



Universidade Federal de Pernambuco

Centro de Artes e Comunicação

Programa de Pós-Graduação em Design

Rodrigo Barbosa de Araújo

**BIOMIMÉTICA E ARTEFATOS PARA AMBIENTES AQUÁTICOS:** Estratégias de leveza e resistência inspiradas na estrutura celular do Agave.

**Recife, 2015.**

Universidade Federal de Pernambuco  
Centro de Artes e Comunicação  
Programa de Pós-Graduação em Design

**BIOMIMÉTICA E ARTEFATOS PARA AMBIENTES AQUÁTICOS:** Estratégias de leveza e resistência inspiradas na estrutura celular do Agave.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Design da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Design.

Recife  
2015

Catálogo na fonte

Bibliotecário Jonas Lucas Vieira, CRB4-1204

A663b Araújo, Rodrigo Barbosa de  
Biomimética e artefatos para ambientes aquáticos: estratégias de  
leveza e resistência inspiradas na estrutura celular do agave / Rodrigo  
Barbosa de Araújo. – 2015.  
115 f.: il., fig.

Orientador: Ney Brito Dantas.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco,  
Centro de Artes e Comunicação. Design, 2016.

Inclui referências.

1. Desenho industrial. 2. Agave (Planta). 3. Surfe. 4. Sustentabilidade. 5.  
Ecodesign. 6. Projeto de produto. I. Dantas, Ney Brito (Orientador). II.  
Título.

745.2 CDD (22. ed.)

UFPE (CAC 2016-114)



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESIGN**

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA  
DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE  
MESTRADO ACADÊMICO DE

**Rodrigo Barbosa de Araújo**

“BIOMIMÉTICA E ARTEFATOS PARA AMBIENTES AQUÁTICOS: ESTRATÉGIAS DE  
LEVEZA E RESISTÊNCIA INSPIRADAS NA ESTRUTURA CELULAR DO AGAVE.”

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: DESIGN E ERGONOMIA

A comissão examinadora, composta pelos professores abaixo, sob a presidência  
do primeiro, considera o(a) candidato(a) **Rodrigo Barbosa de Araújo**

Aprovado.

Recife, 21 de dezembro de 2015.

Prof. Ney Brito Dantas (UFPE)

Prof. Amilton José Vieira de Arruda (UFPE)

Prof. Carlos Alejandro Nome (UFPB)

Prof<sup>a</sup>. Emília Cristina Pereira Arruda (UFPE)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, criador de tudo e de todos, pelo dom da vida, pela proteção, pela integração à natureza, pela fé e esperança em um futuro melhor. Por me proporcionar saúde, e permitir contemplar a beleza do mar e da natureza. Pelo discernimento das coisas, pela fé para ter força de vontade e acreditar na realização desta pesquisa e obtenção do título de mestre.

Gostaria de agradecer a toda minha família, por acreditar e incentivar esta etapa da minha vida. Em especial aos meus avós, meus pais, M<sup>a</sup> Marta Vilarim Barbosa e João Araújo Filho pelo amor incondicional, confiança e total apoio, assim como, gostaria de agradecer ao meu irmão João Araújo Neto por acreditar em mim e pelo seu amor e amizade acima de tudo. Em especial também à minha companheira Adriana Nascimento pelo amor, confiança, presença e incentivos em todas as horas, por acreditar no nosso crescimento e busca de nossos planos de vida. Também agradeço aos amigos que estiveram direta e indiretamente envolvidos durante esta jornada, principalmente Rafael Rattes (designer) e Paulo Carvalho (arquiteto) (co-founders do grupo BI/OS, que contribuiu de forma efetiva no desenvolvimento da pesquisa). Utaiguara Borges, André Arruda (Zaca), Marivaldo Wagner, Thiago Bandeira e Carlos Alberto Faria pelos incentivos e palavras amigas nas horas mais difíceis.

Agradeço também aos funcionários do departamento, e principalmente a todos os professores do PPGDesign UFPE, pela formação, ensinamentos nas disciplinas cursadas, troca de conhecimentos e orientações para o desenvolvimento deste trabalho. Em especial ao meu orientador PhD. Ney Dantas (Lab. Nexus) por acreditar em mim e na minha pesquisa, suas orientações e pela paciência sempre positiva. Assim como, os professores PhD. Leonardo Castillo (Lab. Nexus) pelos ensinamentos em estágio docência, ao PhD. Amilton Arruda (Lab. de Biodesign) pelas coorientações e conhecimentos em biônica, e a Dra. Emília Arruda (LAVeg) por ceder seu laboratório para realização dos experimentos e suas orientações e ensinamentos em anatomia vegetal.

Por fim agradeço a CAPES por ceder a bolsa de estudos que foi de suma importância para materialização desta pesquisa.

“Importante não é ver o que ninguém nunca viu, mas sim, pensar o que ninguém pensou sobre algo que todo mundo vê.”

*Arthur Schopenhauer*

## RESUMO

A biomimética visa o estudo das estratégias da natureza, tendo-a como princípio e inspiração para solução de problemas de design e outras áreas. Esta pesquisa é uma abordagem alternativa para processos de geração de soluções no design de estruturas de pranchas de surf. Atualmente os materiais e processos produtivos destes artefatos ainda estão distantes dos aspectos ecológicos e de um ciclo de vida de produto sustentável. Existem algumas alternativas, onde as pranchas são fabricadas com materiais orgânicos, como por exemplo, o Agave, porém ainda com processos ultrapassados, contrários às estratégias da natureza, que atuam num *optimum* de economia de matéria e energia, dentro de um ciclo de vida sustentável bem definido. Com base na metodologia *DesignLens* (*Biomimicry Institute 3.8*), os ensinamentos da natureza aliados à tecnologia representam potencial de inovação em design e sustentabilidade. 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. Esta pesquisa obteve parte da validação através da impressão 3D de uma secção de uma prancha de surf como exemplo de aplicação, dentre muitas alternativas para as estratégias do Agave em estruturas.

**PALAVRAS CHAVE:** Biomimética. Agave. Prancha de Surf. Fabricação Digital.

## **ABSTRACT**

*Biomimetics aims study of the strategies of nature, having it as a principle and inspiration for design and troubleshooting other áreas. This research is an alternative approach to the processes of generation of solutions in the surfboards design. Currently the materials and production processes of these artifacts are still distant from ecological aspects and a sustainable product life cycle. There are some alternatives, where the boards are made with organic materials, as for example, Agave, but with outdated processes, contrary to nature, strategies that work in an optimum of economy of matter and energy, within a sustainable life cycle. Based on the DesignLens methodology (Biomimicry Institute 3.8), the teachings of nature coupled with technology represent potential for innovation in design and sustainability. When parametric design processes have been incorporated into the digital fabrication, if allowed to reach a level of materialization very close of the strategies of nature. The application of digital technologies has great relevance to the future of the project areas, especially when aligned to the principles of biological systems. This research obtained part of the validation through the 3D printing of a section of a surfboard as an example of application, among many alternatives for the strategies of Agave in structures.*

**KEY WORDS:** *Biomimicry. Agave. Surfboard. Digital Fabrication.*

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Elementos Essenciais. Fonte: BIOMIMICRY.NET, 2015. _____	<b>29</b>
<b>Figura 2</b> - Elementos Essenciais. Fonte: BIOMIMICRY.NET, 2015. _____	<b>30</b>
<b>Figura 3</b> - Biomimicry Thinking. Fonte: BIOMIMICRY.NET, 2015. _____	<b>36</b>
<b>Figura 4</b> - Desafio de biologia. Fonte: BIOMIMICRY.NET, 2014. _____	<b>37</b>
<b>Figura 5</b> - Biologia para design. Fonte: BIOMIMICRY INSTITUTE (2014). _____	<b>37</b>
<b>Figura 6</b> - Baleia Jubarte. Fonte: Inhabitat.com, 2014. _____	<b>38</b>
<b>Figura 7</b> - Nadadeira Nemesis da Speedo e monoquilha da Fluid Earth. Fonte: Inhabitat.com; BIOMIMICRY.NET, 2014. _____	<b>39</b>
<b>Figura 8</b> - Inspiração na nadadeira da Jubarte, maior eficiência. A empresa Whale Power Corporation teve inspiração nas barbatanas da Jubarte. Aplicação em hélices, escalonamento de redução de 32% no arrasto e melhora de 8% no impulso. Fonte: BIOMIMICRY.NET, 2014. _____	<b>39</b>
<b>Figura 9</b> - Planta em estágio final de ciclo, apresentando folhas senescentes e escapo floral (brácteas em detalhe) com frutos e bulbilhos. Um rebento inicia seu crescimento próximo à planta mãe. Areia – Paraíba. Fonte: GONDIM & SOUZA, 2009. _____	<b>41</b>
<b>Figura 10</b> - No escapo floral pode ocorrer de dois a três mil bulbilhos de vários tamanhos. Fonte: <a href="http://www.wikiwand.com/pt/Sisal">http://www.wikiwand.com/pt/Sisal</a> 2015. _____	<b>41</b>
<b>Figura 11</b> - Campo de Sisal em Barra de Santa Rosa, com destaque para os pendões florais em desenvolvimento – Paraíba. Fonte: Embrapa (2014). _____	<b>43</b>
<b>Figura 12</b> - Prancha feita com Agave. Fontes: <a href="http://ninelightssurfboards.files.wordpress.com/2008/05/agav5.jpg">http://ninelightssurfboards.files.wordpress.com/2008/05/agav5.jpg</a> , 2014; <a href="http://revistatrip.uol.com.br/revista/227/salada/surfista-de-fibra.html">http://revistatrip.uol.com.br/revista/227/salada/surfista-de-fibra.html</a> 2013. _____	<b>45</b>
<b>Figura 13</b> - Distribuição dos tecidos vasculares e dos tecidos do sistema fundamental na folha, caule e raiz. Fonte: Adaptado de Taiz & Zeiger (2004). _____	<b>46</b>
<b>Figura 14</b> - A célula e paredes vegetais. Fonte: Adaptado de Taiz & Zeiger (2004). _____	<b>47</b>
<b>Figura 15</b> - A - Tecido fundamental do parênquima. B - Corte transversal do caule de <i>Opuntia rufida</i> destacando as células do tecido parenquimático. Fontes: Taiz & Zeiger (2004) e Atlas de Anatomia Vegetal (2015). _____	<b>48</b>
<b>Figura 16</b> - Seção transversal de um caule de trevo ( <i>Trifolium</i> ), mostrando células com uma morfologia de parede variada. Observe paredes altamente espessadas das fibras do floema (fotografia de James Solliday/ Biological Photo Service). Fonte: Taiz & Zeiger (2004). _____	<b>50</b>
<b>Figura 17</b> - Paredes celulares e pontoações. Fontes: Raven et al (2007). _____	<b>52</b>

- Figura 18** - A - Células com parede primária (PP) e células com parede secundária (PS). B - Paredes primárias (PP) e lâmela mediana (LM). Fonte: Adaptado de Glória & Guerreiro (2006). **53**
- Figura 19** - Aspectos de fibras, esquematicamente. A - textura fibrosa; B - textura helicoidal; C - textura em anel. Fonte: Nultsch (2000). **54**
- Figura 20 - A e B** - Esquemas do arranjo das microfibrilas na parede celular. Paredes primária e secundária. Na parede primária, as microfibrilas de celulose mostram um arranjo entrelaçado (B); Na parede secundária, o arranjo das microfibrilas é ordenado (A e B). As camadas da parede secundária são designadas respectivamente por S1 S2 e S3, levando-se em consideração a orientação da deposição das microfibrilas, que varia nas diferentes camadas. As paredes secundárias são muitas vezes bastantes espessas, como em traqueídes, fibras e outras células servindo ao suporte mecânico da planta Fonte: Raven et al., 2007 & Taiz & Zeiger (2004). **55**
- Figura 21** - Composição da parede celular. Fonte: Adaptado de Taiz & Zeiger (2004). **56**
- Figura 22** - Células com paredes em início de lignificação, a qual ocorre a partir da lamela mediana (LM) (Escapo floral de lírio-amarelo - *Hemerocallis flava*, em corte transversal). Fonte: Glória & Guerreiro (2006). **58**
- Figura 23** - Sistema vascular, xilema. Estrutura de caule de monocotiledónea evidenciando feixes vasculares colaterais fechados, distribuídos na parênquima interfascicular. (*Ruscus* sp.). Autor da foto: Jose Pissara. Fonte: casadasciencias.org (2015). **58**
- Figura 24** - A, B1 e B2 - Feixe Vascular. Protoxilema (P), metaxilema (M). Fonte: Taiz & Zeiger (2004) e Glória & Guerreiro (2000). **59**
- Figura 25** - Tipos de células do xilema. (a), (b) Elementos de vasos largos e (c) elemento de vaso estreito; (d) uma traqueíde; (e), (f) fibras. O pontos escuros correspondem às pontoações, embora não seja visível em (f). As pontoações são áreas nas quais a parede secundária está ausente. Apenas elementos de vaso têm perfurações, que são áreas onde faltam tanto a parede primária como a parede secundária. Detalhe das pontoações nas paredes terminais das traqueídes (seta). Fonte: Taiz & Zeiger (2004). **61**
- Figura 26** - Traqueídes (A) e elementos de vaso (B). Fonte: Taiz e Zeiger (2004). **61**
- Figura 27** - Placas de perfuração em elementos de vaso. Fonte: Raven et. al. (2007). **62**
- Figura 28** - Representação esquemática das placas de perfuração. Fonte: Glória & Guerreiro, 2006. **63**
- 
- Figura 29** - Elementos traqueais. Partes dos elementos traqueais do primeiro xilema formado (protoxilema) de mamona. (a) Espessamentos da parede anelar (em forma de anéis à esquerda) e espiralados em elementos traqueais parcialmente distendidos. (b) Espessamentos de parede em

dupla espiral, em elementos que já estão distendidos. O elementos da esquerda foi muito distendido e as voltas das espirais se soltaram da parede. Fonte: Raven et. al. (2007).	64
<b>Figura 30</b> - Paredes secundárias. Fontes: Raven et. al. (2005) e Glória & Guerreiro (2000).	65
<b>Figura 31</b> - Tipos de parede secundária. Fonte: Nultsch (2000).	n
<b>Figura 32</b> - Sequência cíclica das etapas da abordagem metodológica Desafio de Biologia. Fonte: BIOMIMICRY.NET, (2015).	71
<b>Figura 33</b> - Primeira etapa: ESCOPO. Fonte: BIOMIMICRY.NET, (2015).	72
<b>Figura 34</b> - Segunda etapa: DESCOBRINDO. Fonte: BIOMIMICRY.NET (2015).	79
<b>Figura 35</b> - Estudo de campo, Agave ao final do ciclo vegetativo na cidade na serra da Borborema na cidade de Campina Grande - Paraíba. Fonte: Arquivo pessoal, (2014).	80
<b>Figura 36</b> - Quando retirada a casca, o miolo apresenta-se em um material muito leve e bastante poroso. Fonte: Arquivo pessoal (2014).	81
<b>Figura 37</b> - Elementos xilemáticos dissociados. A dissociação dos elementos xilemáticos revelou a presença de elementos do proto e metaxilema, em que estes últimos apresentaram pontoações do tipo pontoada bem como algumas fibras e traqueídes. Fonte: Arquivo pessoal (2014).	82
<b>Figura 38</b> - Emblocamento em parafina de amostras de Agave. Fonte: Arquivo pessoal (2014).	83
<b>Figura 39</b> - Imagem à esquerda: lâmina com uma amostra do tecido fundamental do Agave. Imagem à direita: microscópio óptico no LAVeg - UFPE. Fonte: Arquivo pessoal (2014).	84
<b>Figura 40</b> - Corte transversal do caule apresentando feixes vasculares circundados por tecido parenquimático. O xilema no Agave contém muitas fibras e têm como principal função, dar suporte e sustentação para o vegetal, arranjadas em forma de feixes ou cordões, espalhados pelo corpo primário da planta. Podem apresentar formas variadas. Fonte: Arquivo pessoal (2015).	85
<b>Figura 41</b> - Corte transversal e corte longitudinal de um feixe vascular. Fibras, traqueídes, células parenquimáticas. Diferentes geometrias, espessuras. Fonte: Arquivo pessoal (2015).	86
<b>Figura 42</b> - Neste caso percebe-se nitidamente a diferença da geometria, no diâmetro e na espessura das células parenquimáticas (esquerda) e as células xilemáticas (direita). Fonte: Arquivo pessoal (2015).	87
<b>Figura 43</b> - O protoxilema, geralmente, apresenta estes padrões (anelar e helicoidal). Fonte: Arquivo Pessoal (2015).	88
<b>Figura 44</b> - Paredes secundárias e pontoações. Fonte: Arquivo Pessoal (2015).	89
<b>Figura 45</b> - A lignina é encontrada nas paredes celulares de vários tipos de células de sustentação, neste caso o vascular, especialmente nas fibras, traqueídes e elementos de vaso. Fonte: Arquivo Pessoal (2015).	89
<b>Figura 46</b> - Terceira etapa: CRIANDO. Fonte: BIOMIMICRY.NET (2015).	93

<b>Figura 47</b> - Sketches à mão livre com aplicação das estratégias do Agave em uma secção da borda de uma prancha de surf. Fonte: Arquivo Pessoal (2015).	<b>94</b>
<b>Figura 48</b> - Definindo estratégia de configuração para o Grasshopper da estrutura do Agave. Primeiramente, defini-se o input, que neste caso foi o shape (outline) 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, células mais densas. A solução pensada foi o Voronoi, onde as células foram escalonadas com furos nas paredes, depois receberiam suavização da forma com união final dos elementos. Fonte: Arquivo Pessoal (2015).	<b>95</b>
<b>Figura 49</b> - Estratégia do Agave, (neste caso) aplicado em prancha de surf. Script gerado pelo Grasshopper. Fonte: Arquivo Pessoal (2015).	<b>96</b>
<b>Figura 50</b> - Input inicial. Acima, outline do shape de uma prancha de surf; Abaixo, secção da prancha como teste piloto de aplicação, área que receberá a estrutura bio-inspirada. Fonte: Arquivo pessoal (2015).	<b>98</b>
<b>Figura 51</b> - Definição da malha estrutural definindo a delimitação inicial dos elementos. Fonte: Arquivo pessoal (2015).	<b>99</b>
<b>Figura 52</b> - Neste momento se pensou na diferenciação das células maiores e menores, com a lógica das paredes finas para economia de peso e paredes espessadas em pontos de reforço. Fonte: Arquivo pessoal (2015).	<b>100</b>
<b>Figura 53</b> - Extrusão e agrupamento de padrões. Fonte: Arquivo pessoal (2015).	<b>101</b>
<b>Figura 54</b> - Definição da malha dos campos de pontoações e pontoações, áreas vazadas na forma de economia de matéria, aumento da leveza e resistência com flexibilidade. Fonte: Arquivo pessoal (2015).	<b>102</b>
<b>Figura 55</b> - A suavização das bordas e do formato tornou a aparência das células mais orgânicas. Fonte: Arquivo pessoal (2015).	<b>103</b>
<b>Figura 56</b> - 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 torções. Fonte: Arquivo pessoal (2015).	<b>104</b>
<b>Figura 57</b> - Secção de uma prancha de surf com aplicação das estratégias do agave. Fonte: Arquivo Pessoal (2015).	<b>105</b>
<b>Figura 58</b> - Visão frontal da secção de uma prancha de surf com aplicação das estratégias de leveza e resistência do Agave. Fonte: Arquivo Pessoal (2015).	<b>106</b>
<b>Figura 59</b> - Quarta e ultima etapa: AVALIANDO. Fonte: BIOMIMICRY.NET (2015).	<b>107</b>

**Figura 60** - Modelo paramétrico 3D de uma secção da borda de uma prancha de surf com aplicação das estratégias do Agave, enviado à Shapeways. Fonte: Arquivo Pessoal (2015). \_\_\_\_\_ **108**

**Figura 61** - Fotos do protótipo impresso em 3D. Secção da borda de uma prancha de surf com aplicação das estratégias de leveza e resistência da estrutura das paredes celulares do Agave, através da biomimética. Fonte: Arquivo Pessoal (2015). \_\_\_\_\_ **109**

**Figura 62** - Protótipo com aplicação das estratégias do agave. Fonte: Arquivo Pessoal (2015). \_\_ **112**

## LISTA DE TABELAS

**TABELA 01** - Princípios da Vida mais relevantes neste nível de abstração de projeto. Fonte: Adaptado de BIOMIMICRY INSTITUTE 3.8 (2015). \_\_\_\_\_ **75**

## SUMÁRIO

1.	<b>PARTE I - INTRODUÇÃO</b> .....	17
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO .....	18
1.2	PROBLEMÁTICA / JUSTIFICATIVAS .....	19
1.3	OBJETIVOS DA PESQUISA E OBJETO DE ESTUDO .....	22
1.3.1	Objetivo Geral.....	22
1.3.2	Objetivos Específicos.....	22
1.3.3	Objeto de estudo .....	22
1.4	METODOLOGIA EMPREGADA.....	22
1.4.1	Referencial teórico.....	23
1.4.2	Métodos e materiais .....	23
2.	<b>PARTE II - REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	24
2.1	BIOMIMÉTICA.....	25
2.1.1	Biônica/ Biomimética .....	25
2.1.2	Inspiração na natureza – ciência e projeto (breve histórico) .....	25
2.1.3	Elementos essenciais .....	29
2.1.4	Princípios da vida .....	30
2.1.5	Ecologia profunda e a busca pelo optimum.....	31
2.1.6	Metodologia de projeto em biomimética .....	34
2.1.6.1	Desafio de biologia .....	36
2.1.6.2	Biologia para Design.....	37
2.1.7	Estudo de caso - Como a Baleia Jubarte pode nos ajudar?.....	38
2.2	AGAVE (AGAVE SISALANA).....	40
2.2.1	Características e classificação botânica.....	40
2.2.2	Importância do Sisal para a economia local .....	42
2.2.3	Agave e pranchas de surf .....	44
2.3	ANATOMIA VEGETAL.....	46
2.3.1	Organização do corpo vegetal .....	46
2.3.2	Células Vegetais.....	47
2.3.3	Tecido fundamental: parênquima .....	48
2.3.4	Parede celular vegetal .....	48
2.3.4.1	Estrutura e composição .....	51
2.3.4.2	Pontoação da parede celular .....	51
2.3.4.3	Parede primária .....	52

2.3.4.4	Parede secundária.....	53
2.3.4.5	Composição da parede celular vegetal .....	55
2.3.4.6	Lignificação .....	56
2.3.5	Tecido vascular: xilema .....	58
2.3.5.1	Composição celular do xilema .....	60
2.3.5.2	Fibras .....	62
2.3.5.3	Elementos traqueais .....	63
2.3.5.4	Parede celular dos elementos traqueais.....	63
3.	<b>PARTE III - MÉTODOS E MATERIAIS</b> .....	67
3.1	PROCEDIMENTOS E ANÁLISES.....	68
3.2	BIOMIMICRY THINKING - DESAFIO DE BIOLOGIA (CHALLENGE TO BIOLOGY).....	70
3.2.1	ESCOPO.....	71
	I - Definir contexto .....	72
	II - Identificar função .....	73
	III - Integrar princípios da vida.....	73
3.2.2	DESCOBRINDO.....	78
	I - Descobrir modelos naturais .....	79
	II - Abstrair estratégias biológicas .....	81
3.2.3	CRIANDO.....	92
	I - Braintorming de ideias bio-inspiradas.....	93
	II - Emulando aos princípios de design .....	95
3.2.4	AVALIAÇÃO .....	106
	I - Medir usando princípios da vida .....	108
	<b>CONCLUSÕES E RESULTADOS FINAIS</b> .....	111
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	113

## **PARTE I - INTRODUÇÃO**

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

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, e passam processos de fabricação ultrapassados de desbaste, extração e desperdício de matéria prima . Estes materiais são amplamente utilizados em artefatos para ambientes aquáticos por possuírem um bom desempenho técnico referente à **leveza e resistência**, consequentemente **flutuação**, propriedades inerentes a este tipo de artefato. Porém, os processos de fabricação desses artefatos seguem uma perspectiva nociva ao meio ambiente em um processo de extração e descarte de matéria prima. A fabricação se dá por um processo de usinagem e desbaste, ocasionando perda de material, os quais são descartados de forma incoerente, por serem incompatíveis com os elementos naturais levam centenas de anos para se degradar.

Por outro lado, existe a aplicação de materiais naturais, como o Buriti e o Agave que apresentam propriedades de leveza, resistência e flutuação, são uma tentativa de tornar a concepção destes artefatos numa forma mais ecológica e integrada 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 para artefatos, não se pode deixar de lado os requisitos funcionais. O produto que não apresenta um bom desempenho técnico, apesar de ter aplicação de matéria-prima orgânica 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 outra problemática, a falta da busca de soluções para problemas diversos, inspirados nos ensinamentos que a natureza tem a dar e na forma como se resolve por si própria de forma bastante equilibrada, ainda mais quando se projeta com foco na sustentabilidade. A Biomimética difundida por Benuys (2003) surge como esta proposta. Um novo campo da ciência que atua como uma interface de aprendizagem das estratégias da natureza convertidas em tecnologia e materialização de soluções com bases ecológicas. Quando aliada à tecnologia se torna uma ferramenta com poder de inovação técnico/sustentável excepcional.

Com base na metodologia *DesignLens (Biomimicry Institute 3.8)*, os ensinamentos da natureza aliados à tecnologia representam potencial de inovação em design e sustentabilidade. Nesta pesquisa verificou-se que a aplicação de tecnologias digitais tem grande relevância para o futuro na produção de artefatos para ambientes 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. Onde o crescimento e desenvolvimento de sistemas biológicos ocorrem através da deposição de elementos naturais que atuam num *optimum* de economia de matéria e energia, dentro de um ciclo de vida sustentável bem definido (KAZAZIAN, 2008).

Esta pesquisa obteve parte da validação através da verificação dos princípios da vida e impressão 3D de uma secção de uma prancha de surf como exemplo de aplicação, dentre muitas alternativas para as estratégias do Agave em estruturas que também precisam de leveza, resistência e flutuação em ambientes aquáticos. Esta nova forma de concepção de estruturas através da utilização de softwares de modelagem paramétrica podem ser aplicado em qualquer tipo de artefatos passíveis de impressão digital e que necessite de propriedades de leveza sem serem artefatos aquáticos especificamente.

## **1.2 PROBLEMÁTICA / JUSTIFICATIVAS**

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 com o surgimento 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.

Levando em consideração que o universo do surf corresponde a um mercado global de grande potencial, e devido ao número de praticantes de surf no Brasil e no mundo. A ISA - *International Surf Association* (2012) estima que existem aproximadamente 17 milhões de praticantes, distribuídos por mais de 70 países, sua indústria move cerca de 2,5 milhões de dólares anuais. Segundo dados atuais do IBGE, o Brasil possui hoje, aproximadamente, 200 milhões de habitantes, onde 80% desta

população está concentrada na faixa litorânea do oceano Atlântico, que tem 8000 km de extensão (ALMASURF, 2012).

Contudo, segundo Butt (2011), no decorrer dos tempos este segmento de mercado e consumo, não assimilou razão de se preocupar e se responsabilizar pelos impactos provocados desde a produção dos materiais e produtos, incluindo a emissão de gases poluentes na atmosfera, como na grande quantidade de resíduo gerado pela indústria de pranchas e equipamentos aquáticos, assim como, a falta de planejamento de soluções adequadas para o descarte de produtos.

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 depositos em aterros ou "lixões" sem qualquer tipo de controle ou tratamento específico ambiental.

O surf é visto como um esporte ambientalmente limpo, apesar disso gera um passivo ambiental enorme proveniente dos resíduos químicos gerados na produção de seus equipamentos. As pranchas são feitas de materiais poluentes, tóxicos e inflamáveis, além de serem derivados do petróleo, contribuindo nas emissões de carbono e desta forma para o efeito estufa. Os resíduos da produção das pranchas de surf representam de 60% a 75% do material total utilizado, ou seja, dos 9,5 quilos de material utilizado para a fabricação de uma prancha, ficam no equipamento pouco mais de 2,5 quilos, sendo descartados os 7 quilos restantes. Anualmente são fabricadas 600 mil pranchas no mundo, ou seja, são descartadas cerca de 4.200 toneladas de resíduos tóxicos no ambiente (ULYSSÉA, 2010).

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 que possuem grande 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. É neste contexto que a área de conhecimento da biônica/ biomimética entra para contribuir com soluções à problemática técnico/ambiental da fabricação de equipamentos para o surf.

Segundo Bluchel (2009) a natureza se desenvolve com dispêndio mínimo em material e energia, ao mesmo tempo cuidando do seu meio ambiente e evitando gigantescos montes de lixo. Como nós podemos lucrar com esta imensa riqueza dos sistemas biológicos? Como podemos economizar enormes quantidades de recursos e usar a abundância dos modelos vivos?

Este trabalho aborda a anatomia vegetal da estrutura das paredes celulares do escapo floral da planta *Agave Sisalana*, que ao final do ciclo de vida, apresenta uma matéria prima desidratada com lumes vazios preenchidos com ar, que dentre outros fatores, resulta em leveza, resistência e flutuação comparáveis a espumas de Poliuretano (PU) e Poliestireno Expandido (EPS).

De acordo com Janine Benyus (2003) a biomimética é um campo emergente da ciência que visa o estudo dos fluxos e lógicas da natureza como princípio e inspiração para solução de problemas de design. Segundo a autora, a biomimética vem 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 acredita que devemos tratar a natureza como modelo, medida e mentora do design, sendo esse o princípio-base da biomimética. Assim como, entender sua estratégia de ciclo de vida relacionado com os Princípios da Vida que são verdadeiras lições de sustentabilidade da própria natureza, elencados por Benyus (2003) e pelo *Biomimicry Institute 3.8*.

Com base nas justificativas de autores perante a inspiração na natureza para solução de nossos problemas cotidianos, que essa pesquisa se justifica, em concordância com (BLUCHEL, 2009):

Com um procedimento de tentativa e erro, não compreensível para cérebros humanos, ela cumpriu durante bilhões de anos, inúmeras séries de experiências, experimentos e testes. A astúcia da natureza consiste de certa maneira, no fato de que na construção de seus sistemas, ela não procede de maneira absolutamente perfeita. Ela mostra sua verdadeira complexidade e capacidade de lidar com divergências. Ela não propõe produtos completamente prontos no mundo, o que faz suas criações muito menos suscetíveis a erros, menos sujeitos à moda e, principalmente, mais eficazes, bem ao contrário da técnica perfeita do homem (BLUCHEL, 2009).

As variantes da natureza parecem ser inesgotáveis no desenvolvimento de materiais de vários componentes especialmente resistentes, fortes, ao mesmo tempo elásticos e extremamente leves. O Brasil tem muitos recursos naturais. Nosso papel, como designers e projetistas interessados em inovações e sustentabilidade na produção de pranchas de surf, é atuar frente essas novas possibilidades de integração com a natureza, extraindo seus ensinamentos para solução de problemas do cotidiano.

## 1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA E OBJETO DE ESTUDO

### 1.3.1 Objetivo Geral

Investigar e abstrair as estratégias de leveza e resistência do Agave para aplicação no design de estruturas de pranchas de surf através da biomimética.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- . Aplicação da metodologia em biomimética *DesignLens*, proposto pelo *Biomimicry Institute 3.8*;
- . Estudo da anatomia vegetal e composição da estrutural de paredes celulares vegetais;
- . Inovar em design e sustentabilidade na produção de pranchas de surf passíveis de fabricação digital através de modelagem paramétrica, com base nos princípios e estratégias do Agave.

### 1.3.3 Objeto de estudo

Esta pesquisa tem como objeto de estudo a **estrutura das paredes celulares do escapo floral do Agave** e suas estratégias de leveza e resistência.

## 1.4 METODOLOGIA EMPREGADA

Este tópico apresenta a visão geral sobre como foi desenvolvida a metodologia desta pesquisa, com caráter interdisciplinar entre design e biologia. Para que se facilite a organização e um melhor entendimento, a pesquisa apresenta uma estrutura organizada em três momentos distintos, inicia com a contextualização, onde foi apresentada de forma expositiva, uma introdução geral contendo a problemática da pesquisa, objetivos e objeto de estudo, assim como, as justificativas, e algumas etapas metodológicas. Além disso, mais duas partes principais: **referencial teórico e; métodos e materiais**.

Em métodos e materiais, encontra-se a descrição das etapas, onde são detalhados as análises realizadas em laboratório e os procedimentos de modelagem paramétrica. Estes momentos caminham juntos e são interdependentes, diante da ótica do projeto em biomimética.

As fases desta pesquisa são identificadas de forma diluída nas etapas do diagrama do *Biomimicry DesignLens*, trata-se de uma abordagem metodológica de design em biomimética, que constitui o pensamento *Biomimicry Design Thinking*, sendo uma metodologia flexível para processos criativos com aplicação de modelos da natureza na criação de soluções inovadoras, foi o que deu norte para esta pesquisa. Desenvolvida no *Biomimicry Institute 3.8*, o diálogo em todas as etapas ocorre de forma contígua durante o desenvolvimento desta dissertação. Há quatro áreas em que se

desenvolve o processo: definição de escopo, descoberta, criação e avaliação. Seguindo estes passos e suas etapas específicas, esta pesquisa integra-se de forma bem sucedida às estratégias e princípios da vida na área de projetos.

#### **1.4.1 Referencial teórico**

Para embasar teoricamente esta pesquisa, foi necessário fazer um levantamento sobre o estado atual dos temas envolvidos. A revisão bibliográfica desta pesquisa teve como base, publicações científicas de relevância como, livros acadêmicos, periódicos, artigos de anais, teses, dissertações, sites especializados, etc. Aqui abordamos temas sobre processos de produção de pranchas de surf e a problemática ambiental, biomimética como ferramenta de inovação em sustentabilidade nas áreas de projeto, biologia, anatomia vegetal e o Agave com ensinamentos de suas estratégias de leveza e resistência.

#### **1.4.2 Métodos e materiais**

A metodologia desta pesquisa está toda enquadrada nas etapas metodológicas no diagrama *Biomimicry Thinking*: definição do escopo, descoberta, criação e avaliação. Deste modo, foi definido o contexto da pesquisa, esta se iniciou com estudo de campo para realizar a coleta de amostras de Agave em seu habitat natural.

Amostras coletadas foram encaminhadas ao LAVeg - Laboratório de Anatomia Vegetal (UFPE), que nos prestou todo apoio com orientações, cedendo equipamentos para a realização de experimentos em microscopia óptica. O LAVeg também viabilizou o acesso CETENE - Centro de Tecnologia do Nordeste, para realização de procedimentos de processamento para identificação dos elementos do Agave e sua estrutura e composição celular.

Após as análises de laboratório, as informações obtidas foram apresentadas ao grupo BI/OS para aplicação das estratégias no design de estruturas para pranchas de surf, através de ferramentas digitais, passíveis de fabricação digital. Por fim foi realizada a impressão de um protótipo como exemplo de aplicação das estratégias de leveza e resistência do Agave.

## **PARTE II - REFERENCIAL TEÓRICO**

## **2.1 BIOMIMÉTICA**

### **2.1.1 Biônica/ Biomimética**

Este capítulo faz uma abordagem do estado da arte sobre a biomimética, trazendo à tona um breve histórico de como se iniciou este campo de pesquisa e desenvolvimento com base na natureza. Apresenta as bases teóricas, a forma como a biomimética atua e em que conceitos se baseia. Para o entendimento de como se comporta a prática biomimética faz-se necessário ressaltar o entendimento prévio da revisão literária juntamente com a metodologia de pesquisa e prática, esta que sempre se apresenta diluída em todas as fases da pesquisa e projeto nesta área, ou seja, a teoria caminha junta com a metodologia.

### **2.1.2 Inspiração na natureza – ciência e projeto (breve histórico)**

“Devo primeiramente fazer alguns experimentos antes de prosseguir, pois é minha intenção mencionar a experiência primeiro, e então demonstrar pelo raciocínio por que tal experiência é obrigada a operar de tal maneira. E essa é a regra verdadeira que aqueles que especulam sobre os efeitos da natureza devem seguir” — Leonardo da Vinci, c. 1513 (CAPRA, 2013).

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) aborda a biônica como meio de projeto, Bruno Munari em “Das coisas nascem coisas” (1981), dentre outros que serão citados neste tópico.

Segundo (QUEIROZ, RATTES E ARAÚJO 2015), no passar dos séculos, vários foram os povos que inspiraram-se na natureza para resolver problemas, desta forma foram aprimorando este conhecimento. A identidade com as formas geométricas encontradas na lua, no sol, nas constelações, nos corpos dos animais e na forma e crescimento das plantas, o corpo humano, etc, elevou as discussões a um patamar científico. Egípcios, gregos e outros povos iniciaram grandes estudos, promovendo a ascensão da ciência geométrica, pautada na natureza.

São exemplos destes estudos: sequência de Fibonacci, retângulo áureo e seção áurea, que são encontrados de maneira extensa dentre os sistemas naturais. Esses princípios foram utilizados também, por homens ilustres de eras posteriores, dentre eles, pode-se citar Leonardo da Vinci, considerado um dos primeiros “biodesigners” da história.

Ao analisar algumas obras de Leonardo da Vinci, a aplicação da proporção áurea em seus trabalhos está sempre presente. No trabalho do artista, a inspiração na Natureza também aparece

com o auxílio de técnicas projetuais. Seu estudo sobre os voos dos pássaros gerou esboços de artefatos que apontavam para o voo humano, este projeto se denominou Ornitóptero. Da Vinci foi uma grande mente criativa que possui o pensamento sistêmico, contudo, outros nomes importantes na história também se inspiraram na natureza e muitos continuam a fazê-lo até os dias atuais.

A partir da década de 1950, surgem vários termos em documentação científica sobre associações de atividades humanas frente à natureza. A inspiração no meio natural promove discussões inovadoras e abarca seu escopo em vários segmentos envolvidos no ato de projeto. Muitos pesquisadores no século XX passaram a ver a natureza como uma grande solucionadora de problemas. Sendo a inspiração 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.

O termo 'biônica' foi criado pelo Major Jack Steele, pesquisador americano ligado à indústria aeronáutica. A biônica foi quem lançou as bases da biomimética. Steele define a biônica na forma de aplicação dos princípios básicos presentes na natureza no campo de projetos interdisciplinares que incluem a biologia, engenharia, arquitetura e design (BARBOSA, 2008).

Em 1958 surge o termo Biônica, o major Jack Ellwood Steele responde por sua origem. Ele definiu Biônica como sendo a ciência dos sistemas em que o funcionamento é baseado nos sistemas naturais, ou que apresentem características específicas dos sistemas naturais, ou ainda que sejam análogos a estes. A oficialização da ciência Biônica ou atividade formalizada se deu por meio de um simpósio, intitulado: Bionics Symposium. O evento reuniu profissionais de variados ramos científicos (ARRUDA, 1994; SOARES, 2008; OLIVEIRA, 2011).

Porém, Benyus (1997) foi quem expandiu o conceito criando o termo Biomimética. Em seu ponto de vista, além de considerar a imitação 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.

Bios (Vida) + Mimesis (Imitação) = Biomimética (área da ciência e disciplina de projeto que tem por objetivo o estudo das propriedades das estruturas biológicas e suas funções, onde se procura aprender com a natureza) (BENYUS, 1997; SANTOS, 2010).

Uma das primeiras contribuições importantes no aparecimento do conceito do biomimetismo surgiu a partir de Thompson (1945), que aborda o conceito de forma indireta no livro "On Growth and Form" apontando para a eficiência mecânica das estruturas naturais, onde alega que muitos progressos científicos se deram graças à observação da Natureza e suas soluções.

Em 1957 Otto Schmitt dá origem ao conceito de biomimetismo (biomimetics) e estabelece o objetivo explícito deste ou outros conceitos similares. Schmitt afirma que o principal objetivo do biomimetismo é analisar fenômenos biológicos na esperança de obter conhecimento e inspiração para desenvolver sistemas físicos ou sistemas mistos biofísicos à imagem da vida (Harkness, 2002 apud Salgado, 2013).

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.

De acordo com Biomimicry 3.8 Institute (2014), a natureza já descobriu o que funciona, o que é apropriado, e o mais importante, o que dura. Em vez de mecanismos de extração, como tem feito o ser humano durante o curso de sua existência, o biomimetismo se difere de outras "bio abordagens" consultando organismos e ecossistemas, e aplicando de forma subjacente os princípios de design às nossas inovações.

Por tanto, esta forma de abordagem introduz um novo conceito passível de aplicação em organizações e empresas, podendo contribuir tanto com projetos e soluções inovadoras para os nossos problemas e soluções de design, como também para despertar nas pessoas em relação à questão da importância da conservação da biodiversidade na Terra.

Os princípios desenvolvidos por Benyus (1997) descreve as abordagens dessa ciência da seguinte maneira:

- **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.

De acordo com Santos (2010), a Biomimética é acompanhada pela filosofia do design ambiental, que tem uma visão multidisciplinar onde muitos setores industriais podem substituir o modo tradicional de projeto e produção dos bens de consumo ao modo natural, baseado nos princípios da natureza que é mais equilibrado e menos oneroso para o ambiente, a exemplo do modelo da pesquisa biomimética.

De fato, dentre outros fatores, a natureza trabalha com a energia solar utilizando apenas o necessário; sua química é à base de água; a natureza adapta a forma à função; realiza reciclagem natural. Por tanto, a biomimética busca descobrir como fazer com que as tecnologias, infraestruturas e produtos sigam esses mesmos princípios da natureza (BIOMIMICRY INSTITUTE 3.8, 2014).

Para que os princípios do design ambiental se cumpram, é necessário que todo o ciclo do produto seja avaliado, da extração da matéria prima até o descarte, passando pelo consumo de energia durante o uso e a operação (SANTOS, 2010). Como a biônica/biomimética esta intrinsecamente ligada aos parâmetros ambientais, Salvador (2003) descreve esta questão desta forma:

A biônica é uma ferramenta do ecodesign para o desenvolvimento de produtos sustentáveis. A biônica é a pesquisa sistemática relativa a mecanismos biológicos (sistemas e subsistemas) que permite a interação de parâmetros e características naturais que possam contribuir com os projetos de produtos industriais. Aproveitar de forma eco-eficiente os insumos (energia, água e outros) e os materiais, as funções e as formas dos sistemas naturais podem ser um dos caminhos para o surgimento de inovações sustentáveis no futuro próximo. (SALVADOR, 2003).

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 pode se basear 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 mais inteligentes, inovadores e com menor impacto sobre o meio ambiente.

No entanto, segundo Tom Muller em matéria publicada na National Geographic (2008), 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. E antes mesmo da biomimética amadurecer em uma indústria comercial, tem-se desenvolvido como uma nova e poderosa ferramenta para a compreensão da vida (MULLER, 2008).

### 2.1.3 Elementos essenciais

O *Biomimicry Institute 3.8* elenca três elementos essenciais e interconectados para a prática de biomimetismo: Ethos é uma representação do 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 (BIOMIMICRY INSTITUTE 3.8, 2014).

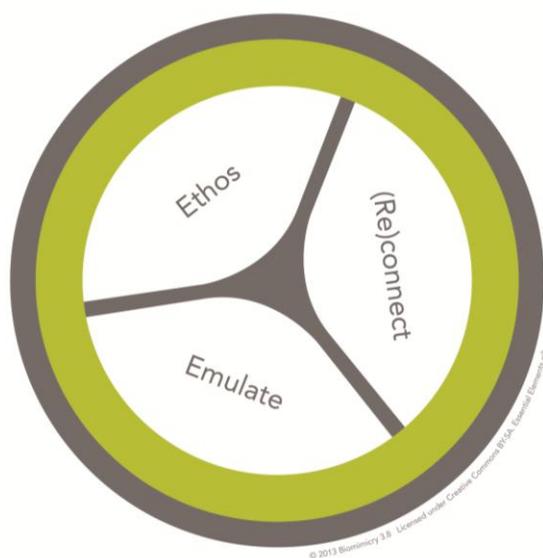


Figura 1 - Elementos Essenciais. Fonte: BIOMIMICRY.NET, 2015.

## 2.1.4 Princípios da vida

De acordo com *Biomimicry Institute 3.8*, os Princípios da Vida, são ensinamentos de design da natureza, onde ocorre a integração e otimização dessas estratégias criando condições favoráveis à vida. Com estes ensinamentos, podem-se modelar estratégias inovadoras, estes parâmetros sustentáveis permitem a orientação pela natureza, utilizando os princípios da vida como ideais aspiracionais. Do mesmo modo a busca pelo *optimum* também é uma constância no sistema da vida do universo. Estes são alguns conceitos intrínsecos à prática do projeto com ênfase na biomimética.

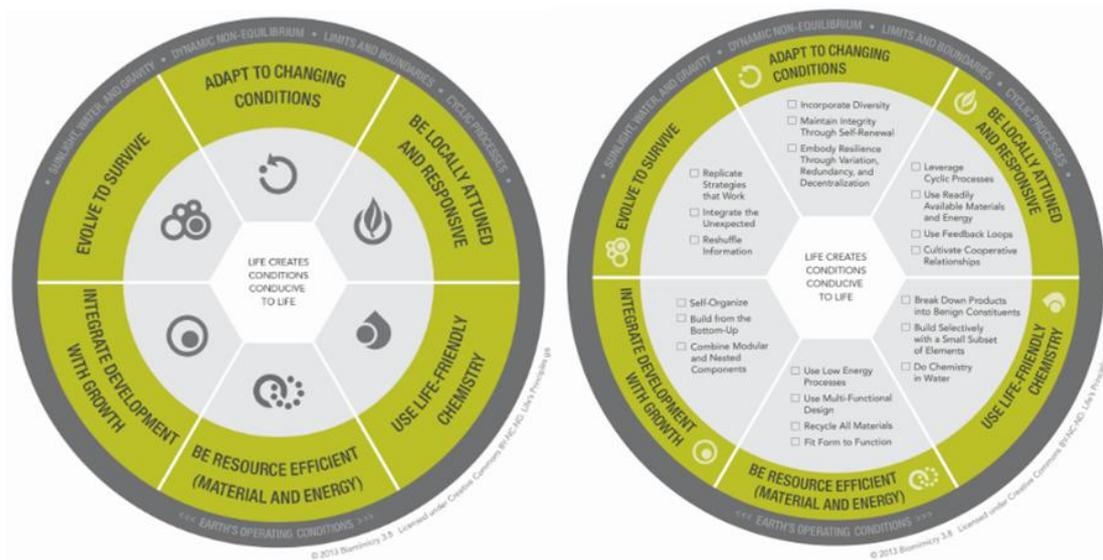


Figura 2 - Elementos Essenciais. Fonte: BIOMIMICRY.NET, 2015.



**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.



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



BE LOCALLY ATTUNED  
AND RESPONSIVE

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



USE LIFE-FRIENDLY  
CHEMISTRY

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



BE RESOURCE EFFICIENT  
(MATERIAL AND ENERGY)

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



INTEGRATE DEVELOPMENT  
WITH GROWTH

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

### 2.1.5 Ecologia profunda e a busca pelo *optimum*

A natureza deve ser vista como um todo orgânico, ver a natureza como uma máquina, com a mentalidade de engenharia, não é a melhor forma de abordagem para solucionar os problemas dos seres humanos através da criação de artefatos industriais. Ao ser vista como máquina, a natureza passa a ser controlada, foi daí que surgiu a ideia de que o homem pode controlar a natureza, esta abordagem têm resultado em consequências trágicas, pois nos séculos que se passaram muito do meio natural foi destruído, com isto, perdeu-se o respeito pelo meio ambiente, não levando em conta a resiliência natural dos ecossistemas (CAPRA, 2013).

“Um ecossistema cresce e se multiplica na medida da energia que recebe. Graças a essa energia, a biomassa se aproxima de um máximo - ou “clímax” - em um *optimum* flutuante e sem nunca ultrapassar o que os limites naturais podem tolerar” (KAZAZIAN, 2010).

A evolução não é mais vista como uma luta competitiva para a existência, preferencialmente deve ser vista como uma cooperativa mútua e criativa, estas são as verdadeiras forças motrizes da evolução. A natureza tem bilhões de anos de evolução em perfeita administração de sua própria complexidade e é inerente o fato de que todos nós fazemos parte dela (CAPRA, 2013).

O autor descreve uma nova compreensão da vida em termos de complexidade, redes e padrões de organização, que aumenta a nossa capacidade de compreender os princípios básicos da ecologia ou princípios básicos de sustentabilidade, é um pensamento que se identifica com os princípios da vida definidos por Janine Benius e cientistas do *Biomimicry Institute* 3.8. A urgência desta nova compreensão para lidar com a nossa crise ecológica global é proteger e garantir a continuidade e florescimento da vida na terra. É dentro deste contexto de sustentabilidade, que os autores Whal & Baxter (2008), defendem o papel do designer como facilitador de soluções sustentáveis:

Sustentabilidade está rapidamente se tornando uma questão de importância crítica para os designers e a sociedade como um todo (...). No entanto, em um ambiente de constante mudança, a sustentabilidade não é um ponto de extremidade final, mas em vez disso, é um processo contínuo de aprendizagem e adaptação (...). Projetando para sustentabilidade não só exige o redesenho de nossos hábitos, estilos de vida e práticas, mas também a maneira que nós pensamos sobre o design. Sustentabilidade é um processo de coevolução e projeto cooperativo que envolve diversas comunidades na tomada de decisões de design flexíveis e adaptáveis em escalas locais, regionais e globais. A transição para a sustentabilidade é sobre a cocriação de uma civilização humana que floresce dentro dos limites ecológicos do sistema de suporte de vida no planeta (WHAL & BAXTER, 2008, tradução do autor).

Existe uma escola filosófica conhecida como Ecologia Profunda, que diz que um elemento natural, é em si mesmo valioso porque é um ser vivo, faz parte da natureza viva, e como tal, tem valor. Ao incorporar um espírito de reverência da natureza, pode-se aprender muito com seus sistemas biológicos. É fato que como indivíduos e sociedades, estamos inseridos e dependentes dos processos cíclicos da natureza (CAPRA, 2013).

... entre outras coisas, a abundância de produções naturais é que permitiram que nossas sociedades acreditassem que poderiam tirar proveito da natureza sem se impor limites. Mas essa aparente opulência da matéria é apesar de tudo regida pela sua própria economia que pode

ser quebrada por uma exploração ávida demais. De fato, a natureza prolifera em um estado 'o mais favorável' que chamamos aqui de "optimum" (KAZAZIAN, 2010). Pág. 59.

“Mesmo admitindo que exista uma noção de valor no sentido de uma "importância" da natureza que deveria ser considerada na economia, ela ainda é, contudo, muito pouco integrada” (KAZAZIAN, 2010).

Na mesma perspectiva da ecologia profunda, devem acontecer mudanças radicais e necessárias na sociedade para que ocorra uma grande transformação, tornando a atual sociedade de consumo em uma sociedade durável que esteja compatível com a perspectiva do optimum da natureza, com o pensamento de que se deveria reduzir o consumo de insumos, a um ponto em que se utilize apenas 10% dos recursos que as sociedades industriais consomem para produzir energia, bens e artefatos industriais (KAZAZIAN, 2005).

De acordo com o autor, em um mundo globalizado e desenvolvido pelas grandes indústrias e nações produtoras, a economia com frequência segue o direcionamento máximo da extração e da produção, em vez do *optimum* regido pelas leis naturais da vida. “Ao *optimum* a economia hoje prefere o máximo. Sua abordagem predadora não a autoriza a considerar as consequências de sua exploração dos recursos”.

Da forma como os recursos do planeta são consumidos, como se fossem ilimitados, os bens de consumo se transformam em resíduos depois de terem sido consumidos e não são levados em consideração os resíduos descartados no meio natural. Em concordância com Kazazian (2010), “os recursos devem ser otimizados por serem limitados e os desperdícios minimizados”.

O autor ainda descreve alguns possíveis direcionamentos com relação ao que ele define como 'produto leve', que é aquele artefato industrial que tem redução de insumos direto na fonte e seu conceito, verificamos que tem forte relação com os Princípios da Vida (*Biomimicry Group 3.8*). Um dos direcionamentos se baseia na melhor gestão da matéria no momento da concepção de um artefato que utilizará apenas o justo necessário. Reduzindo a extração na fonte da matéria prima, esta atitude minimiza o peso e/ou volume de um produto. Esta atitude possibilita reduzir também o impacto sobre o meio ambiente.

Embora um produto em que se faz redução na sua quantidade de matéria e de energia consumida, não é sempre suficiente para que seja considerado limpo e esteja de acordo com os ensinamentos difundidos pelo viés do ecodesign, assim como em projeto com foco na biomimética. O conceito do produto local, onde se utilizam recursos disponíveis localmente também é um dos fatores para redução do gasto energético, graças à diminuição dos transportes. Este conceito esta

de acordo com os princípios da vida descritos mais acima e se trata de atender as necessidades pela utilização da matéria-prima local e de forma econômica. Contudo devem-se garantir as qualidades técnicas e a aceitação do produto pelo usuário final (KAZAZIAN, 2005).

### **2.1.6 Metodologia de projeto em biomimética**

A Biomimética atualmente, se trata de uma ciência empírica que não possui ainda uma metodologia concretizada devido à dificuldade de tradução dos sistemas biológicos para o âmbito tecnológico. De fato, o desenvolvimento das soluções de problemas humanos com aplicação do estudo biomimético vai muito além de uma simples inspiração ou cópia formal da natureza (SANTOS, 2010).

“Não existe uma abordagem geral desenvolvida para a biomimética, embora um número de pessoas esteja atualmente a desenvolver métodos para pesquisar a literatura biológica para analogias funcionais e implementação. Pensamos que isto é apenas parte do quadro necessário. Embora seja bem conhecido que design e engenharia são processados mais facilmente com o uso da teoria, em biomimética, toda vez que precisamos projetar um novo sistema técnico, temos que começar mais uma vez, tentando e testando vários sistemas biológicos como potenciais protótipos e se esforçando para fazer alguns, adaptando a versão de engenharia do dispositivo biomimético que estamos a tentar criar. Além disso, a transferência de um conceito ou mecanismo de vivo para sistemas inanimados não é trivial. Uma réplica simples e direta do protótipo biológico é raramente bem sucedida, mesmo se é possível com a tecnologia atual. É necessário algum formulário ou procedimento de interpretação ou tradução da biologia para a tecnologia”. (VINCENT, 2006, tradução do autor).

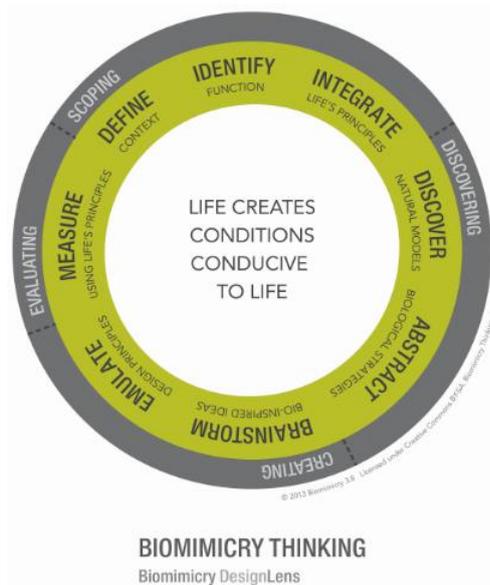
Por tanto, com o intuito de transformar a biomimética em uma prática mais entendida, difundida e aceita como uma base teórica sólida, pesquisadores e cientistas estão cada vez mais, identificando princípios e soluções no meio natural para aplicá-los no desenvolvimento de metodologias para a aplicação dos conceitos biológicos e suas soluções nos problemas da sociedade, o que se trata de uma atividade com certo grau de complexidade, como discutido anteriormente.

É neste mesmo contexto que Gruber (2013) destaca um importante pré-requisito a ser cumprido para que ocorra a transformação destas ideias em trabalho através da aplicação das ideias da natureza para a tecnologia de forma estratégica. Sugere que a biomimética é um método de trabalho que envolve a interdisciplinaridade, e para que se obtenham resultados concretos, afirma que deve se assegurar uma comunicação adequada entre as diversas áreas envolvidas.

Por tanto, para melhor abstrair os conceitos dos sistemas naturais e suas possíveis soluções análogas introduzidas em uma metodologia específica, é possível fazer uso de uma abordagem ou utilização de algum método que consista em uma matriz heurística que facilite a transferência de soluções de uma área específica para outra situação similar, embora não tenha sido desenvolvido especialmente para tal finalidade, mas que tenha relação fundamentada. Como é o caso da prática biomimética, pode ser a aplicação de uma função da natureza descoberta em uma solução humana, ou ainda, a resolução de uma problemática humana existente e consequentemente a busca de uma solução na natureza [SANTOS, 2010; BENIUS, 1997].

Contudo, o *Biomimicry Institute 3.8* têm desenvolvido propostas para sistematizar processos biomiméticos do meio natural. A abordagem de projeto *DesignLens* tem sido indicada como meio específico para aplicar os conceitos inspirados nos princípios da vida em metodologias não lineares, realizadas em ciclos contínuos e repetidos, que gradualmente aumentam em complexidade conforme especificidades e avanço das etapas. Como exemplo desta abordagem, Janine Benius e seus colaboradores apresentam uma metodologia definida como "*Biomimicry Thinking*" onde apresentam as lentes do design biomimético, que fornecem o contexto para onde seguir (tomadas de decisões), como, o quê e porque a biomimética se encaixa no processo de qualquer disciplina ou em qualquer escala de design (projeto).

Esta ferramenta possui um background de desenvolvimento e aperfeiçoamento desde 1998 que está em constante evolução através de novas descobertas na ciência e aplicação pela Janine Benyus e seus colaboradores. *DesignLens* tem o intuito de ajudar a observar profundamente a forma como a vida funciona, e estabelecer parâmetros da utilização da genialidade da natureza para orientar o projeto humano. Segundo o instituto, trata-se de um conjunto de diagramas que representam visualmente os fundamentos da abordagem de design perante a natureza. Os principais componentes desta abordagem de projeto integram o *Biomimicry Thinking* com os Elementos essenciais, os Princípios da vida. Esta ferramenta dialogará com as etapas propostas nesta pesquisa.



**Figura 3 - Biomimicry Thinking.** Fonte: BIOMIMICRY.NET, 2015.

Enquanto metodologia é uma estrutura que se destina a ajudar pessoas a praticar a biomimética ao projetar qualquer coisa. Inclui quatro áreas que fornecem os valores para o processo de design, envolvem a definição do problema e escopo, descoberta da solução, emulação e avaliação. Seguindo os passos específicos dentro de cada fase, ajuda a garantir a integração bem sucedida de estratégias de vida em projetos humanos. Este gráfico cíclico pode ser usado de duas maneiras, definidos como: "Desafio de biologia" e "Biologia para design", no primeiro caso, segue as etapas em sentido horário, inicia quando se tem um problema específico e procura-se uma solução inspirada na natureza, em seguida, abstrai a ideia do conceito, logo após, parte para a fase de emulação e avaliação através da validação das hipóteses. Ou ainda, no segundo caso, indo de um campo a outro sem se prender a uma sequência linear de acordo com a necessidade. Quando se descobre algum princípio natural aleatório, visualiza-se uma aplicação daquele conceito para solucionar algum problema específico, seja de design, arquitetura, engenharia e diversos outros casos.

### 2.1.6.1 Desafio de biologia

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

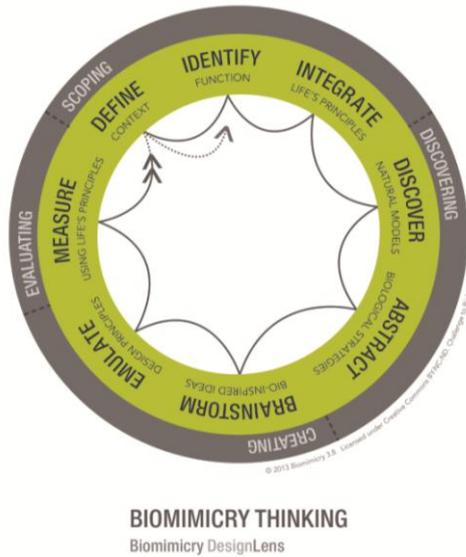


Figura 4 - Desafio de biologia. Fonte: BIOMIMICRY.NET, 2014.

### 2.1.6.2 Biologia para Design

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

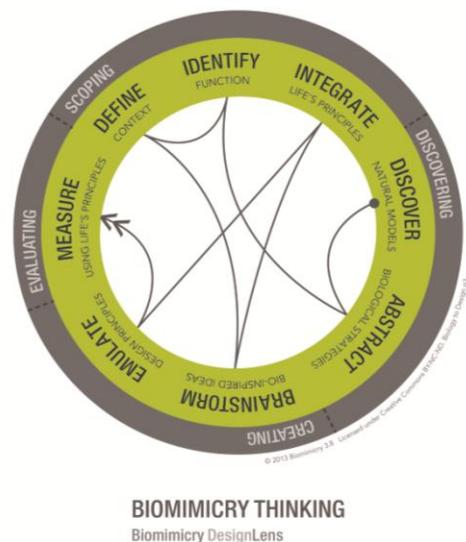


Figura 5 - Biologia para design. Fonte: BIOMIMICRY INSTITUTE (2014).

### 2.1.7 Estudo de caso - Como a Baleia Jubarte pode nos ajudar?

O estudo das estratégias da Baleia Jubarte apresentou várias inspirações de seus conceitos para diferentes setores. Baseado na forma como elas usam suas eficientes nadadeiras já foram desenvolvidos equipamentos para prática de esportes aquáticos, no setor de eficiência energética, usinas eólicas, no setor agrícola e em processos industriais para separação e tratamento de resíduos, inspirados na forma como a baleia se alimenta e dentro de sua boca consegue filtrar a água, somente ingerindo o alimento, no caso, plânctons, peixes e camarões, dentre muitas outras possibilidades de aplicação dos seus conceitos abstraídos. No setor de esportes aquáticos foram desenvolvidos pés de pato para nadadores e mergulhadores, assim como quilhas para pranchas de surf, devido à eficiência hidrodinâmica comprovada por testes em túneis do vento, o aumento da eficiência do impulso e redução do arrasto. No setor de eficiência energética foram desenvolvidos desde hélices para turbinas eólicas, a ventiladores e coolers para computadores devido à eficiência aerodinâmica alcançada.



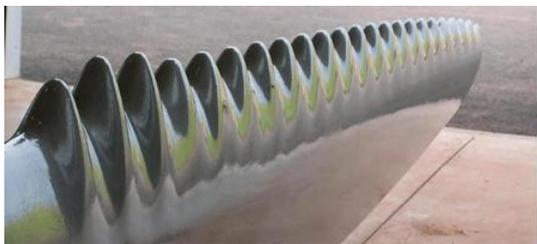
**Figura 6** - Baleia Jubarte. Fonte: Inhabitat.com, 2014.

Os tubérculos em suas nadadeiras resultam em grande eficiência hidrodinâmica, a pesar de ser um animal grande e pesado, consegue se projetar por inteiro para fora da água, e também executar curvas acentuadas rapidamente encurralando peixes em um turbilhão provocado por suas nadadeiras.



**Figura 7** - Nadadeira Nemesis da Speedo e monoquilha da Fluid Earth. Fonte: Inhabitat.com; BIOMIMICRY.NET, 2014.

A Speedo afirma que as linhas de sulcos e buracos nos pés de pato Nemesys ajuda a deslocar mais água a cada pernada do que com um design tradicional, o que resulta em mais de propulsão com menos esforço. Quilha para prancha de surf da empresa Fluid Earth.



**Figura 8** - Inspiração na nadadeira da Jubarte, maior eficiência. A empresa Whale Power Corporation teve inspiração nas barbatanas da Jubarte. Aplicação em hélices, escalonamento de redução de 32% no arrasto e melhora de 8% no impulso. Fonte: BIOMIMICRY.NET, 2014.

## 2.2 AGAVE (AGAVE SISALANA)

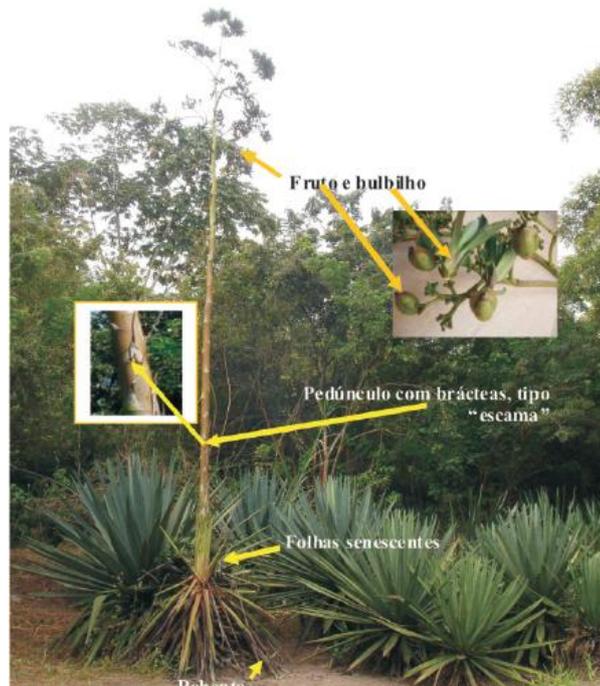
### 2.2.1 Características e classificação botânica

O Agave ou Sisal, segundo Ulysséa (2010) é um vegetal exótico e invasor de dunas e restingas no litoral brasileiro, uma espécie introduzida, comumente encontrada em vários estados. O autor ressalta que além de ser uma planta invasora e dominante, prejudica o estabelecimento e desenvolvimento das espécies de flora nativa não oferecendo alimento à fauna.

O Brasil é o maior produtor mundial de agave, 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. As varas do pendão floral da planta são usadas 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 desta planta, está a fabricação de blocos para pranchas de surf, devido à presença de tecidos como o parênquima do escapo floral, que possuem propriedades de leveza.

O Agave é uma planta monocotiledônea, de acordo com Neto (2012 apud JUDD *et al.*, 2007; GUTIÉRREZ *et al.*, 2008), da família Agavaceae que tem distribuição predominantemente em regiões pantropicais com cerca de 25 gêneros e 637 espécies, reunindo plantas herbáceas, árvores e arbustos rizomatosos, com folhas alternas, espiraladas e dispostas em roseta. 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 ou rebentões como estratégia principal de propagação. (GONDIM, 2009, apud SALGADO *et al.*, 1979).

A planta emite uma inflorescência denominada tecnicamente de escapo floral ou, popularmente, “poste” ou “pendão de agave”. Nesta floração, após cerca de oito a dez anos do plantio, são produzidos flores, frutos e sementes, ou apenas bulbilhos, enquanto vai ocorrendo a morte do sisal. Após a queda das flores desenvolvem-se, na panícula, novas plantinhas denominadas de “bulbilhos” que são utilizados como mudas de propagação vegetativa. Rebentos (Figura 15), oriundos do rizoma da base da planta mãe em fase de floração ou não, também constituem material de propagação vegetativa. (GONDIM & SOUZA, 2009, apud LOCK, 1962; MOREIRA, *et al.*, 1999; SILVA *et al.*, 2008; SILVA *et al.*, 1999; SUINAGA *et al.*, 2006).



**Figura 9** - Planta em estágio final de ciclo, apresentando folhas senescentes e escapo floral (brácteas em detalhe) com frutos e bulbilhos. Um rebento inicia seu crescimento próximo à planta mãe. Areia – Paraíba. Fonte: GONDIM & SOUZA, 2009.



**Figura 10** - No escapo floral pode ocorrer de dois a três mil bulbilhos de vários tamanhos. Fonte: <http://www.wikiwand.com/pt/Sisal> 2015.

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, segundo o autor, 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", que são formados por tecido meristemático, com seis e dez cm e seis a oito folhas e pequenas raízes adventícias – caem da planta, após três meses e atuam como órgão de propagação de novas plantas.

Em síntese, Ulysséa (2010) ao referenciar a utilização do escapo floral do Agave quando a planta morre, explica que o ciclo de vida da planta vai de sete a doze anos e que morre após o desenvolvimento do pendão. Desta forma não há desmatamento para que se obtenha esta matéria prima. Ao contrário, a retirada do meio ambiente nesta região se torna uma prática benéfica para o bioma local, por se tratar de uma espécie invasiva que não serve de alimento neste eco sistema. Porém apresenta benefícios à sociedade quanto à subsistência e plantações.

### **2.2.2 Importância do Sisal para a economia local**

Segundo os autores, muitas espécies desta família se sobressaem devido à importância econômica, dentre elas a *Agave sisalana*, popularmente conhecida como Sisal, é uma rica fonte para a produção de fibras naturais. Esta espécie tem grande importância para a economia do semiárido brasileiro. O Brasil é o maior produtor e exportador de fibras de sisal, produto que se destaca por sua ampla utilização doméstica, industrial e, mais recentemente, no reforço de compósitos poliméricos (GONDIM, 2009, apud MARTIN *et al.*, 2009).

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

Conforme ressalta Bezerra *et al.* (2012), o Brasil possui destaque como um dos maiores produtores mundiais e as primeiras plantações dessa cultura no Nordeste iniciaram na Paraíba, mais especificamente na região do Curimataú e Seridó. Para Gondim *et al.* (2009 apud CARVALHO *et al.*, 2007; SANTOS, 2006) o cultivo do sisal se constitui em opção viável econômica, sendo geralmente plantado em áreas de pequenos produtores nas condições da região semiárida, onde o

clima e solo não são favoráveis à exploração de outras culturas que ofereçam resultados satisfatórios. Com isto, surgiram na década de noventa, cooperativas com a expectativa de alavancar a cultura do sisal na Paraíba e até hoje existem plantações que já datam mais de vinte anos. Sendo que foi na Bahia onde se destacaram as maiores plantações e se adaptaram bem a déficits pluviométricos, bem como, boa adaptação aos diversos tipos de solo do Semiárido.



**Figura 11** - Campo de Sisal em Barra de Santa Rosa, com destaque para os pendões florais em desenvolvimento – Paraíba. Fonte: Embrapa (2014).

Segundo dados da Conab (Companhia Nacional de Abastecimento - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – 2014):

A produção brasileira de sisal em 2013 foi estimada em 82,3 mil toneladas, 18% superior à produção de 2012, estimada em 69,8 mil toneladas. Esta surpreendente safra de 82,3 mil toneladas em 2013 confirma a assertiva de que a cultura do sisal é uma das únicas que resistem às adversidades do semiárido brasileiro, é de fundamental importância socioeconômica e ambiental, já que mantém o homem no campo, gerando emprego e renda em uma região onde impera a pobreza e a carência (CONAB, 2014).

Desta forma, pode-se verificar que a pesar de ser uma espécie introduzida em nosso bioma, ou seja, não se trata de uma planta nativa do Brasil, tem grande importância no cenário nordestino. Entretanto, há um reflexo positivo no meio ambiente onde outras espécies vegetais não se adaptam. Na sociedade e economia da região, gera renda e emprego para famílias locais através do plantio e produção de fibras através das folhas, dentre outras aplicações; como a produção de medicamentos e alimento alternativo para animais em tempo de seca.

### 2.2.3 Agave e pranchas de surf

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 (prancha de surf).

“O desenvolvimento do processo de fabricação foi iniciado no Brasil em 2001 e desenvolvido até os dias atuais. Após muitos testes desde a colheita dos bastões florais (flechas), a cola correta a ser utilizada e o desenvolvimento de uma prensa especial para fabricação dos blocos, conseguiu-se o primeiro protótipo. A técnica de fabricação dos blocos foi sendo aperfeiçoada a cada prancha produzida. Atualmente já foram fabricadas cerca de 60 unidades, as quais foram aprovadas quanto à surfabilidade, qualidade e resistência” (ULYSSEÁ, 2010).

Apesar de ser um material leve, as pranchas feitas com Agave ainda não atinge a média de peso referente às pranchas produzidas com espumas poliméricas. E é justamente nesta lacuna onde se faz necessidade de um maior aprofundamento e estudos para que se consiga reduzir ainda mais o peso final das pranchas com madeira. A pesquisa e aplicação da biomimética é um meio bastante eficaz para que se entendam as estratégias que a anatomia e estrutura das fibras e formas das paredes celulares do pendão floral do agave. Desta forma, pode-se entender o porquê de ser um material natural muito leve e que possui características similares das espumas sintéticas.



**Figura 12** - Prancha feita com Agave. Fontes: <http://ninelightssurfboards.files.wordpress.com/2008/05/agav5.jpg>, 2014; <http://revistatrip.uol.com.br/revista/227/salada/surfista-de-fibra.html> 2013.

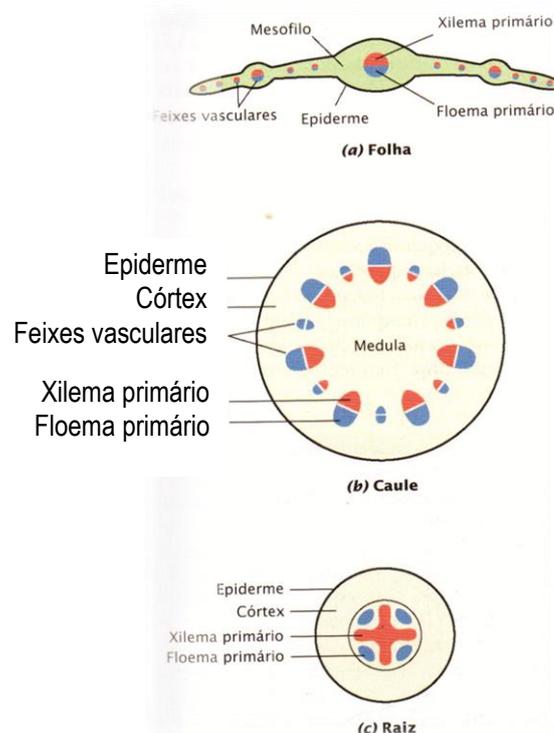
Informações sobre a anatomia do agave podem contribuir sobremaneira para que se atinja um *optimum* na concepção de pranchas consideradas sustentáveis. Por tanto, é baseado nestes dados que a escolha do agave como fonte de inspiração e matéria prima se justifica alinhado aos princípios da biomimética e de sustentabilidade. Entretanto, publicações sobre a estrutura anatômica dessa espécie são inexpressivas e mais a frente serão realizados experimentos em laboratório com auxílio de microscopia, que tem a capacidade de produzir imagens de alta resolução, estas imagens são úteis para avaliar a estrutura superficial de uma dada amostra, este processo será detalhado mais a frente.

## 2.3 ANATOMIA VEGETAL

### 2.3.1 Organização do corpo 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 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 (GLÓRIA & GUERREIRO, 2006; TAIZ & ZEIGER, 2004).



**Figura 13** - Distribuição dos tecidos vasculares e dos tecidos do sistema fundamental na folha, caule e raiz. Fonte:

Adaptado de Taiz & Zeiger (2004).

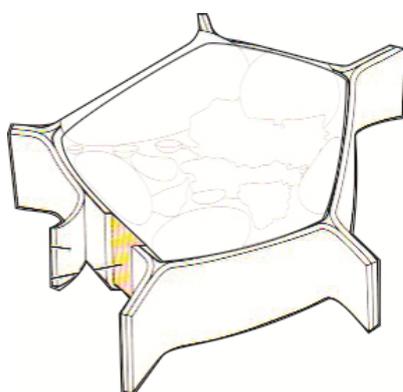
A (Fig. 13) apresenta distribuição dos tecidos vasculares e dos tecidos do sistema fundamental na folha, caule e raiz. No caule, o sistema fundamental ocorre na região medular e cortical, com os feixes vasculares dispostos em um padrão circular entre o córtex e a medula TAIZ & ZEIGER (2004).

### 2.3.2 Células Vegetais

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

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

Por tanto, há tempos que as células são consideradas as unidades estruturais e funcionais que constituem os organismos vivos. Uma diferença fundamental entre os vegetais e os animais é justamente a presença de uma *parede celular rígida* que delimita as células vegetais. Trata-se de uma parede mecanicamente 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 (Figura 2) (GLÓRIA; GUERREIRO, 2006; TAIZ; ZEIGER, 2004).



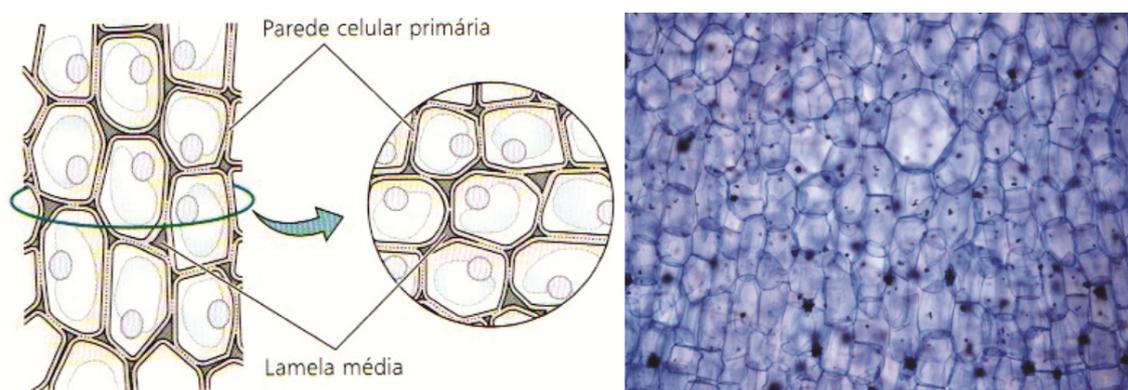
**Figura 14** - A célula e paredes vegetais. Fonte: Adaptado de Taiz & Zeiger (2004).

Segundo Taiz & Zeiger (2004), as “câmaras” da cortiça que foram observadas no microscópio de Hooke eram na verdade, lumes vazios de células mortas. O lume é o espaço limitado pela parede da célula vegetal. Desta forma as migrações celulares são impedidas, pois as células estão ligadas firmemente umas às outras. É válido ressaltar que as funções fisiológicas e bioquímicas dos

vegetais dependem das estruturas, da forma estrutural dos diversos tecidos, como por exemplo, o armazenamento de substrato no parênquima e a condução de água no xilema, etc.

### 2.3.3 Tecido fundamental: parênquima

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.



**Figura 15 - Esquerda** - Tecido fundamental do parênquima. **Direita** - Corte transversal do caule de *Opuntia rufida* destacando as células do tecido parenquimático. Fontes: Taiz & Zeiger (2004) e Atlas de Anatomia Vegetal (2015).

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. Tem ocorrência no xilema e no floema constituindo um caminho importante para o movimento, transporte e reserva de substâncias, como água e outros elementos.

Quanto à composição das células parenquimáticas, os autores citam que estas são compostas por celulose, hemicelulose e substâncias pécicas. Estas substâncias são depositadas constituindo a parede celular que é cimentada às paredes das células adjacentes (GLÓRIA & GUERREIRO, 2006).

### 2.3.4 Parede celular vegetal

A parede celular vegetal apresenta uma gama de funções que exige uma estrutura diversa e complexa (TAIZ & ZEIGER, 2004). Este tópico relata uma breve descrição da morfologia e

arquitetura básica de paredes celulares. Organização, composição e síntese de paredes celulares primárias e secundárias.

Como se pode observar na literatura, 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. Esta descoberta resultou em grande avanço no estudo da biologia, pois, de acordo com Glória e Guerreiro (2006), durante muito tempo, as paredes celulares vegetais foram consideradas estruturas inertes, mortas, cuja única função era conter o protoplasto.

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, Raven *et al.* (2007) distingue os tipos celulares pela estrutura de suas paredes, refletindo íntima relação com a função da célula. As paredes destas células podem possuir uma ou mais camadas que podem ser observadas através da utilização de técnicas microscópicas.

As células podem conter duas paredes: a primária e a secundária. Todas as células têm uma parede primária (como é o caso de células que estão em divisão ou alongamento e tem em geral somente paredes primárias), entretanto, algumas possuem uma segunda parede além da primária, são as células diferenciadas, ou especializadas, possuem arquitetura variada, como descreve Taiz & Zeiger (2004), as paredes primárias, formadas por células em crescimento, são via de regra, consideradas não especializadas e semelhantes quanto à arquitetura molecular em todos os tipos de células.

A parede celular que delimita uma célula podem também variar em espessura, ornamentação e frequência de pontuações, etc. Apesar dessa diversidade morfológica, as paredes celulares comumente são classificadas em dois tipos principais (fator que influencia nas funções e no ciclo de vida das células).

Nultsch (2000) aponta que a estrutura microscópica e a composição da parede celular exercem suas funções mecânicas mesmo após a morte do protoplasto. Muitas células apresentam apenas a parede primária, e é a única que permanece, já em outras células, internamente à parede primária, ocorre a deposição de camadas adicionais, que constituem a parede secundária, o que pode causar a morte da célula após sua diferenciação.

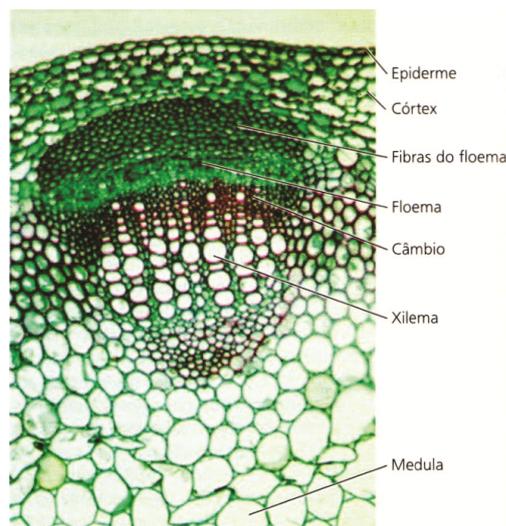
Já o limite entre duas células vizinhas é estabelecido pela lamela média, que atua como um adesivo. Observadas ao microscópio óptico, percebe-se camadas mais ou menos nítidas, onde dá para distinguir a parede primária (formada durante o crescimento em expansão da célula) e a

parede secundária (depositada sobre a primária, após esta ter concluído o crescimento e o aumento da sua área) (GLÓRIA & GUERREIRO, 2006; NULTSCH, 2000).

As paredes celulares primárias são tipicamente finas (menos de 1  $\mu\text{m}$ ), o que caracteriza células jovens e em crescimento. As paredes celulares secundárias são depositadas quando a maior parte do crescimento está concluído, são mais espessas e resistentes que as primárias (TAIZ & ZEIGER, 2004).

Conforme os autores, o crescimento da célula é interrompido quando se forma a parede secundária. Estas podem ser altamente especializadas em estrutura e composição, o que reflete no estado de diferenciação da célula, conforme Taiz & Zeiger (2004), as células de xilema, tais como as encontradas na madeira, são notáveis por possuírem paredes secundárias altamente espessadas, reforçadas por lignina.

A (Fig. 16) revela a seção corada de tecidos vegetais que não apresentam a parede celular uniforme, variando bastante em formato, aparência e composição de acordo com o tipo de célula. Decerto, as paredes celulares do parênquima cortical (caule e raiz) são em geral delgadas têm poucas características distintivas. Entretanto, as paredes de algumas células diferenciadas (especializadas), como por exemplo, as fibras e elementos traqueais, estas possuem paredes espessas e multicamadas.



**Figura 16-** Seção transversal de um caule de trevo (*Trifolium*), mostrando células com uma morfologia de parede variada. Observe paredes altamente espessadas das fibras do floema (fotografia de James Solliday/ Biological Photo Service). Fonte: Taiz & Zeiger (2004).

O limite entre duas células vizinhas é estabelecido pela lamela média, também chamada de lamela mediana ou substância intercelular, que atua como um adesivo. Se trata de uma camada

delgada de material, que pode, em geral, ser vista na junção das paredes de células adjacentes (TAIZ & ZEIGER, 2004; RAVEN *et al*, 2007). Segundo Nultsch (2000), a lamela média como sendo uma substância intercelular, liga firmemente as paredes de células vizinhas, é composta de protopectina e não tem uma estrutura aparente, por tanto, é pouco visível.

#### **2.3.4.1 Estrutura e composição**

Este tópico apresenta um modelo básico das paredes celulares, entretanto, estas paredes apresentam uma diversidade bem mais ampla do que este modelo sugere. 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. Porém ambas são constituídas por microfibrilas de celulose, dentre outros elementos. Taiz e Zeiger (2004) consideram que as microfibrilas de celulose, são estruturas relativamente rígidas que contribuem para a resistência e predisposição estrutural da parede da célula. No entanto, 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.

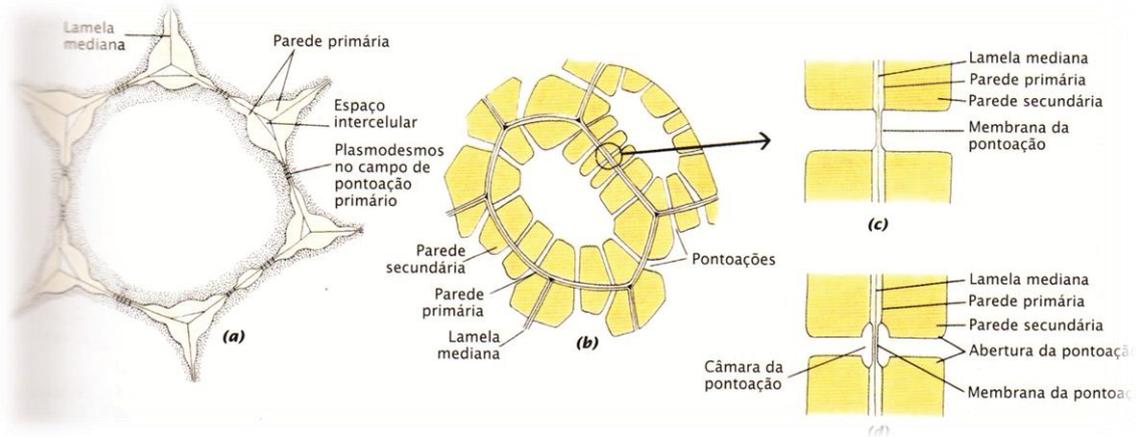
#### **2.3.4.2 Pontoação da parede celular**

Conforme Glória & Guerreiro (2006), quando a parede primária esta em formação, em alguns pontos ocorrem menor deposição de microfibrilas de celulose, formando pequenas depressões denominadas campos de pontoação ou campos de pontoação primária. Em microscopia eletrônica de transmissão consegue-se observar canálculos nos campos de pontoação que atravessa as paredes primárias e secundárias através das pontoações, permitindo a intercomunicação celular.

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).

Ainda 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. Com isto, diferentes tipos de pontoações podem se formar em decorrência da deposição diferencial da parede secundária sobre a primária. Além de outros tipos, Glória & Guerreiro (2006) destacam dois tipos

mais comuns: pontoação simples e pontoação areolada (Fig. 17). Por exemplo, o espaço em que a parede primária não é recoberta pela secundária, compõe a cavidade da pontoação.



**Figura 17** - Paredes celulares e pontoações. Fontes: Raven *et al* (2007).

A (Fig. 17) apresenta campos de pontoação primários, pontoações e plasmodesmos (a) célula parenquimática e campos de pontoação primários, os quais são regiões mais finas nas paredes. Como mostrado aqui, os plasmodesmos comumente atravessam a parede nos campos de pontoação primários. (b) Células com paredes secundárias e numerosas pontoações simples. (c) Um par de pontoações simples (d) Um par de pontoações areoladas (RAVEN *et al.*2007).

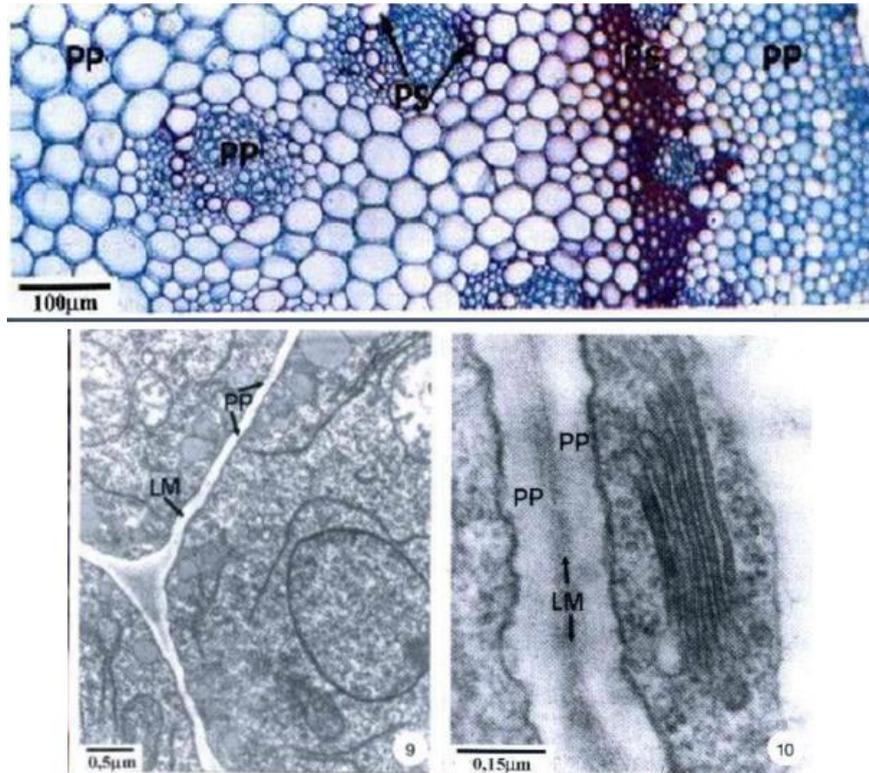
### 2.3.4.3 Parede primária

Nultsch (2000) expõe que a parede primária tem a característica de ser elástica, pode estender-se plasticamente e mudar de forma, com isso, acompanhando o aumento de tamanho da célula. É justamente enquanto a célula aumenta de tamanho, antes e durante o crescimento que a parede primária é depositada. Em muitas células a parede primária é a única que permanece. Glória & Guerreiro (2006) descreve que a parede primária é composta de microfibrilas de celulose inseridas em uma matriz de polissacarídeos;

A parede celular forma-se externamente à membrana plasmática. As primeiras camadas constituem a parede primária (PM), onde a deposição das microfibrilas ocorre por arranjo entrelaçado. Entre as paredes primárias de duas células contíguas está presente a lamela média, ou mediana (LM) (GLÓRIA & GUERREIRO, 2006).

De fato, são diversas as características das paredes, estas apresentam diferentes espessuras, composição e propriedades físicas. Já, a lamela média tem natureza péctica, ou seja, atua como uma cola, que une as paredes primárias das células umas às outras, e que a parede primária é mais

espesada que a lamela média e geralmente se mostra bem mais fina em comparação com a parede secundária (Fig. 18) (GLORIA & GUERREIRO, 2006).



**Figura 18 - Superior** - Células com parede primária (PP) e células com parede secundária (PS). **Inferior** - Paredes primárias (PP) e lâmelas medianas (LM). Fonte: Adaptado de Glória & Guerreiro (2006).

A (Fig. 18) apresenta células com parede primária e células com parede secundária. Pode-se verificar que as paredes primárias são mais finas que as secundárias. Nas outras imagens detalhe das paredes primárias (PP) e lamela mediana (LM), em células adjacentes GLORIA & GUERREIRO (2006).

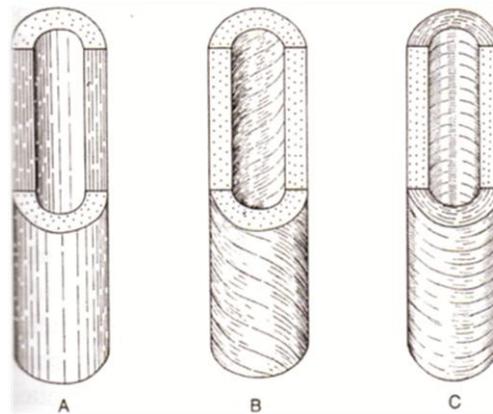
#### 2.3.4.4 Parede secundária

Como já apresentado, embora muitas células vegetais tenha somente uma parede primária delgada, Raven *et al.* (2007), descrevem a parede secundária como sendo uma camada espessa que é depositada pelo protoplasto internamente à parede primária. Esta formação ocorre frequentemente depois da célula ter encerrado o seu crescimento e a parede primária não estar aumentando mais em superfície.

Nas células especializadas, as paredes secundárias são particularmente importantes, sua função é aumentar a resistência naquelas células envolvidas na condução de água. Muitas dessas células

morrem após a parede secundária ter sido depositada. No caso de células mortas, a parede secundária delimita o lume celular, a parte viva da célula que contém o protoplasma. No caso das células mortas o lume não apresenta mais o protoplasma (protoplasma é uma parte da célula, um sistema físico-químico de natureza coloidal que pode passar do estado sólido ao líquido com bastante facilidade) (RAVEN *et al.*, 2007; GLÓRIA & GUERREIRO; 2006).

No momento que ocorre a deposição de camadas adicionais que constituem a parede secundária, as microfibrilas são depositadas por arranjo ordenado (Fig. 19).



**Figura 19** - Aspectos de fibras, esquematicamente. A - textura fibrosa; B - textura helicoidal; C - textura em anel.

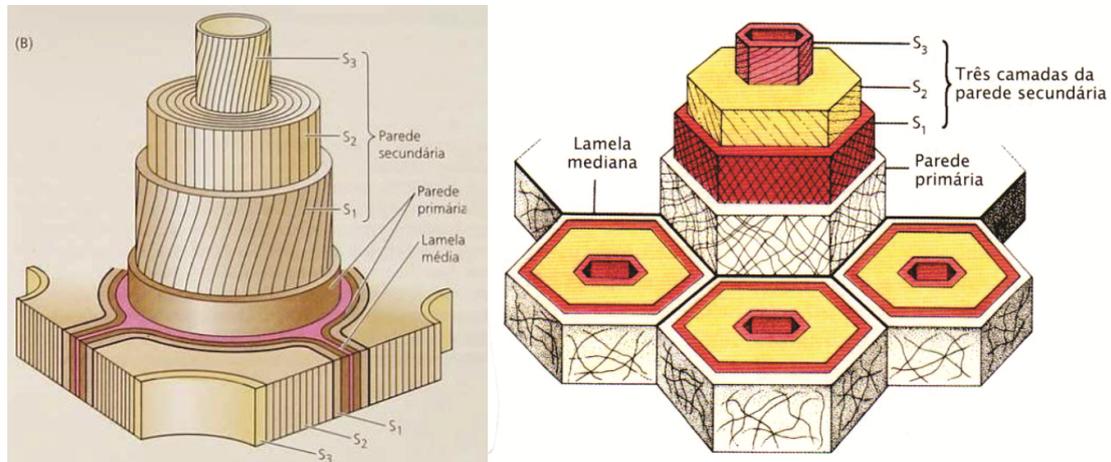
Fonte: Nultsch (2000).

A orientação das fibras depositadas paralelamente é significado decisivo para as propriedades mecânicas. Segundo Nultsch (2000):

Quando estas estão dispostas mais ou menos paralelamente ao eixo longitudinal da célula, fala-se de uma textura fibrosa (A). Tais fibras podem possuir alta resistência à tração, mas tem pouca elasticidade. Mais frequente é o tipo com textura helicoidal (B), presente nas traqueídes. As fibras dispõem-se helicoidalmente, em ângulo mais ou menos agudo com o eixo da célula. Possuem intensa elasticidade. Mais raro é o tipo de textura em anel (C), no qual as fibrilas apresentam ordenação praticamente perpendicular ao eixo longitudinal da célula. Porém, possivelmente, neste caso, tratam-se de espirais muito planas (NULTSCH, 2000).

Sabe-se ainda, que a parede secundária possui mais de uma camada, como apresenta os autores. Glória & Guerreiro (2006) determinam que a primeira, segunda e terceira camadas da parede secundária são designadas S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub> e S<sub>3</sub>, respectivamente sendo delimitadas pela mudança de orientação da deposição, que varia nas diferentes camadas, onde a última camada (S<sub>3</sub>) pode faltar.

Para Raven *et. al.* (2007), estas três camadas bem definidas designadas S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub> e S<sub>3</sub>, respectivamente, para as camadas externa, mediana e interna - podem ser distinguidas na parede secundária (figura 8). Segundo o autor, elas diferem entre si na direção das microfibrilas de celulose, a estrutura em camadas aumenta bastante sua resistência. As múltiplas camadas da parede podem ser encontradas em células do xilema, por exemplo.



**Figura 20 - Esquerda e Direita** - Esquemas do arranjo das microfibrilas na parede celular. Paredes primária e secundária. Na parede primária, as microfibrilas de celulose mostram um arranjo entrelaçado (B); Na parede secundária, o arranjo das microfibrilas é ordenado (A e B). As camadas da parede secundária são designadas respectivamente por S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub> e S<sub>3</sub>, levando-se em consideração a orientação da deposição das microfibrilas, que varia nas diferentes camadas. As paredes secundárias são muitas vezes bastantes espessas, como em traqueídes, fibras e outras células servindo ao suporte mecânico da planta. Fonte: Raven *et al.*, 2007 & Taiz & Zeiger (2004).

#### 2.3.4.5 Composição da parede celular vegetal

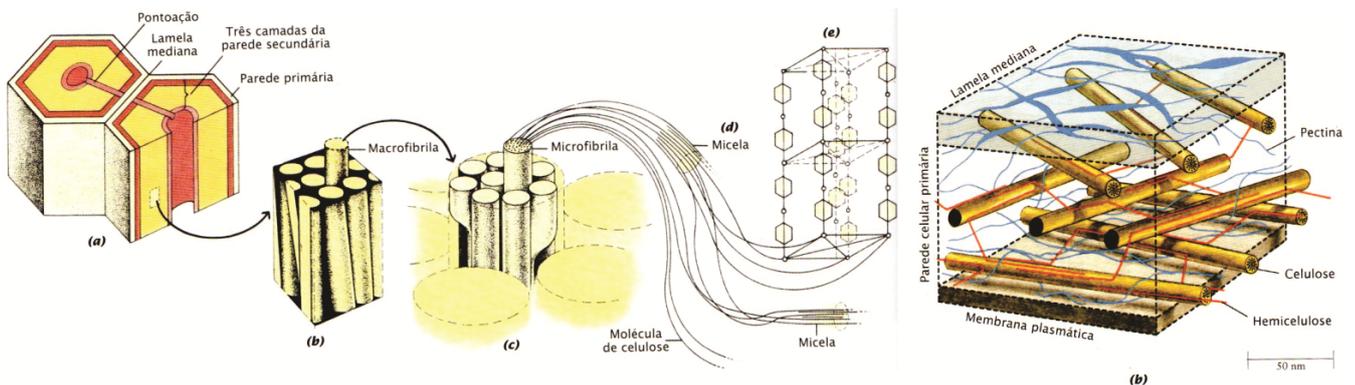
Taiz & Zeiger (2004) expõem que frequentemente, as paredes apresentam uma estrutura complexa e são impregnadas com substâncias específicas, tais como celulose, lignina, proteínas estruturais, dentre outras.

Em relação à composição, o principal componente das paredes celulares vegetais é a celulose, a qual determina em grande parte sua arquitetura. A celulose é um polímero estrutural que é agrupada em microfibrilas. Estas se entrelaçam e se enrolam umas às outras, semelhantes a fios num cabo (Fig. 20). Por se entrelaçarem desta forma, têm uma resistência maior do que o aço de espessura equivalente. 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 (RAVEN *et al.*, 2004). De acordo com o autor, as paredes primárias se compõem da seguinte forma:

São constituídas por celulose, hemicelulose, substâncias pécicas, proteínas e água. Também podem conter lignina, suberina e cutina. A celulose é mais abundante nas paredes secundárias do que nas paredes primárias, e as pectinas podem faltar; a parede secundária é, portanto, rígida e não favorece a distensão (RAVEN *et al.*, 2004).

Nultsch (2000) sugere que a parede secundária contém muito mais celulose do que a parede primária, podendo em caso extremo chegar até 94% de sua composição. Sua matriz consiste de hemiceluloses e proteínas (Fig. 21).



**Figura 21** - Composição da parede celular. Fonte: Adaptado de Taiz & Zeiger (2004).

A lignina pode também estar presente nas paredes primárias, mas é característica peculiar de células com paredes secundárias. Ao passo que ocorre a deposição da parede secundária, inicia-se o processo de lignificação. 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).

#### 2.3.4.6 Lignificação

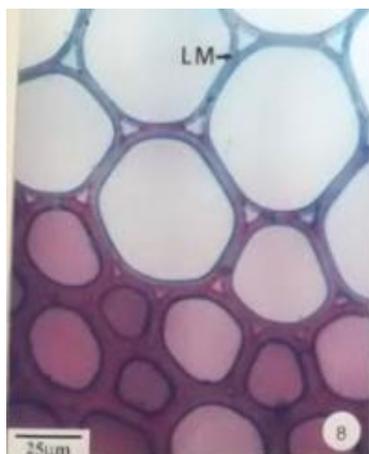
O processo de lignificação, como descreve Nultsch (2000), se realiza pela impregnação de lignina (que é uma substância em abundância da madeira) nos espaços interfibrilares da parede celular. A lignina é um polímero estrutural que forma uma cadeia tridimensional como se fosse uma grade estrutural. Desta forma penetram na parede celular. A lignificação determina o aumento da resistência mecânica, também esta associado a certa perda de elasticidade.

A lignina é encontrada nas paredes celulares de vários tipos de tecidos de sustentação e vascular, especialmente traqueídes e elementos de vaso. Ela é depositada, sobretudo no espessamento da parede secundária, mas também pode ocorrer na parede primária e lamela média, juntamente com celulose e hemicelulose. 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. A lignina é uma componente chave do tecido de transporte de água e proteção da planta (TAIZ & ZEIGER, 2004).

De acordo com Glória & Guerreiro (2006), a composição destas se apresenta da seguinte forma: A parede primária possui alto teor de água, cerca de 65%, e o restante, que corresponde à matéria seca, é composto de 90% polissacarídeos (distribuídos em celulose, hemicelulose e pectina em quantidades equivalentes) e 10% de proteínas e outras impregnações de ceras e suberinas e polímeros como também a cutina nas paredes primárias de algumas células.

A parede secundária possui um teor de água reduzido, devido à deposição de lignina, que é um polímero hidrofóbico. A matéria seca é constituída de 65 a 85% de polissacarídeos (50 a 80% de celulose e 5 a 30% de hemicelulose) e 15 a 35% de lignina. A celulose é maior componente da parede secundária, estando ausentes as pectinas e glicoproteínas. Embora o processo de lignificação esteja associado à parede secundária, ele geralmente se inicia na lamela média e parede primária (Fig. 22), de modo que estas também podem conter lignina quando da formação da parede secundária.

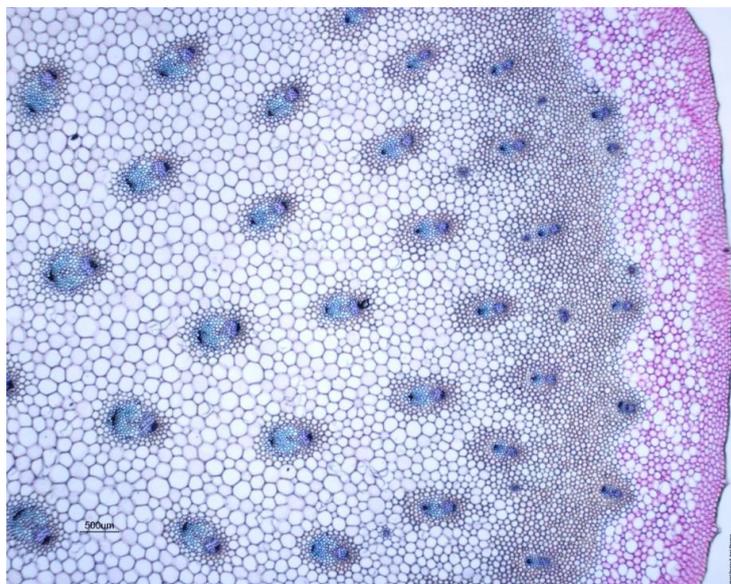
Por tanto, podemos concluir baseando-se na teoria dos autores, que quando uma planta morre, ou seja, encerra seu ciclo de vida, as células também morrem então o substrato se vai juntamente com a água. O que lhe resta basicamente de matéria seca nas paredes primárias das células é algo em torno de 30% 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, ficando mais leve e com espaços vazios no interior das células e nos espaços intercelulares ou lacunas intercelulares, que são preenchidos com ar.



**Figura 22** - Células com paredes em início de lignificação, a qual ocorre a partir da lamela mediana (LM) (Escapo floral de lírio-amarelo - *Hemerocallis flava*, em corte transversal). Fonte: Glória & Guerreiro (2006).

### 2.3.5 Tecido vascular: xilema

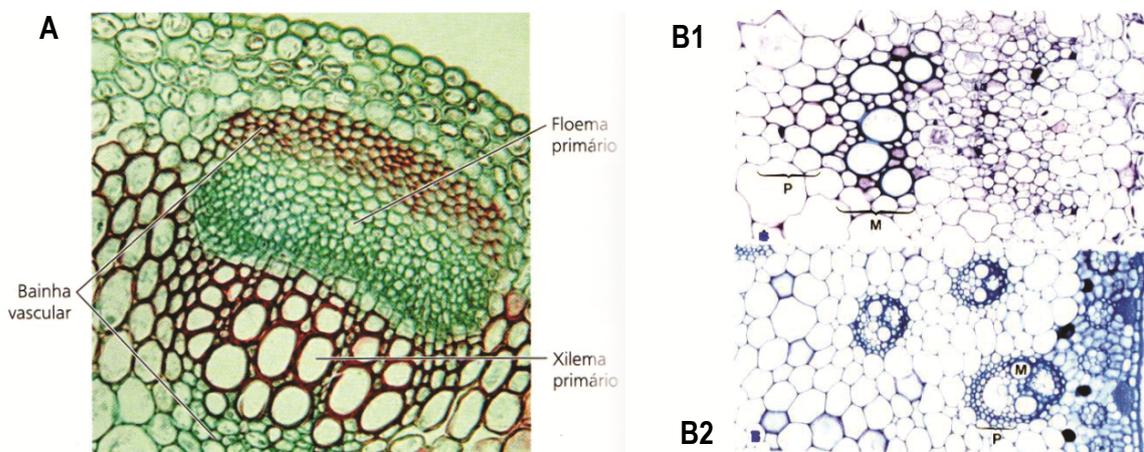
O xilema é o principal tecido de condução de água nas plantas vasculares, também tem a função de conduzir nutrientes e minerais. É formado por um sistema contínuo de tecido vascular que percorre todo o corpo da planta (Fig. 23). Na maioria dos vegetais, o xilema constitui a porção mais longa da rota de transporte de água, podendo representar algo em torno de 99%. Está diretamente envolvido na sustentação e no armazenamento de substâncias. (GLÓRIA & GUERREIRO, 2006; RAVEN *et al.*, 2007; TAIZ & ZEIGER, 2004).



**Figura 23** - Sistema vascular, xilema. Estrutura de caule de monocotiledónea evidenciando feixes vasculares colaterais fechados, distribuídos na parênquima interfascicular. (*Ruscus* sp.). Autor da foto: Jose Pissara. Fonte: casadasciencias.org (2015).

Os xilemas primário e secundário são tecidos complexos formados por elementos condutores, é o tecido responsável pelo transporte de água e solutos à longa distância, armazenamento de nutrientes e fornecendo suporte mecânico. O xilema faz parte do tecido vascular e estão distribuídos em todos os órgãos das plantas, contendo células parenquimáticas e fibras, além de outros tipos celulares. De acordo com Glória & Guerreiro (2006), conforme o vegetal se desenvolve, o xilema primário se apresenta em duas categorias: o protoxilema (proto = primeiro/antes) e o metaxilema (meta = depois/ após) (Fig. 24).

Segundo os autores o protoxilema é composto de células condutoras que se diferenciam primeiro, ou seja, adquirem paredes secundárias lignificadas de modo precoce, por este motivo, geralmente apresentam menor diâmetro do que no metaxilema, onde ocorre a diferenciação tardia dos elementos vasculares, desta forma possuem maior diâmetro. A propósito, o xilema (primário e secundário) apresenta os mesmos tipos celulares básicos: os elementos traqueais, as células parenquimáticas e as fibras.



**Figura 24 - A, B1 e B2 - Feixe Vascular. Protoxilema (P), metaxilema (M).** Fonte: Taiz & Zeiger (2004) e Glória & Guerreiro (2000).

Conforme Taiz & Zeiger (2004), o xilema consiste de dois tipos de elementos traqueais: as traqueídes e os elementos de vaso (Fig. 24). As traqueídes estão presentes nas gimnospermas e em outros grupos de plantas vasculares. Estas células condutoras possuem anatomia especializada, o que lhes permite transportar água com grande eficiência após a diferenciação da célula.

A maturação tanto de traqueídes quanto de elementos de vaso envolve a 'morte' da célula. Assim, células condutoras de água funcionais não têm membranas e organelas. O que permanece são paredes celulares

lignificadas e grossas, que formam tubos ocios através dos quais a água pode fluir com resistência relativamente baixa (TAIZ & ZEIGER, 2004).

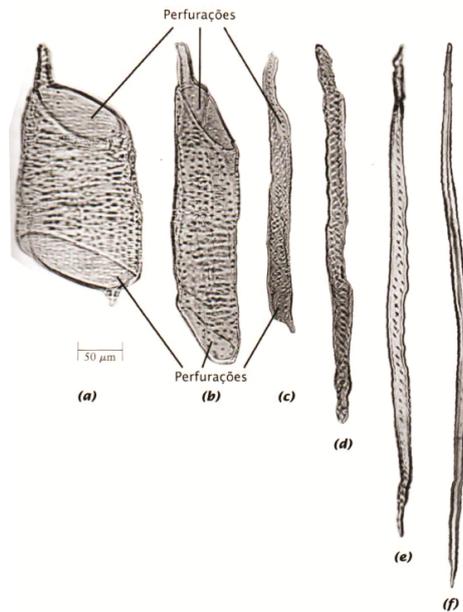
Sendo assim, a diferenciação de um elemento traqueal, é um exemplo de morte celular programada. Raven *et. al.* (2007), esclarece que este processo é resultado de uma programação genética que faz com que a célula morra, neste momento ocorre a eliminação total do protoplasto. Por tanto, só as paredes das células permanecem, rígidas. O xilema pode ainda conter células parenquimáticas, que comumente se apresentam em fileiras verticais. Algumas fibras presentes no xilema mesmo na maturidade podem continuar vivas e desempenhar funções de armazenamento de substâncias e sustentação.

#### **2.3.5.1 Composição celular do xilema**

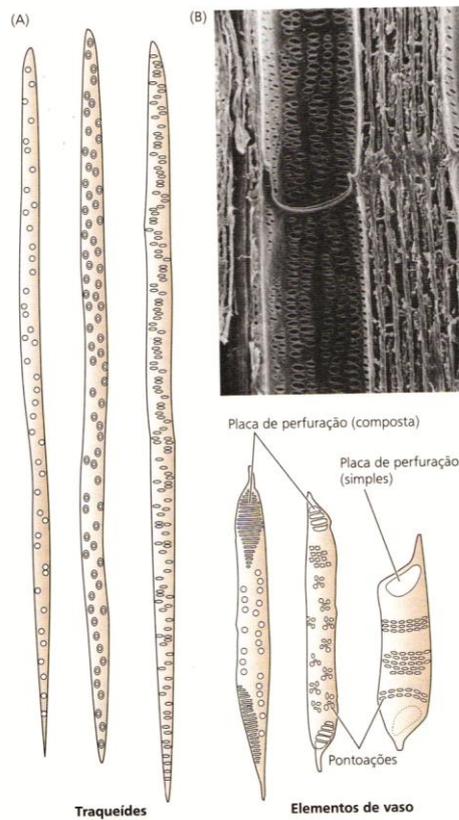
Em relação à composição do xilema, considera-se que as principais células de condução do são as fibras e os elementos traqueais, como citado anteriormente, estes se dividem em dois tipos: traqueídes e elementos de vaso.

As fibras têm como principal função, dar suporte e sustentação para as partes do vegetal que não alongam mais. Quando presentes no xilema são denominadas fibras xilemáticas. Estão arrançadas em forma de feixes ou cordões, espalhados pelo corpo primário da planta e podem apresentar formas variadas, embora tenham origem comum (GLÓRIA & GUERREIRO, 2006).

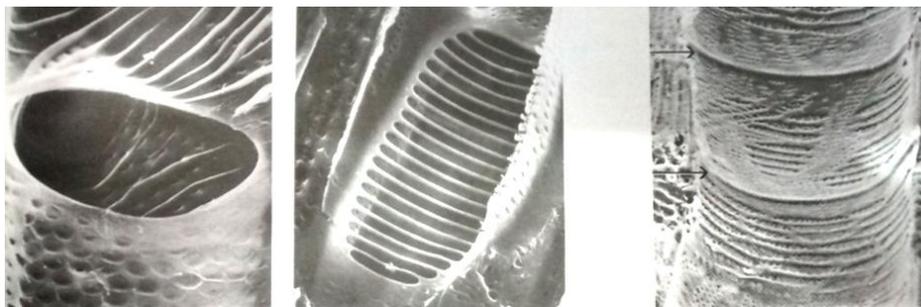
As traqueídes, assim como, os elementos de vasos são tipos de células condutoras de água encontradas na maioria das gimnospermas. Tanto as traqueídes quanto as fibras estão organizadas em filas verticais sobrepostas, ambas são células fusiformes alongadas que possuem parede secundária. Por sua vez, não apresentam protoplasto na maturidade (ou seja, tem o lume celular vazio) e podem ter pontoações (Fig. 25). Desta forma, a água flui entre as células adjacentes através de numerosas pontoações em suas paredes. Estas pontoações estão tipicamente localizadas em oposição à outra, formando pares de pontoações (RAVEN *et al.*, 2007; TAIZ & ZEIGER, 2004).



**Figura 25** - Tipos de células do xilema. **(a)**, **(b)** Elementos de vasos largos e **(c)** elemento de vaso estreito; **(d)** uma traqueíde; **(e)**, **(f)** fibras. O pontos escuros correspondem às pontoações, embora não seja visível em **(f)**. As pontoações são áreas nas quais a parede secundária está ausente. Apenas elementos de vaso têm perfurações, que são áreas onde faltam tanto a parede primária como a parede secundária. Detalhe das pontoações nas paredes terminais das traqueídes (seta). Fonte: Taiz & Zeiger (2004).



**Figura 26** - Traqueídes **(A)** e elementos de vaso **(B)**. Fonte: Taiz e Zeiger (2004).



**Figura 27** - Placas de perfuração em elementos de vaso. Fonte: Raven *et. al.* (2007).

Segundo Raven *et. al.* (2007), as traqueídes não apresentam placas de perfuração como nos elementos de vaso. Porém os elementos de vaso consistem no empilhamento de dois ou mais elementos, são células mortas que se interconectam com outras através das placas de perfuração. Estas podem ser do tipo perfurado simples com uma abertura larga, ou podem estar dispostas como barras ou degraus com espaços intercalados (Fig. 27).

#### **2.3.5.2 Fibras**

Segundo Glória & Guerreiro (2006), as fibras são células de sustentação que são responsáveis tanto pela rigidez como pela flexibilidade da madeira. Elas têm o formato alongado com as pontas afiladas com maior dimensão no sentido do eixo longitudinal. Geralmente as fibras variam no espessamento da parede, mas são mais espessas que as paredes das demais células do xilema e podem possuir muitas pontuações.

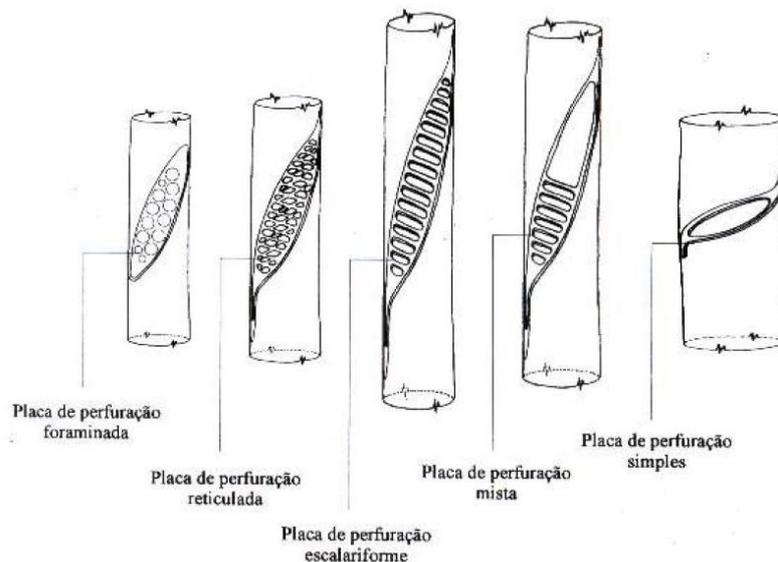
As fibras são células longas, de paredes celulares secundárias grossas, geralmente lignificadas, e com extremidades afiladas. Devido ao espessamento da parede, que pode ser muito acentuado, lume celular é reduzido, ocasionando, em geral, a morte das células na maturidade (GLÓRIA & GUERREIRO, 2006).

As fibras podem ter valor econômico e ser exploradas com fins comerciais, como é o caso de algumas espécies de dicotiledôneas, a exemplo do cânhamo, onde as fibras presentes no caule podem ultrapassar os cinco centímetros de comprimento. Em monocotiledôneas, por exemplo, como o sisal (*Agave*) presente no nordeste do Brasil, as fibras são extraídas das folhas, para produção de cordas, cordões, tecidos e etc.

### 2.3.5.3 Elementos traqueais

Como descrito anteriormente, existem dois tipos de elementos traqueais: traqueídes e elementos de vaso, onde as traqueídes não possuem as placas de perfuração, enquanto que os elementos de vaso são dotados destas placas. As traqueídes são típicas das gimnospermas, elas se posicionam e fileiras longitudinais, justapondo-se pelas extremidades que não são perfuradas, o intercambio com outras células se dá através das pontuações.

De acordo com Glória & Guerreiro (2006), no decorrer da diferenciação, tanto as traqueídes quanto os elementos de vaso, deixam de possuir o protoplasto, o que torna os torna capazes de realizar o transporte da água, nutrientes e sais minerais. Nos elementos de vaso, a parede terminal de cada extremidade sofre um processo de dissolução, originando a placa de perfuração (ou seja, perdendo matéria, torna-se uma estrutura oca). Quando a dissolução da parede terminal é total, dá origem à placa de perfuração simples; se a dissolução ocorrer de forma parcial, as placas de perfuração podem ser do tipo foraminada, reticulada, escalariforme, mista e radiada (Fig. 28).

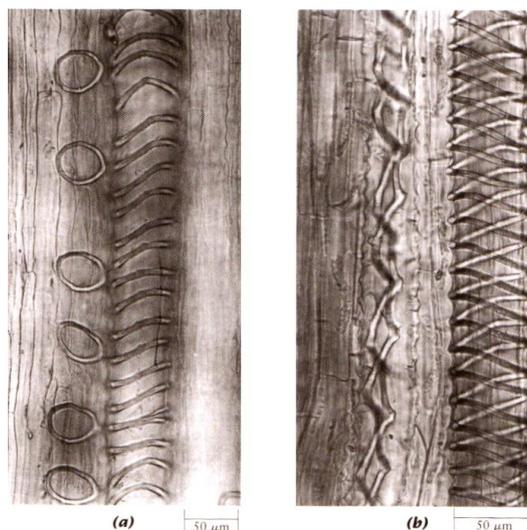


**Figura 28** - Representação esquemática das placas de perfuração. Fonte: Glória & Guerreiro, 2006.

### 2.3.5.4 Parede celular dos elementos traqueais

Como caracteriza Glória & Guerreiro (2006), a deposição de parede secundária no interior da parede primária em elementos traqueais ocorre em diferentes níveis, estabelecendo diferentes padrões. Segundo as autoras, esses padrões aparecem em séries ontogenéticas de elementos traqueais, nos quais há progressivo aumento da extensão de cobertura da parede primária pela parede secundária (Fig. 29). Em outras palavras, é quando uma célula passa por diferentes estágios

de desenvolvimento até atingir sua maturação, ou seja, ocorrem mudanças estruturais de uma determinada unidade que são pré-programadas geneticamente.



**Figura 29** - Elementos traqueais. Partes dos elementos traqueais do primeiro xilema formado (protoxilema) de mamona.

(a) Espessamentos da parede anelar (em forma de anéis à esquerda) e espiralados em elementos traqueais parcialmente distendidos. (b) Espessamentos de parede em dupla espiral, em elementos que já estão distendidos. O elemento da esquerda foi muito distendido e as voltas das espirais se soltaram da parede. Fonte: Raven *et. al.* (2007).

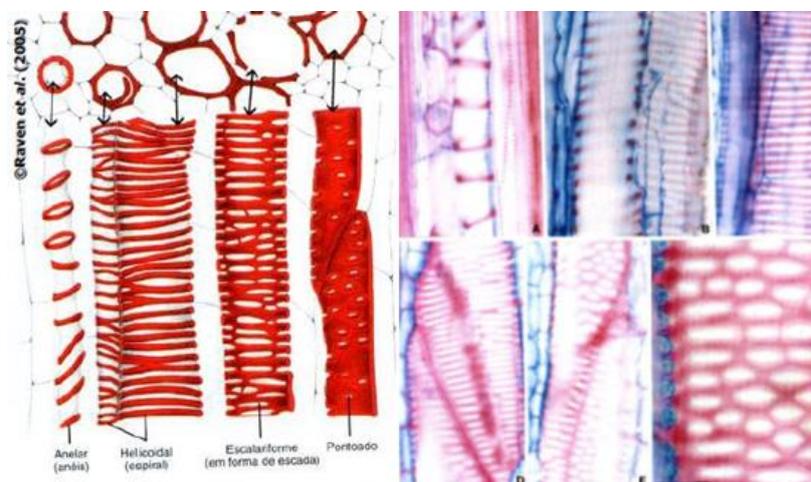
Quanto à estrutura dos elementos traqueais do xilema primário, Raven *et. al.* (2007) descreve que os elementos traqueais apresentam uma diversidade no tipo de espessamentos da parede secundária. Durante o desenvolvimento da planta em que ocorre estágios de crescimento ou de alongamento de raízes, caules e folhas, a parede secundária dos primeiros elementos traqueais formados no xilema primário, é depositada sob a forma de anéis ou espirais. Estes tipos são mais frequentes no protoxilema (Fig. 29).

Esses espessamentos anelares (semelhantes a anéis) ou helicoidais (espiralados) possibilitam a tais elementos traqueais serem esticados ou distendidos após as células terem se diferenciado, embora estas células sejam frequentemente destruídas durante o alongamento do órgão. No xilema primário, a natureza do espessamento da parede é grandemente influenciada pela intensidade do alongamento. Se houver pouco alongamento, aparecem elementos traqueais com menor capacidade de extensão em lugar de elementos com maior capacidade de extensão. Por outro lado, se houver um alongamento intenso, serão formados muitos elementos traqueais com espessamentos anelares e espiralados (RAVEN *et. al.*, 2007).

O autor descreve que no xilema primário que se forma tardiamente (metaxilema), e no xilema secundário, a parede secundária das traqueídes e dos elementos de vasos recobre por completo a

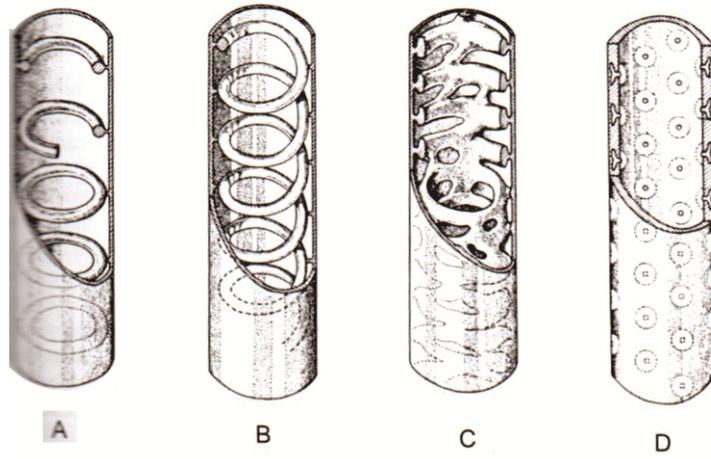
parede primária, exceto nos campos de pontoação e nas placas de perfuração dos elementos de vaso. Estas células são rígidas, não podem ser esticadas e são denominadas elementos pontoados (RAVEN *et. al.*, 2007).

Glória & Guerreiro (2006) explica que nos primeiros elementos traqueais formados, a deposição de parede secundária se apresenta na configuração do padrão anelar, onde os anéis não se conectam uns com os outros. Outra configuração semelhante é o padrão helicoidal, formando hélices (figura 18). As regiões que apresentam deposição de parede secundária são menos abundantes, o que pode fazer com que esses padrões sofram colapsos facilmente, entretanto são mais extensíveis. O protoxilema, geralmente, apresenta estes padrões (anelar e helicoidal). Estas particularidades permitem que os elementos traqueais se diferenciem em tecidos que estão crescendo, ao passo que se estendem e continuam sendo funcionais, realizando o suprimento de água em todas as partes dos vegetais.



**Figura 30** - Paredes secundárias. Fontes: Raven *et. al.* (2005) e Glória & Guerreiro (2000).

Quando ocorre da deposição da parede secundária encobrir grandes áreas da parede primária, podem apresentar-se três padrões distintos para os diferentes graus de cobertura: escalariforme, reticulado e pontoado (Fig 30 e 31). Esses padrões são mais comuns no metaxilema e em regiões onde o crescimento já cessou. No escalariforme, as regiões sem deposição de parede secundária ocorrem de forma regular. No reticulado, a deposição se apresenta de forma irregular. No padrão pontoado apresenta-se a maior cobertura da parede primária, sendo quase toda ela coberta pela parede secundária, exceto nas áreas de pontoações.



**Figura 31** - Tipos de parede secundária. Fonte: Nultsch (2000).

### **PARTE III - MÉTODOS E MATERIAIS**

### 3.1 PROCEDIMENTOS E ANÁLISES

Neste tópico será descrito o que foi feito, e a forma como foram realizadas as etapas da pesquisa. A abordagem metodológica selecionada para esta dissertação foi escolhida por estar muito relacionada à prática de projeto em design e sustentabilidade amparado em estratégias biológicas que possam resultar em inovações tecnológicas.

Nesta ocasião, se trata de uma pesquisa interdisciplinar que permeia o campo da biologia e do design, na busca de soluções técnico/sustentáveis para o desenvolvimento de estruturas com propriedades de leveza, resistência, e conseqüentemente, flutuação, assim como, possibilidade de fabricação digital. Este tópico também apresenta o raciocínio desenvolvido para argumentação e tomada de decisões. Esta sistemática faz parte do processo metodológico para estruturação da pesquisa e desenvolvimento da lógica desta dissertação.

Esta pesquisa está apoiada na abordagem do *Biomimicry Thinking (Pensamento Biomimético)*, o qual foi elucidado no referencial teórico e nesta etapa se mostrou ser bastante eficaz na organização, configuração e detalhamento da metodologia desta pesquisa, que busca o desenvolvimento de soluções bioinspiradas. Como fora descrito no segundo capítulo, o *Pensamento Biomimético* (BIOMIMICRY INTTITUTE 3.8, 2015) funciona como uma estrutura, pois fornece o contexto para onde, como, o quê e porquê o biomimetismo se encaixa no processo de qualquer disciplina ou qualquer escala de design (design no sentido de projeto).

Deste modo, as etapas de metodologia de pesquisa científica que compõe esta dissertação, são identificadas de forma diluída e têm seu detalhamento enquadrado nas etapas e fases constituintes do diagrama **Desafio para Biologia**, da ferramenta metodológica *Biomimicry DesignLens* (BIOMIMICRY INTTITUTE 3.8, 2015). Esta modalidade foi selecionada por se comportar de forma sequencial e estrutural mais organizada, facilitando a didática e o cumprimento dos objetivos frente à problemática apresentada.

Segundo o *Biomimicry Insitute 3.8* (2015), esta modalidade apresenta uma configuração controlada e é particularmente útil quando existe um cenário no sentido de uma problemática, e se está buscando ideias biológicas para a solução. O diagrama se inicia com a definição do escopo, seguindo pela fase de descoberta, posteriormente, a fase de criação, finalizando um ciclo através da avaliação. Entre estas fases ocorrem algumas subetapas, contudo, o ciclo segue de forma sequencial e em sentido horário, como é detalhado mais a frente.

Este trabalho iniciou com o embasamento teórico, o qual recorreu a fontes de publicações científicas juntamente com a pesquisa de campo para coleta de dados. Foi levado para o

Laboratório de Anatomia Vegetal - LAVeg (UFPE) amostras da planta Agave, que foram coletadas em seu habitat natural. Foram realizadas algumas entrevistas com a bióloga Dra. Emília Arruda, que auxiliou de forma efetiva na fundamentação da pesquisa e na realização de procedimentos laboratoriais, indicando qual o ponto de partida para investigação de teorias e definições em anatomia vegetal e na estrutura celular do escapo floral do Agave. O apoio na literatura sobre anatomia vegetal possibilitou assimilar os elementos presentes naquelas amostras, e de fato, permitiu uma visualização inicial de que aquelas estratégias poderiam apresentar boas soluções tecnológicas e sustentáveis para o problema da pesquisa, se na natureza aquilo funciona, então quando convertido em design, esperava-se que também funcionaria.

As possibilidades de aplicação das estratégias do Agave são inumeráveis, devido o fato de existir uma ampla gama de artefatos que necessitam de soluções em estruturas com propriedades de leveza, resistência, assim como flutuação, para diferentes ambientes e aplicações. Para transformar estas estratégias biológicas em design e tecnologia foi necessário fazer o uso de ferramentas de modelagem digital paramétrica. Neste caso o **Design Paramétrico** se apresentou como a forma de projetar mais adequada por apresentar esta capacidade de configuração bastante flexível e adaptável. Com ela pode-se gerar uma estrutura genérica adaptável a incontáveis aplicações com base em parâmetros que podem ser alterados. Com os inputs e a estratégia de configuração e representação bem definidos, pode-se obter diferentes outputs modificando os parâmetros, assim, a forma da estrutura se adequa a qualquer artefato, porém, mantendo o mesmo princípio de leveza estrutural e resistência mecânica.

A propósito, um artefato teve de ser selecionado para teste piloto e aplicação das estratégias do Agave. Portanto, a categoria de artefato para ambiente aquático optado foi '**pranchas de surf**', os motivos são vários para a escolha deste tipo de produto, além de ser um tipo de artefato o qual o autor tem certo conhecimento e vivência.

A fundamentação em relação à introdução destes objetos foi apresentada na primeira parte desta pesquisa. Eis alguns dos argumentos: primeiramente se trata de um artefato para o ambiente aquático que, para funcionar (desempenhar sua função), exige certas soluções estruturais em sua configuração, tais como as estratégias de leveza, resistência, flexibilidade e flutuação (presentes no Agave).

Tanto a produção de pranchas com polímeros, como também de Agave, atualmente ainda persiste em aplicar processos de fabricação ultrapassados que não condizem com os ensinamentos da natureza e princípios da vida, na forma como ela se constitui atuando em um *optimum* de matéria e energia. Neste ponto surge outra argumentação, fundamentada na problemática ambiental

referente aos processos de produção, onde ocorrem grandes quantidades de desperdício e descarte de matéria prima que não se reintegram ao ciclo de vida do meio natural.

Por outro lado, o crescimento e desenvolvimento da vida no planeta (como a planta Agave, objeto de estudo desta pesquisa), ocorrem de forma equilibrada, através de processos de adição de matéria e energia somente onde é necessário e em quantidades mínimas para suporte mecânico de sua própria estrutura e desempenho de suas funções, com excelentes performances. Como, dito anteriormente, estes princípios podem ser direcionados para qualquer categoria de produto. O Agave também fornece estratégias de sustentabilidade e autorreciclagem em um ciclo de vida equilibrado favorável à vida.

Dando sequência à estruturação da pesquisa dentro da linha de raciocínio da biomimética, é chegada a hora de emular as estratégias da estrutura celular do Agave aos princípios de design no âmbito do projeto de produtos. Mas como? Neste momento ocorre a materialização das ideias através da computação e modelagem de uma estrutura genérica com auxílio do design paramétrico. Esta estrutura foi então, aplicada em pranchas de surf, produto que representou grande potencial de aplicação por motivos citados anteriormente.

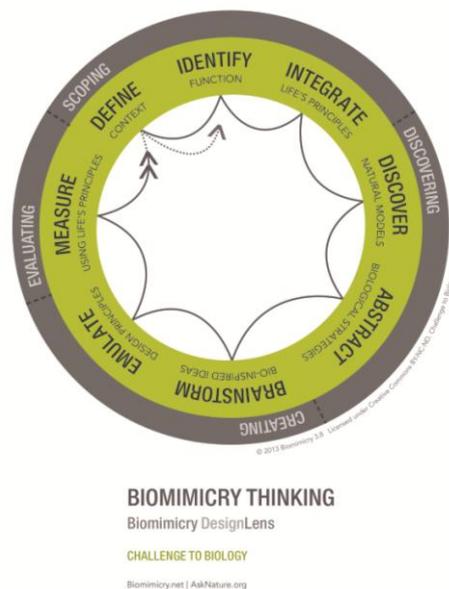
Neste caso, verificou-se que a aplicação de tecnologias digitais teve grande relevância para a área de projeto, principalmente quando alinhadas aos princípios de sistemas biológicos. Então, obteve-se parte da validação desta pesquisa com a aplicação da estrutura celular do Agave em estruturas através do design paramétrico. Justamente por apresentar a possibilidade de alteração de parâmetros, permitindo adequar as estratégias à ampla possibilidade de aplicações, como em soluções de estruturas leves, resistentes, flexíveis, flutuantes e passíveis de fabricação digital, emulando também, desta forma, os princípios da vida elencados por Benyus (2003) e sua equipe do *Biomimicry Inttitute 3.8*.

Para uma maior concretização dos resultados esperados, e uma análise mais aprofundada da eficácia desta aplicação paramétrica, projetou-se esta estrutura numa secção de uma prancha de surf, de forma que fosse passível de fabricação digital, levando-se em consideração a necessidade de adaptação da forma da estrutura algumas devido a algumas limitações para impressão 3D.

### **3.2 BIOMIMICRY THINKING - DESAFIO DE BIOLOGIA (Challenge to Biology)**

Este capítulo apresenta a utilização e aplicação detalhada da modalidade da ferramenta metodológica **Desafio de Biologia** (*Challenge to Biology*) do *Biomimicry Inttitute 3.8*. Como citado anteriormente no capítulo procedimentos e análises, o diagrama inicia definindo o **escopo** da pesquisa, seguindo pela fase de **descoberta**, posteriormente, fase de **criação** e finalizando as

etapas do ciclo, fecha-se o diagrama com a fase de **avaliação**. Vale salientar que para se obter melhores resultados e um refinamento das estratégias identificadas e convertidas na forma de soluções, pode-se repetir o caminho percorrido através do diagrama várias vezes em um processo cíclico. Desta forma, podem-se alcançar estágios de abstração mais aprofundados, atingindo graus de desempenho técnico mais elevado. Assim como, ascender para uma maior aproximação dos princípios da vida, os quais já foram apresentados anteriormente.



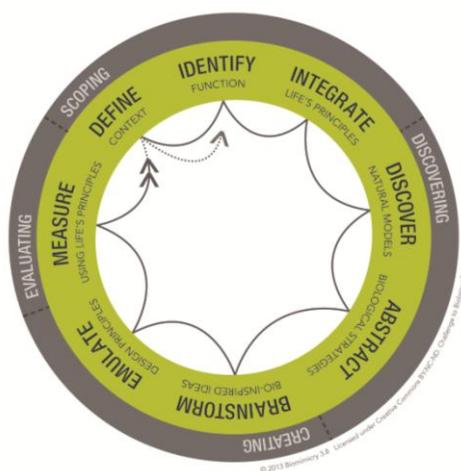
**Figura 32** - Sequência cíclica das etapas da abordagem metodológica Desafio de Biologia. Fonte: BIOMIMICRY.NET, (2015).

### 3.2.1 ESCOPO

Primeira de quatro etapas, aqui se trata do início da abordagem ao diagrama, indica o ponto de partida e apresenta o caminho a seguir com a intenção de onde se pretende chegar. As três fases que compõem o **ESCOPO: Definir Contexto, Identificar Função, e Integrar Princípios da Vida**, foram abordadas na parte I e II desta dissertação.

É neste momento que se compreende a problemática, o conhecimento das funções necessárias como solução a ser alcançada, também se encontra o embasamento do contexto na forma de uma revisão bibliográfica. Desta forma, também foi apresentado o modelo natural, neste caso o Agave. Então, busca-se através de sua estratégia atuar por meio do design na configuração de soluções técnicas e sustentáveis para artefatos voltados ao ambiente aquático, que neste caso, foi selecionada a prancha de surf como teste piloto. Porém situações diversas poderão receber as soluções funcionais em estrutura, leveza e resistência, mesmo que não necessite de flutuação.

O **ESCOPO** inclui informações sobre processos de produção de pranchas de surf, biomimética como meio de inovação em design e sustentabilidade através de soluções bioinspiradas, aplicação de métodos de produção digital por apresentar possibilidade de representar a forma como a vida se desenvolve no meio natural, com base nas diretrizes dos **Princípios da Vida**. O estudo da anatomia vegetal sobre estruturas celulares com representou grande importância, ao fornecer o conhecimento específico em biologia para identificação dos tecidos, sistemas e elementos celulares e composição, assim como suas funções estruturais.



**Figura 33** - Primeira etapa: ESCOPO. Fonte: BIOMIMICRY.NET, (2015).

## I - Definir contexto

No início deste trabalho no capítulo de introdução, contém o tópico Contextualização, que se trata exatamente desta fase do diagrama. A contextualização situa o leitor apresentado algumas palavras chaves desta pesquisa, e introduz alguns problemas que se inter-relacionam e juntos arquitetam a problemática, a qual se apresenta acompanhada de argumentações e justificativas em um texto expositivo. Nesta fase também foram apresentados os objetivos gerais e específicos, assim como o objeto de estudo, que se trata do Agave, mais especificamente, a estrutura e composição das paredes celulares do parênquima do escapo floral da planta.

Também compõe esta fase do diagrama, a parte II da pesquisa - referencial bibliográfico, onde estão apresentadas as teorias, embasando e dando o suporte necessário para o conhecimento e argumentação baseada nos elementos chave da pesquisa. O referencial teórico fundamenta e constrói a lógica da problemática, fornecendo as respostas necessárias aos questionamentos que vão surgindo durante o andamento da pesquisa, ou seja, o referencial pode dialogar com todas as etapas metodológicas em qualquer momento da pesquisa.

## II - Identificar função

**Identificar Função** se trata da segunda fase do diagrama, esta abordagem se volta para as funções que devem ser levadas em consideração nesta pesquisa. Após obter o conhecimento da problemática, tomamos conhecimento das propriedades funcionais que são de grande relevância neste trabalho. Estas funções, enxergadas como estratégias, são as propriedades funcionais técnico/estruturais de **leveza**, **resistência**, e conseqüentemente **flutuação**.

São estas funções que serão investigadas em um modelo natural, neste caso, o Agave, que é utilizado como matéria prima na produção de pranchas de surf, e é justamente a propriedade de leveza e conseqüente flutuação que faz com que sirva para aplicação em pranchas de surf, porém, não resulta no mesmo desempenho das pranchas produzidas com espumas poliméricas. Por tanto, esta relação do Agave com pranchas de surf antecipa a segunda etapa do diagrama, **DESCOBERTA**, mais especificamente a fase **Descobrir Modelos Naturais**, pois nesta pesquisa, o modelo natural já estava definido desde a contextualização.

## III - Integrar princípios da vida

Nesta terceira fase, finaliza-se a definição do **ESCOPO**, à qual continua dialogando e recorrendo ao embasamento teórico, mais especificamente no capítulo sobre biomimética da parte II desta pesquisa. Neste ponto, ocorre o fechamento do recorte e intento desta pesquisa, que é o desenvolvimento de soluções bio-inspiradas, tanto do ponto de vista técnico, como também ambiental. Para que ocorra um maior balizamento com os sistemas biológicos, deve-se atentar para as diretrizes contidas nos **Princípios da Vida**. Segundo o *Biomimicry Institute 3.8 (2015)*, “a vida cria condições propícias para a vida”, desempenhando suas funções de forma magnífica e equilibrada em ciclos de vida sustentáveis e bem definidos.

De fato, ao integrar alguns destes princípios, ficou claro que existe a possibilidade de aplicação e materialização de soluções estratégicas bioinspiradas para artefatos que requerem propriedades funcionais de **leveza e resistência**, as quais foram determinadas na fase anterior do diagrama, **Definir Função**. Então com estas funções bem definidas, elas foram procuradas em um modelo natural que representasse estes princípios e estratégias, neste caso, a inspiração ocorreu com a planta Agave, tanto nas soluções técnicas de sua estrutura celular, como também nos ensinamentos sobre sustentabilidade em um eficiente o ciclo de vida que a planta apresenta, assim como sua utilização na aplicação de artefatos. Então, informações do capítulo sobre Agave no referencial teórico apresentaram ensinamentos que têm forte relação com os princípios da vida.

Portanto, foi neste momento que ocorreu a seleção e **Integração dos Princípios da Vida** mais condizentes com as necessidades deste projeto. Em uma escala de projeto mais ampla é possível aplicar cada um dos princípios isoladamente, contudo interconectados integrando-se uns aos outros. Aqui foram elencados alguns que estreitam uma relação mais aprofundada com as propriedades e estratégias a serem alcançadas nesta pesquisa.

Tendo em vista que alguns destes princípios são levados em conta como diretrizes e parâmetros, estes foram convertidos em tecnologia condizente com o desenvolvimento da natureza em design e tecnologia sustentável na solução de estratégias de estruturas leves e resistentes, passíveis de meios de produção compatíveis e em condições propícias à vida. A (Tabela 1) abaixo apresenta de forma esquemática as “lições do design da natureza”, como são definidas pelo *Biomimicry Institute 3.8* (2015). Os Princípios elencados mais pertinentes estão destacados na cor azul e descritos de forma pontual como foram levados em conta nesta pesquisa.



EVOLUIR PARA SOBREVIVER	SER EFICIENTE EM RECURSOS (MATERIAIS E ENERGIA)	ADAPTAR-SE ÀS CONDIÇÕES DE MUDANÇA	INTEGRAR O DESENVOLVIMENTO COM CRESCIMENTO	SER LOCALMENTE LIGADO E RESPONSIVO	USAR QUÍMICA AMIGÁVEL À VIDA
Incorporar informações continuamente para garantir um desempenho duradouro.	Ser habilmente conservador em aproveitar as oportunidades de recursos locais.	Responder adequadamente a contextos dinâmicos.	Investir de forma otimizada em estratégias que promovam o desenvolvimento e crescimento.	Se encaixar e se integrar com o meio ambiente.	Use química que ofereça suporte a processos da vida.
<b>Replicar as estratégias que funcionam</b> Repetir abordagens de sucesso	<b>Use o design multifuncional</b> Conheça múltiplas necessidades com uma solução elegante.	<b>Manter a integridade através da autorrenovação</b> Persistir na adição de energia e matéria apenas para curar e melhorar o sistema.	<b>Combinar modularidade e componentes agrupados</b> Encaixar várias unidades dentro de cada outra progressivamente do simples ao complexo.	<b>Usar materiais e energia facilmente disponíveis</b> Construir com materiais abundantes e acessíveis, enquanto o aproveitamento da energia disponível for gratuito.	<b>Construir seletivamente com um pequeno subconjunto de elementos</b> Montar relativamente poucos elementos em formas elegantes.
<b>Integrar o inesperado</b> Incorporar erros de maneira que possa levar a novas formas e funções.	<b>Use Processos de baixo consumo energético</b> Minimizar o consumo de energia através da redução necessária em temperaturas, pressões, e / ou tempo para reações.	<b>Incorporar a resiliência através da variação, redundância, e descentralização</b> Manter a função após perturbação, incorporando uma variedade de formas duplicadas, processos ou sistemas que não estão localizados exclusivamente em conjunto.	<b>Construir de baixo para cima</b> Montar os componentes de uma unidade de cada vez.	<b>Cultivar relacionamentos cooperativos</b> Encontrar o valor através de interações vitoriosas	<b>Decompor os produtos em constituintes benignos</b> Use química em que os resultados de decomposição não resultem em nenhum subproduto prejudicial.
<b>Remodelação de informações</b> Trocar e alterar informações para criar novas opções.	<b>Recicle todos os materiais</b> Manter todos os materiais em um circuito fechado.	<b>Incorporar a diversidade</b> Incluir várias formas, processos ou sistemas para atender a uma necessidade funcional.	<b>Auto-organização</b> Criar condições para permitir que os componentes possam interagir em conjunto para avançar no sentido de um sistema enriquecido.	<b>Alavancar processos cíclicos</b> Tire vantagem de fenômenos que se repetem.	<b>Fazer a química na água</b> Usar a água como solvente.
	<b>Ajustar forma a função</b> Selecione pela forma ou padrão com base na necessidade.			<b>Use ciclos de feedback</b> Envolver-se em informações cíclicas dos fluxos para modificar uma reação adequada.	

Tabela 01 - Princípios da Vida mais relevantes neste nível de abstração de projeto. Fonte: adaptado de BIOMIMICRY INSTITUTE 3.8 (2015).

Estas são as diretrizes e os parâmetros elencados para integração das estratégias desta pesquisa, tendo como exemplo de aplicação, dentre muitos outros artefatos que podem receber estas soluções, as pranchas de surf e seus processos de produção. Neste ponto inicia-se a direcionar o foco maior na solução da problemática.

- No campo **EVOLUIR PARA SOBREVIVER**:
  - No princípio “**Replicar as estratégias que funcionam** - Repetir abordagens de sucesso.”, levaram-se em conta as estratégias de leveza e resistência do escapo floral do Agave. Se a planta faz uso dessas estratégias com sucesso, deverá funcionar quando convertidas no design de artefatos que precisam destas funções.
- O campo **SER EFICIENTE EM RECURSOS (MATERIAIS E ENERGIA)**, os princípios:
  - “**Use o design multifuncional** - Conheça múltiplas necessidades com uma solução elegante.” Influenciou em uma visão mais abrangente para aplicação das estratégias em várias categorias de artefatos que apresentam a mesma necessidade, não apenas pranchas de surf.
  - “**Use Processos de baixo consumo energético** - Minimizar o consumo de energia através da redução necessária em temperaturas, pressões, e/ou tempo para reações.” Aqui pensou-se no gasto energético dispensado desde a extração de matérias primas provenientes de fontes não renováveis, como na energia para transformação em compósitos poliméricos termofixos que ao longo de toda a cadeia de transformação e ciclo de vida, continua agredindo o meio natural, sem falar no gasto energético necessário para reciclar e reprocessar os materiais, o que os tornam muitas vezes inviáveis de reciclagem.
  - “**Recicle todos os materiais** - Manter todos os materiais em um circuito fechado”. Este princípio determina que os materiais aplicados devem ser reinseridos em um novo ciclo de vida através da reciclagem reprocessamento, sem maiores gastos energéticos como citado no princípio anterior.
  - “**Ajustar forma a função** - Selecione pela forma ou padrão com base na necessidade.” Princípio de grande relevância e determinante da estratégia a se buscar nesta pesquisa. A forma da estrutura celular do Agave determinou a configuração final da estratégia.
- Em **ADAPTAR-SE ÀS CONDIÇÕES DE MUDANÇA**, foi levado em conta o princípio:

- **“Incorporar a diversidade** - Incluir várias formas, processos ou sistemas para atender a uma necessidade funcional.” A mesma estratégia poderá assumir várias formas estruturais e diferentes configurações de artefatos com as mesmas necessidades funcionais sendo adaptáveis mas mantendo os mesmos princípios.
- **INTEGRAR O DESENVOLVIMENTO COM CRESCIMENTO**, campo que apresenta os seguintes princípios:
  - Aqui em **“Combinar modularidade e componentes agrupados** - Encaixar várias unidades dentro de cada outra progressivamente do simples ao complexo.”, pensou-se na aplicação de um processo de configuração e materialização tecnológico/digital de estratégias, que permita qualquer direcionamento, através de uma forma versátil de organização e adaptação das entidades conforme a necessidade de projeto, mantendo níveis de complexidades sobre controle. O Design Paramétrico através da ferramenta *Grasshopper*, permite essa modularidade e organização da complexidade, podendo adentrar níveis de abstração progressivamente, conforme a necessidade.
  - Seguindo o princípio **“Construir de baixo para cima** - Montar os componentes de uma unidade de cada vez.”, se definiu a estratégia de cada entidade isoladamente. Estas entidades posteriormente são agrupadas conforme a função dos elementos em determinados momentos, durante a fase de projeto de artefatos com elementos estruturais modulares.
  - O princípio **“Auto-organização** - Criar condições para permitir que os componentes possam interagir em conjunto para avançar no sentido de um sistema enriquecido.”, representa a possibilidade de aplicação da técnica *Voronoi*, que através de um conjunto de pontos definidos num plano, possuem diferentes ancoragens, definindo a subdivisão deste plano em células, que são delimitadas por regiões próximas a cada um dos pontos se auto-organizando e também a possibilidade de se reorganizar.
- Em **SER LOCALMENTE LIGADO E RESPONSIVO**, foram elencados os seguintes princípios:
  - **“Usar materiais e energia facilmente disponíveis** - Construir com materiais abundantes e acessíveis, enquanto o aproveitamento da energia disponível for gratuito.” Este princípio é um dos motivos mais relevantes para a aplicação em pranchas de surf, de materiais orgânicos advindos de fontes renováveis e locais,

como por exemplo, o Agave e o Buriti, que existe em abundância em várias regiões.

- O princípio “**Cultivar relacionamentos cooperativos** - Encontrar o valor através de interações vitoriosas.”, apresenta-se como uma cadeia de valor social e econômico para produtores rurais, a população local e as plantações de Agave. Sendo que o Agave no Brasil é uma espécie invasora que se adaptou muito facilmente ao clima deste país e que destrói a vegetação nativa ao seu redor, por tanto a extração desta como matéria prima, se torna uma forma de cooperativismo entre a população local e a ecologia local. Um exemplo de comercialização e aplicação é na produção de pranchas de surf.
- “**Alavancar processos cíclicos** - Deve-se tirar vantagem de fenômenos que se repetem.” O próprio ciclo de vida de plantas como o agave, emprega processos cíclicos de forma bastante eficiente, ao se ao se propagar e se autorreciclar, mantendo e difundindo suas estratégias de sobrevivência.
- No último campo **USAR QUÍMICA AMIGÁVEL À VIDA**, apresentam-se tais princípios:
  - “**Construir seletivamente com um pequeno subconjunto de elementos** - Montar relativamente poucos elementos em formas elegantes.” Aplicar quando possível, a menor quantidade de materiais divergentes, facilitando a reintegração ao meio natural.
  - “**Decompor os produtos em constituintes benignos** - Use química em que os resultados de decomposição não resultem em nenhum subproduto prejudicial.”, Este princípio indica claramente a importância em se aplicar materiais orgânicos.
  - “**Fazer a química na água** - Usar a água como solvente.” No caso de fabricação de artefatos, pranchas de surf, ou processamento de materiais compósitos com elementos naturais, à exemplo, pode-se utilizar resinas que são a base óleo de mamona, livre de solventes tóxicos.

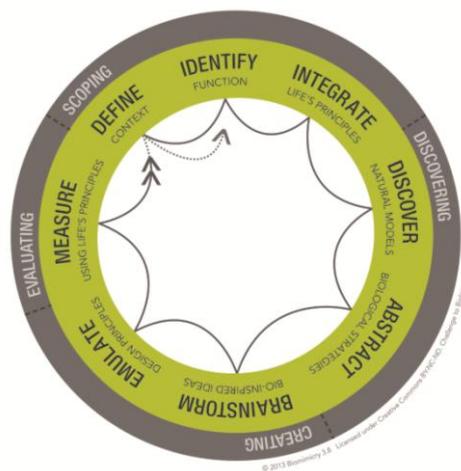
Desta forma ficou claro que a fase de **Integração dos Princípios da Vida** influenciou diretamente nas tomadas de decisões, etapas a seguir e na aplicação de ferramentas passíveis de fabricação digital adequadas ao desenvolvimento da pesquisa.

### 3.2.2 DESCOBRINDO

**DESCOBRINDO** é a segunda de quatro etapas do diagrama, nesta etapa a abordagem é encarada como um desafio para o estudo da vida na busca de inspirações. Esta etapa representa a descoberta do Agave, devido o fato de estar envolvido na produção de artefatos para o ambiente

aquático referente à leveza e resistência de sua matéria. Esta descoberta se enquadra no primeiro subitem, **Descobrendo Modelos Naturais**, onde um estudo de campo e coleta de amostras do modelo em seu habitat natural forneceu a possibilidade de aprender mais sobre suas estratégias.

Para tanto, adentra-se na próxima fase, **Abstrair Estratégias Biológicas**, onde foi preciso realizar uma análise aprofundada sobre anatomia vegetal, em temas que estivesse relacionado com as estratégias da estrutura celular; leveza, resistência e flexibilidade, e conseqüentemente flutuação. Com isto, necessitou-se adentrar em um mundo microscópico para identificação dos por quês daquelas estratégias funcionarem tão bem. Considerou-se então, as paredes celulares do tecido de preenchimento e sistema condutor do pendão floral do Agave.



**Figura 34** - Segunda etapa: DESCOBRINDO. Fonte: BIOMIMICRY.NET (2015).

## I - Descobrir modelos naturais

Neste tópico, apresenta-se o modelo natural tomado como objeto de estudo desta pesquisa. Esta escolha já foi bem contextualizada nas partes I e II, mais especificamente no capítulo Agave, onde foram apresentadas suas características e classificação botânica, sua importância para economia local, assim como, a aplicação no processo de produção de pranchas de surf.

Em relação à utilização do escapo floral com matéria prima, esta se dá, após a morte da planta, estágio em que se encerra o ciclo vegetativo, e a mesma começa a secar. A partir deste momento, a extração torna-se um benefício para a fauna e flora nativa, como foi citado anteriormente, o Agave no Brasil é uma espécie invasora que não se integra à ecologia local e destrói a vegetação nativa por se propagar com rapidez e invadir os espaços, não favorecendo a cooperatividade com a fauna e flora.

Na (Fig. 35) observou-se em loco a planta em estágios finais de seu ciclo vegetativo, onde já apresenta as floras secas. Quando a planta seca por completo, o espaço floral cai e este é o momento ideal de colheita, de forma que todo o substrato interno, através de processos químicos naturais, retorna ao solo e forma de nutrientes, integrando-se a um novo ciclo e realimentando as plantas adjacentes.



**Figura 35** - Estudo de campo, Agave ao final do ciclo vegetativo na cidade na serra da Borborema na cidade de Campina Grande - Paraíba. Fonte: Arquivo pessoal, (2014).

O escapo floral apresenta a epiderme com uma casca grossa e rígida, já por dentro, o que se encontra é uma matéria seca bastante leve e resistente, como se pode ver na (Fig. 35) apresentam algumas fibras envoltas em um material que aparenta ser poroso, chegando a assemelhar-se a uma espuma. E para se entender como funcionam as estratégias no modelo natural, necessitou-se avançar para a próxima fase, **Abstrair estratégias biológicas**. Para adentrar em um nível de abstração mais aprofundado e conseguir assimilar como estas estratégias atuam na escala microscópica.



**Figura 36-** Quando retirada a casca, o miolo apresenta-se em um material muito leve e bastante poroso. Fonte: Arquivo pessoal (2014).

## II - Abstrair estratégias biológicas

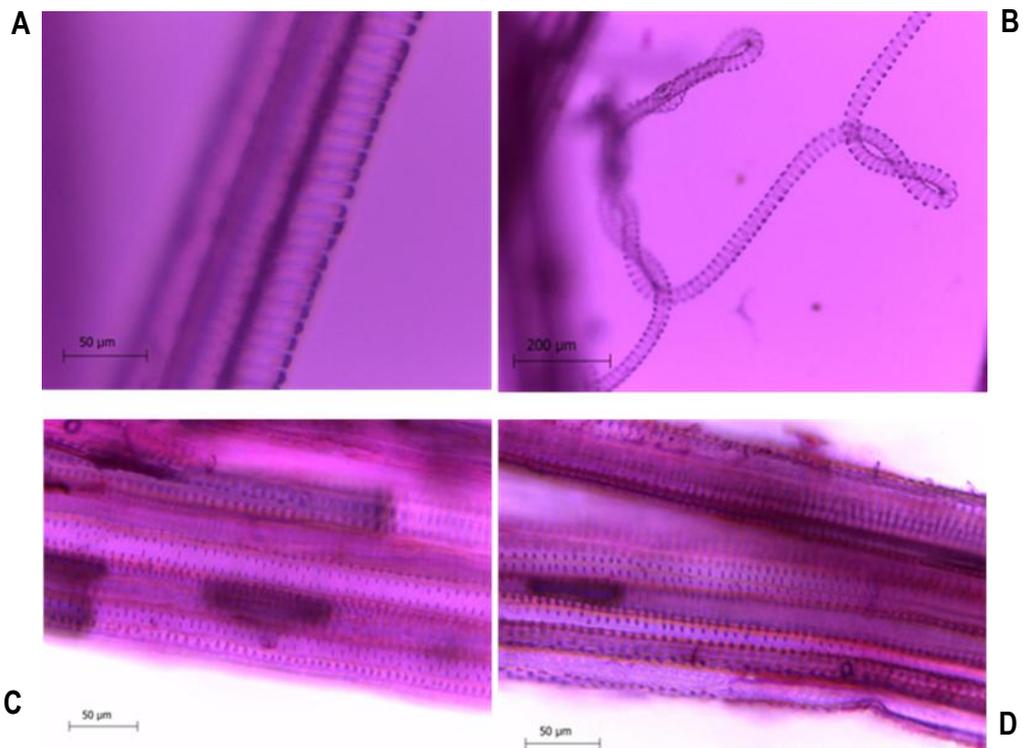
### Identificação e análise dos elementos do Agave

Nesta fase ocorre o detalhamento dos procedimentos realizados em laboratório. As amostras do modelo natural foram encaminhadas ao Laboratório de Anatomia Vegetal - LAVeg UFPE, onde tivemos todo o aporte da bióloga Dra. Emília Arruda, a qual cedeu entrevistas e atuou de forma efetiva na realização dos experimentos laboratoriais, detalhando e explicando todo o processo de manuseio das amostras para preparação das lâminas para microscopia óptica, assim como nas análises e identificação dos elementos. Através da visualização microscópica, permitiu-se a identificação dos elementos da planta que tem relação com as estratégias de interesse desta pesquisa.

Primeiramente, realizou-se um experimento chamado **dissociação**, esta técnica foi utilizada para a análise e caracterização dos elementos xilêmicos por meio da utilização da solução de Franklin que consiste em uma mistura de peróxido de hidrogênio e ácido acético 1:1 (FRANKLIN, 1945). As amostras juntamente com a solução de dissociação foram colocadas em placas de petri ou frascos bem vedados e mantidos em estufa à 41°C por 12 horas. Após esse período o material foi lavado em água destilada, para a completa remoção da solução. Essas amostras foram então

coradas com safranina e montadas em lâminas semi-permanentes com glicerina 50% ou em Bálsamo do Canadá, sendo antes submetida à desidratação em série etanólica (50-100%) e pós-desidratada em série gradual de acetato de butila-etanol (1:3,1:1,3:1), e transferidas ao acetato puro (KRAUS & ARDUIM, 1997).

Este processo, em parte, separa os elementos uns dos outros possibilitando a identificação de algumas células isoladamente. A análise e registro das principais características anatômicas foram realizados por meio do microscópio de luz. Neste momento foram identificadas células especializadas, tais como fibras e traqueídes possuindo paredes secundárias, assim como a presença de pontoações nas paredes celulares, (Fig. 37) indicado o caminho a seguir na investigação sobre anatomia vegetal.



**Figura 37-** Elementos xilemáticos dissociados. A dissociação dos elementos xilemáticos revelou a presença de elementos do proto e metaxilema, em que estes últimos apresentaram pontoações do tipo pontoada bem como algumas fibras e traqueídes. Fonte: Arquivo pessoal (2014).

O próximo passo foi a preparação das lâminas com intuito de se obter imagens bidimensionais da estrutura celular do Agave, tanto no eixo longitudinal como transversal, para isto, foi necessário a realização do corte das amostras. Contudo, devido o material ser resistente e rígido para realizar o corte convencional com lâmina manual, foi preciso recorrer ao processo de microtomia. Este é um

processo em que uma amostra desidratada contida num bloco de parafina passa por um aparelho chamado micrótomo para ser "fatiado" em micrômetros.

Vale salientar que antes do início das etapas de desidratação e infiltração em parafina, a amostra é submetida à vácuo (em dessecador acoplado à bomba à vácuo) para completa remoção do ar dos tecidos, facilitando a penetração do fixador. A fixação é um processo que cessa qualquer metabolismo celular, evitando a deterioração do material, só então ocorre a desidratação. Nesse processo, amostras do material fixado em FAA50 (formaldeído, ácido acético e álcool 50%) e preservado em etanol 70% foi submetida a série etanol-butanol terciário (50% a 100%), sendo transferidas ao butanol puro (*overnight*). Após essa etapa iniciou-se a infiltração e inclusão em parafina em série butanol-parafina (3:1, 1:1, 1:3), sendo posteriormente transferidas à parafina pura efetuando-se mais 2-3 trocas (KRAUS & ARDUIN 1997). O próximo passo se trata do emblocamento (Fig. 38) onde a amostra será introduzida em um molde juntamente com a parafina para formar um pequeno bloco acoplado a uma base para ser levado ao micrótomo rotativo.



**Figura 38** - Emblocamento em parafina de amostras de Agave. Fonte: Arquivo pessoal (2014).

O material incluído foi então seccionado em micrótomo rotativo. Os cortes obtidos foram submetidos à dupla coloração composta por azul de Astra e safranina (KRAUS *et al.* 1998) e montados em lâminas permanentes com bálsamo do Canadá (BUKATSCH, 1972). A análise e registro das principais características anatômicas foram realizados por meio do microscópio de luz no LAVeg.



**Figura 39** - Imagem à esquerda: lâmina com uma amostra do tecido fundamental do Agave. Imagem à direita: microscópio óptico no LAVeg - UFPE. Fonte: Arquivo pessoal (2014).

Esta fase do diagrama dialoga de forma muito intensa com o capítulo Anatomia vegetal do referencial teórico, que forneceu o conhecimento necessário para leitura das imagens microscópicas, caracterização e análise dos elementos presentes nas amostras de Agave.

À partir deste momento apresenta-se a produção de imagens microscópicas. As análises foram realizadas juntamente com a bióloga Dr. Emília Arruda, coordenadora do LAVeg - UFPE. O entendimento do conteúdo destas imagens possibilitou **abstrair as estratégias biológicas** do Agave. Foram produzidas imagens bidimensionais no plano transversal e longitudinal, desta forma foi possível enxergar a estrutura celular.

### **Microscopia**

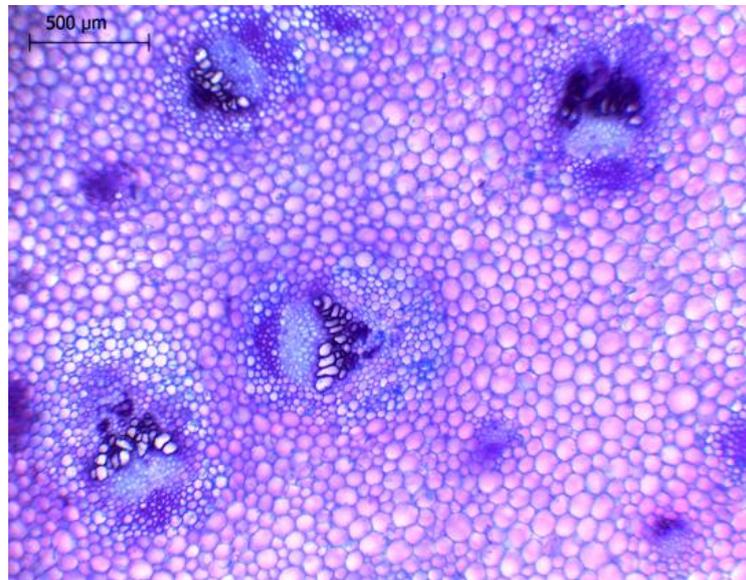
O corte transversal do agave apresenta o tecido fundamental, que é representado pelo parênquima de preenchimento. O sistema vascular é representando por um estelo do tipo polistelo cujos monostelos apresentam feixes do tipo colaterais apresentando uma camada de células não espessadas pelo periciclo multisseriado e contínuo apresentando células espessadas (Fig. 40).

A (Fig. 40) [corte transversal] apresenta o tecido fundamental, contendo o xilema que é principal sistema de condução, este se apresenta em padrões de distribuição bem característicos. Aqui se trata de tecido parenquimático, o qual apresenta células com formatos diversos, predominando as cilíndricas, mas em geral, são células multifacetadas.

As células do parênquima do Agave possuem paredes delgadas que são compostas predominantemente por celulose, e pode dispor-se em uma ou mais camadas entre o sistema vascular. As paredes celulares são cimentadas às paredes das células adjacentes, através da deposição de substâncias que as constituem. Desta forma, as células estão ligadas firmemente umas às outras, resultando em paredes rígidas mecanicamente fortes, porém relativamente

delgadas. A união destas paredes é o que determina a estrutura. As células parenquimáticas estão presentes em maiores quantidades, apresentam maiores diâmetros e possuem paredes celulares finas, ou seja, apenas paredes primárias.

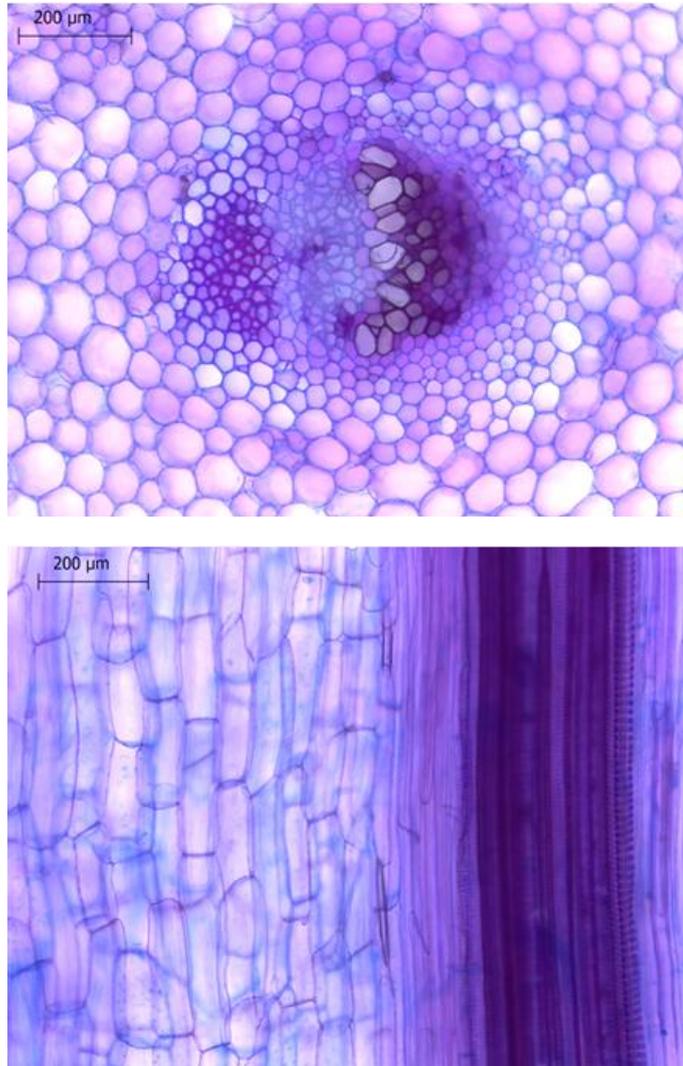
O xilema no Agave é formado por um sistema contínuo de tecido vascular que percorre todo o corpo da planta. Está diretamente envolvido na sustentação e no armazenamento de substâncias, fornecendo suporte mecânico. Os feixes vasculares estão distribuídos de forma aleatória, talvez seja uma estratégia do vegetal para distribuir as tensões mecânicas por todo o tecido parenquimático do escapo floral, onde ocorre uma variação na espessura das paredes celulares. 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.



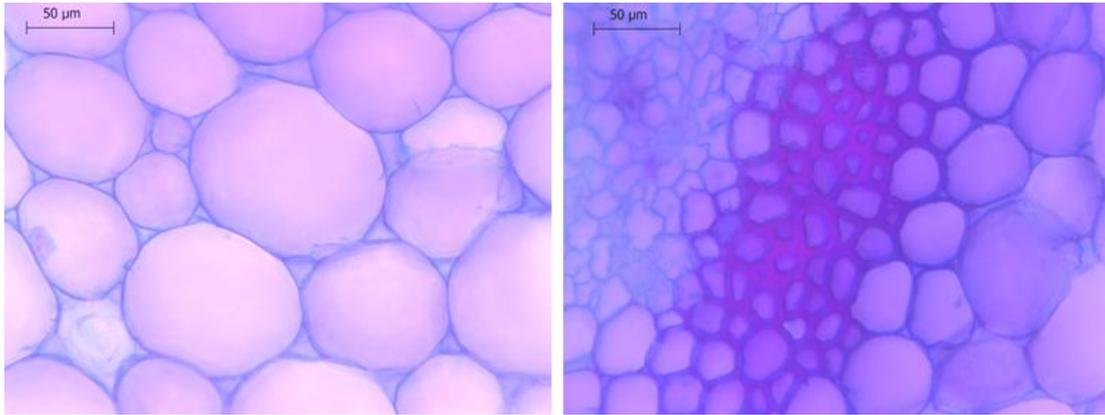
**Figura 40-** Corte transversal do caule apresentando feixes vasculares circundados por tecido parenquimático. O xilema no Agave contém muitas fibras e têm como principal função, dar suporte e sustentação para o vegetal, arranjadas em forma de feixes ou cordões, espalhados pelo corpo primário da planta. Podem apresentar formas variadas. Fonte: Arquivo pessoal (2015).

O xilema faz parte do tecido vascular e estão distribuídos em todos os órgãos das plantas, contendo células parenquimáticas e fibras, além de outros tipos celulares. A (Fig. 41) apresenta o xilema contendo células com paredes secundárias, paredes mais espessas. Nota-se a estratégia que o vegetal aplica na geometria nesta visão de topo, o diâmetro e espessura das paredes celulares vão variando na transição das células de preenchimento (paredes primárias) para as células condutoras (paredes secundárias).

Quanto mais próximo do parênquima as células possuem somente a parede primária que tem a característica de ser elástica, 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.



**Figura 41-** Corte transversal e corte longitudinal de um feixe vascular. Fibras, traqueídes, células parenquimáticas. Diferentes geometrias, espessuras. Fonte: Arquivo pessoal (2015).

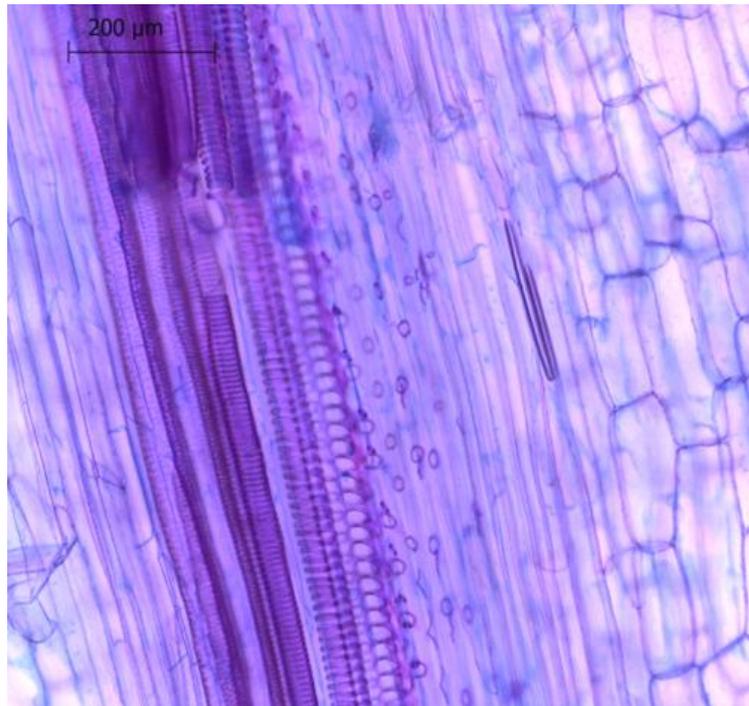


**Figura 42-** Neste caso percebe-se nitidamente a diferença da geometria, no diâmetro e na espessura das células parenquimáticas (esquerda) e as células xilemáticas (direita). Fonte: Arquivo pessoal (2015).

O xilema no Agave também apresenta células parenquimáticas (paredes primárias), porém a presença de células diferenciadas com paredes secundárias mais grossas é uma das características mais marcantes, apresentando células como: fibras, traqueídes, elementos de vaso, dentre outras. 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.

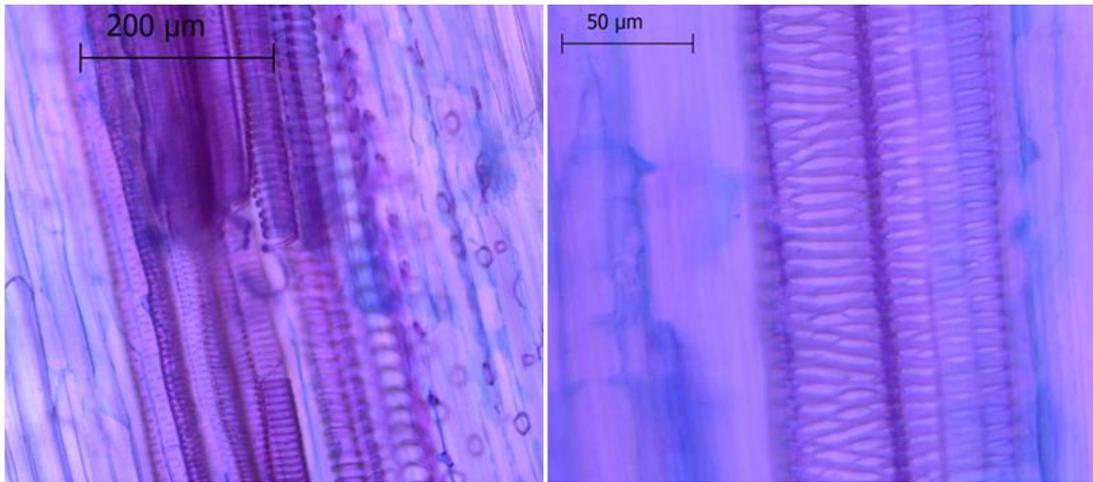
Estas propriedades são influenciadas pelo crescimento do vegetal e o desenvolvimento e de tipos de paredes secundária. No caso do Agave, quando a planta inicia o estágio de florescência, momento em que se desenvolve o escapo floral, no xilema primário, a natureza do espessamento das paredes celulares é grandemente influenciada pela intensidade do alongamento da planta, conseqüentemente das células que se desenvolvem. Se houver pouco alongamento, aparecem elementos traqueais com menor capacidade de extensão em lugar de elementos com maior capacidade de extensão. Por outro lado, se houver um alongamento intenso, serão formados muitos elementos traqueais com espessamentos anelares e espiralados (Fig. 43). Nos primeiros elementos traqueais formados, a deposição de parede secundária no protoxilema se apresenta nas configurações dos padrões **anelar e helicoidal**. Apresentam-se também, três padrões distintos com diferentes graus de cobertura: **escalariforme, reticulado e pontoado**. No escalariforme, as regiões sem deposição de parede secundária ocorrem de forma regular. No reticulado, a deposição se apresenta de forma irregular (Fig. 44). No padrão pontoado apresenta-se a maior cobertura da parede primária, sendo quase toda ela coberta pela parede secundária, exceto nas áreas de pontoações. No escalariforme, as regiões sem deposição de parede secundária ocorrem de forma regular. No reticulado, a deposição se apresenta de forma irregular. No padrão pontoado apresenta-

se a maior cobertura da parede primária, sendo quase toda ela coberta pela parede secundária, exceto nas áreas de pontoações (Fig. 43).



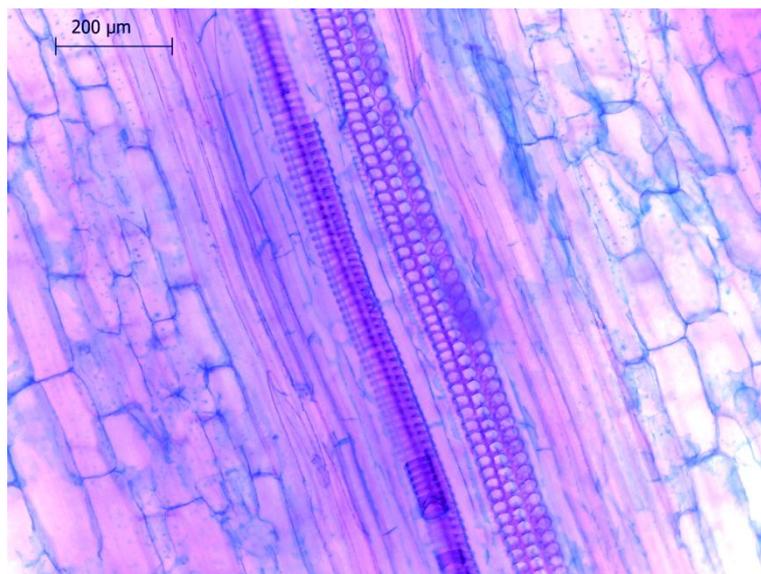
**Figura 43-** O protoxilema, geralmente, apresenta estes padrões (anelar e helicoidal). Fonte: Arquivo Pessoal (2015).

Embora possua arquitetura variada, as diferentes células presentes no Agave necessitam se comunicar com as outras, e o fazem por determinados **espaços vazados**, localizados na parede celular. As **pontoações** e os campos de pontoação estão localizados onde geralmente nenhum material de parede é depositado durante a formação da parede secundária, são nestes locais onde estão presentes os campos de pontoação. Estas áreas vazadas das paredes celulares se apresentam como se fossem orifícios, e certamente a falta de matéria nestes campos, não compromete a estrutura e resistência mecânica, porque estes estão distribuídos de forma muito elegante e equilibrada, seguindo padrões bem definidos. Na verdade a falta de matéria e substâncias nestas regiões representa maior flexibilidade, resistência e leveza ao Agave.



**Figura 44** - Paredes secundárias e pontoações. Fonte: Arquivo Pessoal (2015).

Os elementos traqueais contidos, tais como as traqueídes, não possuem placas de perfuração, enquanto que os elementos de vaso são dotados destas placas. As traqueídes são típicas das gimnospermas, e neste caso, se posicionam em fileiras longitudinais, justapondo-se pelas extremidades que não são perfuradas, o intercâmbio com outras células se dá através das pontoações. A orientação das fibras depositadas paralelamente é significado decisivo para as propriedades mecânicas, e deste modo, resulta em uma maior resistência à tração.



**Figura 45** - A lignina é encontrada nas paredes celulares de vários tipos de células de sustentação, neste caso o vascular, especialmente nas fibras, traqueídes e elementos de vaso. Fonte: Arquivo Pessoal (2015).

No tecido xilemático, percebe-se a presença de lignina, substância responsável pela função mecânica e sustentação. A lignina se apresenta nas imagens através da coloração em tons violetas

mais fortes, desta forma consegue distinguir bem os locais que contêm maiores concentrações deste polímero natural. As ligninas são polímeros estruturais que formam uma cadeia tridimensional como se fosse uma grade estrutural, desta forma penetram na parede celular formando a parede secundária, juntamente com celulos e outros componentes. Portanto, a lignificação determina o aumento da resistência mecânica, mas também está associado a certa perda de elasticidade.

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, em pontos de sustentação distribuídos aleatoriamente, porém de forma equilibrada, garantindo a leveza para um crescimento ascendente rápido sem perder sustentação mecânica. Desta forma, As paredes primárias possuem baixíssimas quantidade de lignina, o que predomina em maior quantidade é a celulose. Já as paredes secundárias possuem muito mais celulose do que a primária, mas também apresentam quantidades maiores de lignina. A lignina impõe resistência à compressão, enquanto confere rigidez. Neste sentido, as paredes secundárias devem sua resistência e rigidez à lignina.

As células do tecido de preenchimento são responsáveis por armazenagem de substâncias e nutrientes. Contudo, quando o Agave atinge o final do seu ciclo de vida, ocorre um processo químico natural programado geneticamente, onde todo o conteúdo das células transforma-se em estado líquido e retornam ao solo em forma de nutrientes, restando apenas delgadas paredes celulares compostas basicamente por celulose e outros componentes. Além disso, a maturação tanto de traqueídes quanto de elementos de vaso envolve a 'morte' da célula. Assim, células condutoras deixam de possuir membranas ou organelas. O que permanece é a estrutura a qual é formada por paredes celulares lignificadas grossas, formando tubos ocos através dos quais a água pode fluir com resistência relativamente baixa. Quando a planta morre, o que permanece é esta estrutura vazada rígida e resistente. A propósito, 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.

Em relação ao que já aprendemos na literatura (NULTSCH, 2000) sobre anatomia vegetal e sobre as propriedades das paredes celulares do Agave quanto à composição das paredes, sabe-se que a parede primária destas células, possui teor de água em cerca de 65%, e o restante, que corresponde à matéria seca, é composto de 90% polissacarídeos (distribuídos em **celulose**, hemicelulose e pectina em quantidades equivalentes) e 10% de proteínas e outras impregnações de ceras e suberinas e polímeros (ligninas) como também a cutina nas paredes primárias. A parede secundária possui um teor de água reduzido, devido à deposição de lignina, que é um polímero

hidrofóbico. A matéria seca é constituída de 65 a 85% de polissacarídeos (50 a 80% de celulose e 5 a 30% de hemicelulose) e 15 a 35% de lignina. A celulose é o maior componente da parede secundária, estando ausentes as pectinas e glicoproteínas.

Podemos concluir desta forma que quando uma planta morre, ou seja, encerra seu ciclo de vida, as células também morrem (porém a estrutura das paredes celulares é conservada), então todo o substrato se vai juntamente com a água, retornando ao solo. 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 considerável quantidade de peso, ficando mais leve e com espaços vazios no interior das células, assim como nos espaços intercelulares que são preenchidos com ar.

### **CONCLUSÕES FINAIS ACERCA DAS ANÁLISES DO AGAVE**

Como a proporção de lignina no Agave é muito pouca, uma vez que as fibras só estão presentes no periciclo e no xilema, isto influencia diretamente na densidade do caule do Agave. Vale salientar que as madeiras são mais densas, rígidas e pesadas porque apresentam maior proporção de lignina. Em comparação com a madeira, a resposta para a leveza do escapo floral 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. Elementos de vaso e traqueídes não apresentam protoplasto vivo na maturidade funcional. Fibras apresentam parede secundária, mas mantém o protoplasto vivo na maturidade funcional, porém até que a planta encerre suas atividades metabólicas. Já as células parenquimáticas são semelhantes às células parenquimáticas observadas em outros tecidos.

Neste momento finaliza-se a segunda fase da etapa **DESCOBRINDO**, onde à partir destas análises e identificação dos elementos do Agave, foi possível entender e **Abstrair as estratégias biológicas** do Agave. Estes ensinamentos se apresentam como diretrizes para a próxima etapa da metodologia, **CRIANDO**.

Algumas destas diretrizes definiram a estratégia de configuração de estrutura com base nas propriedades de leveza e resistência abstraídas do Agave. O próximo passo inicia o processo de aplicação destas estratégias em artefatos para o ambiente aquático, no caso, pranchas de surf. Porém ressalta-se mais uma vez que estas estratégias que foram aprendidas com a estrutura celular do agave podem ser aplicadas para solucionar uma ampla gama de produtos que necessitam de soluções estruturais e de flutuação.

Finalizando, sob a visão do designer, o Agave:

Atua em um *optimum* de matéria e energia. Acredita-se que por apresentar um rápido ciclo de vida e possuir rápido crescimento, atingindo algo em torno de 8m de altura, precisa ter sustentação mecânica, resistência e leveza na estrutura de seu caule. Sua estrutura interna proporciona esta condição. O reforço mecânico está espalhado em pontos distribuídos através do sistema condutor de uma forma equilibrada, através da deposição de lignina somente onde é necessário, mantendo assim, a leveza e resistência necessária com economia de matéria e energia. Deve-se ressaltar que na visão do design, as 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 serão então convertidos em soluções estruturais no campo do design, podendo direcionar estas estratégias para soluções em estruturas de qualquer artefato. Neste caso, esta aplicação será direcionada ao artefato prancha de surf, por motivos já argumentados anteriormente.

### 3.2.3 CRIANDO

Aqui se trata da terceira de quatro etapas do diagrama. Esta etapa se desdobra em duas fases, **Brainstorm de ideias bio-inspiradas e Emulando aos princípios de design.**

Para realização da primeira fase, foi necessário recorrer a técnicas de criatividade para obter ideias bio-inspiradas nas estratégias do Agave. Segundo Bluchel (2009), uma inovação pode ser bem sucedida se a biologia atuar juntamente com a criatividade e a técnica, desta forma é possível alcançar soluções criativas e inovadoras através da ciência natural mais a tecnologia. E a biomimética surgiu para suprir esta demanda de projeto inspirado na natureza, onde através de meios estruturados, possibilita a conversão de estratégias biológicas em princípios de design, e vai muito mais além se no processo de emulação forem aplicadas tecnologias para fabricação digital que possibilitem a simulação de princípios da vida.

Nesta etapa de criação, através de insights criativos e processos de biassociação de ideias, ocorre a materialização das estratégias do Agave no design de estruturas e processos de produção de pranchas de surf. Neste momento a pesquisa recebeu o auxílio do arquiteto e projetista Paulo Carvalho, um dos fundadores do grupo BI/OS - *Biological Inputs and Outputs Systems*, especializado em estratégias focadas em Design Paramétrico e inspiração na natureza.

As estratégias biológicas abstraídas em etapa anterior foram decisivas para a fase de **Emulação aos princípios de design.** Estas estratégias foram apresentadas na forma de diretrizes ao grupo BI/OS, que ficou responsável pela modelagem paramétrica de uma estrutura leve e resistente com

aplicação em pranchas de surf. Para tal, utilizou-se o *Grasshopper*, plugin do software *Rhinoceros*, específico para modelagem paramétrica e passível a fabricação digital.

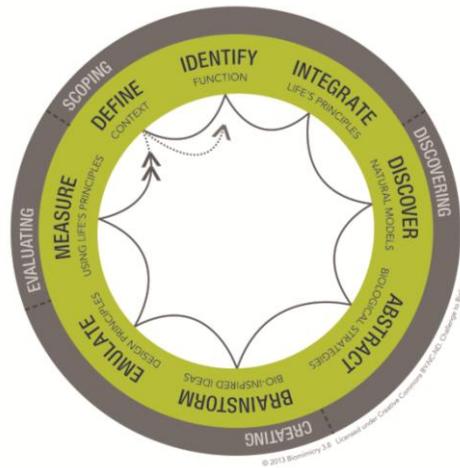


Figura 46 - Terceira etapa: CRIANDO. Fonte: BIOMIMICRY.NET (2015).

### I - *Braintorming* de ideias bio-inspiradas

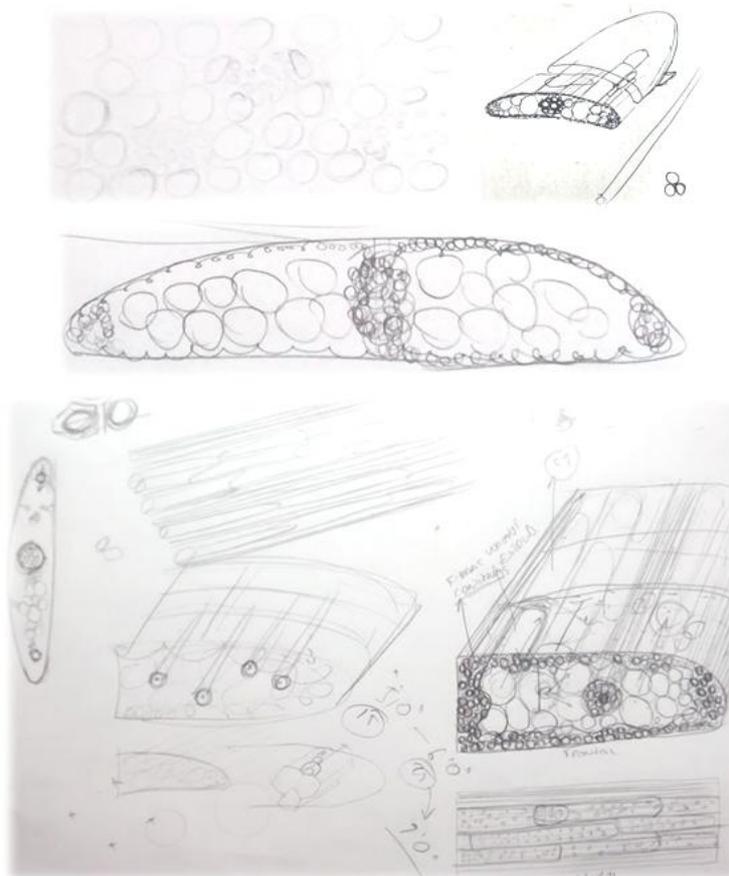
Esta fase se deu através da geração de ideias e soluções com base em elementos apresentados na contextualização da pesquisa, nos princípios da vida e nas estratégias do Agave. Estratégias estas que foram direcionadas à aplicação no design de estruturas para pranchas de surf. Esta fase se deu através de insights criativos e bi-associação de ideias, resultando em uma nova síntese solucionadora da problemática da pesquisa. Foi da bio-inspiração do Agave juntamente com a possibilidade de solução técnica que foi pensada a estrutura adaptada à pranchas de surf.

Foram levados em conta alguns elementos presentes no Agave, tais como: Fibras, traqueídes, elementos de vasos, células parenquimáticas, tomados através da forma estrutural das paredes celulares. Uma das estratégias apresentadas pelo Agave que foi aplicada nesta fase de criação está relacionada aos padrões de distribuição dos elementos de reforço e resistência mecânica, espalhando feixes de sustentação com fibras espessadas contendo lignina em pontos realmente necessários, reduzindo o peso da matéria e energia.

Foi identificado um padrão estrutural para distribuição da força e de pontos de tensão, ao passo que as células do parênquima (diâmetros maiores com paredes finas) se aproximam do xilema, o diâmetro das células diminui, porém o reforço com lignina na parede secundária as torna mais espessas. Da mesma forma que o formato das células variam de arredondadas à poligonais. Então se pensou em aplicar em pranchas de surf, a estratégia das células com maior diâmetro e paredes

finas atuando como o tecido de preenchimento, e células com menor diâmetro e paredes espessadas em pontos de maior necessidade de reforço. Pensou-se aplicar tubos longitudinais e células fusiformes alongadas sobrepostas umas às outras para resistir a pressões transversais ao sentido da prancha. Desta forma, as concentrações das “fibras/traqueídes/elementos de vasos/pontoações” estariam atuando como feixes de reforço, estas distribuídas entre células com maiores diâmetros e paredes mais finas influenciando na leveza e resistência.

Vales ressaltar que a intenção da biomimética não é trabalhar com cópias fiéis do modelo natural. Na verdade, faz-se uso de ideias bio-inspiradas em campos de abstração, que são convertidos em estratégias baseadas nos princípios da natureza. Então, sofrem uma distorção em formas e escalas que são adaptadas à realidade da técnica e materialização da estratégia na forma de um artefato, através de meios de produção também inspirados em processos da natureza.



**Figura 47** - Sketches à mão livre com aplicação das estratégias do Agave em uma secção da borda de uma prancha de surf. Fonte: Arquivo Pessoal (2015).

## II - Emulando aos princípios de design

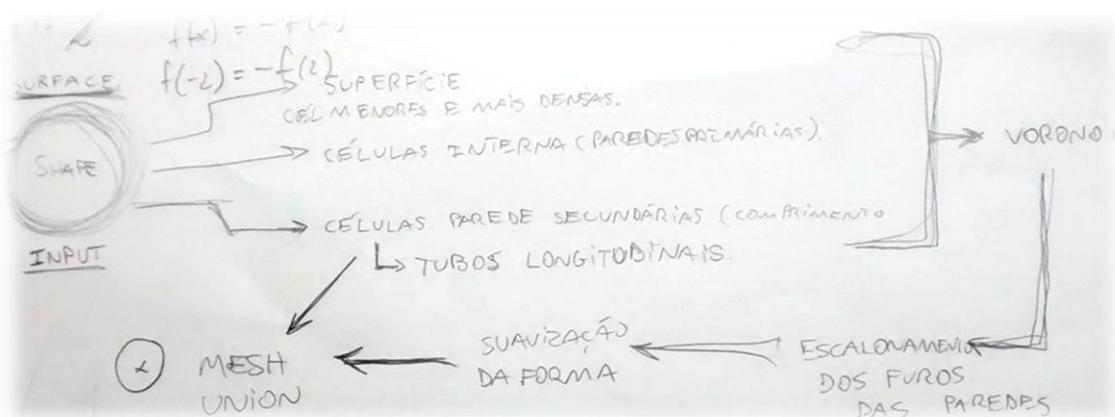
A emulação representa um sentimento que instiga a imitar ou a exceder outrem, de forma estimulante e cooperativa (BIOMIMICRY INSTITUTE 3.8, 2015).

Como forma de validação desta pesquisa, optou-se por utilizar o design paramétrico como meio conversão das estratégias do Agave em tecnologia. Se trata de é uma forma de modelagem digital que se baseia em parâmetros para a definição de modelos, capaz de ser ajustado e reajustado durante o processo de projeto.

Na segunda fase ocorre a aplicação de tecnologias de fabricação digital com possibilidade de diálogo com os princípios da vida, e por permitir representar as estratégias biológicas do agave no design de estruturas e processos de produção de pranchas de surf. A emulação aos princípios de design atuou mais como uma fase de projeção de ideias na forma de inputs, fazendo uso da ferramenta *Grasshopper* para modelagem paramétrica, foi possível se aproximar das estratégias do Agave materializadas em artefatos para o ambiente aquático através da fabricação digital.

Para tal fim, foi utilizado o Design Paramétrico como meio instrumental tecnológico para alcançar a validação dos objetivos, de forma que a materialidade dos resultados desta pesquisa seja passível de fabricação digital. Neste momento ocorre a conversão de princípios biológicos com o conhecimento adquirido com o estudo do agave em uma estratégia propícia a modelagem paramétrica.

Pensou-se nas estratégias que a planta usa, aplicando a lógica estrutural do Agave em escala ampliada de modo a adequá-la ao projeto na tentativa de se atingir economia de matéria e peso, mantendo a leveza.

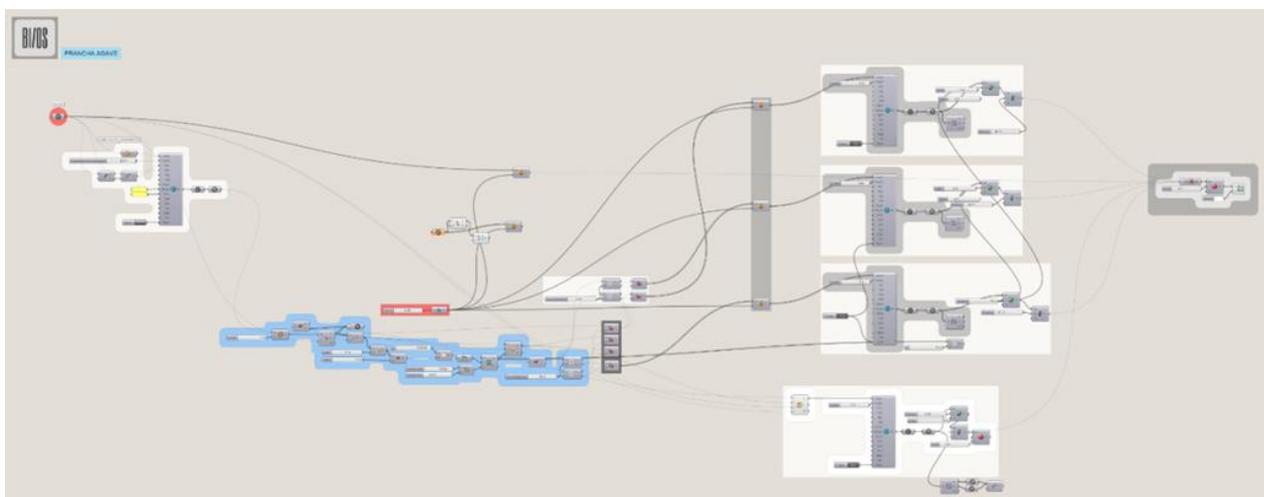


**Figura 48** - Definindo estratégia de configuração para o *Grasshopper* da estrutura do Agave. Primeiramente, defini-se o input, que neste caso foi o shape (outline) da prancha. Para o preenchimento interior, foram definidas células com maior

diâmetro possuindo paredes finas, para pontos de reforço, foram definidos tubos longitudinais com paredes espessadas e para a superfície, células mais densas. A solução pensada foi o Voronoi, onde as células foram escalonadas com furos nas paredes, depois receberiam suavização da forma com união final dos elementos. Fonte: Arquivo Pessoal (2015).

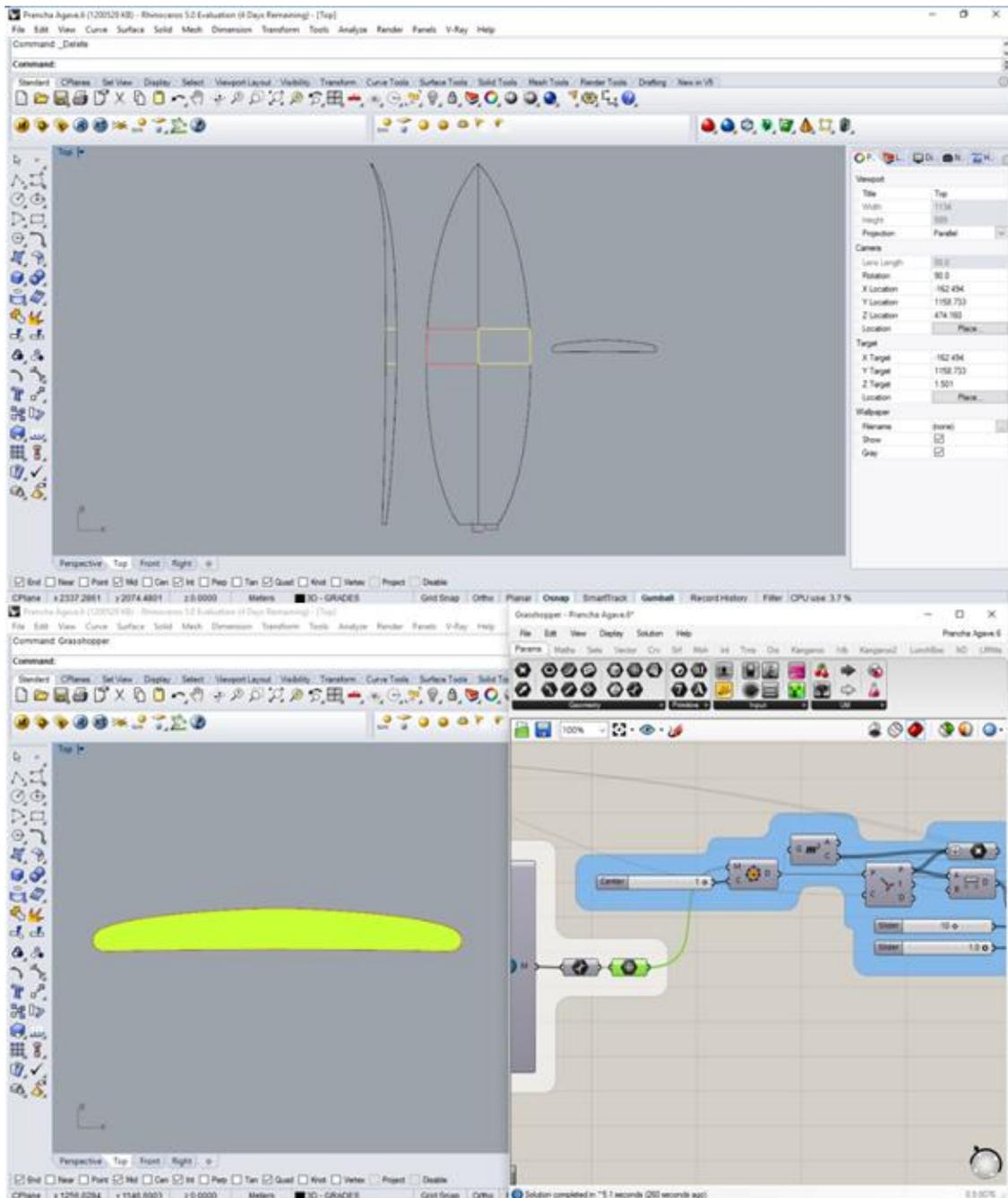
A (Fig. 48) representa o início deste processo de emulação aos princípios de design. A sequência de imagens abaixo apresenta toda programação da modelagem paramétrica, e a efetivação desta emulação da natureza em princípios de design, onde somente se conseguiu atingir os objetivos desta pesquisa aplicando a modelagem paramétrica como princípios de design, justamente neste ambiente de possibilidades (RATTES, 2015) que se inicia a materialização da estratégia da natureza no design de artefatos.

A (Fig. 49) representa a conclusão da segunda fase **Emulando aos princípios de design** da terceira etapa do diagrama *Biomimicry Thinking - Desafio de Biologia*. Neste ponto é concluído o processo de emulação da estratégia do Agave. No diagrama abaixo, vê-se o resultado final na forma de um script contendo todas as diretrizes, gerado pelo Grasshopper, etapa executada pelo grupo BI/OS. Este diagrama representa toda a programação com aplicação das funções necessárias para se aplicar estratégias de leveza e resistência em estruturas para artefatos. No caso desta pesquisa, a aplicação foi direcionada para solucionar a problemática das pranchas de surf. O input é o ponto de partida, o direcionamento inicial para a aplicação destas mesmas estratégias e diretrizes em artefatos.



**Figura 49** - Estratégia do Agave, (neste caso) aplicado em prancha de surf. Script gerado pelo *Grasshopper*. Fonte: Arquivo Pessoal (2015).

O input inicial que foi levado em conta para aplicação em pranchas de surf foi o shape da prancha e a linha de outline. Contudo, esta aplicação não foi feita de forma integral em um projeto completo de uma prancha de surf (pois a intenção desta pesquisa não é o desenvolvimento de projeto de um produto específico), neste caso, se trata apenas de um teste piloto, e 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 da aplicação das estratégias do agave na tecnologia e no design de artefatos. De fato, ao visualizar o andamento da materialização da estratégia na modelagem paramétrica, já ficou bastante evidente que aquela aplicação torna-se muito ampla, são incontáveis as possibilidades de artefatos que podem receber esta aplicação.



**Figura 50** - Input inicial. Acima, *outline* do *shape* de uma prancha de surf; Abaixo, seção da prancha como teste piloto de aplicação, área que receberá a estrutura bio-inspirada. Fonte: Arquivo pessoal (2015).

As configurações das diretrizes e as modificações dos parâmetros acontecem por meio dessas caixas que são encapsulamentos por componentes e funções, onde cada um desses módulos possui uma programação que gera resultados específicos.

A partir da delimitação da área, foi aplicada uma decomposição de pontos distribuídos aleatoriamente, seguindo o padrão de disposição das células e tecidos encontrados no Agave. A determinação destes pontos gerou uma estrutura de Voronoi bidimensional, se trata de um tipo de

decomposição de um dado espaço que contendo elementos distribuídos entre si com determinadas distâncias entre objetos e família de objetos através de pontos. Neste caso estes elementos foram distribuídos de forma semelhante aos padrões da natureza, representados por células e por tecidos e sistemas do Agave. O espaço que uma célula ocupa está diretamente associado à célula correspondente, cada gerando pontos atrativos de forma que se distribuem e se equilibram dentro de um determinado espaço (AURENHAMMER, 1991). Diagramas de Voronoi podem são amplamente encontrados na natureza em diversos campos da ciência e tecnologia, tendo inúmeras aplicações práticas e teóricas.

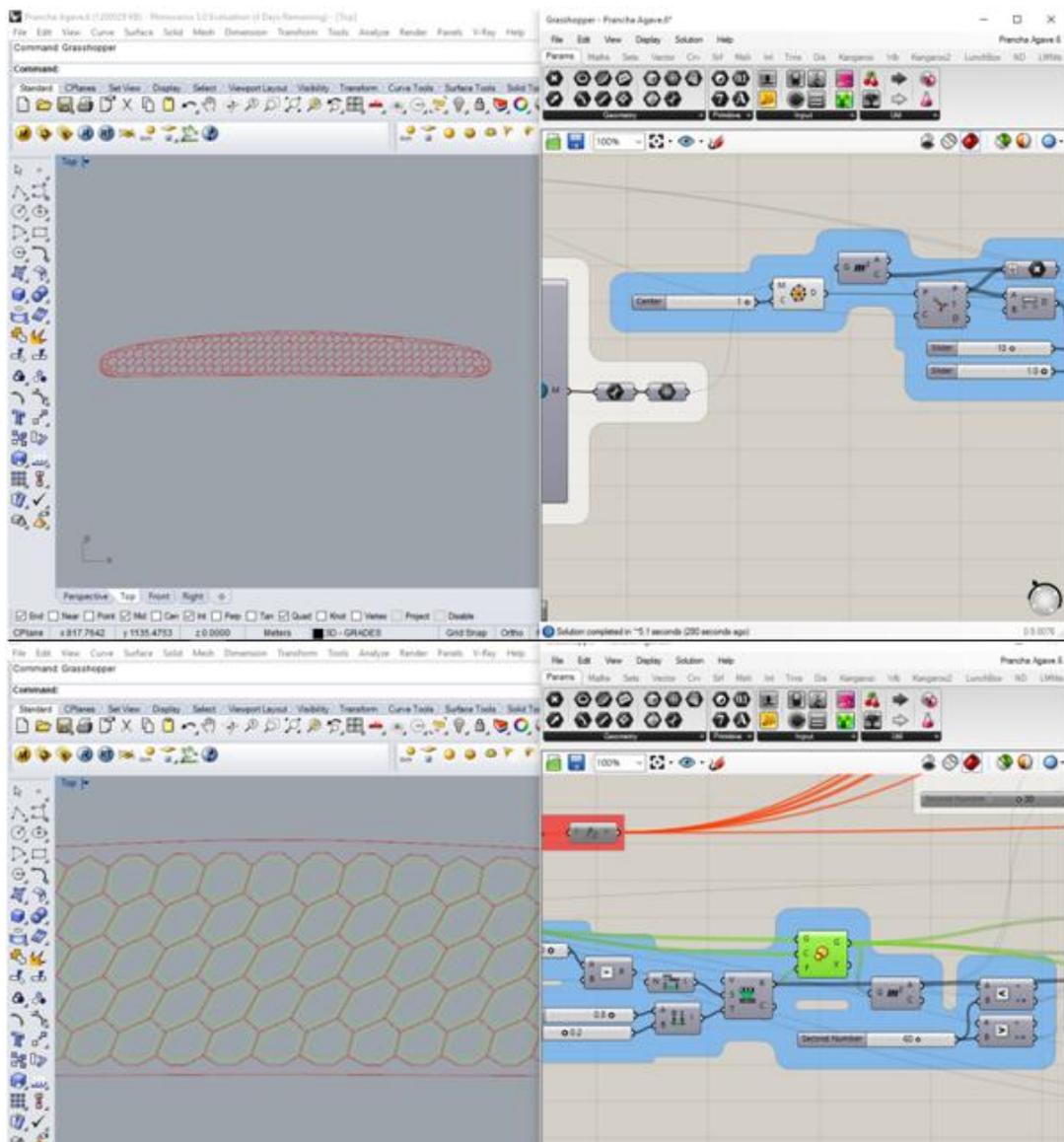
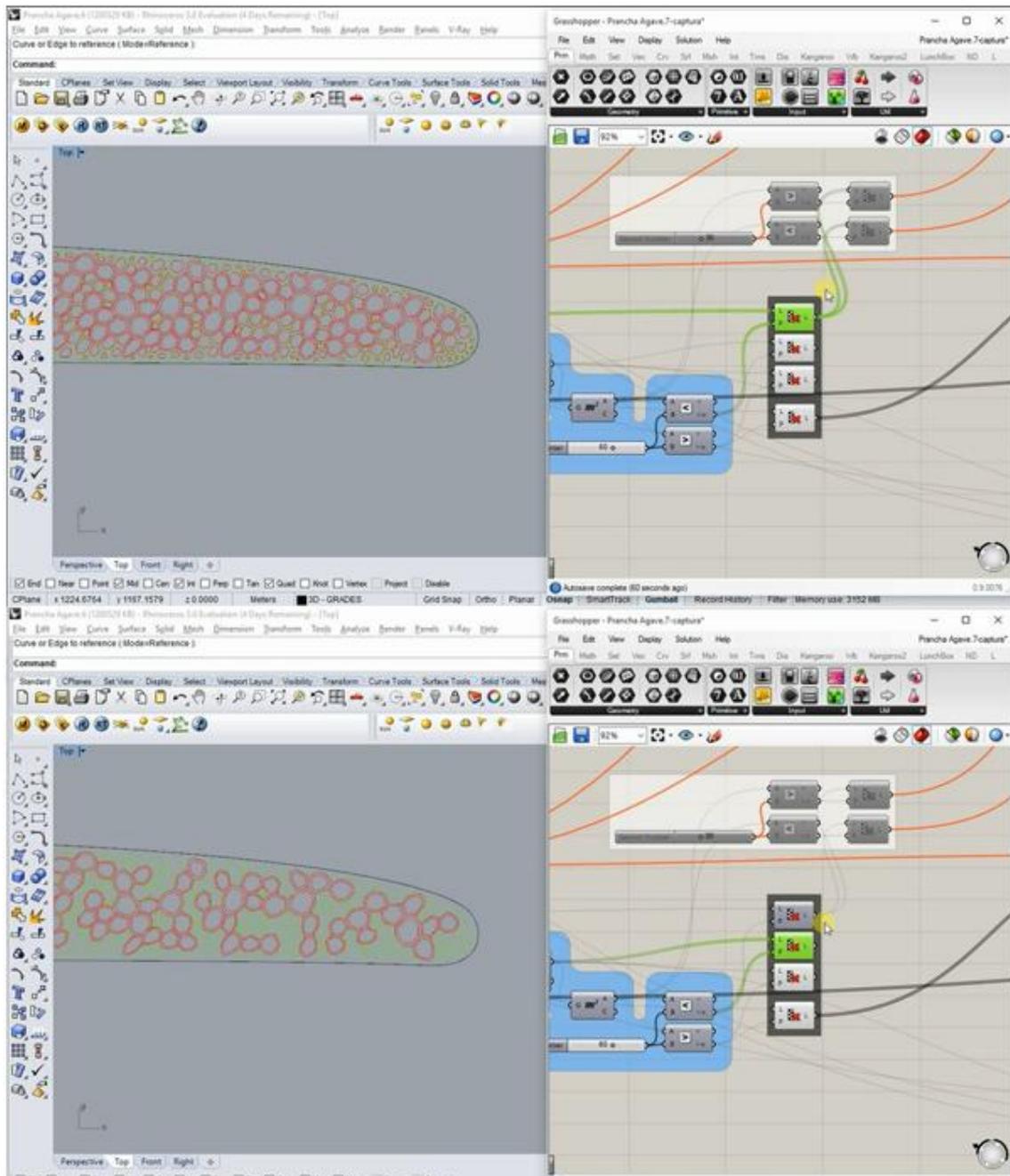
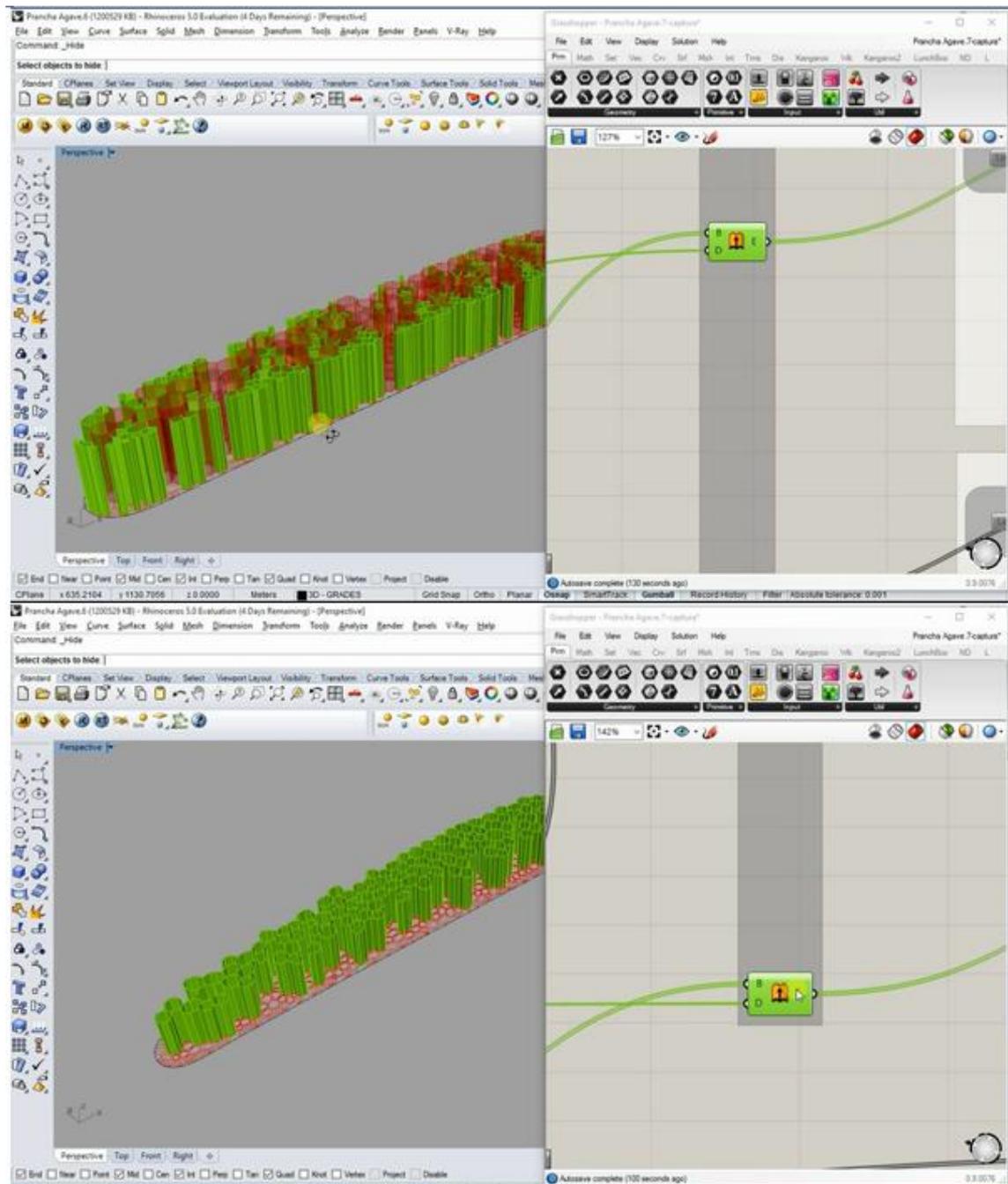


Figura 51 - Definição da malha estrutural definindo a delimitação inicial dos elementos. Fonte: Arquivo pessoal (2015).



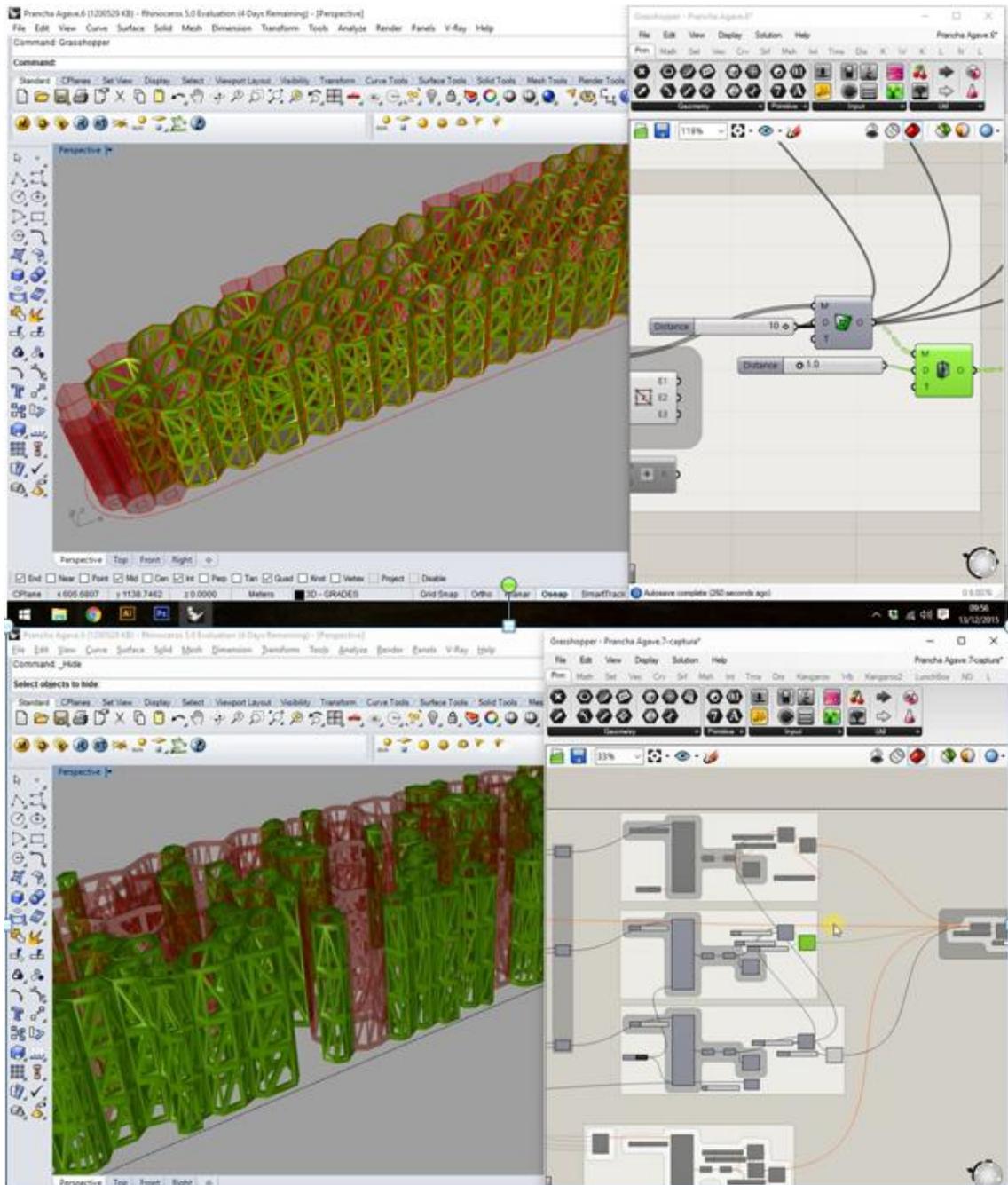
**Figura 52** - Neste momento se pensou na diferenciação das células maiores e menores, com a lógica das paredes finas para economia de peso e paredes espessadas em pontos de reforço. Fonte: Arquivo pessoal (2015).

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, aplicou-se a função de extrusão, configurando “tubos” iniciais (Fig. 53).

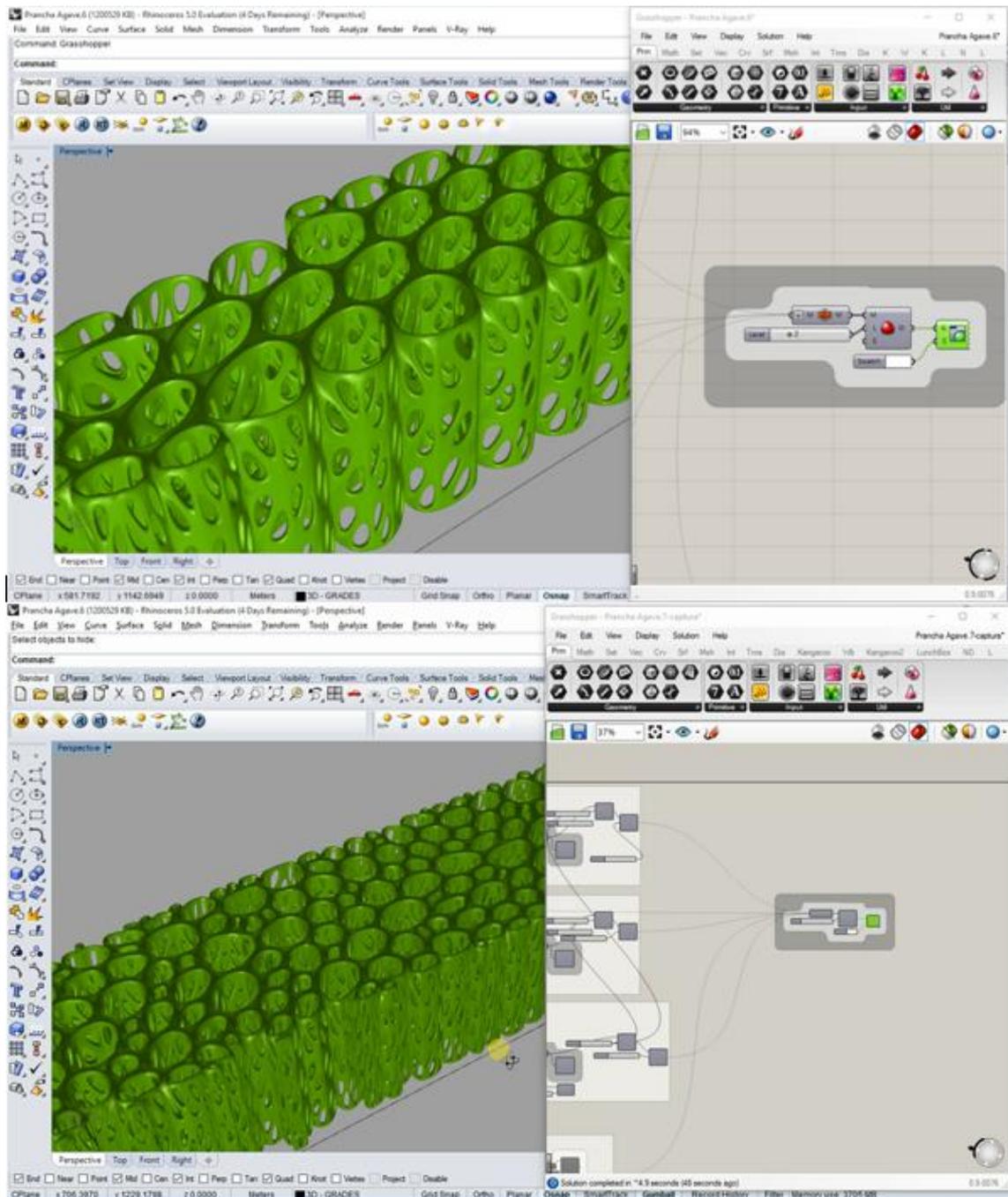


**Figura 53** - Extrusão e agrupamento de padrões. Fonte: Arquivo pessoal (2015).

Dando prosseguimento ao processo emulação, o próximo passo foi a configuração de uma malha determinando os campos de pontuação, onde será aplicado a estratégia da pontuação. Essas regiões tornam-se vazadas de uma forma que não compromete a resistência, distribuindo os pontos de tensões ao longo de cada elemento isolado e toda estrutura (Fig. 54). Esta mesma abstração foi aplicada em todas as células.

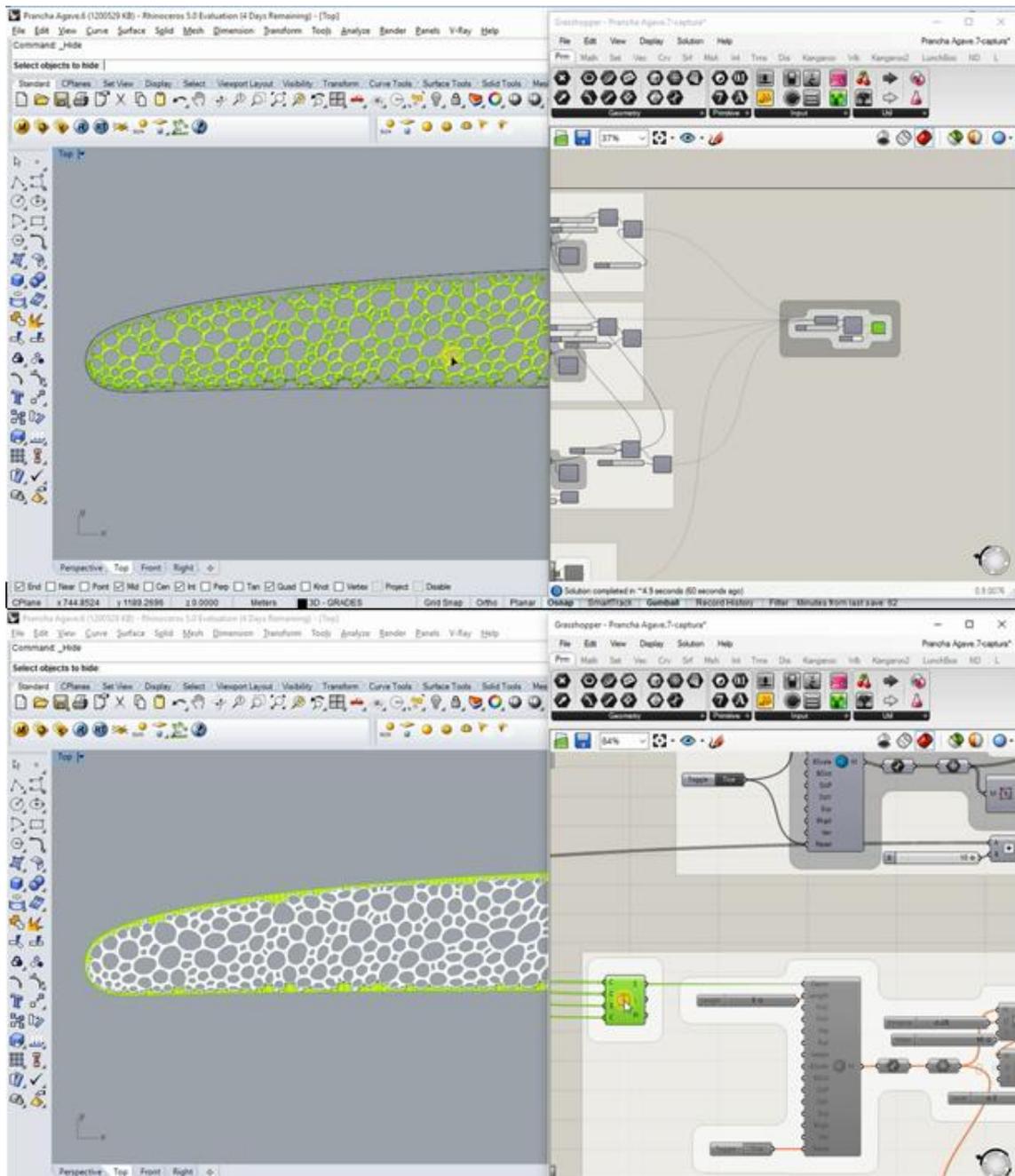


**Figura 54** - Definição da malha dos campos de pontoações e pontoações, áreas vazadas na forma de economia de matéria, aumento da leveza e resistência com flexibilidade. Fonte: Arquivo pessoal (2015).



**Figura 55** - A suavização das bordas e do formato tornou a aparência das células mais orgânicas. Fonte: Arquivo pessoal (2015).

O próximo passo foi determinar a melhor estratégia para representar o preenchimento das bordas. Como pode ser observado à olho nu (Fig. 36), é grande a concentração de fibras e bastante densa, possui mais rigidez devido à maiores quantidades de lignina depositadas nesta região, representando muita resistência mecânica à casca do vegetal.



**Figura 56** - 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 torções. Fonte: Arquivo pessoal (2015).

Com células mais densas preencheram-se os espaços vazios próximos à superfície e bordas da secção da prancha de surf. Os espaços foram povoados com células inspiradas nas fibras, com paredes espessas de maior densidade e concentração (Fig. 56 e 57). Esta camada funciona como se fosse a laminação de uma prancha de surf, que é composta por fibra de vidro e resinas poliméricas, é o reforço necessário para evitar trincas e infiltrações. Neste caso é uma solução bioinspirada na resistência que a casca do escapo floral do Agave apresenta.

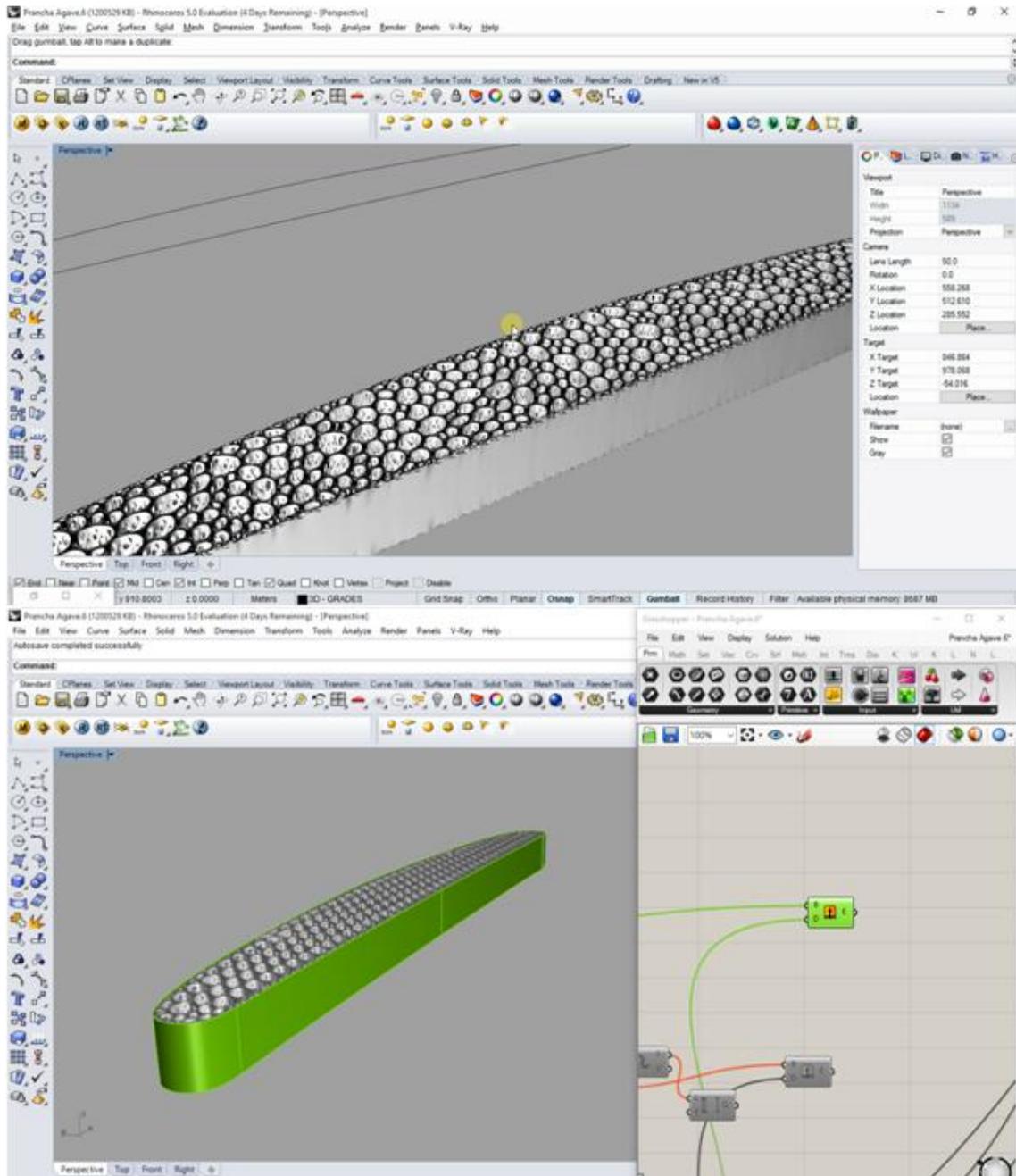
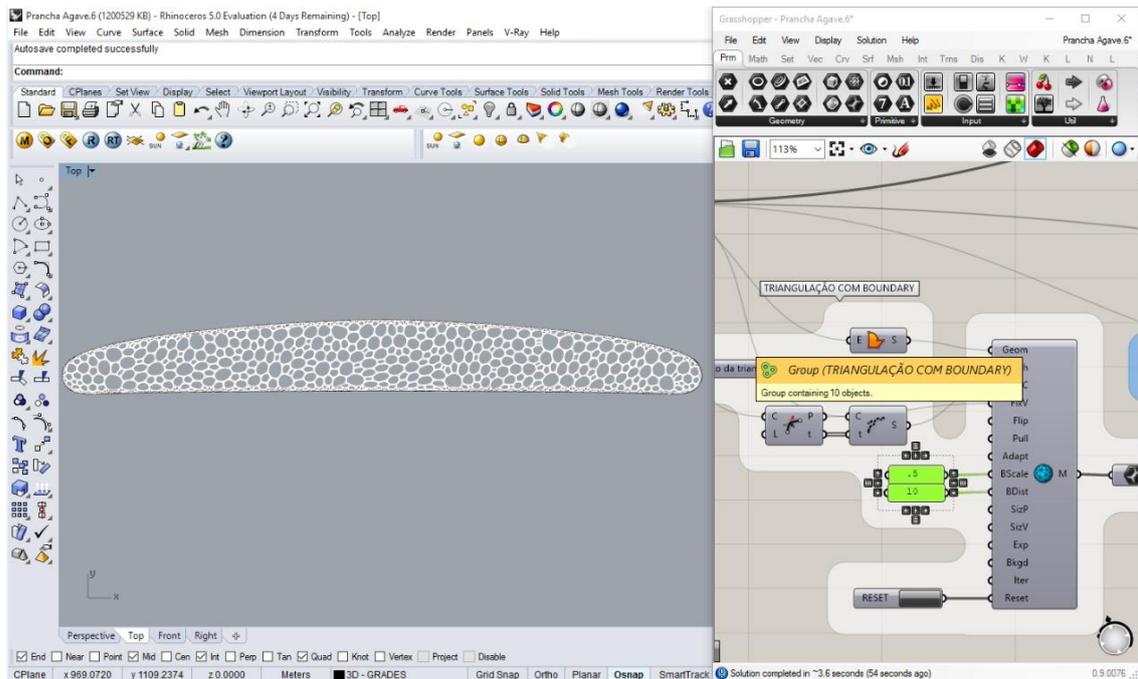


Figura 57 - Secção de uma prancha de surf com aplicação das estratégias do Agave. Fonte: Arquivo Pessoal (2015).



**Figura 58** - Visão frontal da secção de uma prancha de surf com aplicação das estratégias de leveza e resistência do Agave. Fonte: Arquivo Pessoal (2015).

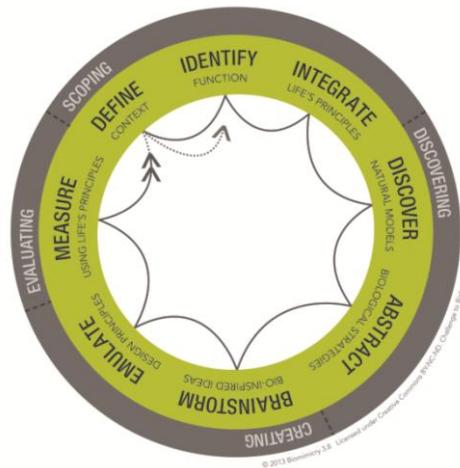
Neste momento encontra-se finalizada toda a configuração da modelagem paramétrica com base nas estratégias do Agave direcionado para aplicação em uma secção de uma prancha de surf. De fato, durante a interação do processo de desenvolvimento enquanto a estratégia tomava corpo pela conversão dos princípios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

No entanto, dando prosseguimento ao diagrama **Biomimicry Thinking - Desafio de biologia** se inicia a próxima e última de quatro etapas, **AVALIAÇÃO** com o subitem **Medir usando princípios da vida**. Fase em que serão feitas algumas análises sobre os resultados alcançados no intuito de medir o nível de interação entre a solução da problemática e os requisitos de possibilidade de fabricação digital. Para que este teste piloto se consolide e se atinja parte da validação deste trabalho, foi tomado como base uma parte da estrutura apresentada para impressão 3D. Foram feitas adaptações e algumas restrições para viabilizar a impressão. Este resultado final é apresentado na próxima etapa, como forma de validação juntamente com análises sobre o atendimento de princípios da vida.

### 3.2.4 AVALIAÇÃO

Quarta e última de quatro etapas do diagrama que é composta de uma única fase **Medir usando princípios da vida**. Esta fase se apresenta como resultados finais desta pesquisa. Porém, uma

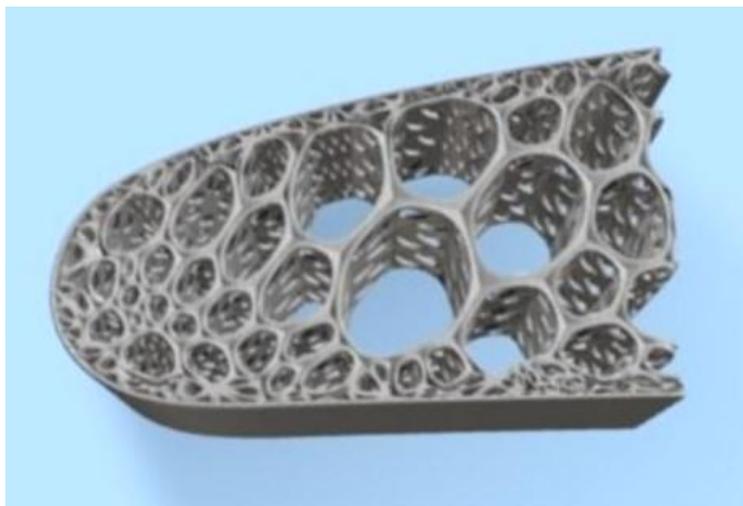
avaliação mais aprofundada e aproximação da realidade dessas estratégias materializadas foram necessárias. Então, através da fabricação digital foi impresso em 3D um protótipo da estrutura paramétrica aplicada na secção da borda de uma prancha de surf, que foi o produto final obtido como teste de aplicação das estratégias do Agave. Esta avaliação foi feita através da medição do atendimento aos princípios da vida, e acabou por validar por completo os resultados quando seguidos os passos da abordagem *Biomimicry Thinking*.



**Figura 59** - Quarta e ultima etapa: AVALIANDO. Fonte: BIOMIMICRY.NET (2015).

Para realização desta etapa, foi definida apenas uma seção da borda para impressão, pois nesta região se apresentam todas as estratégias aplicadas. A peça encaminhada para impressão 3D (Fig. 60) apresenta a lógica da economia de matéria e energia com aplicação de células de maior diâmetro e células mais densas com menor diâmetro fornecendo o reforço necessário sem prejudicar o peso da aplicação. Toda a estrutura interna possui áreas vazadas referentes à pontoações. Portanto, não se fez necessário imprimir toda a secção transversal da prancha desenvolvida na etapa de parametrização.

Para impressão do protótipo procurou-se os serviços on-line de fabricação digital da empresa *Shapeways*, a qual foi escolhida por apresentar capacidade de impressão 3D com resultados de alta qualidade, possibilitando assim, uma avaliação mais detalhada da estrutura com as estratégias do Agave.



**Figura 60** - Modelo paramétrico 3D de uma secção da borda de uma prancha de surf com aplicação das estratégias do Agave, enviado à *Shapeways*. Fonte: Arquivo Pessoal (2015).

### **I - Medir usando princípios da vida**

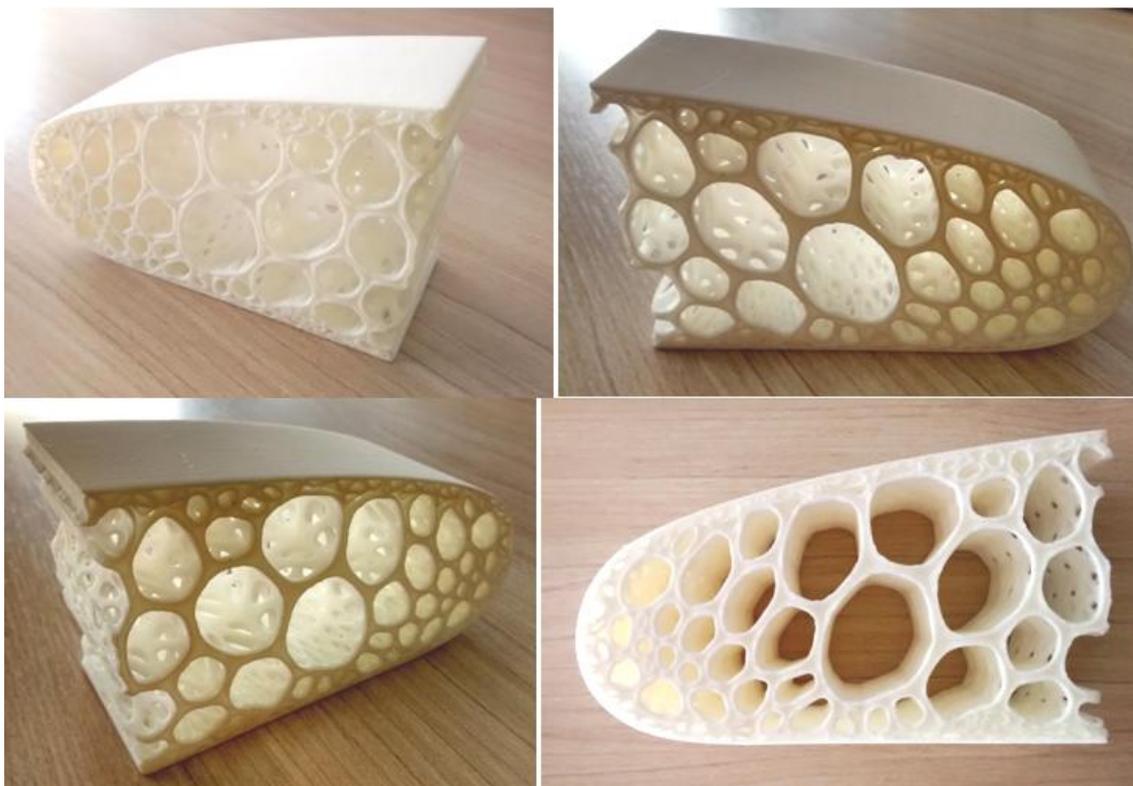
Esta é a última fase do diagrama *Biomimicry Thinking* na modalidade **Desafio de biologia**, fase em que se verifica o atendimento dos objetivos propostos e avaliação da **Integração dos Princípios da Vida**. Quando os processos de design paramétrico foram incorporados à fabricação digital emulando estratégias da natureza, permitiu-se atingir níveis de desempenho técnico e materialização muito satisfatórios.

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 dos ensinamentos do Agave, que vão muito mais além da utilização do mesmo, apenas como matéria prima. Então a fabricação digital através da modelagem paramétrica permitiu se aproximar um pouco mais dos princípios da vida e integração aos processos e ciclos da natureza, que executa duas funções sem desperdício de matéria prima e energia.

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 1x1. Em seguida, a revisão ao atendimento dos princípios da vida que foram

elencados na primeira etapa desta metodologia, revisados nesta fase final, consequentemente confirmaram a validação desta pesquisa.



**Figura 61** - Fotos do protótipo impresso em 3D. Secção da borda de uma prancha de surf com aplicação das estratégias de leveza e resistência da estrutura das paredes celulares do Agave, através da biomimética. Fonte: Arquivo Pessoal (2015).

De fato, após a análise estrutural e funcional do protótipo impresso em 3D com a aplicação das estratégias de leveza e resistência do Agave, validou as premissas desta pesquisa. E para que ocorra a validação de uma forma completa, nesta fase final da pesquisa, foi feita a averiguação se os princípios da vida realmente atribuem validação real com potencial de soluções técnicas e sustentáveis nos processos de produção de pranchas de surf. A seguir uma breve discussão 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, neste caso a prancha de surf. Porém este princípio pode ser direcionado 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 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 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.

## CONCLUSÕES E RESULTADOS FINAIS

Desta forma, completa-se um ciclo inteiro e as quatro etapas da metodologia *DesignLens Biomimicry Thinking* - **Desafio de biologia**. Como descrito no embasamento teórico da abordagem metodológica em biomimética, esta modalidade é particularmente útil para uma configuração "controlada", ou para a criação de um processo iterativo de design. Não surpreendentemente, os melhores resultados ocorrem quando você navega o caminho várias vezes, como ficou confirmado na última fase, onde foi realizada a averiguação final do cumprimento dos princípios da vida, que deixou algumas diretrizes na forma de resultados, pois confirmou-se que caminhando novamente por certas etapas, pode-se obter evolução e otimização no projeto de artefatos com aplicação de estruturas biomiméticas.

De fato, o processo de desenvolvimento da pesquisa enquadrado nas etapas do diagrama, geraram discussões e resultados durante todo o trajeto, ao apresentar os meios para trabalhar em cada etapa e a forma como foi concluída cada uma. A efetivação de cada uma destas etapas gerou diretrizes e parâmetros para que ocorresse a possibilidade de execução das etapas seguinte. Esta foi uma das principais características identificadas quando se caminhou através das etapas metodológicas, desde a etapa inicial até o fim, foi necessário recorrer e desenvolver um diálogo com o embasamento teórico que apresentou elementos geradores de discussões e conclusões.

Esta pesquisa buscou informações na natureza, com intuito de se buscar 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 dos princípios da vida elencados e verificados na fase avaliação. 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 7 metros no momento de florescência, precisa ter leveza e economia de matéria, conseqüentemente menos peso, e a lignina é a maior responsável pelo peso e solidez em madeiras, por exemplo. Portanto na linha deste raciocínio, o Agave atua em um *optimum* de economia de matéria e energia como se pensou mais acima na etapa de descobrimento do modelo natural para pesquisa em biomimética.

Ao se tomar conhecimento das estratégias do Agave em níveis microscópicos, foi visualizada uma ampla gama de possibilidades de aplicação das estratégias do vegetal. Desta forma foi

selecionada a modelagem paramétrica executada no *plugin Grasshopper* do programa de modelagem digital *Rhinceros*. A modelagem paramétrica permite que as estratégias do agave convertidas em parâmetros criam possibilidades de aplicação em incontáveis artefatos que fazem uso de estruturas leves e resistentes.

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. Aqui 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. Na (Fig.62) se pode observar a estrutura celular do agave em forma adaptada para necessidades de pranchas de surf em escala passível de fabricação digital. 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 diversas destas estratégias. Vale salientar que o escopo desta pesquisa não adentra na definição dos materiais mais adequados para produzir pranchas dentro desta perspectiva.



**Figura 62** - Protótipo com aplicação das estratégias do Agave. Fonte: Arquivo Pessoal (2015).

O material selecionado em que o protótipo foi impresso, se trata do ABS que é um material termoplástico rígido e leve, com flexibilidade e resistência na absorção de impacto, 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.

Finalizando, a biomimética se mostrou ser, provavelmente, uma das áreas de projeto que terão grande impactos positivos na vida das pessoas e do meio ambiente no geral. Pois a natureza tem 3,8 bilhões de anos de evolução, por tanto ela sabe o que funciona, o que perdura, e desta forma se autorregenera em seu próprio equilíbrio.

## REFERÊNCIAS

ARRUDA, Amilton J. V. **O que é Biônica?**. In: Revista Arte Comunicação. v.1, n.1, p.19-24, jun. 1994. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 1994.

AURENHAMMER, FRANZ. **Voronoi Diagrams - A Survey of a Fundamental Geometric**

**Data Structure**. Institute fur Informationsverarbeitung Technische Universitat Graz, Schietstattgasse 4a, Austria. 1991.

APEZZATO-DA-GLÓRIA, Beatriz; CARMELLO-GUERREIRO, Sandra Maria. **Anatomia Vegetal**. Viçosa: Ed. UFV, 2006.

BARBOSA, E. R. **Inspiração que vem da natureza exige visão multidisciplinar na pesquisa**. Cienc. Cult. [online], vol.60, n.3, pp. 15-16, 2008.

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.

BUKATSCH, F. Bemerkungen Zur Doppelfärbung Astrabalau-Safranin. **Mikrokosmos**. V.61, N.8, 225P. 1972.

BUTT, Tony. **Sustainable Guide to Surfing**. Published by Surfers Against Seawage, 2011.

CAPRA, F.; LUISI, **The systems view of life. A Unifying Vision**. Ed., 2014

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Conjuntura Mensal Sisal Janeiro 2014**. Acesso em: 24/09/2014 Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/14\\_02\\_12\\_11\\_46\\_10\\_sisaljaneiro2014.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/14_02_12_11_46_10_sisaljaneiro2014.pdf)

EMBRAPA. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/>> Acessado em:

Jul. 2014.

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**. Ed. Senac. 2009.

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

KRAUS, J.E.; ARDUIN, M. **Manual básico de métodos em Morfologia Vegetal**. Editora EDUR - Universidade Rural: Rio de Janeiro – RJ, 1997, 198p.

MUNARI, Bruno. **Das Coisas Nascem Coisas**. São Paulo: Martins Fontes, 1998.

MULLER, T. **Biomimetics: Design by Nature - What has fins like a whale, skin like a lizard, and eyes like a moth? The future of engineering**. Acesso em: 20/09/2014 Disponível em:<<http://ngm.nationalgeographic.com/2008/04/biomimetics/tom-mueller-text/2>>

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.

OLIVEIRA, Emilio; LANDIM, Paula. **Biônica e Biomimética: diferenças e aproximações à luz da sustentabilidade**. Simpósio Brasileiro de Design Sustentável, 2011 set 11-13, Recife. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2011

PAPANECK, Victor. **Design for the real world**. New York Ed. Bantam boks, 1971.

PHILLIPPI JR, Arlindo *et al.* **Uma introdução à questão ambiental**. In: Curso de Gestão Ambiental. Barueri,SP: Manole, 2004.

QUEIROZ, Natália, RATTES, Rafael & BARBOSA, Rodrigo. **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.

RATTES, Rafael. **Biomimética aplicada ao Metadesign: Geração de Máquinas Abstratas com base no estudo do Mandacaru**. Dissertação para obtenção de Grau de Mestre em Design. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2015.

RAVEN, P.H., EVERT, R.F. & EICHHORN, S.E. **Biologia Vegetal**, 7ª. ed. Coord. Trad. J.E.Kraus. Editora Guanabara Koogan, Rio de Janeiro. 2007.

SALGADO, J. C. H. **Contributo do Biomimetismo para o desenvolvimento de Eco-bairros.** Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia do Ambiente no Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2013.

SALVADOR, Roner José. **Metodologia biônica em dobradiças de móveis.** Programa de pós-graduação em Engenharia na Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Porto Alegre, 2003.

SANTOS, C. **O desenho como processo de aplicação da biomimética na arquitetura e no design.** Revista TÓPOS. V. 4, N° 2, p. 144 – 192. Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2010.

SOARES, M. A. R. **Biomimetismo e Ecodesign: Desenvolvimento de uma ferramenta criativa de apoio ao design de produtos sustentáveis.** Lisboa. Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia, 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.

VINCENT, Julian F.V; BOGATYREVA, Olga A; BOGATYREV, Nikolaj R; BOWYER, Adrian; PAHL, Anja-Karina. **Biomimetics: its practice and theory.** J. R. Soc. Interface 22 August 2006 vol. 3 no. 9 471-482.

WAHL, D. C. **Bionics vs. biomimicry: from control of nature to sustainable participation in nature.** In C. A. Brebbia (Ed.), Design and Nature III: Comparing Design in Nature with Science and Engineering, v. 87. p.289-298, WIT Press, 2006.

WAHL, D. C.; BAXTER, S. **The Designer's Role in Facilitating Sustainable Solutions** Massachusetts Institute of Technology Design Issues: Volume 24, Number 2 Spring 2008.