

**FERRAMENTAS E MODELOS
TECNOLÓGICOS GERADORES
DE CASES EM BIOMIMÉTICA**

SOBRE OS AUTORES

Rodrigo Barbosa de Araújo | rodrigobarbosadesigner@gmail.com

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/3979180438305969>

Doutorando em Design na Universidade Federal de Pernambuco (PPGD | UFPE). Mestre em Design (PPGD | UFPE). Bacharel em Design pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Foi professor assistente no Departamento de Design UFPB. Experiência em desenho industrial, com ênfase em design de produto e conhecimentos em programação visual. Pesquisador no grupo de pesquisas de Biodesign e Artefatos Industriais – UFPE, atuando nas linhas de pesquisa de design e tecnologia, e artefatos digitais, onde desenvolve estudos envolvendo biomimética/biônica, design de materiais e processos de fabricação digital.

Ney Brito Dantas | ney.dantas@gmail.com

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/3943497493556232>

PhD – Architectural Association School Of Architecture (1998). COACH, SLAC/ICI. Pesquisador da Pós-Graduação de Design, professor do Departamento de Arquitetura da Universidade Federal de Pernambuco. Busca soluções inovadoras incrementais e radicais que possam fazer a diferença na solução de grandes desafios da contemporaneidade como: riscos e vulnerabilidades causados por eventos climáticos extremos; desenvolvimento humano (coaching); melhoria da qualidade de vida das cidades (CityCoaching), etc. Estas inovações podem se manifestar, por exemplo, sob a forma de um novo material, uma otimização de processo ou o desenvolvimento de ferramentas sociotécnicas e ambientes virtuais de interação.

Amilton Arruda | arruda.amilton@gmail.com

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/9138096051015150>

Graduado em Desenho Industrial pela UFPE (1982), Mestrado em Design e Biônica pelo IED de Milão (1992) e Doutorado em Ricerca in Disegno Industriale – Ph.D pela Universidade Politécnico de Milão (2003). Foi consultor internacional do Instituto Europeo de Design na implantação de cursos *Lato Sensu* Especialização em Fashion Design, Design de Interiores e Produto, Design Gráfico e Editorial, nas Faculdades Ávila (Goiânia), Faculdade Boa Viagem (Recife), Instituto de Educação Superior de Brasília (IESB). Foi consultor do SEBRAE nacional no edital para implantação de centros e núcleos de design nos estados brasileiros. Desde 1985 é professor da UFPE, associado III, docente do Programa de Pós-Graduação em Design PPGD/UFPE. Coordenador do Grupo de Pesquisa em Biodesign e Artefatos Industriais do CNPq. Foi chefe do Departamento de Design do CAC/UFPE (2014-2015). Orienta mestrandos e doutorandos nas áreas de Biônica e Biomimética com ênfase no Design; Design Estratégico atuando principalmente nos seguintes temas: Inovação Tecnológica, Gestão do Design e Processos de Design. Organizador de três livros da série design, cultura e tecnologia pela plataforma OpenAccess da Edgard Blucher 2016 design e complexidade 2017 design e inovação social 2018 design, artefatos e sistemas sustentáveis.

Paulo Carvalho | paulodca@gmail.com

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6854895527660524>

Arquiteto, mestrando em Design pela UFPE, especialista em métodos computacionais de projeto e fabricação digital, acumula conhecimento nas áreas de design paramétrico, design generativo e biodigital. CEO fundador da SELVAGEN, Startup que combina natureza e tecnologia no desenvolvimento de artefatos de Design e Arquitetura, é consultor de Design e Inovação do Porto Digital, além de ministrar cursos e palestras em eventos e instituições renomadas.



Abordagem Metodológica em Biomimética Estratégias de Leveza e Resistência para Artefatos Aquáticos Inspirados no Agave

Methodological Approach to Biomimetics – Lightness and Resistance Strategies for Agave Inspired Aquatic Artifacts

Rodrigo Barbosa de Araújo | Ney Brito Dantas | Amilton Arruda | Paulo Carvalho

Resumo

Este artigo apresenta práticas e experiências de uma pesquisa multidisciplinar através da análise da natureza e suas implicações em projetos. Resultou de uma dissertação de mestrado desenvolvida no Programa de Pós-Graduação em Design da Universidade Federal de Pernambuco. O tema principal é biomimética, área da ciência que visa o estudo das estratégias da natureza tendo-a como princípio e inspiração para solução de problemas de design. A contextualização dessa pesquisa partiu da problemática ambiental relacionada com o design e os processos de fabricação de artefatos aquáticos. A pesquisa foi estruturada através do enquadramento das etapas de projeto de uma abordagem metodológica desenvolvida pelo *Biomimicry Institute 3.8*, denominada *Biomimicry DesignLens*, se trata de um método flexível para processos criativos com aplicação de modelos da natureza na criação de soluções inovadoras e sustentáveis no design de artefatos. Quando processos de design paramétrico foram incorporados à fabricação digital, se permitiu atingir um nível de materialização muito próximo das estratégias da natureza. Verificou-se que a aplicação de tecnologias digitais tem grande relevância para o futuro das áreas de projeto, principalmente quando alinhadas aos princípios de sistemas biológicos.

Palavras-chave: Biomimética; Agave; Design paramétrico; Fabricação digital.

Abstract

This article presents practices and experiences of a multidisciplinary research through the analysis of nature and its implications in projects. It resulted from a master's thesis developed in the Graduate Program in Design of the Federal University of Pernambuco. The main theme is biomimetics, an area of science that aims to study the strategies of nature taking it as a principle and inspiration for solving design problems. The contextualization of this research was based on environmental issues related to the design and manufacturing processes of aquatic artifacts. The research was structured through the framework of the design steps of a methodological approach developed by Biomimicry Institute 3.8, called Biomimicry DesignLens, it is a flexible method for creative processes with application of nature models in the creation of innovative and sustainable solutions in design artifacts. When parametric design processes were incorporated into digital manufacturing, it allowed itself to reach a level of materialization very close to nature's strategies. It was verified that the application of digital technologies has great relevance for the future of the project areas, especially when aligned with the principles of biological systems.

Keywords: Biomimicry; Agave; Parametric design; Digital fabrication.

Figura 1: Imagem de abertura.

Fonte: <https://www.s-wings.surf/>.2018.



Figura 2: A confecção de uma prancha de surf ocorre através de processos de usinagem e laminação de materiais poliméricos termofixos, com altos índices de perda de matéria-prima. Fonte: <https://www.surftoday.com/surfing/11051-the-surfboard-brands-of-the-world>. 2018.



Figura 3: Utilização do Agave como matéria-prima alternativa para fabricação de pranchas de surf. Material orgânico alternativo que apresenta estratégias de leveza e resistência. Fonte: Surfline.com. 2018.



Figura 4: Prancha de surf feita com bloco de Agave. Fonte: <https://www.agavesurf.com/surfboards/>. 2018.

1. DEFININDO O CONTEXTO (ESCOPO)

O ser humano possui uma característica única entre os seres, que é a capacidade de manipulação e transformação de materiais, transformando-os em artefatos e substâncias estáveis. Desta forma, o homem insere no ambiente, produtos industrializados que representam um padrão de consumo e descarte que não condiz com a capacidade de regeneração do meio natural, podendo comprometer a qualidade de vida das gerações futuras (PHILIPPI JR. *et al.*, 2004).

Perante esta perspectiva econômica promissora, e o desenvolvimento de novos materiais em função da revolução industrial, surgiram grandes empresas produtoras e fornecedoras de materiais diversos, como o poliuretano (PU), o poliestireno expandido (EPS), fibra de vidro e resinas poliméricas, com vasta aplicação em artefatos para esportes aquáticos. Estes materiais são os principais componentes para a confecção de uma prancha de surf.

A contextualização facilita o entendimento sobre como foi arquitetada a problemática desta pesquisa que apresenta mais de um problema, compatíveis e abordadas de forma integrada. O ponto de partida foi a problemática ambiental das pranchas de surf, que são produzidas com espumas e compósitos poliméricos termofixos, provenientes de fontes não renováveis que passam por processos de fabricação ultrapassados de extração e processamento de matéria-prima, com grandes perdas de matéria e energia. Assim como a falta de busca por soluções na natureza.

Estes materiais são amplamente utilizados em artefatos para ambientes aquáticos por possuírem um bom desempenho técnico referente à leveza e resistência, conseqüentemente boa flutuação, que são as principais funções dos materiais nesta categoria de artefatos. Porém, os processos de fabricação seguem uma perspectiva nociva ao meio ambiente. A fabricação se dá pela polimerização de resinas sintéticas, usinagem e desbaste e lixa, ocasionando perda de material, descartados de forma incoerente. Estes materiais são incompatíveis com os elementos naturais reconhecíveis pelo meio ambiente e desta forma levam centenas de anos para se degradar.

De acordo com Grijó (2011), a indústria do surf no Brasil e no mundo vem, há mais de 50 anos, gerando resíduos tóxicos e inflamáveis em todos seus processos produtivos e pós-consumo, que são depositados em aterros ou "lixões" sem qualquer tipo de controle ou tratamento específico ambiental. Como se pode verificar, a produção de pranchas de surf atualmente em todo o mundo necessita ser revista e levado em consideração os impactos ambientais, principalmente devido aos materiais utilizados e o processo de fabricação.

Existe na natureza uma grande quantidade de materiais que podem servir como fonte de inspiração com funções e propriedades específicas, e têm potencial de serem traduzidas para a tecnologia, e aplicados os seus conceitos em projetos de design e em muitas outras áreas. No meio natural pode estar a solução para muitos problemas humanos através dos ensinamentos da natureza. É neste contexto que a área de conhecimento da biônica/ biomimética entra para contribuir com soluções à problemática técnico/ambiental da fabricação de pranchas de surf.

Por outro lado, existe a aplicação de materiais naturais, como o Buriti e o Agave que apresentam propriedades de leveza, resistência e flutuação. É uma tentativa de tornar a concepção destes artefatos em algo mais ecológico e integrado à natureza. Entretanto, somente a aplicação de materiais naturais não garante que sejam considerados produtos sustentáveis, pois os processos de produção permanecem os mesmos e continuam seguindo contra os ensinamentos e ciclo de vida da natureza. Outro fator carente de inovação é que as pranchas produzidas com estes materiais apresentam menor desempenho técnico por conta do peso final do produto.

Na busca de soluções inovadoras e sustentáveis em projetos de design, não se pode deixar de lado os requisitos funcionais. O produto que não apresenta um bom desempenho técnico, apesar de ter aplicação de matérias-primas orgânicas não se consolida como produto inovador e torna-se de difícil aceitação na sociedade, não permitindo uma quebra de paradigma para um estilo de vida mais integrado à natureza (KAZAZIAN, 2010).

Neste ponto, surge outro fator de grande relevância, ainda mais quando se projeta com foco na sustentabilidade. A falta da busca de soluções para problemas diversos, inspirados pelos ensinamentos que a natureza tem a dar e no modo como se resolve por si própria de forma bastante equilibrada. A Biomimética difundida por Benuys (2003) surge com esta proposta. Uma abordagem multidisciplinar recente da ciência que atua através da aprendizagem das estratégias da natureza que podem ser convertidas em tecnologia e materializadas como soluções com bases ecológicas. Quando aliada à tecnologia se torna uma ferramenta com poder de inovação técnico/sustentável excepcional.

Esta pesquisa foi guiada pela abordagem metodológica *DesignLens Biomimicry Thinking*. Trata-se de um método ou ferramenta desenvolvida pelo *Biomimicry Institute 3.8* e que vem sendo aperfeiçoada desde os anos noventa. A proposta é projetar soluções de design com bases sustentáveis, atuando mais próximo da natureza. Esta abordagem foca nos ensinamentos da natureza, que aliada à tecnologia representa potencial de inovação em design e sustentabilidade. Nesta pesquisa verificou-se que a aplicação de tecnologias digitais tem impactos positivos para os processos de concepção de artefatos aquáticos, principalmente quando alinhadas aos princípios de sistemas biológicos.

Neste sentido, quando processos de design paramétrico são incorporados à fabricação digital, permite-se atingir um nível de materialização muito próximo das estratégias da natureza. Inspirando-se nos ensinamentos dos sistemas biológicos, o crescimento e desenvolvimento ocorrem através da deposição de elementos naturais que atuam num *Optimum* (KAZAZIAN, 2010) de economia de matéria e energia, utilizando o mínimo necessário dentro de um ciclo de vida sustentável bem resolvido.

Esta pesquisa foi validada levando em consideração diretrizes e requisitos para sustentabilidade através da verificação dos Princípios da Vida do *DesignLens – Biomimicry Thinking*. Assim como, a impressão 3D de um protótipo da estrutura bio-inspirada gerada no formato de uma seção de uma prancha de surf como



Figura 5: Estabilizadores hidrodinâmicos desenvolvidos pela empresa S- Wings – Biomimetic Fins. O design biomimético das quilhas é inspirado nas barbatanas dos peixes, proporcionando mais controle e propulsão do que a tração das quilhas clássicas. Fonte: <https://www.s-wings.surf/>. 2018.

A biomimética é uma abordagem inovadora que busca soluções sustentáveis para os desafios humanos, emulando padrões e estratégias testados pelo tempo da natureza. Fonte: Biomimicry Institute 3.8.

As plantas maximizam a resistência enquanto reduzem os materiais, incorporando elementos tetraédricos que podem ser empilhados em contêineres hexagonais. Fonte: Biomimicry Institute 3.8.



Figura 6: Seção transversal da madeira de balsa. Fonte: <https://psmicrographs.com/sems/flowers-plants/>. 2018.

Figura 7: Micrografia eletrônica de varredura de uma amostra de madeira balsa (*Ochroma lagopus*). Percebe-se que as células são grandes e com paredes muito finas, de modo que a proporção de matéria sólida para espaço aberto é muito pequena. Apenas cerca de 40% do volume da madeira é substância sólida. Sendo assim, é uma das madeiras mais leves com excelentes qualidades de flutuação. Fonte: <http://sciencewise.anu.edu.au/articles/timbers>. 2018.

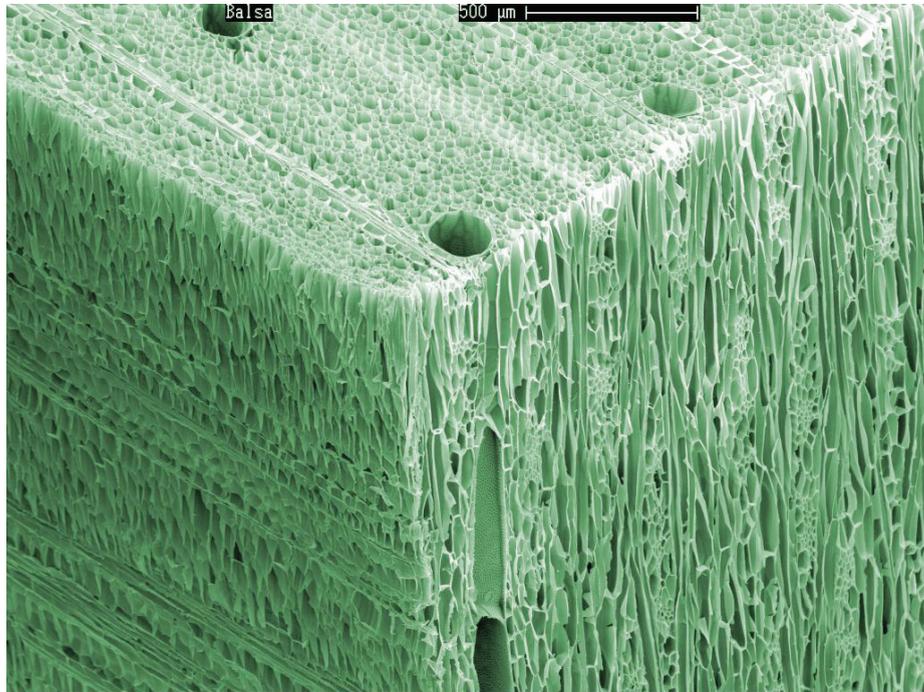


Figura 8: Exemplo de estrutura biomimética impressa em 3D. Inspiração em elementos naturais associada a processos de fabricação digital. Fonte: http://www.formakers.eu/media/1.663.1359024993.Trabeculae_01_shiro_recitymagazine_03.jpg.



Figura 9: Luminária Hyphae, da empresa Nervous System. Inspirada nas formas como os veios se formam nas folhas, a luminária projeta sombras sutis nas paredes próximas. Cada luminária é desenvolvida digitalmente em uma simulação por computador e fabricada com impressão 3D. Fonte: <https://n-e-r-v-o-u-s.com/>. 2018.

exemplo de aplicação e estudo. Ficou evidente com os resultados finais, que a estrutura gerada pode ser aplicada em uma gama de artefatos que requerem funções estruturais leves e resistentes, boa flutuação em ambientes aquáticos, dentre várias outras possibilidades de aplicação. Esta nova forma de concepção de estruturas bio-inspiradas através da utilização de softwares de modelagem paramétrica e fabricação digital permite uma materialização mais próxima das estratégias da natureza.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA (DESCOBRINDO)

2.1 Biomimética

No passar dos séculos, vários foram os povos que se inspiraram na natureza para resolver problemas. Mais recente, a partir da década de 1950, aparecem nos documentos científicos vários termos sobre associações de atividades humanas frente ao meio natural. Surgem os termos: biônica e biomimética, dentre outros. Segundo Queiroz; Rattes; Araújo (2015) são duas nomenclaturas que possuem o mesmo princípio básico: inspiração na natureza. Contudo, nos dias atuais a utilização do termo biomimética vem sendo mais difundido.

De acordo com Bluchel (2009) os padrões básicos técnicos de tudo que vive como sistema biológico, coincide com os padrões básicos técnicos da sociedade humana. A natureza está cheia de requintes técnicos. Biologia e técnica não são oponentes fundamentais, evidentemente, há diferenças entre uma máquina e um ser vivo. No entanto, ambos estão sujeitos às mesmas leis físicas e, por isso, os sistemas vivos e suas estruturas podem ser observados também sob um ponto de vista técnico.

A Natureza é um supersistema tecnológico que transforma grandes quantidades de energia, matéria-prima e lixo de forma limpa e equilibrada. A ciência interdisciplinar biônica pode fornecer valiosos serviços pioneiros à pesquisa e ao desenvolvimento. Na visão de Bluchel (2009), se com todo esse conhecimento, aumentasse a disposição para aprender com a natureza de maneira abrangente em questões funcionais e transferir o aprendizado para as condições humanas, então nós também aprenderíamos, talvez, o que a natureza pratica de maneira visivelmente perfeita:

Outros autores compartilham da mesma visão através da Biomimética, que etimologicamente, vem do grego: *bios* (vida) e *mimesis* (imitação). Benyus (2003) define a biomimética como sendo uma abordagem da inovação que busca soluções para desafios humanos ao emular padrões e estratégias testados pelo tempo na natureza. Vem sendo fortemente difundida para que aprendamos a compreender a ordem natural das coisas, uma compreensão complexa do ecossistema para promover uma real adaptação do homem ao meio. A autora defende que devemos tratar a natureza como modelo, medida e mentora do 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. Depois de 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, assim realiza o aparentemente impossível: cria formas que ao mesmo tempo são semelhantes e diferentes. O fato é que sempre se encontra um padrão básico central na natureza. Tudo está ligado pelas proporções formadas pelo padrão básico. Segundo Bluchel (2009) como todos os sistemas biológicos, cada célula minúscula é uma parte minúscula do sistema todo, na escala manométrica, representa um cosmos fascinante em nível atômico e molecular. Algo que impressiona são as dimensões inimagináveis que ultrapassam os limites da capacidade de reconhecimento.

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).

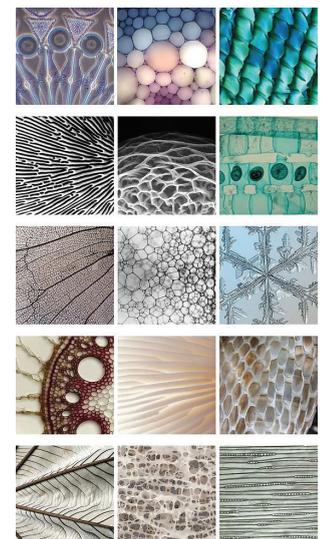


Figura 10: Biblioteca de estruturas naturais open source. Inspiração em estratégias da natureza. Muitas estruturas da natureza pode atender a indústria com a aplicação de soluções naturais para realizar inovações sustentáveis.

Fonte: <https://www.lilianvandaal.com>. 2018.

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 nanomundo 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, p. 92).

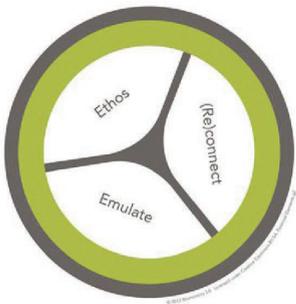


Figura 11: Elementos Essenciais – Biomimicry DesignLens.
Fonte: Biomimicry Institute 3.8, (2015).

3 BIOMIMICRY - DESIGN LENS

O *Biomimicry Institute 3.8* juntamente com Janine Benyus e sua equipe de colaboradores, vem desenvolvendo e aperfeiçoando esta abordagem metodológica em biomimética desde 1998. Intitulada *Biomimicry DesignLens*, sua representação se dá através de diagramas que exploram três componentes principais para a prática de projeto em design biomimético, são eles: *elementos essenciais*; *princípios da vida*; e *biomimicry thinking*.

O processo inicia em um estado de empatia com o meio natural ao ter em mente a importância dos *elementos essenciais* – que são três elementos interconectados para a prática de projeto inspirado pela natureza (*Biomimicry institute 3.8*, 2015).

Ethos representa respeito, responsabilidade e gratidão da espécie humana pelo planeta; *(Re)conexão* indica que nós somos parte da natureza, pessoas e natureza estão na verdade profundamente entrelaçadas. Nesta perspectiva, existe uma reconexão do humano com o meio natural. O elemento Emular representa os princípios, padrões, estratégias e funções encontradas na natureza que podem inspirar o design. A emulação representa um sentimento que instiga a imitar ou a exceder outrem, de forma estimulante e cooperativa.

O segundo componente desta abordagem são os *princípios da vida*, que segundo o *Biomimicry Institute 3.8* (2015) são ensinamentos e estratégias que a natureza traz em termos de design e ideais aspiracionais para projeto com parâmetros sustentáveis que formam aprendidos e aperfeiçoados ao longo de 3.8 bilhões de anos pela natureza. Os diagramas apresentam os princípios que fazem com que a vida crie condições propícias à vida. Com seis ensinamentos principais podem-se modelar estratégias inovadoras e parâmetros sustentáveis que permitem orientação pela natureza:

- **Evoluir 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.

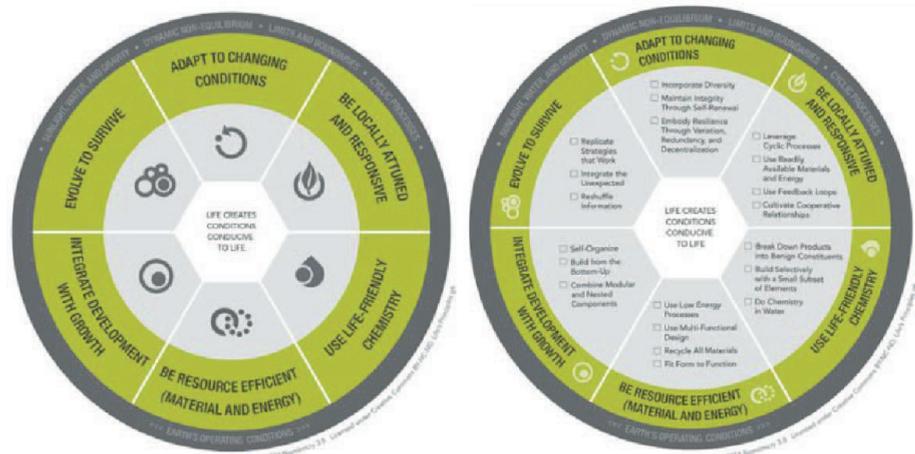


Figura 12: Diagrama Princípios da Vida – Biomimicry DesignLens.
Fonte: Biomimicry Institute 3.8 (2014).

- **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).
- **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.
- **Usar química amigável à vida:** Usar poucos elementos de uma forma elegante; usar química favorável à vida, ou seja, evitar produtos tóxicos; usar água como solvente.
- **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.
- **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 permita que o todo tenha possibilidade de auto-organização.

4 BIOMIMICRY THINKING

Enquanto método ou ferramenta é uma estrutura que se destina a ajudar as pessoas a praticar a biomimética ao projetar qualquer artefato. São etapas de pesquisa, projeto e tomadas de decisões que fornece o contexto para onde seguir; como; o quê; e porque a biomimética se encaixa no processo de qualquer disciplina ou em qualquer escala de design. Inclui quatro áreas que fornecem os valores para o processo: Escopo, Descobrimdo, Criando e Avaliando. A abordagem não é rígida, e pode-se percorrer o diagrama de forma sequenciada (Biology) ou aleatória (Biology to Design). A abordagem nesta pesquisa é denominada *Challenge to biology* (Biomimicry Institute 3.8, 2015).

A abordagem 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. Desta forma entende-se que a partir do *Biomimicry DesignLens* é possível obter dados relevantes a partir da investigação das estratégias do Agave convertidos em design e tecnologia.

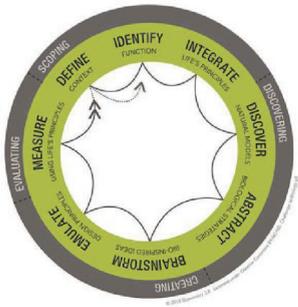


Figura 13: Diagrama Biomimicry Thinking – Challenge to Biology – Biomimicry DesignLens. Fonte: Biomimicry Institute 3.8, (2014).



Figura 14: Fibras de sisal (*Agave sisalana*).

Fonte: <https://www.publ-icdomainpictures.net/en/view-image.php?image=14457&picture=sisal-fibre>.



Figura 15: Plantação de Agave. Fonte: <http://www.wikiwand.com/pt/Sisal>, (2015).

5 AGAVE

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 (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.

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 emite 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 (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).

Desta forma, pode-se verificar que a pesar 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 (2012) 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 as pranchas fabricadas são bem aceitas quanto à surfabilidade, qualidade e resistência, no entanto, apesar de o Agave ser um material leve e orgânico, estes artefatos não atingem a média de peso referente às pranchas produzidas com espumas poliméricas nem apresentam inovações no design da estrutura e nos requisitos ambientais. Portanto, neste contexto se faz necessário inovar nos processos de concepção destes artefatos para que se consiga otimizar o produto final tanto do ponto de vista estrutural como ambiental.

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.

Por tanto, com base nestes dados que a escolha do Agave como elemento natura 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 de 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 mais a frente.

6 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. Estes são os órgãos vegetativos e são constituídos basicamente dos mesmos tecidos primários que estabelecem três

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).



Figura 16: Pendão floral do agave sendo colhido ao final do seu ciclo de vida. Matéria-prima leve e resistente.

Fonte: Surfline.com. 2018.



Figura 17: As propriedades de leveza e resistência, assim como, boa flutuação, são imprescindíveis para um bom desempenho técnico e usabilidade das pranchas de surf.

Fonte: <https://www.agavesurf.com>. 2018.

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).

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).

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:

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 forte, 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).

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. Apezato-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.

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 pode também variar em espessura, ornamentação e frequência de pontoações 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 μm), 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 altamente 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).

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 (TAIZ & ZEIGER, 2004).

Segundo os autores, no local onde está presente o campo de pontoação, durante a formação da parede secundária, geralmente nenhum material de parede é depositado.

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).

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).

7 DESENVOLVIMENTO

Há quatro áreas em que se desenvolve o processo: definição de escopo, descoberta, criação e avaliação. As diversas etapas da pesquisa caminham juntas e são interdependentes, identificadas de forma diluída no diagrama do *Biomimicry DesignLens*. O processo apresenta o detalhamento das etapas e fases de método. O diálogo ocorre de forma contígua durante o desenvolvimento desta pesquisa.

Seguindo estes passos e suas etapas específicas, esta pesquisa integra-se de forma bem-sucedida às estratégias e princípios da vida no design de artefatos. Inicialmente, foi definido o contexto e a problemática, em seguida realizado uma revisão bibliográfica, coleta análises de dados em laboratório e os procedimentos de modelagem paramétrica para conversão das estratégias do modelo biológico em uma estrutura bio-inspirada para pranchas de surf.

8 ESCOPO

- **Definir contexto:** Esta fase foi detalhada no início do artigo, na própria definição do contexto e problemática da pesquisa. Assim como os objetivos e objeto de estudo (modelo biológico) e o referencial teórico exposto na revisão bibliográfica.
- **Identificar função:** Identificação das funções necessárias para o desempenho do artefato: leveza e resistência. As funções identificadas serão investigadas em um modelo natural.
- **Integrar princípios da vida:** Ao integrar os princípios, ficou claro que existe a possibilidade de aplicação de meios alternativos de materialização com soluções sustentáveis bio-inspiradas. Aqui foram elencados alguns princípios que estreitam uma relação mais aprofundada com as propriedades e estratégias a serem alcançadas nesta pesquisa. Neste ponto inicia-se a direcionar o foco para a solução da problemática. Os princípios elencados são:

Replicar as estratégias que funcionam repetindo abordagens de sucesso; Desenvolver design multifuncional com múltiplas aplicações para uma solução leve e elegante; Aplicar processos de baixo ou reduzido consumo energético minimizando o consumo de energia em processos; Ajustar forma à função selecionando pela forma ou padrão com base na necessidade; Combinar modularidade e componentes agrupados, encaixar várias unidades dentro de cada outra progressivamente do simples ao complexo; Auto-organização representado por uma estrutura de Voronoi; Usar materiais e energia facilmente disponíveis construindo com materiais abundantes e acessíveis com maior aproveitamento da energia; Construir seletivamente com um pequeno subconjunto de elementos; Montar relativamente poucos elementos em formas elegantes; Decompor os produtos em constituintes benignos usando uma química em que os resultados de decomposição não resultem em nenhum subproduto prejudicial; Combinar modularidade e componentes agrupados; Cultivar relacionamentos cooperativos encontrando valor através de interações vitoriosas;

9 DESCOBRINDO

- **Descobrir modelo natural:** Nesta fase apresenta-se o modelo natural. A espécie *Agave sisalana* Perrine se apresenta como objeto de estudo desta pesquisa. Informações relevantes sobre suas características e classificação botânica, sua importância para economia local, assim como, a aplicação nos processos de produção de pranchas de surf foi apresentadas na etapa “Descobrendo” (revisão bibliográfica).
- **Abstrair estratégias biológicas:** Para cumprimento desta fase, foi de grande relevância a revisão bibliográfica realizada sobre anatomia vegetal para entendimento de como são as estruturas celulares dos tecidos vegetais em escala micro. 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.

Com o auxílio da professora bióloga e pesquisadora Dra. Emília Arruda do Laboratório de Anatomia Vegetal da Universidade Federal de Pernambuco (LAVeg – UFPE) e do Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste (CETENE), foram realizados experimentos de dissociação, microtomia e de lâmina utilizando amostras de AGAVE para identificação dos tipos de células presentes no tecido vegetal através de microscopia óptica.



Figura 18: Amostras de Agave *Sisalana* Perrine.
Fonte: Autor, (2014).

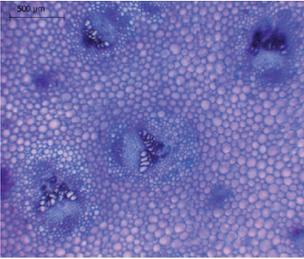


Figura 19: O corte transversal do Agave apresenta o tecido fundamental, que é representado pelo parênquima de preenchimento. O sistema vascular apresenta feixes do tipo colaterais apresentando uma camada de células não espessadas pelo periciclo multisseriado e contínuo apresentando células espessadas. As células parenquimáticas estão presentes em maiores quantidades, apresentam maiores diâmetros e possuem paredes celulares finas, ou seja, apenas paredes primárias. Fonte: Autor, (2015).

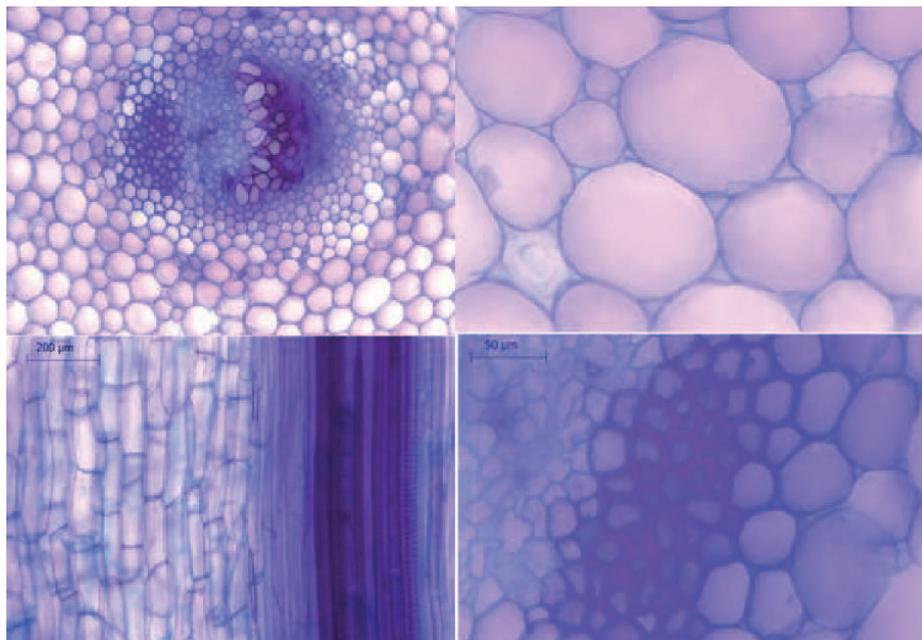
Foram identificados elementos xilêmáticos dissociados. A dissociação dos elementos xilêmáticos revelou a presença de elementos do metaxilema, apresentando pontoações do tipo pontoada bem como algumas fibras e traqueídes. Células especializadas, tais como fibras e traqueídes possuindo paredes secundárias, 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 por meio do microscópio de luz. 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 as estratégias biológicas do Agave (próxima fase).

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.

Na Figura 19 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).

Figura 20: Direita – Xilema. Corte transversal e longitudinal. Fibras, traqueídes, células parenquimáticas. Diferentes geometrias e espessuras. Esquerda: As fibras e traqueídes que estão organizadas em filas verticais sobrepostas, são células fusiformes alongadas que possuem parede secundária. Estas fibras são células de sustentação responsáveis por propriedades de rigidez e flexibilidade. Fonte: Autor, (2015).



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 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 ociosos.

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.

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 bio-inspirada, 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,

10 CRIANDO

A aplicação da biomiméticos em projetos de desenvolvimento industrial e desenvolvimento de produtos requer uma adaptação aos métodos tradicionais através de um modelo mais simples. Existem vários processos de design biomimético, adaptação, integração e aplicação que correspondem aos objetivos de cada projeto. Métodos tradicionais para resolver problemas não são mais adequados:

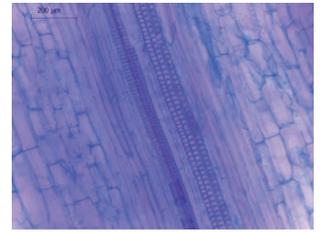


Figura 21: Corte Longitudinal. O crescimento e alongamento intenso do Agave formam muitos elementos traqueais com espessamentos anelares e espiralados, escalariforme, reticulado e pontoado. Fonte: Autor, (2015).

Arthur Koestler (1905-1983) criou a expressão 'bi-associação', se trata de um processo que é base tanto para a arte da descoberta, como para a descoberta da arte. Para diferenciar as coisas das associações cotidianas, que de costume, percorrem caminhos conhecidos. Bi-associação significa o salto repentino da força criativa de imaginação que reúne em novas sínteses, ideias diferentes, observações, percepções ou sistemas de referências até então sem ligações diretas (BLUCHEL, 2009).

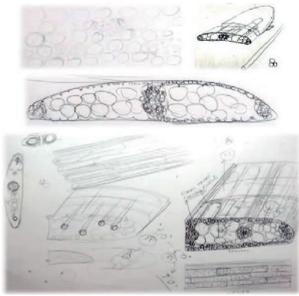


Figura 22: *Sketches à mão livre. Estratégias do Agave em escala ampliada e adaptada, com foco na economia de matéria sem perda de resistência.*
Fonte: Autor, (2015).

¹ *Diagramas de Voronoi são amplamente encontrados na natureza. Em diversos campos da ciência e tecnologia tem inúmeras aplicações práticas e teóricas. O espaço que uma unidade de célula ocupa está diretamente associado à célula correspondente, cada uma gerando pontos atrativos de forma que se distribuem e se equilibram dentro de um determinado espaço (AURENHAMMER, 1991).*

Através da interdisciplinaridade entre biologia e técnica é possível alcançar soluções criativas e inovadoras. Contudo, a abstração das estratégias e o nível de abstração e aprofundamento no conhecimento, depende muito da capacidade de interpretação do designer biomimético. Segundo Berges-Muro (2014) aprender os métodos de design biomimético pode ser difícil e envolver um longo período de tempo. Experiências anteriores são importantes para uma melhor interpretação e aplicação das estratégias biológicas em projetos de design biomimético voltados para o desenvolvimento de produtos para a indústria e mercado. A abordagem metodológica do design biomimético requer uma adaptação aos métodos tradicionais através de modelos biomiméticos simples.

BRAINSTORM – tempestade de ideias bio-inspiradas. Fase de execução da abstração através de técnicas criativas e representação gráfica da estratégia. Esta fase precede o início da emulação dos princípios da natureza no design de uma estrutura para prancha de surf.

A estratégia remete ao desenvolvimento de um padrão estrutural composto por 'tubos ocos' distribuídos de uma forma que reforça a resistência mecânica do artefato final. A ideia apresenta uma configuração de feixes de sustentação distribuídos em pontos realmente necessários, sem excessos, reduzindo a quantidade de matéria e energia gasta.

A ideia de um Voronoi¹ como padrão estrutural distribui as pressões e forças de torções pelos pontos de tensão do artefato. Na coleta de dados em anatomia vegetal ficou evidente que: ao passo que as células do parênquima (diâmetros maiores com paredes finas) se aproximam do xilema, o diâmetro das células diminui, porém, espessamento da parede secundária as torna mais reforçadas. Do mesmo modo que o formato das células varia de arredondadas a poligonais. A configuração estrutural alcançada requer processos de produção de pranchas de surf alternativos adequados e alinhados aos ensinamentos dos Princípios da Vida.

- **Emulação:** Sentimento que instiga a imitar ou a exceder outrem de forma estimulante e cooperativa (Biomimicry Institute 3.8, 2015).

Na etapa de emulação dos princípios da natureza aos princípios de design, foi necessária a utilização de um método de modelagem digital através do Design Paramétrico como meio de conversão das estratégias do Agave em tecnologia, dialogando com a natureza. Os processos de fabricação por adição proveniente de tecnologias de impressão digital permitem a adição de matéria e energia somente onde é necessário. Esta fase teve o apoio ferramental do grupo BI/OS Code em 2015, onde o arquiteto Paulo Carvalho executou a modelagem paramétrica utilizando o *plug-in Grasshopper* do software de modelagem 3D *Rhinoceros*.

11 INÍCIO DO PROCESSO DE EMULAÇÃO AOS PRINCÍPIOS DE DESIGN

Logo em seguida foi definindo a estratégia de configuração para o *Grasshopper* da estrutura do Agave. Primeiramente, define-se o input inicial, que neste caso foi o (*outline*) do *shape* de uma da prancha. Para o preenchimento interior, foram

definidas células com maior diâmetro possuindo paredes finas, para pontos de reforço, foram definidos tubos longitudinais com paredes espessadas e para a superfície da borda, células mais densas. A solução pensada foi o Voronoi, onde as células foram escalonadas com furos nas paredes, depois receberam tratamento de suavização da forma com união final dos elementos.

Teste piloto foi tomado como base apenas uma secção de uma prancha de surf para recebimento desta estrutura bio-inspirada, pois já seria o suficiente para validação parcial desta pesquisa e da aplicação das estratégias do agave em artefatos aquáticos com auxílio da tecnologia. De fato, são incontáveis as possibilidades de artefatos que podem receber esta aplicação estrutural com propriedades de leveza e resistência. Com a lógica da diferenciação das células bem definidas, cada célula é um elemento individual, porém são reconhecíveis e agrupadas por padrões. Em cima desta malha bidimensional com padrão de Voronoi, aplicou-se a função de extrusão para configurar os "canaletas" iniciais.

A Figura 23 apresenta a configuração de uma malha nos elementos cilíndricos determinando os campos de pontoação, onde foi aplicada a estratégia da pontoação. Essas regiões tornam-se vazadas, reduzindo o peso e otimizando a economia de matéria-prima e proporcionando flexibilidade de uma forma que não compromete a resistência da estrutura do artefato, distribuindo os pontos de tensões ao longo de cada elemento isolado e em conjunto por toda estrutura. Esta mesma abstração foi aplicada em todas as células.

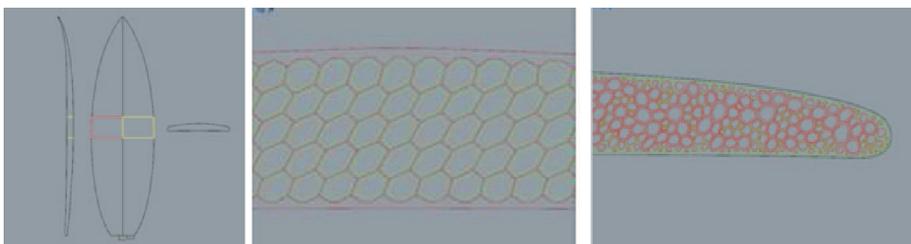


Figura 23: Definindo a delimitação inicial dos elementos.

Fonte: Autor, (2015).

O próximo passo foi determinar a melhor estratégia para representar o preenchimento das bordas adicionando uma população de células com maior densidade e concentração. Esta camada de células dá a resistência necessária para suportar o peso em cima da prancha e maiores impactos e torções. Esta camada funciona como a laminação de uma prancha de surf composta com fibra de vidro e resinas poliméricas, é o reforço necessário para dar resistência, impermeabilização do bloco contra infiltrações. Neste caso, a solução foi bio-inspirada na resistência que a casca (tecido de revestimento) do escapo floral do Agave apresenta.

Neste momento encontra-se finalizada toda a configuração da modelagem paramétrica com base nas estratégias do Agave direcionado para aplicação em uma secção de uma prancha de surf. De fato, durante a interação do processo de desenvolvimento enquanto a estratégia tomava corpo pela conversão dos princípios da vida e abstração das estratégias da natureza, via-se nitidamente o potencial de aplicações em artefatos diversos que são oportunidade de experimentos e pesquisas futuras.

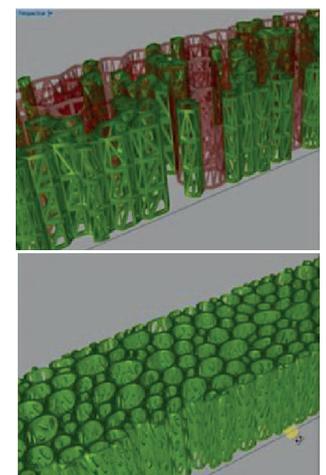
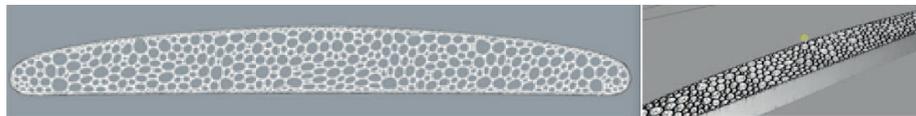


Figura 24: A suavização das bordas e do formato tornou a aparência das células mais orgânicas.

Fonte: Autor, (2015).

Figura 25: Corte transversal da secção de uma prancha de surf apresentando a estrutura com aplicação das estratégias de leveza e resistência do Agave.

Fonte: Autor, (2015).



12 AVALIANDO

Esta é a última etapa do diagrama *Biomimicry Thinking – Desafio de biologia*. Neste momento ocorreu a avaliação e aproximação da realidade das estratégias do Agave materializadas na estrutura de uma de uma prancha de surf. No subitem ‘Medir usando princípios da vida’, foram feitas algumas análises sobre os resultados obtidos com intuito de medir o nível de interação e coerência entre a problemática e a solução com a inclusão dos Princípios da Vida em forma de requisitos de projeto, viabilizado pelas possibilidades da fabricação digital por processos de adição.

Para que este teste piloto se consolide e se atinja parte da validação deste trabalho, foi tomada como base uma parte da estrutura apresentada para impressão 3D. Foram feitas adaptações e algumas restrições para viabilizar a impressão de um protótipo da estrutura paramétrica aplicada na secção da borda de uma prancha de surf, que foi o artefato gerado como teste e exemplo de aplicação das estratégias do Agave. Esta avaliação foi feita através da medição do atendimento aos princípios da vida, e acabou por validar os resultados esperados nesta pesquisa quando percorridos os passos da abordagem *Biomimicry Thinking* do *Biomimicry Intitute 3.8*.

Este resultado final é apresentado como forma de validação juntamente com uma breve análise sobre o atendimento dos Princípios da Vida. A modelagem paramétrica da estratégia da natureza expande o potencial de inovação no design de pranchas e outros artefatos.

A possibilidade de fabricação digital foi um dos pontos chave desta pesquisa. Pois uma das propostas era a de rever os processos de produção de pranchas de surf através de inovações sustentáveis com base nos ensinamentos do Agave, que vão muito mais além da utilização do mesmo, apenas como matéria-prima.

De fato, os ensinamentos da natureza com base na metodologia *Design Lens* (*Biomimicry Institute 3.8*) aliados a tecnologias digitais têm grande potencial de inovação em design e sustentabilidade. O design paramétrico viabilizou a conversão das estratégias utilizadas pelo vegetal na materialização de estruturas leves e resistentes, configuráveis através de parâmetros manipuláveis e adaptáveis a qualquer input tomado como ponto de partida.

O artefato escolhido para fabricação digital e análise estrutural e funcional, foi uma secção da borda de uma prancha de surf, através da impressão 3D de um protótipo medindo (10 x 4 x 6 cm) em escala de 1 x 1.



Figura 26: Impressão digital: protótipo da estrutura bioinspirada aplicada na borda de uma secção de um bloco de prancha de surf.

Fonte: Autor, (2015).

- **Medir usando princípios da vida:** Integração final dos princípios da vida. Em relação ao cumprimento de princípios que não puderam ser atendidos antes da fase de emulação, pois foram enxergados como princípios de medição e revisão de um ciclo que se conclui. Após uma análise do

protótipo, neste momento foi possível fazer esta verificação, pois são princípios relacionados às revisões finais para serem incorporados em replicações.

O princípio *evoluir para sobreviver* pode ser atendido por completo quando ocorre a assimilação e integração de erros, incorporando-os na forma de aprendizado para que não se repita em novas aplicações das estratégias. Isto pode ser incorporado através da remodelação de informações introduzidas no ambiente de projeção, neste caso o *Grasshopper*, que trabalha com inputs, onde a mudanças destes cria novas possibilidades de solução.

O princípio *adaptar-se às condições de mudança* mantém a sua integridade através da autorrenovação, adicionando matéria e energia para melhorar a estratégia. No caso desta pesquisa, após a análise detalhada do protótipo, verificou-se que a resistência da estrutura esta foi alcançada, apresenta-se bastante eficaz. Quanto à leveza, esta também foi atendida, mas percebeu-se que a espessura de toda estrutura pode ser reduzida. Onde, em um novo ciclo produtivo esta otimização de matéria e energia representa melhores desempenhos, adaptando-se às condições de mudança em prol do aperfeiçoamento do sistema. Em relação à descentralização da aplicação das estratégias, estas podem ser aplicadas em qualquer localidade e condição local, adaptando-se ao input do projeto conforme as diretrizes de configuração fazendo uso de materiais naturais locais.

Também no sentido de adaptar-se à novos cenários, as estratégias que funcionam no vegetal e que foram convertidas ajustando forma à função em uma estrutura paramétrica. Porém esta estratégia pode ser direcionada para outras condições ambientais e diversos artefatos, por exemplo: embarcações no geral, barcos, lanchas, caiaques, remos para caiaques e SUP (*Stand up paddle*), decks de cais em portos, mobiliário no geral, artefatos esportivos, bicicletas, skates, automóveis, tecnologias aeroespaciais, na arquitetura as aplicações são incontáveis, assim como na construção civil. Estas estratégias também podem ser direcionadas para isolamento térmico e acústico dentre inúmeras outras aplicações.

Do mesmo modo, o princípio ser eficiente em materiais e recursos foi atendido seguindo os processos da natureza que se desenvolve adicionando matéria-prima e energia locais somente onde é necessário. Este princípio foi representado pelo processo de fabricação digital através da impressão 3D atuando por processos de adição. Já a integração de processos de reciclagem com materiais que são reconhecidos pelo ciclo de realimentação do sistema complementa a eficiência energética e otimização de material.

Para finalizar, o princípio *ser localmente ligado e responsivo*, pode ser atingido com ciclos de *feedback*, usando e principalmente ajustando as informações geradas ao longo de toda a pesquisa, envolvendo as informações obtidas com as análises do protótipo elencando os Princípios da Vida. Estes fatores são na verdade, respostas para melhoramento das estratégias, onde se devem envolver as informações em fluxos cíclicos para modificar e readequar o sistema e melhorando-o como um todo.

13 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Desta forma, completa-se um ciclo inteiro e as quatro etapas da metodologia *DesignLens Biomimicry Thinking* – Desafio de biologia. O processo de desenvolvimento da pesquisa gerou discussões e resultados durante todo o trajeto ao apresentar os meios em cada etapa e a forma como foi concluída cada uma. A efetivação de cada uma destas etapas gerou diretrizes e parâmetros com base nos Princípios da Vida. Esta foi uma das principais características identificadas quando se caminhou através das fases dos diagramas, foi necessário recorrer e desenvolver um diálogo com o embasamento teórico que apresentou elementos geradores de discussões, tomadas de decisões e conclusões.

Esta pesquisa buscou informações na natureza, com intuito de se descobrir soluções técnicas e sustentáveis para a produção de pranchas de surf, onde as soluções propostas nesta pesquisa apresentam grande potencial de inovação em design e sustentabilidade através do design biomimético. De fato, a estrutura das paredes celulares do caule do Agave, apresentaram as estratégias necessárias para funções de leveza e resistência, e conseqüentemente flutuação para pranchas de surf. Concluiu-se que o agave só aplica a lignina em quantidades mínimas somente onde é necessário para que proporcione à planta a sustentação e resistência mecânica com economia de peso. Devido ao fato da planta ter um período de crescimento em altura bastante rápido, alcançando mais de sete metros no momento de florescência, precisa atuar com leveza e economia de matéria. Portanto na linha deste raciocínio, o Agave atua em um *optimum* de economia de matéria e energia como se imaginou nas etapas iniciais de descobrimento do modelo natural.

De fato, a intenção não era a de reproduzir uma cópia fiel da natureza e sim emular suas estratégias e princípios convertidos para área projetual. Conseguiu-se atingir os objetivos da pesquisa ao aplicar as estratégias do Agave na solução estrutural e processos de produção de pranchas surf para que se tornem condizentes com os ensinamentos da natureza. Quando os processos de fabricação digital foram incorporados, a configuração e execução das estratégias demonstrou ser de grande eficiência, o que fez com se pensasse em aplicações para diversos artefatos. Vale salientar que o escopo desta pesquisa não adentra na investigação e definição dos materiais mais adequados para produzir pranchas dentro desta perspectiva.

O protótipo da estrutura foi impresso em ABS, um termoplástico rígido e leve, com flexibilidade e resistência na absorção de impactos, muito utilizado na fabricação de produtos moldados para direcionamentos diversos. Porém a escolha deste material se trata apenas do material mais acessível e disponível para impressão. Esta peça se trata de um protótipo para estudo volumétrico e analítico da estrutura aplicada. O desenvolvimento de um material convergente aos princípios da vida é um próximo passo para melhoramento e refinamento de aplicação dos princípios da vida, neste caso o material deve se adequar aos processos naturais de reciclagem do meio ambiente.

14 REFERÊNCIAS

- APEZZATO-DA-GLÓRIA, Beatriz; CARMELLO-GUERREIRO, Sandra Maria. Anatomia Vegetal. Viçosa: Ed. UFV, 2006.
- BENYUS, Janine M. *Biomimética*: Inovação inspirada pela natureza. São Paulo: Pensamento, 2003.
- BERGES-MURO, L. *Approach to Biomimetic Design*. Learning and Application. Dyna – Scielo, v. 81(188), p.181-190, 2014.
- BIOMIMICRY 3.8. *Biomimicry Institute 3.8*. Disponível em: <<http://biomimicry.net/>>. Acessado em 15 nov. 2015.
- BLÜCHEL, Kurt G. *Biônica*: como podemos usar a engenharia da natureza a nosso favor. 1 ed. São Paulo: PHL, 2009.
- GONDIM, T. M. S.; SOUZA, L. C. *Caracterização de frutos e sementes de sisal* – Circular técnica 127 – Embrapa, Campina Grande, 2009.
- GRIJÓ, Paulo Eduardo Antunes 2011. *Estudo preliminar para gestão ambiental na produção de pranchas de surfe*. 3º International Workshop Advances in Cleaner Production – São Paulo, 2011.
- KAZAZIAN, T. *Haverá a idade das coisas leves*. São Paulo: Senac, 2009.
- MAIER, M.; SIEGE, D I.; 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
- 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.
- NULTSCH, W. *Botânica geral*. 10. ed. Porto Alegre: ArtMed, 2000.
- PHILLIPPI JR, Arlindo *et al*. Uma introdução à questão ambiental. *Curso de Gestão Ambiental*. Barueri, SP: Manole, 2004.
- QUEIROZ, N.; RATTES, R.; ARAÚJO, R. B. Biônica e Biomimética no Contexto da Complexidade e Sustentabilidade em Projeto. *Design Contexto: ensaios sobre design, cultura e tecnologia* – Design & Complexidade. Amilton Jose Vieira de Arruda (org.). v. 1, Cap. 7, p. 127-144, Recife: Ed. Universitária, 2015.
- RAVEN, P.H., EVERT, R.F. & EICHHORN, S.E. *Biologia Vegetal*, 7. ed. J. E. Kraus (Coord. trad.). Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2007.
- SILVA, O. R. R. F.; COUTINHO, W. M.; CARTAXO, W. V.; SOFIATTI, V.; FILHO, J. L. S.; CARVALHO, O. S. Cultivo do Sisal no Nordeste Brasileiro. *Circular Técnica 123*. Embrapa – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Campina Grande, 2008.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. *Fisiologia vegetal*. Porto Alegre: Artmed, 2004.
- ULYSSEÁ, 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.