

INVESTIGAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE LEVEZA E RESISTÊNCIA DAS FIBRAS DE AGAVE PARA MATERIAL DE IMPRESSÃO 3D BIOINSPIRADO

RESEARCH OF LIGHT STRATEGIES AND RESISTANT OF AGAVE FIBERS FOR BIO-INSPIRED 3D PRINT MATERIAL

AMILTON JOSÉ VIEIRA DE ARRUDA, PhD. | UFPE
EMÍLIA CRISTINA PEREIRA ARRUDA, Dra. | UFPE
RODRIGO BARBOSA DE ARAÚJO, MSc. | UFPE

RESUMO

Matérias-primas são fundamentais para fabricação de artefatos diversos. Porém, a crescente demanda por recursos naturais finitos para extrair matérias-primas contribui significativamente para a degradação ambiental. A substituição de materiais sintéticos por produtos naturais vêm ganhando espaço, como por exemplo, fibras lignocelulósicas. Dentre as fibras vegetais mais utilizadas, as de Agave sisalana são uma alternativa de extremo valor por apresentar excelentes propriedades mecânicas. Através de uma abordagem metodológica multidisciplinar em biomimética no campo do design de materiais e biologia, tem-se o objetivo de emular as estratégias da natureza complexa e multifuncional dos sistemas biológicos no desenvolvimento de materiais bioinspirados, sobretudo no contexto da fabricação digital. O desenvolvimento de novos biomateriais disponibilizados a partir da combinação de matérias-primas renováveis e biodegradáveis deve-se principalmente à hierarquia estrutural dos elementos que o constituem. Neste sentido, esta pesquisa adentra na investigação das propriedades mecânicas dos elementos que constituem as paredes celulares das fibras de sisal, para o desenvolvimento de um novo material bioinspirado nas estratégias de leveza e resistência do agave, direcionado à fabricação digital de artefatos sustentáveis.

PALAVRAS CHAVE: Biomimética; Design de Material; Agave; Fabricação Digital.

ABSTRACT

Raw materials are essential for the manufacture of various artifacts. However, the increasing demand for finite natural resources to extract raw materials contributes significantly to environmental degradation. The replacement of synthetic materials from natural products have been gaining space, such as lignocellulosic fibers. Among the most used vegetable fibers, those of Agave sisalana are an extremely valuable alternative because they have excellent mechanical properties. Through a multidisciplinary methodological approach in biomimetics in the field of materials design and biology, we aim to emulate the strategies of the complex and multifunctional nature of biological systems in the development of bio-inspired materials, especially in the context of digital manufacturing. The development of new biomaterials available from the combination of biodegradable and renewable raw materials is mainly due to the structural hierarchy of the elements that constitute. In this sense, this search investigate of the mechanical properties of elements that constitute the cell walls of sisal fibers, for the development of a new bio-inspired material in agave's lightness and resistance strategies, directed to the digital manufacture of sustainable artifacts.

KEY WORDS: Biomimicry; Material Design; Agave; Digital Fabrication.



1. INTRODUÇÃO

A observação sistemática da natureza para aprender a resolver problemas técnicos tem sido algo que tem caracterizado a história da humanidade. No século XXI, as possibilidades são dadas pelas mais recentes tecnologias, ou seja, sistemas de produção e desenvolvimento de novos materiais.

Segundo Oxman (2010) a cultura de design moderno está passando por uma mudança para o design consciente do material. Inspirado nas estratégias da natureza, onde a geração da forma é impulsionada pelo desempenho máximo com recursos mínimos através da programação das propriedades do material. A autora propõe e desenvolve modelos e processos para uma abordagem baseada nos materiais e na geração de formas habilitadas computacionalmente. Este aprendizado pode se emulado através de tecnologias emergentes, como a fabricação digital. A aplicação de tecnologias digitais tem grande relevância para a área de projeto, principalmente quando alinhadas aos princípios de sistemas biológicos. Nas últimas décadas, as pesquisas bioinspiradas para resolução de problemas, têm focado no desenvolvimento de métodos e ferramentas para o uso sistemático e aplicação de informações dos elementos naturais. Dentro deste contexto, cientistas estão se permitindo usar a natureza como modelo para emular as técnicas de soluções da natureza.

De acordo com Kapsali (2016), o papel dos materiais no contexto de princípios biomiméticos pode revelar novas oportunidades de design. Segundo a autora, os materiais na natureza são limitados, porém bastante eficientes: 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. Deste modo, surge uma abordagem engenhosa do design em biologia 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 e sua estrutura é montado, ao invés de propriedades decorrentes da química.

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 forte ou usamos mais material. Contudo, se revisarmos o design, poderíamos não utilizar o mesmo material em maior quantidade, mas

sim, utilizar alternativas bioinspiradas com otimização em matéria e energia. Hoje, existem mais de 300 tipos de polímeros comerciais usados para fabricar nossos produtos, muitos dos quais derivam de recursos naturais cada vez mais esgotados, exigindo grandes quantidades de energia e processos tóxicos para produzi-los, que ao final da vida útil acabam em aterros sanitários (KAPSALI, 2016).

Materiais fortes como metal, plásticos reforçados e polímeros super-resistentes são componentes essenciais em nossos ambientes construídos. Contamos com a força desses materiais para manter as coisas, mas a natureza nos mostra que podemos construir estruturas fortes a partir de materiais fracos. A natureza nos mostra como comportamentos complexos e avançados podem emergir de uma abordagem hierárquica para o design. O princípio biomimético da maximização de recursos demonstra como uma estrutura forte pode emergir de materiais fracos.

Por outro lado, o desenvolvimento econômico baseado em tecnologias industriais mais limpas têm se tornado práticas que a sociedade começou a discutir nos últimos anos. Questões relacionadas à variável ambiental resulta em um modelo de desenvolvimento econômico baseado em inovações tecnológicas mais limpas que contribuam para uma maior integração com o meio ambiente, utilizando formas mais eficientes de matéria-prima e energia. Compósitos biodegradáveis e de fontes renováveis tem tido destaque, devido a constante busca de materiais que substituam total ou parcialmente os polímeros derivados do petróleo. Neste aspecto, o desenvolvimento de novos biomateriais ou biocompósitos ocorre a partir da combinação de matérias-primas renováveis e biodegradáveis, proporcionando a redução de resíduos tóxicos.

Conforme Carneiro (2017), não somente por questões ambientais, mas também por razões técnicas e econômicas, as fibras vegetais vêm ganhando espaço na indústria. Sendo utilizadas, em larga escala, na substituição de compostos reforçados por fibra sintética. Essas mudanças ocorreram em função das fibras serem naturais, biodegradáveis, recicláveis e de baixo custo, com larga aplicação na indústria automotiva, indústria de tapeçaria e o setor da construção civil, por exemplo. Muitas fibras lignocelulósicas vêm ganhando espaço, dentre elas, destacando-se a de sisal, proveniente da planta agave, produzida no Nordeste do Brasil, que apresenta vantagens técnicas, econômicas e ambientais. Constituindo-se, também, em excelente matéria-prima para a obtenção de celulose. Dentre as fontes de celulose, a fibra de sisal (Agave sisalana Perr), pode apresentar até 75% de celulose em sua composição. O sisal é uma alternativa de extremo valor, devido, principalmente,

as suas excelentes propriedades mecânicas. Destaca-se, portanto, que as fibras de sisal apresentam comportamento mecânico semelhante às fibras sintéticas, com relação à força de tração (CARNEIRO, 2017).

Em estudos realizados por Araújo (2015), verifica-se que a planta Agave apresenta estratégias biológicas de leveza e resistência. Com a utilização de técnicas de microscopia pode-se enxergar a organização estrutural da disposição das células lignocelulósicas presentes no tecido vegetal de agave (figura 01).

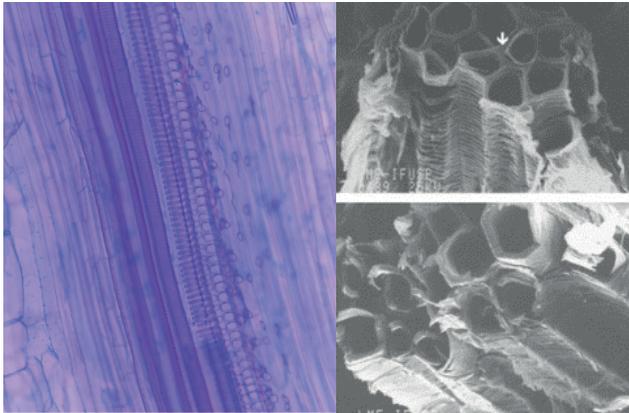


Figura 01 – A orientação das fibras depositadas paralelamente é um dos fatores significativos para as propriedades mecânicas da planta. Esta organização estrutural resulta em uma maior resistência à tração. Imagem à esquerda: microscopia ótica, ampliação em 200 μm . Imagens à direita: micrografia (SEM), ampliação em 10 μm .
Fontes: Imagem à esquerda: autores, (2015). Imagem à direita: Martins *et al.*, (2004).

Ainda segundo o autor a estrutura das paredes celulares do tecido vegetal do Agave, apresentam as estratégias necessárias para funções de leveza e resistência com otimização de matéria e energia. Dentre outros fatores, a deposição de lignina (polímero natural estrutural responsável pela rigidez das células vegetais) ocorre em quantidades mínimas para que proporcione à planta sustentação e resistência mecânica com economia de peso, mantendo assim, a leveza e resistência necessária com economia de matéria e energia. Estas propriedades aplicadas no desenvolvimento de uma estrutura genérica bioinspirada pode ser direcionada à uma gama de artefatos que requerem estruturas leves e resistentes. Este processo foi guiado através de uma abordagem metodológica em biomimética, denominada *Biomimicry Thinking*, desenvolvida pelo Instituto de Biomimética 3.8, levando-se em consideração princípios de sustentabilidade presentes no meio natural.

O estudo realizado por Araújo (2015) teve como objetivo desenvolver uma estrutura biomimética inspirada na configuração das paredes celulares lignocelulósicas de agave. Para emulação das estratégias biológicas em

artefatos materializados, processos de modelagem digital, design paramétrico e impressão 3D (figura 02), permitiu o alinhamento aos princípios de crescimento e desenvolvimento de modelos biológicos, que depositam matéria prima e energia fazendo uso do princípio da maximização de recursos.



Figura 02 – 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: Autores, (2015).

Um estudo mais aprofundado das propriedades mecânicas das fibras de agave/sisal, emulados um material bioinspirado para fabricação digital permitirá um maior estreitamento aos princípios da vida e inovação em sustentabilidade. O desenvolvimento de um material biodegradável, que seja constituído com elementos reconhecíveis pelo meio ambiente é um próximo passo para aplicação dos ensinamentos da natureza ao mundo material humano.

Este artigo apresenta uma investigação dos materiais que compõem as paredes celulares das fibras de agave/sisal para entender quais elementos são responsáveis pelas propriedades mecânicas. Estas propriedades serão emuladas no desenvolvimento do design de um material bioinspirado para impressão 3D. Este material deve se adequar aos processos naturais de reciclagem do meio ambiente através de condições de biodegradação e atender às exigências mecânicas com maximização de matéria prima e energia (baixo acúmulo de matéria seca), que seja biodegradável e se reintegração ao meio natural ao final da vida útil. Este material em desenvolvimento possibilitará a materialização de artefatos digitais impressos.

2. DESIGN DE MATERIAIS - PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

Vivemos em um mundo de materiais. 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. 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).

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.

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 forte 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 tóxicos para produzir, e acabam em aterros sanitários (KAPSALI, 2016).

Estes são exemplos, segundo a literatura, que podem nortear o estabelecimento dos requisitos para o design de um novo material ou produto, 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 até hoje a forma como os átomos são organizados na configuração de algum material desenvolvido pela engenharia, estamos limitados ao que a tecnologia impõe ao homem. 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).

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 novo material bioinspirado. 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, como o Agave, que apresenta em sua anatomia celular, propriedades de leveza e resistência, que convertidas em tecnologia e incorporando os Princípios da Vida (*BIOMIMICRY 3.8*, 2015), contribuem para uma maior aproximação com o meio natural (ARAÚJO, 2015).

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. 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 com base na biologia.

3. BIOMIMÉTICA

No passar dos séculos, vários foram os povos que se inspiraram na natureza para resolver problemas, desta forma foram aprimorando este conhecimento. Encontra-se na literatura, inspiração na natureza e referências à biônica, entre muitos autores conhecidos, como: Werner Nachtigall, fomentador e criador de princípios da Biônica; Victor Papanek também cita em sua obra "Design for the Real World" (1971) e aborda a biônica como meio de projeto, Bruno Munari em "Das coisas nascem coisas" (1981), dentre outros (QUEIROZ, RATTES E ARAÚJO 2015).

Muitos pesquisadores no século XX passaram a ver a natureza como uma grande solucionadora de problemas. Sendo a bioinspiração uma valiosa arma para melhorar o desempenho de uma gama de artefatos concebidos pelo homem. Dentro deste contexto, mais especificamente a partir de 1958, a inspiração na natureza torna-se uma ciência através do termo Biônica. No passar dos anos, ao serem assimiladas as discussões contemporâneas, como sustentabilidade e complexidade no projeto, surgem outros termos como Biomimetismo, Bioinspiração e Biodesign. Sendo hoje o mais difundido, a Biomimética.

De acordo com Freitas e Arruda (2017), em 1969 o engenheiro Otto Schmitt apresenta a definição do termo Biomimética em um artigo com o mesmo título, tendo publicado oficialmente o termo no dicionário de Webster em 1974: "Trata do estudo da formação, estrutura ou função de substâncias e materiais biologicamente produzidos (como as enzimas ou a seda), e mecanismos e processos biológicos (como a sintetização de proteínas ou de fotossíntese) especialmente para os propósitos de sintetização de produtos similares por mecanismos artificiais que mimetizam os naturais".

Benyus (2003) foi quem expandiu o conceito criando o termo Biomimética. Em seu ponto de vista, além de considerar a mimetização da forma biológica, o Biomimetismo inclui a inspiração nos conceitos de replicação do comportamento dos organismos biológicos. É uma forma de projetar que se baseia nas formas e estruturas da natureza. Segundo a autora, a natureza oferece infinitos exemplos de como revolucionar os produtos, processos e a nossa vida cotidiana na busca de soluções sustentáveis, inspirando-se em modelos da natureza que se desenvolveram e foram adaptando estratégias pelo tempo a milhões de anos.

A ideia central é que a natureza, pela necessidade de adaptação, já resolveu muitos dos problemas com que nos deparamos no dia a dia: energia, estruturas leves,

produção de alimentos, controle de temperatura, processos químicos limpos, transporte, embalagem, e mais uma gama de possibilidades.

Ossos, dentes e conchas marinhas podem ser considerados exemplos de materiais complexos desenvolvidos pela natureza e seu principal parceiro, o tempo. Como resultado de muitíssimos anos de evolução, materiais como esses apresentam propriedades de grande interesse para o ser humano, mas o desenvolvimento de rotas artificiais de fabricação para chegar a essas propriedades vem colocando grandes desafios aos cientistas (STUDART, 2012).

Perante esta perspectiva, vários pesquisadores, designers e projetistas têm buscado na natureza, princípios e soluções como aplicação de um design sustentável. A biomimética é um instrumento que se baseia na natureza devido ao fato de sistemas biológicos existentes terem conseguido sobreviver, ao longo de milhares de anos através da adaptação às condições do meio ambiente predominante, utilizando os recursos da natureza de uma forma surpreendentemente eficiente. O designer, então, pode e deve se apropriar desses princípios para se lançar à criação de produtos e materiais mais inteligentes, inovadores e com menor impacto sobre o meio ambiente.

Para Freitas e Arruda (2017), uma forma de realizar o estudo do funcionamento dos sistemas físicos e mecânicos naturais pode se dar através de um processo de analogia. Sendo a Analogia Funcional um meio de tentar compreender quais funções os modelos naturais desempenham tanto no todo, quanto em suas partes e componentes. Em outras palavras são evidenciados os atributos funcionais, qualidades específicas que podem ser mimetizadas a partir da estrutura natural analisada, uma vez que os organismos naturais desenvolveram habilidades complexas e altamente adaptáveis, a ideia é mimetizar essas aptidões funcionais e aplicá-las em artefatos artificiais.

De acordo com Oxman (2015), inspirado pela natureza, surgiu recentemente uma nova abordagem de design chamada ecologia material que visa estabelecer uma relação mais profunda entre o objeto de design e seu ambiente. A chave para essa abordagem é a percepção de que o ambiente e o objeto de design interagem através de múltiplas dimensões e um espectro de variáveis ambientais. A ecologia material visa preencher esta lacuna aumentando a dimensionalidade do espaço de design através do design de materiais multifuncionais e fabricação digital. Ao fazê-lo, surge uma visão holística do design que considera a computação, a fabricação e o próprio material como dimensões inseparáveis do design, o que resulta em objetos ecológicos desde o início.

3.1. Biomimicry Design Lens (lentes do design biomimético)

Esta pesquisa está apoiada em uma abordagem metodológica projetual na área da biomimética desenvolvida pela autora Janine Benyus e sua equipe de colaboradores do *Biomimicry Institute 3.8*, desenvolvida e aperfeiçoada 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).

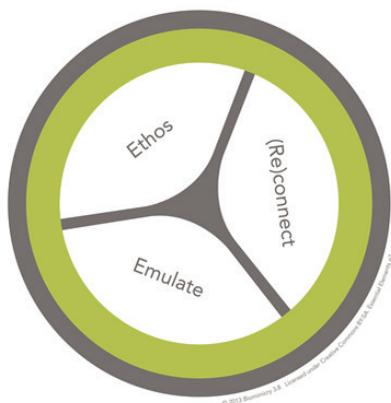


Figura 03 – Elementos Essenciais - *Biomimicry DesignLens*.
 Fonte: *Biomimicry Institute 3.8*, (2015).

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 foram 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:

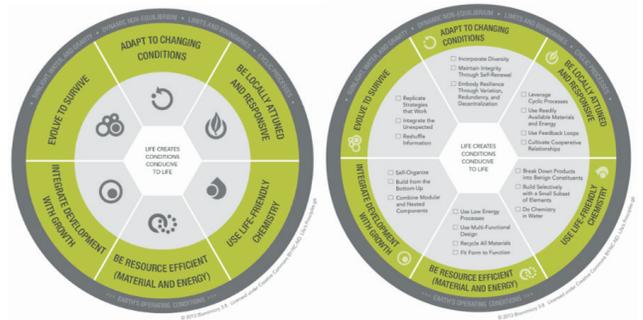


Figura 04 – Diagrama Princípios da Vida - *Biomimicry DesignLens*.
 Fonte: *Biomimicry Institute 3.8* (2015).

Segundo o diagrama, a natureza evoluiu para sobreviver, desenvolvendo estratégias de gerenciamento de informações, datando estratégias, identificando abordagens de sucesso e erro anteriores, integrando soluções alternativas para problemas similares e evoluindo tais abordagens criando novas soluções.

Para adaptar-se às condições de mudanças, a natureza apresenta ações e comportamentos que permitem resiliência, redundância e descentralização do sistema. Desprendimento de energia e adição de matéria o mínimo necessário. Incorporação da diversidade fazendo uso de processos, funções e formas que provêm um melhor funcionamento. Segundo este preceito, a forma deve seguir o desempenho pretendido.

O meio natural é atento e responsivo às questões locais, utilizando materiais locais e energia de fácil acesso, cultivando processos de cooperação mútua onde todos ganham e tirando proveito de fenômenos locais que se repetem (clima, ciclos, etc.). Incluindo o fluxo de informações em processos cíclicos, nunca lineares.

Ao ser eficiente em materiais e energia, a natureza integra múltiplas e complexas necessidades em soluções elegantes evitando desperdício. Minimiza o consumo energético buscando fontes renováveis e gerenciando o uso de materiais em ciclo, ou seja, planejando o ciclo de vida conforme estações e períodos de sazonalidades. A química presente na natureza ocorre de modo amigável à vida usando poucos elementos de uma forma elegante, evitando produtos tóxicos e usando água como solvente.

Deste modo, ao integrar conhecimento e crescimento, a vida combina elementos modulares e sistemas que evoluem do simples para o complexo. Assim, pode-se compreender o funcionamento do todo e também dos pequenos componentes e sistemas que a compõe, pois a natureza cria condições para que os componentes interajam com possibilidade de crescimento e auto-organização.

3.2. Biomimicry Thinking

Enquanto método ou ferramenta, é uma estrutura que auxilia a prática de projetos bioinspirados. Se encaixa no processo de qualquer disciplina ou em qualquer escala de design. As etapas possibilitam tomadas de decisões e fornecem o contexto para onde seguir, como e o porquê das ações, decisões e feedback das etapas. Inclui quatro áreas que fornecem os valores para o processo: Escopo, Descobrendo, Criando e Avaliando. A abordagem não é rígida, e pode-se percorrer o diagrama *Biomimicry Thinking* de dois modos. Ambos os casos apresentam caráter cíclico de abordagem, e considera-se que os melhores resultados surgem com o uso do diagrama múltiplas vezes em um processo iterativo, resultando em aprimoramento do projeto (BIOMIMICRY INSTITUTE 3.8, 2015).

A primeira possibilidade de abordagem é denominada *Challenge to Biology* (Desafio à 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.

Uma outra possibilidade, denominado *Biology to Design* (Biologia para Design) (figura 05), ocorre quando a abordagem do diagrama segue de forma mais aleatória de acordo com a necessidade do projeto, ou quando o processo se configura à partir de uma inspiração biológica e se busca dar um direcionamento para desenvolvimento de algum projeto ou artefato bioinspirados. O uso deste diagrama auxilia o processo de criação para inventores, empreendedores e estudantes que não tem seu próprio processo de projeto, mas que estimulam processos criativos através de analogias, facilitando o caminho para inovação.

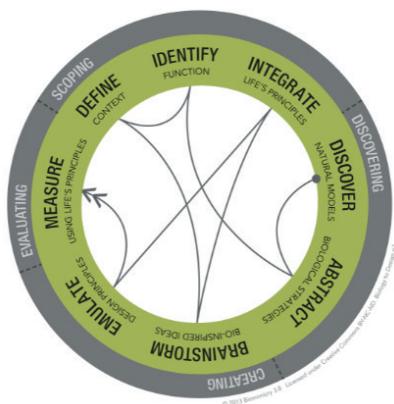


Figura 05 – Diagrama Biomimicry Thinking - Biology to Design
Fonte: Biomimicry Institute 3.8, (2015).

O diagrama é composto por quatro campos principais: 1. Escopo: dividido em três etapas, onde se define o contexto do problema, identificação das funções necessárias ao projeto e integração dos princípios da vida; 2. Descobrendo: dividido em duas etapas, descobrindo um modelo natural e abstração das estratégias biológicas; 3. Criando: subdividido em duas etapas, brainstorm para ideias bioinspiradas e emulação dos princípios da vida; e 4. Avaliando: onde se avalia o projeto usando como medida, os princípios da vida. O processo atinge melhores resultados quando em processos iterativos

Desta forma, nesta pesquisa, os diagramas *Biomimicry Thinking* possibilitam a condução do processo de pesquisa e projeto, tanto para obtenção e organização de *inputs* gerados à partir da investigação das propriedades mecânicas do Agave, como em paralelo, auxilia o processo de analogia e abstração das estratégias biológicas para o design de materiais bioinspirados. Além disso, possibilita também, a emulação das estratégias de leveza e resistência das fibras de agave, no design de um material bioinspirado para fabricação digital fazendo uso de tecnologias existentes, como as impressoras 3D. Os *outputs* gerados apresentam potencial de inovação em sustentabilidade na área do design biomimético de materiais e estruturas biologicamente inspirados.

A abordagem para desenvolvimento desta pesquisa se dá através da modalidade *Biology to Design*. Iniciando o processo na fase de descobrimento do modelo natural, nesta pesquisa o agave, onde se tinha um conhecimento prévio das estratégias de leveza e resistência, como pode ser verificado em Araújo (2015). Assim como, o potencial comercial para aplicação de suas fibras na indústria, devido apresentar altos coeficientes de rigidez e elasticidade, segundo a literatura especializada (CARNEIRO, 2017).

O segundo momento desta pesquisa está alocada na fase de abstração das estratégias biológicas, buscando uma área de aplicação para as estratégias do agave. Na sequência ocorre a identificação das funções necessárias para o projeto, posteriormente definindo o escopo do contexto da pesquisa (pode ser entendido como uma fase de definição da problemática). A próxima etapa convém criar ideias bioinspiradas para emulação em estruturas leves, resistentes e com otimização em matéria e energia, com foco no design de um material para impressoras 3D. Em seguida ocorre a incorporação dos princípios da vida do *Biomimicry DesignLens*, que são princípios sustentáveis, realizando uma reintegração do campo do design e fabricação digital com o meio natural. A fase emular representa os princípios, padrões, estratégias e funções

encontradas na natureza que podem inspirar o design. A última etapa está relacionada com materialização e prototipação das ideias para testes em artefatos digitais e ensaios mecânicos. A validação ocorre com a verificação ao atendimento dos princípios da vida elencados no processo no início do projeto/pesquisa. Ciclos iterativos de replicação do processo, implica em melhores resultados.

4. AGAVE

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 cultivo é direcionado para a produção e confecção de cordas através da utilização das fibras de suas folhas. Os produtos obtidos mais exportados são na forma de fibras, fios, cabos, cordas, cordéis e tapetes, onde 70% da produção de sisal são direcionados à exportação. É amplamente aplicado em materiais compósitos na substituição de fibras sintéticas. O Agave também é utilizado para confeccionar artigos de artesanato e o pseudocaulo da planta é usadas na cobertura de casas e na construção de cercas, assim como, na produção de produtos de nicho de mercado, como pranchas de surf, porém não possui valor comercial comparável à fibra da folha. Dentre muitas outras opções de utilização desta planta que apresenta propriedades de leveza e resistência, está a fabricação de blocos para pranchas de surf, devido à presença de tecidos vegetais composto por fibras lignocelulósicas, as quais estão presentes tanto nas folhas como no escapo floral do agave (ARAÚJO, 2015).

Agave é uma planta monocotiledônea da família Agavaceae (NETO, 2012, apud JUDD et al., 2007; GUTIÉRREZ et al., 2008). Dentre diferentes gêneros destaca-se Agave com 300 espécies distribuídas e cultivadas em regiões tropicais das Américas, principalmente em ambientes áridos e semiáridos. Porém praticamente todo o Sisal (nome vulgar) cultivado mundialmente possui, possivelmente, a mesma constituição genética, pois provém de plantas com estreita variação genética devido a utilização de bulbilhos como estratégia principal de propagação. (GONDIM, 2009, apud

SALGADO et al., 1979). Conforme Silva et al. (2008), o sistema radicular típico das monocotiledôneas é fasciculado, fibroso e em forma de tufo. É acaulescente, e no lugar do caule há um pseudocaulo suculento e com uma espessa camada de lignina, onde as folhas e o broto terminal se inserem e armazenam água e nutrientes.

Segundo Carneiro (2017) a espécie *Agave sisalana* se adaptou de forma favorável à região Semiárida do Nordeste brasileiro, apresentando melhor crescimento e desenvolvimento se cultivada em solo areno-argiloso com baixos índices de fertilidade. Necessitando de sol pleno e disponibilidade de água moderada para seu crescimento. Devido ao estresse ambiental por falta de água, a acumulação de matéria seca é reduzida, conseqüentemente a planta economiza mais água, conferindo adaptação à seca.

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) (2019). Quanto ao processo de reprodução do escapo floral, Silva et al. (2008) descreve que quando a planta está a ponto de florescer, surgem pequenas folhas que são estreitas e pontiagudas e estão localizadas ao redor do ápice do pendão. Quando ocorre a inflorescência, o ápice do caule se transforma em um pedúnculo floral que pode atingir de seis a oito metros de altura. Aparecem escamas parecidas com folhas, então emitem entre vinte e quarenta ramos que, por sua vez, originam grupos de flores de cor branca ou ligeiramente esverdeadas. Cada ramo produz em torno de quarenta flores e, 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" com seis e dez centímetros, e seis a oito folhas com pequenas raízes adventícias que caem da planta, atuando como estratégia de propagação de novas plantas.

4.1. 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).

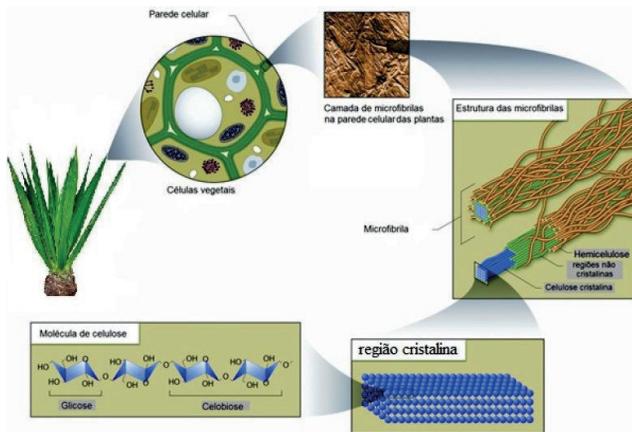


Figura 06 – Representação da estrutura e composição química da parede celular dos vegetais.
Fonte: CARNEIRO, (2017).

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; ANSELL e MWAIKAMBO, 2002; MEGGIATO JR., 2007; MARTIN et al., 2009)

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; ANSELL E MWAIKAMBO, 2002).

Segundo Holanda (2013) as fibras de sisal por possuírem uma composição química lignocelulósica, influencia a resistência da fibra. Neste sentido, a lignina que é um polímero complexo e de estrutura amorfa que proporciona resistência aos tecidos vegetais, assim como o enrijecimento da parede celular e a proteção das fibras contra danos químicos e físicos. Carneiro (2017, apud. Agarwal e Broutman, 1999) 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, haja 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 P e K 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 baixo módulo de elasticidade das fibras de sisal se dá ao fato de existirem de forças intermoleculares entre as cadeias de celulose.

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, consequentemente 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 (agave) 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).

Desta forma, a investigação das propriedades químicas e mecânicas das fibras de agave apresentam potencialidades para emulação de um material bioinspirado em estratégias de leveza e resistência, e condições de biodegradação para ser usado como insumo para impressoras 3D.

5. 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).

Ainda 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 (BARROS, 2011).

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. Desta forma são produzidos modelos físicos e artefatos com materiais diversos naturais e sintéticos. 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 (geralmente, 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. (BARROS, 2011).

Através destes processos podem ser impressas formas complexas sólidas ou ocas. O insumo para a impressoras tridimensionais é um arquivo CAD que descreve a forma da peça; o resultado é um único exemplar da peça feito em polímero, por exemplo. Mas existem outros materiais para impressão que são biodegradáveis sob condições específicas de biodegradação, como por exemplo o

PLA (poliácido láctico), e mais recentemente, filamentos de um compósito de madeira e resina (figura 07). 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.



Figura 07 – Estrutura bioinspirada impressa em 3D com filamento de madeira.
Fonte: *lilianvandaal.com*, (2017).

A seguir, apresentamos alguns processos de fabricação digital do tipo aditivo, onde 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 de impressoras 3D.

5.1. Principais tipos de impressoras 3D - técnicas de fabricação digital aditivas

Estes processos descritos neste tópico são tecnologias que possivelmente podem se beneficiar com 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.

De acordo com Celani (2008) as técnicas de fabricação digital podem ser classificadas em três categorias: aditivas, subtrativas e formativas.

Este tópico adentra apenas em alguns processos aditivos. As técnicas subtrativas atuam com perda considerável de matéria prima, fator que vai contra os princípios da vida de crescimento e desenvolvimento dos modelos naturais, elencados pelo *Biomimicry Institute 3.8*. As técnicas aditivas produzem objetos por meio da deposição sucessiva de camadas de material com baixos índices de perda

em relação aos processos subtrativos. Existem diversos processos de fabricação aditiva, como as impressoras a pó (3DP), modelagem por deposição de Material Fundido (FDM), e sinterização seletiva a laser (SLS), dentre outros.

5.1.1. 3DP - impressão 3D

A impressora possui um rolo que deposita e compacta finas camadas de pó sucessivamente. Sobre cada camada um cabeçote imprime seções do objeto a ser produzido com jatos de um líquido aglutinante, que pode ser incolor ou colorido. As seções vão se aglutinando umas sobre as outras, desde a base até o topo do objeto. As impressoras 3D permitem peças coloridas e diferentes materiais podem ser utilizados. Após o término da impressão, a peça é retirada da máquina e o excesso de pó é eliminado com um jato de ar comprimido. Existe ainda, meios de recuperação do restante do pó que não foi aglutinado. A peça impressa precisa ser coberta por uma resina para adquirir maior resistência.

5.1.2. FDM - modelagem por deposição de material fundido

Modelagem por deposição de material fundido, no geral termoplásticos (acrilonitrila butadieno estireno ABS, policarbonato PP, poliéster PS, poliestireno tereftalato PET, poliácido láctico PLA, etc.), que depois de aquecido e derretido é depositado camada a camada, formando o objeto. Essa técnica utiliza também plásticos pouco resistentes como material de suporte nas áreas em que a geometria do objeto o exige. Após a impressão o material de suporte é retirado.

5.1.3. SLS - Sinterização Seletiva a Laser

Semelhante à técnica 3DP, porém com a utilização a partir de polímeros em pó que se fundem quando expostos a um feixe de laser. O laser desenha sobre a superfície de cada camada a seção correspondente do objeto, fundindo-a a camada inferior.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A biomimética se mostra como uma das áreas de projeto que ainda trará grandes impactos positivos na vida das pessoas e do meio ambiente no geral. Existe na natureza uma grande quantidade de materiais que podem servir como fonte de inspiração, com funções e propriedades específicas que possuem grande potencial de serem traduzidas para a tecnologia, e aplicadas as suas estratégias como conceitos em projetos de design e em muitas outras áreas, no meio natural pode estar a solução para muitos problemas humanos (BLUCHEL, 2009).

Um grande problema com a impressão 3D em sua forma atual, é que muitas das impressoras contam com materiais de construção tóxicos, em uma crescente variedade de polímeros (plásticos), resinas e pós metálicos. Os materiais usados na impressão em 3D deveriam ser seguros para qualquer pessoa, mas liberam gases tóxicos quando aquecidos, dentre outros fatores. Deveriam ser provenientes de matérias-primas locais, e no final de suas vidas, deveriam ser "inutilizáveis" em materiais reutilizáveis, ou se tornarem biodegradáveis segundo a pesquisadora Janine Benyus.

A diferença com a natureza está gradualmente se fechando. Os pesquisadores estão usando microscópios eletrônicos e de força atômica, microtomografia e computadores de alta velocidade para olhar cada vez mais na microescala e em nanoescala os segredos da natureza, e uma crescente variedade de materiais avançados para imitá-los com mais precisão do que nunca.

Atualmente existem impressoras digitais que atuam por processos de adição. Com a tecnologia já existente, pode-se focar no desenvolvimento de um novo material bioinspirado, que poderá ser uma alternativa positiva para impressão de artefatos bioinspirados leves, resistentes e biodegradáveis, reduzindo os impactos ao meio ambiente. Se por um lado temos uma limitação para exploração de diferentes tipos de materiais e processos, por outro, temos a necessidade de intensa criatividade para obtenção de diferentes resultados com as tecnologias já disponíveis.

Quando as estratégias de modelos naturais são incorporados aos processos de fabricação digital, estas se apresentam como grande potencial de inovação em sustentabilidade, o que faz com se pense em aplicações para diversos setores e artefatos. Vale salientar que se trata de uma pesquisa em andamento, e neste caso adentra na investigação e definição das principais propriedades mecânicas presentes nas fibras de agave para desenvolvimento de um material mais adequado aos princípios da vida propostos pelo *Biomimicry Institute* 3.8.

Neste sentido, deixa margem para possivelmente se desenvolver o design de um material compósito bioinspirado nos elementos presentes nas paredes das fibras de agave que contém porções de celulose, lignina, proteínas, cálcio, alguns tipos de ceras naturais, dentre outros componentes. Este conhecimento permite entender a função de cada elemento e a relação entre eles de forma hierárquica, adentrando em níveis de complexidade de forma sistemática e analítica com realização de experimentos em anatomia vegetal e manipulação de materiais.

O envolvimento multidisciplinar de áreas diversas é uma característica da abordagem metodológica em biomimética. Esta pesquisa envolve design biomimético, biologia, química, engenharia de materiais e fabricação digital, para que se consiga atingir objetivos concretos. E antes mesmo da biomimética amadurecer em uma indústria comercial, tem-se desenvolvido como uma nova e poderosa ferramenta para a compreensão da vida.

REFERÊNCIAS

ASHBY, Michael F.; JOHNSON, Kara. **Materiais e Design: Arte e Ciências da Seleção de Materiais do Design do Produto**. 2. ed. Rio de Janeiro: Campus, 2011.

ARAÚJO, R.B. **Biomimética e artefatos para ambientes aquáticos – estratégias de leveza e resistência inspiradas na estrutura celular do agave**. Dissertação de mestrado. PPGD - Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2015.

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.

BENYUS, Janine M. **Biomimética: Inovação inspirada pela natureza**. Ed. Pensamento-Cultrix, 2003.

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.

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.

CARNEIRO, J. L. S. **Caracterização de acessos de sisal usando descritores da planta e da fibra**. Programa de pós-graduação em recursos genéticos vegetais - Universidade Estadual de Feira de Santana - BA 2017.

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

GONDIM, T. M. S.; SOUZA, L. C. **Caracterização de Frutos e Sementes de Sisal** - Circular técnica 127 - Embrapa, Campina Grande, 2009.

FREITAS, T., ARRUDA, A. **Novas estratégias da biomimética: as analogias no biodesign e na bioarquitetura**. Mix Sustentável. Florianópolis. v.4 - n.1 - p.73-82 – março, 2018.

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.

ISSG. **Global Invasive Species Database** (2019) Species profile: Agave sisalana. Downloaded from <http://www.iucngisd.org/gisd/speciesname/Agave+sisalana> on 22-01-2019.

KAPSALI, V. **Biomimetics for Designers - Applying Nature's Processes & Materials in the Real World**. Ed. hames & Hudson, London, 2016.

MARTIN, A. R., MARTINS. M. A., MATTOSO, L. H. C., SILVA, O. R. R. F. **Caracterização química e estrutural de fibra de sisal da variedade Agave sisalana** - Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 19, nº 1, p. 40-46, 2009 SP

MWAIKAMBO, L. Y., & ANSELL, M. P. (2002). **Chemical modification of hemp, sisal, jute, and kapok fibers by alkalization**. Journal of Applied Polymer Science, 84(12), 2222-2234. <https://doi.org/10.1002/app.10460>
NETO, L. C. I., MARTINS, F. M. **Anatomia dos órgãos vegetativos de Agave sisalana Perrine ex EN-GELM (Agavaceae)**. Revista Caatinga. 2012.

OXMAN, Neri. **Material-based design computation**. Thesis (Ph.D.)-Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Architecture, 2010.

OXMAN, Neri; ORTIZ, Christine; GRAMAZIO, Fabio; KOHLER, Matthias. **Computer-Aided Design**. Elsevier, Volume 60, 2015.

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.

SAPUAN, S.M.; et al. **Mechanical properties of woven banana fiber reinforced epoxy composites.** Mat. Des., v. 27, pag. 689-693, 2006.

SEELY, Jennifer 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.

SILVA, O. R. R. F., et al. **Cultivo do Sisal no Nordeste Brasileiro,** Circular Técnica n. 123, Embrapa, Campina Grande, PB, 2008.

AUTORES

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

AMILTON JOSÉ VIEIRA DE ARRUDA, PhD. | Universidade Federal de Pernambuco | Programa de Pós-graduação em Design | Recife, PERNAMBUCO (PE) - Brasil | Correspondência para: R. General Aduauto Gomes Barbosa, 94 Apt 302 - Várzea, Recife - PE, 50741-280 | E-mail: arruda.amilton@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1422-2486>

EMÍLIA CRISTINA PEREIRA ARRUDA, Dra. | Universidade Federal de Pernambuco | Programa de Pós-graduação em Biologia Vegetal | Recife, PE - Brasil | Correspondência para: R. Professor Moraes Rego, s/n - UFPE, Centro de Biociências, Departamento de Botânica - Cidade Universitária, Recife - PE, 50.670-901 | E-mail: emilia_arruda@yahoo.com.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5322-0686>

RODRIGO BARBOSA DE ARAÚJO, MSc. | Universidade Federal de Pernambuco | Programa de Pós-graduação em Design | Recife, PERNAMBUCO (PE) - Brasil | Correspondência para: R. Golfo de Tailândia, 55 Apt 301 - Intermares, Cabedelo - PB, 58102-092 | E-mail: rodrigoa82@hotmail.com

COMO CITAR ESTE ARTIGO

ARRUDA, Amilton José Vieira de; ARRUDA, Emília Cristina Pereira; ARAÚJO, Rodrigo Barbosa de. Investigação de estratégias de levaza e resistência das fibras de agave para material de impressão 3D bioinspirado. **MIX Sustentável, [S.l.], v. 5, n. 1, p. 53-65, mar-jun. 2019.** ISSN 24473073. Disponível em:<<http://www.nexos.ufsc.br/index.php/mixsustentavel>>. Acesso em: dia mês. ano. doi:<https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2019.v5.n1.53-65>.

DATA DE ENVIO: 01/02/2019

DATA DE ACEITE: 20/02/2019