomponente + fibra de Agave 600  $\mu\text{m}$  (20%)

**Condição:** Provetes confeccionados em molde de silicone fechado.

**Peso da amostra:** 4,15 g (média).

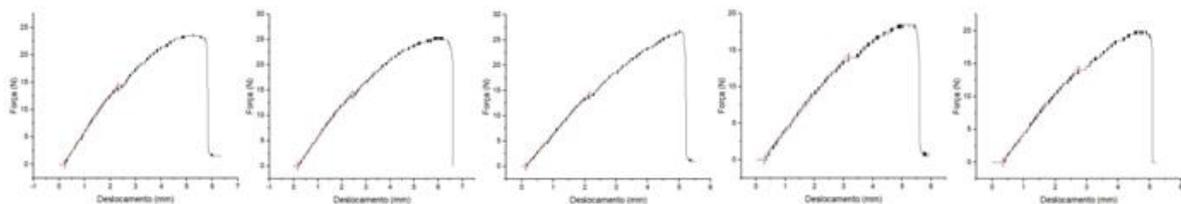
Dados das medições, tensão máxima, módulo de elasticidade e gráficos das amostras do compósito Respan 600 20%.



| Amostras | Eixo | Medição 1 [mm] | Média [mm] | Massa [g] |
|----------|------|----------------|------------|-----------|
| AM1      | X    | 127,54         | 127,54     | 4,12      |
|          | Y    | 4,86           | 4,86       |           |
|          | Z    | 12,73          | 12,73      |           |
| AM2      | X    | 127,54         | 127,54     | 4,11      |
|          | Y    | 4,48           | 4,48       |           |
|          | Z    | 12,73          | 12,73      |           |
| AM3      | X    | 127,50         | 127,50     | 4,41      |
|          | Y    | 4,43           | 4,43       |           |
|          | Z    | 12,96          | 12,96      |           |
| AM4      | X    | 127,67         | 127,67     | 4,12      |
|          | Y    | 4,13           | 4,13       |           |
|          | Z    | 12,99          | 12,99      |           |
| AM5      | X    | 127,63         | 127,63     | 4,02      |
|          | Y    | 4,19           | 4,19       |           |
|          | Z    | 12,81          | 12,81      |           |

| Desvio padrão |             |
|---------------|-------------|
| x             | 0,070922493 |
| y             | 0,289084763 |
| z             | 0,124418648 |
| Massa         | 0,147957318 |

| Respan 106 (20%)    | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | Média | Desvio padrão |
|---------------------|------|------|------|------|------|-------|---------------|
| Tensão max.         | 7,36 | 9,21 | 9,79 | 7,70 | 8,20 | 8,45  | 1,02          |
| Módulo elasticidade | 0,27 | 0,32 | 0,37 | 0,31 | 0,36 | 0,33  | 0,04          |



Fonte: Autor (2022).

**Respan e 20% de mix de fibras de (106 µm; 250 µm; 425 µm; 600 µm - 1/4 partes de cada).**

**Marca:** Unipol - Brasil

**Material:** Resina poliuretana expansiva de mamona bicomponente + mix de fibras de Agave (106 µm, 250 µm, 425 µm, 600 µm (20%))

**Condição:** Provetes confeccionados em molde de silicone fechado.

**Peso da amostra:** 3,89 g (média).

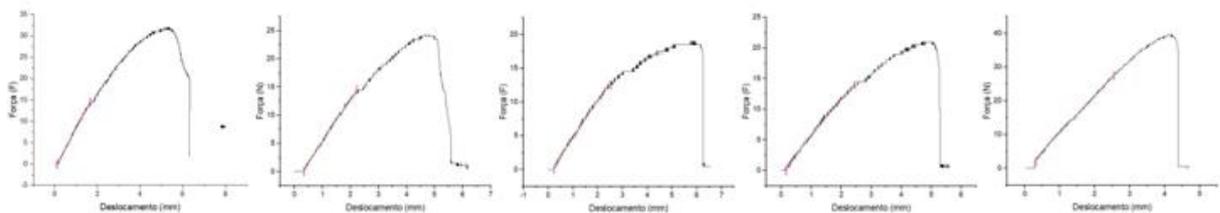
Dados das medições, tensão máxima, módulo de elasticidade e gráficos das amostras do compósito Respan Mix 10%.



| Amostras | Eixo | Medição 1 [mm] | Média [mm] | Massa [g] |
|----------|------|----------------|------------|-----------|
| AM1      | X    | 127,75         | 127,75     | 4,10      |
|          | Y    | 5,10           | 5,10       |           |
|          | Z    | 12,98          | 12,98      |           |
| AM2      | X    | 127,47         | 127,47     | 3,76      |
|          | Y    | 5,04           | 5,04       |           |
|          | Z    | 12,87          | 12,87      |           |
| AM3      | X    | 127,72         | 127,72     | 3,74      |
|          | Y    | 5,15           | 5,15       |           |
|          | Z    | 12,96          | 12,96      |           |
| AM4      | X    | 127,87         | 127,87     | 3,75      |
|          | Y    | 5,10           | 5,10       |           |
|          | Z    | 12,90          | 12,90      |           |
| AM5      | X    | 127,30         | 127,30     | 4,14      |
|          | Y    | 5,11           | 5,11       |           |
|          | Z    | 12,88          | 12,88      |           |

| Desvio padrão |             |
|---------------|-------------|
| x             | 0,231451939 |
| y             | 0,039370039 |
| z             | 0,049193496 |
| Massa         | 0,203273215 |

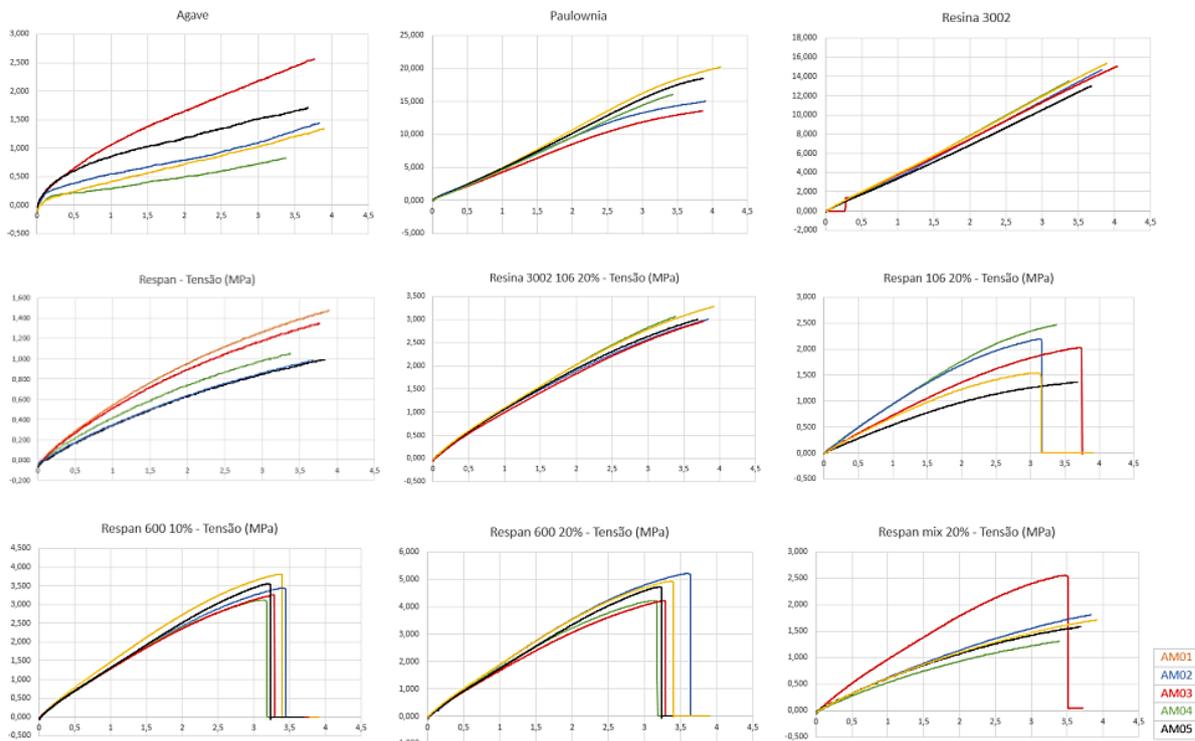
| Respan 106 (20%)    | 1    | 2    | 3    | 4    | 5     | Média | Desvio padrão |
|---------------------|------|------|------|------|-------|-------|---------------|
| Tensão max.         | 8,74 | 6,91 | 5,10 | 5,77 | 10,83 | 7,47  | 2,33          |
| Módulo elasticidade | 0,32 | 0,26 | 0,18 | 0,20 | 0,37  | 0,27  | 0,08          |



Fonte: Autor (2022).

## APÊNDICE B – ENSAIO TRAÇÃO

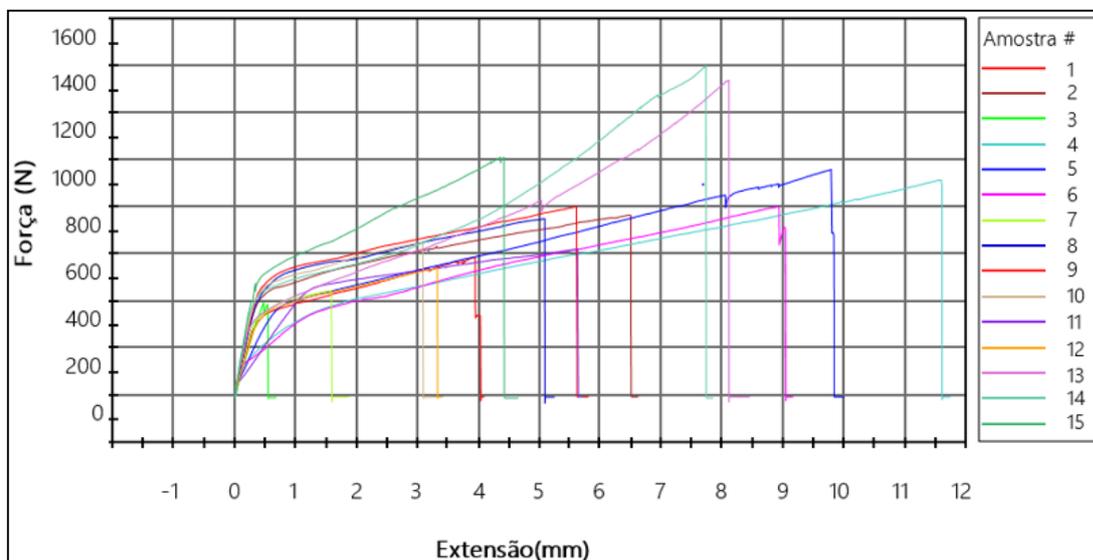
Gráficos dos ensaios de tração das amostras.



Fonte: Autor (2022).

## APÊNDICE C – ENSAIO CISALHAMENTO

Gráfico com o comparativo das curvas dos ensaios de 15 provetes das amostras de cisalhamento.



Fonte: Autor (2022).

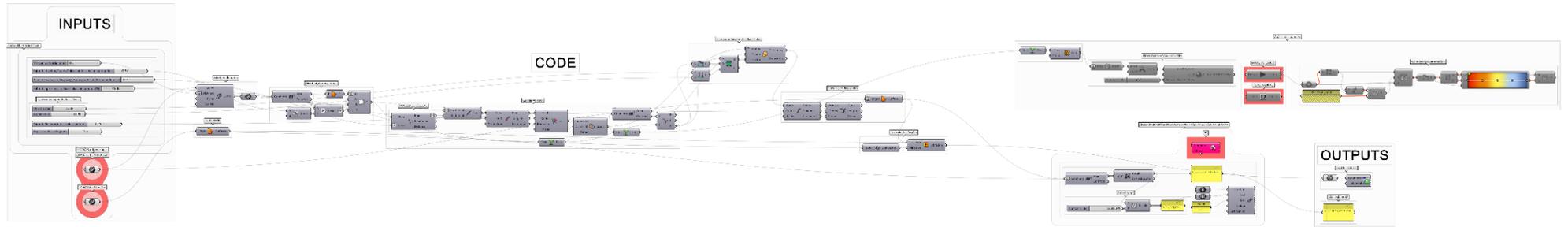
Tabela comparativa entre as amostras com os valores de carga máxima (N); extensão máxima (mm); e extensão na carga máxima (mm).

|                                 | Provetes 1 a 15 | Amostras           | Carga máxima (N) | Extensão máxima (mm) | Extensão na carga máxima (mm) |
|---------------------------------|-----------------|--------------------|------------------|----------------------|-------------------------------|
| 01                              | 1               | PU_01              | 590.44           | 4.07                 | 3.92                          |
|                                 | 2               | PU_02              | 771.81           | 6.60                 | 6.47                          |
|                                 | 3               | PU_03              | 398.00           | 0.67                 | 0.46                          |
| <b>Média PU</b>                 |                 |                    | <b>586,75</b>    | <b>3,78</b>          | <b>3,61</b>                   |
| 02                              | 4               | Respan_01          | 919.11           | 11.72                | 11.56                         |
|                                 | 5               | Respan_02          | 963.93           | 8.83                 | 8.63                          |
|                                 | 6               | Respan_03          | 805.09           | 9.14                 | 8.90                          |
| <b>Média Respan</b>             |                 |                    | <b>896,04</b>    | <b>9,89</b>          | <b>9,69</b>                   |
| 03                              | 7               | Respan_106_01      | 450.09           | 1.87                 | 1.59                          |
|                                 | 8               | Respan_106_02      | 752.96           | 5.24                 | 5.07                          |
|                                 | 9               | Respan_106_03      | 806.79           | 5.79                 | 5.60                          |
| <b>Média Respan 106 µm</b>      |                 |                    | <b>669,94</b>    | <b>4,30</b>          | <b>4,08</b>                   |
| 04                              | 10              | Respan_600_01      | 649.93           | 3.33                 | 3.06                          |
|                                 | 11              | Respan_600_02      | 623.95           | 5.72                 | 5.62                          |
|                                 | 12              | Respan_600_03      | 543.08           | 3.41                 | 3.31                          |
| <b>Média Respan 600 µm</b>      |                 |                    | <b>605,65</b>    | <b>4,15</b>          | <b>4,00</b>                   |
| 05                              | 13              | Resina_3002_106_01 | 1341.37          | 8.42                 | 8.08                          |
|                                 | 14              | Resina_3002_106_02 | 1402.19          | 7.84                 | 7.72                          |
|                                 | 15              | Resina_3002_106_03 | 1018.39          | 4.64                 | 4.41                          |
| <b>Média Resina 3002 106 µm</b> |                 |                    | <b>1253,98</b>   | <b>6,96</b>          | <b>6,73</b>                   |

Fonte: Autor (2022).

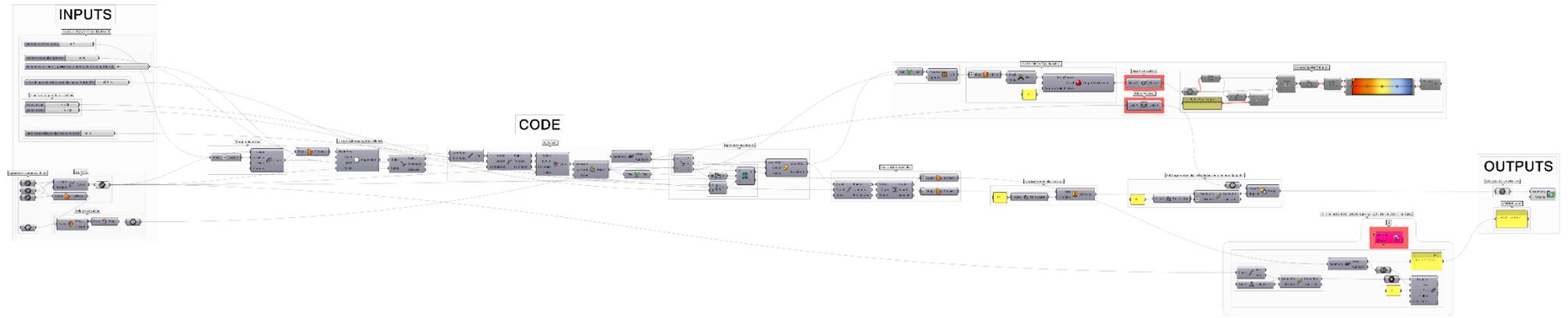


## ESQUELETO



Fonte: Autor (2022).

# QUILHA



Fonte: Autor (2022)