



**PGDESIGN** | Programa de Pós-Graduação  
Mestrado | Doutorado



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
FACULDADE DE ARQUITETURA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESIGN**

Hilton Albano Vieira Fagundes

**DESIGN E TECNOLOGIA: BIOMORFOSE DE FRUTOS DE CASCA DURA  
APLICADA À GRAMÁTICA DA FORMA**

Tese de Doutorado

Porto Alegre

2021

**HILTON ALBANO VIEIRA FAGUNDES**

**Design e tecnologia: biomorfose de frutos de casca dura aplicada à gramática da forma**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Design da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Design.

Orientador: Prof. Dr. Wilson Kindlein Júnior

Co-orientador: Prof. Dr. Fábio Gonçalves Teixeira

Porto Alegre

2021

## CIP - Catalogação na Publicação

Fagundes, Hilton Albano Vieira

Design e Tecnologia: Biomorfose de frutos de casca dura aplicada à gramática da forma / Hilton Albano Vieira Fagundes. -- 2021.

153 f.

Orientador: Wilson Kindlein Júnior.

Coorientador: Fábio Gonçalves Teixeira.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Arquitetura, Programa de Pós-Graduação em Design, Porto Alegre, BR-RS, 2021.

1. biomorfose. 2. biônica. 3. gramática da forma. 4. frutos de casca dura. 5. texturas e superfícies. I. Kindlein Júnior, Wilson, orient. II. Teixeira, Fábio Gonçalves, coorient. III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Hilton Albano Vieira Fagundes

**DESIGN E TECNOLOGIA: BIOMORFOSE DE FRUTOS DE CASCA DURA APLICADA À  
GRAMÁTICA DA FORMA**

Esta Tese foi julgada adequada para a obtenção do Título de Doutor em Design, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Design da UFRGS.

Porto Alegre, 14 de maio de 2021.

---

**Prof. Dr. Fábio Gonçalves Teixeira**

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Design da UFRGS

**Banca Examinadora:**

---

Orientador: **Prof. Dr. Wilson Kindlein Júnior**

UFRGS - Departamento de Materiais (DEMAT)

---

Co-orientador: **Prof. Dr. Fábio Gonçalves Teixeira**

UFRGS - Departamento de Design e Expressão Gráfica (DEG)

---

**Prof. Dr. André Canal Marques**

UNISINOS – Curso de Design de Produto e FabLab – Examinador Externo

---

**Profa. Dra. Mariana Kuhl Cidade**

UFSC – Departamento de Desenho Industrial – Examinador Externo

---

**Prof. Dr. Luís Henrique Alves Cândido**

UFRGS - Departamento de Design e Expressão Gráfica (DEG) – Examinador Interno

---

**Profa. Dra. Underléa Miotto Bruscato**

UFRGS – Departamento de Arquitetura – Examinador Interno

## AGRADECIMENTOS

Ao meu filho Franz Hofstadler, pelo seu amor incondicional, grande apoio para a continuidade e incentivo em todas as horas e à Clarice pelo apoio.

Ao meu orientador Prof. Dr. Wilson Kindlein Júnior incansável em suas contribuições, sempre incentivador, brilhante em seus comentários e assertivas; sem medir esforços ao atendimento de todas as questões. Nada seria possível sem a sabedoria, a dedicação e o apoio amigo.

Ao meu co-orientador Prof. Dr. Fábio Gonçalves Teixeira pessoa da mais alta seriedade, competência e responsabilidade, pelo apoio nos momentos críticos.

Ao Prof. Dr. Jorge Mariath pela sabedoria e conhecimento e pelo prazer em dividir e multiplicar. Aos professores Dr. Fábio Pinto da Silva, Dr. Luiz Henrique Cândido, Dr. Everton Amaral da Silva, Dra. Liane Roldo, Dr. Regio Pierre da Silva, Dra. Branca Oliveira e Dra. Lauren Duarte, pessoas de alta capacidade, conhecimento e um enorme prazer e transmitir seu saber.

Ao meu colega e amigo Dr. Felipe Palombini suporte técnico em inúmeras dúvidas, pessoa de alta capacidade, generosidade e humildade, serei grato para sempre.

Ao Prof. Dr. Felix Bressan pelas ajudas com o algoritmo; ciência e arte em uma única pessoa.

Às minhas colegas Eliana Paula Calegari, Jussara Smidt Porto e Mariana Schmidt pela grande ajuda e contribuição durante as aulas e na realização de artigo científico.

Ao engenheiro Renato das Neves, que reside no Pará, que conseguiu remeter para o sul um cacho de sementes da pameira Jupati, minha gratidão.

A Profa. Dra. Elisa Guerra Ashton Eichenberg pela atenciosa colaboração no Laboratório.

Ao físico Felipe Toschi, responsável técnico do laboratório Sidi que me oportunizou a realização da tomografia da Jupati.

Aos meus colegas de profissão arquitetos Leonardo Gindri e Ícaro Epifânio pelo apoio no entendimento e conhecimento dos diferentes *softwares* de parametrização.

Aos meus colegas de profissão arquitetos Andreoni Prudêncio e Miguel Angel Esnaola por ceder a possibilidade de aplicação do estudo em projeto de sua autoria.

Aos meus colegas Gabriel Barbieri, Luciano Santos Silva, Israel, Yuri Walter, Wagner, João, Jaqueline e Vera Piazza que sempre estiverem presentes me ajudando em uma coisa ou outra.

A todo o corpo docente e funcionários, em especial a querida e sempre atenciosa Eloísa e, mais recentemente, Laziê, do Programa de Pós-Graduação em Design (PGDesign/UFRGS) por contribuírem para o desenvolvimento de uma pesquisa multidisciplinar.

A UFRGS pelo ensino de excelência e qualidade e a CAPES que possibilitaram esta pesquisa.

A todos os demais que por pressa ou falha de memória eu não tenha citado nesta lista de agradecimentos, mas que de uma forma ou de outra contribuíram para este trabalho.

Este trabalho foi realizado com o apoio do CNPq e CAPES.

## RESUMO

FAGUNDES, H. A. V. **Design e tecnologia: biomorfose de frutos de casca dura aplicada à gramática da forma**. 2021. 153 p. Tese (Doutorado em Design) – Escola de Engenharia / Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

A natureza é rica em apresentar uma diversidade de formas em que se organiza para preservar, desenvolver e continuar a vida que carrega. Enquanto o reino animal é dinâmico e se movimenta, no reino vegetal existe a permanência em um local e, para sua continuidade, se utiliza do deslocamento da planta mãe através de diferentes estratégias de dispersão de frutos e suas sementes. Considerando uma interessante embalagem vital, frutos e sementes e sua morfologia foram estudados a partir de uma lógica geométrica como fonte de inspiração para aplicações em revestimentos de envelopes de edificações. Este estudo baseou-se em alguns frutos de casca dura, como referenciais destas possibilidades, os quais possuem a função de invólucro sofisticado, para preservar e proteger o material genético sob diferentes condições até a germinação. A partir do entendimento de aspectos da natureza, a biomorfose e suas geometrias, procurou-se explorá-las através de princípios de design generativo, como a gramática da forma e a parametrização. As amostras escolhidas concentraram-se naquelas cuja a superfície apresentasse uma logicidade geométrico-formal, seguindo-se de um de ações visando seu entendimento. Atendidos os critérios de escolha elaborou-se desenhos iniciais, levantamento fotográfico em diferentes escalas, após empregou-se a digitalização tridimensional para construção da forma externa e a tomografia computadorizada para leitura do aspecto interior, como método não invasivo. A recriação em meio digital permitiu uma revisão da representação gráfica com o aporte de novas informações. Do conhecimento síntese partiu-se para a abstração geométrica aplicada a uma gramática da forma baseada em parâmetros ou regras em soluções bi e tridimensional e, utilizando *softwares* computacionais generativos, como método capaz de estender estas geometria e formas em composições aplicáveis a superfícies em padronizações tanto estáticas como cinéticas para revestimentos de fachadas. Verificou-se que para a obtenção de soluções bio-inspiradas é importante o auxílio de diferentes áreas do conhecimento (biologia, desenho, engenharia, design, matemática e arquitetura), como método multidisciplinar de investigação e análise multiplicando as alternativas de configurações como as do tratamento de superfícies desde as aplicações compositivas em painéis estáticos até à dinâmica de elementos cinéticos.

**Palavras-chave:** biomorfose, analogias biológicas, gramática da forma, frutos de casca dura, design e tecnologia, fachadas de edifícios, texturas e superfícies.

## ABSTRACT

FAGUNDES, H. A. V. **Design and technology: biomorphosis of hard-shelled fruit applied to shape grammar.** 2021. 153 p. Thesis (PhD in Design) – School of Engineering / Faculty of Architecture, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

Nature is rich in presenting a diversity of shapes in which it organizes itself to preserve, develop and extend the life it carries. While the animal kingdom is dynamic and moves, in the vegetable kingdom there is permanence in place and, for its continuity, it uses the displacement of the mother plant through different dispersion strategies of fruits and their seeds. Considered an interesting vital packaging, fruits and seeds and their morphology were studied from a geometric logic as a source of inspiration for applications in envelope cladding of buildings. This study was based on some hard-shelled fruits, as references of these possibilities, whose function is that of a sophisticated enclosure, to preserve and protect the genetic material under different conditions until germination. From an understanding of aspects of nature, biomorphosis and its geometries, we sought to explore them through principles of generative design, such as form grammar and parameterization. The chosen samples focus on those whose surface has a geometric-formal logic, followed by actions aimed at its comprehension. After fulfilling the selection criteria, initial drawings were made, photographic surveys were taken at different scales, after which three-dimensional scanning was used to construct the external shape and computed tomography for reading the interior aspect, as a non-invasive method. Recreation in a digital medium allowed a revision of the graphic representation with the addition of new information. From the knowledge synthesis, geometric abstraction was applied to a shape grammar based on parameters or rules in two- and three-dimensional solutions, using generative computational software as a method capable of extending these geometries and shapes into compositions applicable to surfaces in both static and kinetic standardizations for facade cladding. It was found that in order to obtain bio-inspired solutions, the aid of different areas of knowledge (biology, drawing, engineering, design, mathematics, and architecture) is important, as a multidisciplinary method of investigation and analysis, thus multiplying the configuration alternatives such as those of surface treatment, from compositional applications in static panels to the dynamics of kinetic elements.

**Keywords:** biomorphosis, biological analogies, shape grammar, hard-shelled fruit, design and technology, building facades, textures and surfaces.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Analogias naturais e soluções de aplicações úteis ao homem.....	25
Figura 2 – Método de projeto bioinspirado.....	26
Figura 3 – Transformações geométricas de uma espécie de peixe.....	26
Figura 4 – Analogia formal entre a forma do bico do pássaro martim-pescador.....	29
Figura 5 – Síntese das duas abordagens da Biomimética.....	30
Figura 6 – Etapas básicas de identificação, análise e aplicação de design de produto.....	33
Figura 7 – Princípios das estruturas vincadas aplicados a placas delgadas.....	39
Figura 8 – Experimentos do arquiteto Jean Prouvé em chapas dobradas.....	40
Figura 9 – Luminárias em papel reciclado e lâmpadas LED.....	42
Figura 10 – Modelo de automóvel prototipado pela empresa RoboFold.....	43
Figura 11 – Diagrama da análise geométrica da pele de uma cobra.....	49
Figura 12 – Abordagem tradicional de projeto.....	49
Figura 13 – Abordagem de projeto por meio de um sistema generativo.....	50
Figura 14 – Gramática da forma: forma inicial, regra, forma da linguagem e forma final.....	51
Figura 15 – Aplicação de um sistema de geração de formas baseado em regras.....	52
Figura 16 – Exemplo de uma gramática da forma e linguagem resultante.....	54
Figura 17 – Aplicação da gramática da forma – exemplos da geração de padrões.....	55
Figura 18 – Exemplo da aplicação da Gramática da Forma Paramétrica.....	57
Figura 19 – Exemplo de aplicação paramétrica: plugin Grasshopper® - Rhinoceros®.....	61
Figura 20 – Principais modos de dispersão de sementes (agentes dispersores) .....	65
Figura 21 – Bioinspiração: Fruto Durian; Esplanade theater; Superfície piramidal.....	67
Figura 22 – Esplanade theater, conceito de design: objetivos e resultados.....	68
Figura 23 – Árvore do Cedro - <i>Cedrela fissilis</i> (Meliaceae) e frutos do cedro.....	71
Figura 24 – Fruto de Cedro - <i>Cedrela fissilis</i> (Meliaceae): fase inicial de abertura/aberto.....	72
Figura 25 – Fruto de Cedro - <i>Cedrela fissilis</i> (Meliaceae): componentes.....	73
Figura 26 – Fruto de Cedro - <i>Cedrela fissilis</i> (Meliaceae): aberto e após a dispersão.....	73
Figura 27 – Fruto de Cedro - <i>Cedrela fissilis</i> (Meliaceae): desenho – fruto aberto.....	74
Figura 28 – Fruto de Cedro - <i>Cedrela fissilis</i> (Meliaceae): geometrização – fruto aberto.....	75
Figura 29 – Fruto de Cedro - <i>Cedrela fissilis</i> (Meliaceae): criação de padrão geométrico.....	76
Figura 30 – Aplicação do padrão compositivo em superfície vazada do material.....	77
Figura 31 – Noz <i>Juglans regia</i> (L.): desenhos de Otto Wilhelm Thomé e árvore Nogueira...	77
Figura 32 – Noz <i>Juglans regia</i> (L.): revestimento do endocarpo.....	78
Figura 33 – Noz <i>Juglans regia</i> (L.): dividida em três (trivalvo) e duas partes (bivalvo).....	79
Figura 34 – Noz <i>Juglans regia</i> (L.): vistas - extremo penducular, apical e ex. longitudinal....	82

Figura 35 – Noz <i>Juglans regia</i> (L.): casca ou tegumento e semente.....	82
Figura 36 – Noz <i>Juglans regia</i> (L.): casca/tegumento, semente e valva separada.....	83
Figura 37 – Noz <i>Juglans regia</i> (L.): externa e internamente.....	83
Figura 38 – Noz <i>Juglans regia</i> (L.): discriminação dos componentes da casca e semente...	84
Figura 39 – Noz <i>Juglans regia</i> (L.): abertura da sutura, a partir da extremidade apical.....	85
Figura 40 – Noz <i>Juglans regia</i> (L.): seccionada transversalmente – casca e semente.....	86
Figura 41 – Noz <i>Juglans regia</i> (L.): três dimensões das amostras consideradas.....	86
Figura 42 – Posicionamento da noz inteira junto ao aparelho digitalizador.....	87
Figura 43 – Casca da noz digitalizada e casca desta noz em seu aspecto natural.....	88
Figura 44 – Noz <i>Juglans regia</i> (L.): imagens obtidas a partir da digitalização de amostras..	89
Figura 45 – Noz <i>Juglans regia</i> (L.): casca digitalizada e linha de ruptura após ensaio.....	89
Figura 46 – Noz <i>Juglans regia</i> (L.): casca após a ruptura e imagem digitalizada antes.....	89
Figura 47 – Noz <i>Juglans regia</i> (L.): fotomicrografias da seção e encontro das valvas.....	90
Figura 48 – Noz <i>Juglans regia</i> (L.): fotomicrografias seção transversal/encontro valvas.....	91
Figura 49 – Noz <i>Juglans regia</i> (L.): imagens obtidas por MEV – pontos de ampliações.....	91
Figura 50 – Noz <i>Juglans regia</i> (L.): imagens MEV – ampliações ponto sutura das valvas....	92
Figura 51 – Noz <i>Juglans regia</i> (L.): ensaio compressão – casca.....	92
Figura 52 – Noz <i>Juglans regia</i> (L.): ensaio compressão – gráfico tensão x deformação.....	93
Figura 53 – Palmeira Jupati - <i>Raphia taedigera</i> (Mart.) árvore e frutos.....	95
Figura 54 – Fruto Jupati - <i>Raphia taedigera</i> (Mart.): aspectos gerais da casca.....	95
Figura 55 – Fruto Jupati - <i>Raphia taedigera</i> (Mart.): seção casca e semente.....	96
Figura 56 – Fruto Jupati - <i>Raphia taedigera</i> (Mart.): preparação digitalização.....	97
Figura 57 – Fruto Jupati - <i>Raphia taedigera</i> (Mart.): e modelo tridimensional.....	98
Figura 58 – Fruto Jupati - <i>Raphia taedigera</i> (Mart.): vistas do modelo.....	99
Figura 59 – Fruto Jupati - <i>Raphia taedigera</i> (Mart.): Modelo 3D malha triângulos.....	100
Figura 60 – Fruto Jupati - <i>Raphia taedigera</i> (Mart.): Modelo 3D malha e superfície.....	101
Figura 61 – Fruto Jupati - <i>Raphia taedigera</i> (Mart.): Modelo 3D aplicação cargas.....	104
Figura 62 – Configuração deformada com tensões Von-Mises.....	104
Figura 63 – Fruto Jupati - <i>Raphia taedigera</i> (Mart.): Modelo referenciado aplicação cargas.	105
Figura 64 – Fruto Jupati - <i>Raphia taedigera</i> (Mart.): Modelo discretiz. tensões Von-Mises	105
Figura 65 – Fruto Jupati - <i>Raphia taedigera</i> (Mart.): Modelo discretizado – apl. cargas.....	107
Figura 66 – Fruto Jupati - <i>Raphia taedigera</i> (Mart.): Modelo discretiz. seção vistas cargas.	107
Figura 67 – Fruto Jupati - <i>Raphia taedigera</i> (Mart.): Modelo discretizado – ampliação.....	108
Figura 68 – Fruto Jupati - <i>Raphia taedigera</i> (Mart.): tomografia CT.....	109
Figura 69 – Fruto Jupati - <i>Raphia taedigera</i> (Mart.): tomografia – corte/vista.....	110
Figura 70 – Categorias e características como referenciais biológicos desta pesquisa.....	113

Figura 71 – Características/categorias com maior influência em referenciais biológicos.....	115
Figura 72 – Sequenciamento de etapas a partir de forma bioinspirada e aplicação.....	116
Figura 73 – Percurso para a obtenção de soluções em superfícies texturizadas baseada em formas da biologia.....	117
Figura 74 – Represent. gráfica modelo biológico: fruto Jupati - <i>Raphia taedigera</i> (Mart.)....	118
Figura 75 – Resultado de aplicação de uma Gramática da Forma.....	119
Figura 76 – Resultado da geração de uma malha de módulos tridimensionais.....	120
Figura 77 – Resultado de impressão dos módulos tridimensionais em malha de tecido.....	121
Figura 78 – Parametrização dos princípios geométricos do fruto da palmeira Jupati.....	122
Figura 79 – Experimentações do módulo cinético e sua estrutura de suporte.....	123
Figura 80 – Protótipos de simulação de composição modular com o emprego da luz.....	123
Figura 81 – Geração de formas tridimensionais a partir da parametrização geométrica.....	124
Figura 82 – Sistema de abertura e movimentação dos módulos cinéticos – indiv. e conj.....	125
Figura 83 – Protótipos cinéticos: estudo do percurso e articulação elementos móveis.....	127
Figura 84 – Diagrama de análise da iluminação solar em número de horas: inverno.....	128
Figura 85 – Diagrama de análise da iluminação solar em número de horas: verão.....	129
Figura 86 – Diagrama de análise da radiação solar em KWh/m2: inverno.....	130
Figura 87 – Diagrama de análise da radiação solar em KWh/m2: verão.....	130
Figura 88 – Diagrama de análise da iluminação solar em um edifício em Porto Alegre.....	132
Figura 89 – Diagrama da iluminação solar - horas e diagrama radiação solar - KWh/m2 ....	132
Figura 90 – Diagrama de análise da iluminação solar: simulação em edifício – inverno.....	133
Figura 91 – Diagrama de análise da iluminação solar: simulação em edifício – verão.....	133
Figura 92 – Diagrama de análise da radiação solar: simulação em edifício – inverno.....	134
Figura 93 – Diagrama de análise da radiação solar: simulação em edifício – inverno.....	134
Figura 94 – Características: referencial biológico e resultados soluções bioinspiradas.....	136
Figura 95 – Tipos de estruturas de gradação – mudanças possibilidade de aplicação.....	136
Figura 96 – Obtenção de soluções bioinspiradas – uma proposta para sequenciamento passo-a-passo tomando o exemplo do fruto da palmeira Jupati.....	141

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Noz <i>Juglans regia</i> (L.): ensaio de compressão de amostras das cascas.....	<b>94</b>
Tabela 02: Propriedades mecânicas típicas: relação peso espec. x módulo de elastic.....	<b>102</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS

<b>2D</b>	Bidimensional
<b>3D</b>	Tridimensional
<b>ABNT</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>ASTM</b>	<i>American Society for Testing and Materials</i> (Sociedade Americana para Teste de Materiais)
<b>ASCII</b>	<i>American Standard Code for Information Interchange</i> (Código Padrão Americano para o Intercâmbio de Informação)
<b>CAD</b>	<i>Computer Aided Designer</i> (Projeto Auxiliado por Computador)
<b>CAE</b>	<i>Computer Aided Engineering</i> (Engenharia/simulação - Auxiliada por Computador)
<b>CAM</b>	<i>Computer Aided Manufacturing</i> (Manufatura Auxiliada por Computador)
<b>CNC</b>	<i>Charge Coupled Device</i> (Dispositivo de Carga Acoplada)
<b>CT</b>	Tomografia Computadorizada
<b>E</b>	Módulo de Elasticidade
<b>epw</b>	<i>Energy Plus Webseite</i>
<b>FEA</b>	<i>Finite Element Analysis</i> (análise por elementos finitos)
<b>FEM</b>	<i>Finite Element Method</i> (método de elementos finitos)
<b>GPa</b>	Gigapascais
<b>IGES</b>	<i>Initial Graphics Exchange Specification</i>
<b>Kg</b>	Quilograma ou Kilograma
<b>kV</b>	Quilovolts ou Kilovolts
<b>KWh/m<sup>2</sup></b>	Quilowatts ou Kilowatts hora/metros quadrados
<b>LDSM</b>	Laboratório de Design e Seleção de Materiais
<b>mA</b>	miliampere
<b>MDF</b>	<i>Medium Density Fiberboard</i> (Painel de Fibra de Média Densidade)
<b>MEF</b>	Método dos Elementos Finitos
<b>MEV</b>	Microscopia Eletrônica de Varredura
<b>mm</b>	Milímetros
<b>N/cm</b>	Newtons/centímetros
<b>STL</b>	<i>STereoLithography</i> (estereolitografia)
<b>STEP</b>	<i>STandard for the Exchange of Product</i> (Padrão para Intercâmbio de Dados de Produto)
<b>UFRGS</b>	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
<b>VDA</b>	<i>VerbanD der Automobilindustrie</i> (União das Indústrias Automotivas)
<b>v</b>	coeficiente de <i>Poisson</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>16</b>
1.1.	Problema de pesquisa.....	20
1.2.	Hipótese.....	20
1.3.	Objetivos.....	20
1.3.1.	Objetivo geral.....	20
1.3.2.	Objetivos específicos.....	20
1.4.	Justificativa.....	21
1.5.	Estruturação e organização do estudo realizado.....	23
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>24</b>
2.1.	As estruturas biológicas como fonte de inspiração: origem, terminologia e nomenclatura.....	24
2.2.	Os padrões de estruturas bio-inspiradas em plantas: as formas da natureza.....	32
2.3.	Materiais e formas leves como solução de design sustentável.....	33
2.4.	A superfície dos materiais como fator de desempenho do objeto – a natureza como referência.....	35
2.5.	Superfícies vincadas dos materiais: características morfo-estruturais.....	37
2.5.1.	Dobras e vincos como elemento de enrijecimento de placas.....	39
2.5.2.	Padrões de textura (ondulações, vincos, dobras e ranhuras): solução estrutural para elementos de espessura delgada.....	42
2.6.	Biomorfose e formas bio-inspiradas e as cascas vincadas como estruturas e envelopamentos de produtos e edifícios.....	44
2.7.	As geometrias como padrões das estruturas biológicas.....	45
2.8.	Emprego de sistemas generativos.....	49
2.9.	Gramática da Forma.....	51
2.9.1.	Elementos de uma Gramática da Forma.....	53
2.9.2.	A utilização de princípios da gramática da forma no processo de concepção do projeto.....	56
2.9.3.	Gramática da forma paramétrica.....	57
2.9.4.	Modelagem paramétrica.....	58
2.9.5.	Padrões da natureza, gramática da forma e sistemas generativos.....	62
2.10.	As estruturas biológicas e a forma geométrica de frutos e sementes.....	64
2.11.	Grupos vegetais: evolução e funcionamento de frutos e sementes.....	65

2.12.	Frutos e sementes de cascas dura e suas funções.....	68
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>71</b>
3.1.	Escolha de frutos de cascas dura para estudo de sua estrutura.....	71
3.2.	O estudo da casca dura do fruto de Cedro - <i>Cedrela fissilis</i> (Meliaceae).....	71
3.2.1.	Características morfo-estruturais dos frutos de Cedro - <i>Cedrela fissilis</i> (Meliaceae).....	73
3.2.2.	Escolha e seleção de amostras do referencial, fruto e semente de Cedro - <i>Cedrela fissilis</i> (Meliaceae).....	74
3.2.2.1	Critérios gerais.....	74
3.2.2.2	Estudos da composição geométrica a partir do fruto seco aberto de Cedro - <i>Cedrela fissilis</i> (Meliaceae).....	75
3.3.	O estudo da casca dura do fruto da Noz comum - <i>Juglans regia</i> (L.).....	77
3.3.1.	Frutas e sementes de paredes duras: drupas e nozes.....	78
3.3.2.	A casca da noz - <i>Juglans regia</i> (L.) e as possibilidades do emprego através da bio-inspiração ou da biomorfose.....	79
3.3.2.1.	Características importantes a serem observadas.....	82
3.3.2.1.1.	Estrutura autoportante.....	82
3.3.2.1.2.	Envolturas em camadas.....	83
3.3.2.1.3.	Invólucro.....	83
3.3.2.1.4.	Compartimentos/encaixe.....	84
3.3.2.1.5.	Dobras.....	84
3.3.3.	Escolha de amostra para caracterização e análise.....	85
3.3.3.1.	Critérios gerais.....	85
3.3.3.2.	Quantidades e dimensões.....	85
3.4.	Metodologia.....	87
3.4.1.	Digitalização tridimensional.....	87
3.4.1.1.	Tratamento dos dados.....	88
3.4.2.	Microscopia óptica.....	90
3.4.3.	Microscopia eletrônica de varredura – <i>MEV</i> .....	91
3.4.4.	Análise a partir de testes de compressão mecânica.....	92
3.4.5.	Sobre as caracterizações obtidas nos diferentes métodos de análise.....	94
3.5.	O estudo da casca dura do fruto palmeira Jupati - <i>Raphia taedigera</i> (Mart.)	95
3.5.1.	Escolha e seleção de amostras do referencial, fruto e semente Jupati - <i>Raphia taedigera</i> (Mart.).....	96
3.5.1.1.	Critérios gerais.....	96
3.5.2.	Obtenção da forma geométrica tridimensional.....	96

3.5.3.	Digitalização tridimensional a laser (por holografia conoscópica) .....	97
3.5.3.1.	Homogeneização da malha.....	98
3.5.4.	Simulações pelo método dos elementos finitos.....	99
3.5.4.1.	Criação de modelo tridimensional referenciado no fruto da palmeira Jupati – <i>Raphia taedigera</i> (Mart.).....	100
3.5.4.2.	Resultados, a partir – modelo virtual, extraídos do <i>software</i> ABAQUS™ ...	102
3.5.4.3.	Resultados, a partir – fruto digitalizado, extraídos do <i>software</i> ABAQUS™	106
3.5.5.	Tomografia Computadorizada (CT).....	108
3.6.	Formulação das bases para o método de antecipação de alternativas.....	111
3.6.1.	Escolha das características das formas naturais – frutos e sementes.....	112
<b>4</b>	<b>RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>116</b>
4.1.	Etapas percorridas para a obtenção de uma forma bio-inspirada.....	116
4.2.	Levantamento das características para a análise estético-morfológica.....	117
4.3.	Aplicação dos conceitos da gramática da forma a partir das regras dos modelos naturais, descrição e análise dos resultados.....	117
4.4.	Estudos da geometria, parametrização e modelagem generativa do fruto de Jupati - <i>Raphia taedigera</i> (Mart.).....	119
4.5.	Bio-inspiração e biomorfose – a aplicação dos padrões da casca do fruto da palmeira Jupati - <i>Raphia taedigera</i> (Mart.).....	135
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES, SUGESTÕES E POSSIBILIDADES DE CONTINUIDADE DA PESQUISA EM TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>138</b>
<b>5.1.</b>	<b>Considerações finais.....</b>	<b>138</b>
<b>5.2.</b>	<b>Recomendações para trabalhos futuros.....</b>	<b>142</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>143</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A natureza é uma ampla fonte de soluções considerando-se problemas análogos àqueles que o homem enfrenta em seu dia-a-dia. Respostas que podem atender a questões como: a estrutura, o transporte e a locomoção, a coordenação e a emissão, transmissão e a recepção de informações (BROECK, 2000).

Janine Benyus em seu livro "*Biomimicry: Inovação inspirada pela natureza*", relata sobre as experiências que o ser humano ganhou a partir da observação do mundo natural como modelo. Aprender com eventos experienciados torna-se um significativo aporte para analogias que servem como mentor de ideias para outras possibilidades (BENYUS, 1997).

Conforme Özek & Yeler (2009) a natureza é base de inspiração em muitas disciplinas, tais como arquitetura e design. Os organismos naturais com suas características exclusivas fornecem ideias aos pesquisadores quer na resolução de problemas que se apresentam assim como na concepção de produtos. O mundo biológico vive seus dinamismos em complexas estruturas, e a cada vez obtém novos padrões evolutivos. Mas se por um lado tal constatação é inspiradora, por outro, uma simples imitação da natureza sem a correta justificativa, pelos designers por exemplo, pode dificultar a correta tomada das decisões afetando o sucesso das soluções.

Segundo Radwan (2016), o estudo da biomimética caracteriza-se como um crescente campo de pesquisa em arquitetura e engenharia oferecendo soluções novas e inspiradoras. As diferentes interpretações existentes para um processo de design baseado na biomimética podem ser desdobradas em duas principais: a abordagem embasada em problemas e a abordagem baseada em solução. Uma abordagem embasada em problemas (design para biologia), é conduzida através da inspiração da biologia pela progressão de etapas que são não-lineares ou uma dinâmica que não segue passos pré-determinados. Isso fornece *feedback*, bem como refinamento nos circuitos ou percursos. Sob este ponto de vista, o designer procura soluções através da identificação do problema. Segundo o autor isso leva os biólogos ou o conhecimento da biologia a combinar este problema com um organismo que tenha resolvido uma questão semelhante. Este enfoque fundamenta-se então na identificação de metas e limitações de design. A outra abordagem, conforme este autor, é fundamentada em uma solução de projeto pensado na biologia, a qual também pode ser conhecida como o design de influência da biologia, abordagem de baixo para cima e ainda como solução orientada em design de inspiração na biologia. Essa interpretação é empregada quando o processo de design é originalmente dependente da ciência, no conhecimento de biólogos e cientistas, ao invés de se concentrar inicialmente nos problemas de design. Um exemplo ilustrativo disto é a análise científica da folha da flor de lótus, planta aquática, cujos estudos

resultaram em muitos novos projetos como por exemplo um referente a fachadas auto-limpantes para edifícios.

Pode-se afirmar que existem três níveis principais de biomimética, os quais podem ser aplicados na abordagem de um problema de design. Esses níveis incluem: forma, processo e ecossistema. Ao analisar o organismo ou o ecossistema, formar e processar, uma solução pode acontecer através da maneira com que a natureza a resolve. Para esta aplicação, é importante determinar qual aspecto da biologia esta sendo referenciado; isso é conhecido como nível. A biomimética pode ser aplicada em vários campos de atividade, desde o transporte, indústria automotiva, eletrônica e vestuário. Através da pesquisa em biologia, a biomimética pode oferecer o aporte de novos recursos tecnológicos e contribuir para avanços em várias áreas do desenvolvimento de produtos e até mesmo serviços (RADWAN, 2016).

Thompson (1961) descreve o processo formativo da natureza como efeito da ação de forças, descrevendo a forma de um objeto tal qual um diagrama de forças onde se pode obter ou interpretar quais as forças agem ou agiram sobre tal objeto. Este efeito das forças que interferem na definição da forma está, por exemplo, claramente apresentado no corpo de um animal, onde cada osso do esqueleto se apresenta como componente da linha de forças às quais este animal é submetido em suas condições normais.

O conceito biomorfismo inclui, dentre outros, a estrutura ou composição de organismos vivos e sua conseqüente transferência para a lógica construtiva. Para este estudo procurou-se analisar, mais especificamente, alguns frutos e sementes e, partir dos conceitos da biomorfose, buscar analogias capazes de possibilitar a aplicação ao processo de design de determinada superfície destinadas à soluções que as empregam como revestimento.

Pawlyn (2011), ao considerar a biomimética como a abstração de um bom design da natureza associa-a como aprendizado a partir da natureza e na transferência desse conhecimento para a resolução de problemas de design. Benyus (1997), estende esta explicação e forma três níveis de pensamento. Um primeiro nível de biomimética trata da imitação da forma natural. Este tipo de imitação faz referenciar-se em um organismo por seus atributos morfológicos, como sua forma visual, componentes, materiais ou como se parece, ou seja, reportar-se ao design de um organismo. Um segundo nível trata de imitar os processos naturais. Este nível faz reproduzir o surgimento ou as ações e processos de uma entidade biológica dentro do ambiente. E um terceiro nível, trata da imitação de ecossistemas naturais. Este é um conjunto de processos mais complexo em relação aos dois primeiros níveis.

Imitar ecossistemas exige considerar não apenas o objeto projetado, mas considerá-lo em uma aspecto maior, em um contexto ampliado, de como ele afeta seu ambiente de forma

explícita e implícita. Ao se expandir a esfera de influência, estabelece-se uma verdadeira perspectiva sustentável.

Em uma abordagem semelhante, é possível encontrar o termo Bioinspiração (*Bioinspiration*), também aplicado quando os fenômenos e aspectos da natureza servem de inspiração para o desenvolvimento de artefatos ou tecnologias pelo homem (BIGGINS *et al.*, 2011).

Na criação ou desenvolvimento de produtos ou soluções que podem ser aplicados ao design e à arquitetura podem ser incorporadas padrões de aproximação com aquilo que acontece na natureza, uma vez que para ambos os casos as proposições consideradas adequadas para atender a diferentes necessidades e algumas conflitantes entre si, são aquelas funcionais.

A biomimética fornece uma vasta área de conhecimento e é uma maneira prática de aprender como um design emerge na natureza, para entender e reproduzir os modos de produção da natureza, para criar projetos, materiais, componentes e outros, para criar um ciclo de energia sustentável e fechado (GRUBER, 2011).

A natureza ao longo de seu histórico de evolução nos seus diferentes sistemas foi capaz de escolher as melhores estratégias de sobrevivência, desenvolver uma enorme capacidade de adaptação e responder da melhor maneira dentro de mecanismos de eficiência funcional e, considerando estes mecanismos e soluções, é que o projetista poderá aplicar, analogamente, no desenvolvimento de produtos e soluções bio-inspiradas.

Pensando em uma abordagem ecologicamente sustentável, a biologia pode emprestar importantes estratégias ambientais à engenharia, arquitetura e ao design (envolvendo aqui o desenvolvimento de novos componentes) e, tais estratégias deveriam, em muitos casos, ser conectadas onde a inovação se faz necessária, especialmente em situações onde se aplica a novos produtos e a novos ambientes. Para que isto aconteça, as soluções devem emergir a partir de modelos fornecidos pela natureza, da sua melhor relação com o meio-ambiente e organismos vivos, da investigação da melhoria da qualidade de vida baseada em soluções simples e na otimização e adaptação de soluções convencionais.

Para Pawlin (2011), quando a arquitetura é levada em consideração, há uma distinção óbvia e importante entre biomorfismo e biomimética em qualquer nível. Após a Revolução Industrial, quando a evolução das ciências naturais como a física, a química e especialmente a biologia dominaram o mundo teórico e prático, tornou-se inevitável que arquitetos se inspirassem nesses importantes desenvolvimentos e às mudanças no mundo do pensamento. Muitos usaram a natureza como fonte ou inspiração para formas novas, simbólicas e não convencionais. Estas abordagens alternativas para o projeto arquitetônico com base na

descoberta de formas excepcionais foram exploradas por alguns arquitetos conhecidos, tais como Frei Otto, Eero Saarinen e Antonio Gaudi.

Conforme Pawlin (2011), o design ou a arquitetura biomimética tem suas raízes nas obras dos surrealistas e da *Art Nouveau*. Um surrealista, Grefory Grigson, cunhou o termo "biomorfismo" em 1936 passando a existir como um estilo. Desde então, e incorporado aos dias atuais associado à computação, serve para obter ou replicar as formas livres visíveis na natureza e sua combinação para criar bordas, superfícies ou volumes. Também está relacionado aos desenvolvimentos na ciência, especialmente no campo da matemática, como a geometria da natureza a qual não pode ser abstraída pela geometria euclidiana, que passou a ser explicada através da ajuda da geometria fractal. Sob um outro ponto de vista existe a possibilidade, através deste conhecimento, de buscar e encontrar uma forma que seja semelhante a uma entidade viva ainda que sua função não seja adaptada. Concentrando-se seus resultados apenas no aspecto formal ou visual, abdicando dos avanços aos níveis funcionais e sustentáveis, neste caso, objeto da biomimética ou da biônica.

Andrade (2014), afirma que no conceito de biomorfismo (*Biomorphism*), as formas oriundas da natureza servem como fonte de inspiração estética e semântica para a criação de produtos, construções e obras de arte. É bastante recorrente que o biomorfismo se vale de estudos das proporções e da harmonia encontrados na natureza e, com base nisto, se habilita para a aplicação destes no design de produtos, na arquitetura e suas construções e em diversas composições visuais. A busca por proporções relacionadas entre si, trouxeram princípios como o da identificação de uma aparente unidade indivisível diretamente relacionada à harmonia entre as partes como essência da beleza da forma, a seção áurea, representada por uma constante algébrica cujo valor (arredondado) é 1,618, ou seja, o número áureo.

Especificamente, neste estudo, uma análise da biomorfose de frutos e sementes, como os de cascas dura, pode compreender, em detalhes, o processo de desenvolvimento das sementes e dos componentes estruturais que servem para sua dispersão e guarda do embrião vital sob determinadas condições ambientais até o momento de liberar tal desenvolvimento. O entendimento deste processo pode se concentrar na camada da superfície envoltória como uma estrutura com eficiência de material, de soluções de superfície e de invólucro do elemento propagador da sua espécie.

Conforme El-Zeiny (2012), projetos da natureza apresentam grande eficiência energética com os materiais disponíveis os quais são capazes de apresentar uma estrutura resistente para grandes áreas com uma pequena espessura de superfície, como é o caso de frutos e sementes de casca dura. Uma das principais funções das estruturas biológicas dos frutos de

casca dura é proteger o fruto interno, ou seja, as sementes com o embrião, cruciais para a reprodução e propagação da espécie. Esta proteção responde as várias influências do ambiente, incluindo as radiações solares, perda de água ou a danos mecânicos quer por animais e quer pelo impacto no solo quando os frutos maduros ou sementes se desprendem da planta mãe. As propriedades de proteção tornam tanto as morfologia, as superfícies e as paredes de frutos de casca dura um modelo interessante para o desenvolvimento de embalagens, materiais, componentes resistentes ou responsivos a ações do meio externo, etc.

### **1.1. Problema de pesquisa**

Este estudo apresenta como problema de pesquisa: quais os passos para sintetizar as formas naturais (padrões e estrutura) e suas geometrias de superfícies, como os frutos de casca dura, para a aplicação em métodos generativos como uma gramática da forma visando soluções aplicáveis em superfícies de revestimento?

### **1.2. Hipótese**

Através de diferentes processos visando a caracterização da biomorfose das superfícies de elementos da natureza, como as cascas duras de frutos, seus diferentes níveis de abstração das características formais e estruturais e suas inter-relações de geometria, é possível estabelecer uma gramática da forma resultando, através da parametrização, soluções múltiplas e variadas como alternativas projetuais.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo geral**

Desenvolver um repertório relacionado em regras próprias da natureza – soluções e princípios naturais, a partir das informações de elementos de modelos referenciais, para a análise de formas com base em abordagens de modelagem geométrica e de processos generativos como as gramáticas da forma (do analógico até os digitais) que se multiplicam pela parametrização (modelagem paramétrica).

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

- a. estimular o emprego de analogias biológicas na atividade projetual a partir do entendimento básico de soluções e princípios da forma natural;
- b. identificar as regras, modulações e padrões de repetição como solução formal existente, por meio da análise detalhada de frutos de casca dura;
- c. utilizar um repertório criado por regras próprias da natureza, elementos referenciais, visando identificar soluções geométricas para a criação de uma gramática específica;

- d. elaborar uma Gramática da Forma constituída por regras esquemáticas para a inserção de componentes compositivos a partir de exemplares referenciais da natureza - elaborar uma linguagem formal com a possibilidade de variações múltiplas;
- e. explorar as potencialidades de um sistema generativo para análise, discussão e proposição de soluções de texturas tridimensionais bioinspiradas na casca de frutos;
- f. propor a aplicação em painéis de revestimento produzindo textura tridimensional e também de variações em aberturas (perfurações), a partir de sistema de geração de formas através da parametrização com o uso de ferramentas digitais;
- g. mostrar que é possível ampliar o espectro de soluções parametrizadas a partir de ferramentas de programação visual abrangendo questões como a iluminação e radiação solar para painéis de revestimento de fachada através de outros *plug-ins* do *software* de parametrização;

#### 1.4. Justificativa

A realização de projetos bioinspirados possui um caráter sistemático que emprega analogias visando interpretar ou elucidar os princípios encontrados na natureza, após sua análise e reconhecimento, para que os mesmos possam ser aplicados posteriormente na solução de problemas projetuais (Arruda, 2002).

O projetista procura compreender tais princípios e regras intrínsecos às referências naturais os quais produzem uma determinada ordenação estrutural e organização de materiais complexos associados à eficiência e a uma estética própria.

O processo de transferência de informações de um modelo biológico para soluções de projeto prescinde de métodos e de tecnologias que ampliem o espectro do conhecimento biológico para que a solução bio-inspirada se aproxime do panorama diversificado do que a natureza apresenta.

As formas e estruturas da natureza apresentam um grau de complexidade que não podem ser apropriadas ou definidas por uma única ferramenta. Para tanto faz-se necessário o aporte de diferentes ferramentas e processos em uma metodologia não linear para que analogias entre a biologia e a tecnologia (aplicadas a engenharia, arquitetura ou design) possam produzir alternativas projetuais para solucionar problemas de projeto.

Uma multiplicidade de ferramentas, incorporando desde a observação mais simples pelo desenho até soluções mais avançadas da tecnologia, pode gerar uma linguagem baseada no entendimento da lógica matemática da geometria, como neste caso de superfícies de frutos de casca dura. Esta linguagem é traduzida em métodos generativos que se utilizam de uma

gramática da forma e da aplicação de princípios paramétricos capazes de gerar diversidade de alternativas referenciadas no modelo biológico estudado.

Os padrões da natureza, quer na forma como na superfície, quando aplicados a uma gramática da forma, se prestam a enriquecer a capacidade do projetista em gerar desenhos originais referenciados na biologia de forma subjetiva, a partir de investigações de regras geométricas obtidas considerando determinados princípios, tais como proporções e simetrias, como categorias estéticas.

Ao entendimento desta linguagem da natureza é possível aplicar uma gramática da qual possam trazer a variabilidade e flexibilidade de soluções para produtos e novas formas bio-inspiradas. É possível empregar algoritmos em sistemas de computação os quais possam montar diferentes cenários manipulando e transformando formas complexas de maneira muito rápida e precisa visando soluções adaptáveis, flexíveis e inovadoras.

A investigação do modelo biológico inspirador pode estar associada a um sequenciamento de passos, os quais métodos e técnicas que auxiliem a compreensão e apropriação das analogias e, desta forma, potencializa e estimula soluções múltiplas e inovadoras que incorporam diferentes graus de solução de problemas.

A natureza é rica em apresentar variações entre seus elementos, a maneira com a qual os organiza e sua geometria o que a tornam capaz de formar uma especialidade em cada estrutura e, neste caso, atuam na aplicação de uma gramática da forma bio-inspirada.

Investigar o modelo biológico em todo o seu espectro pode ter o auxílio de diferentes técnicas sistematizadas que, diferentemente dos caminhos convencionais, possa gerar variedade de alternativas dentro de uma mesma linguagem (gramática da forma).

Desta maneira, o processo de construção de objetos e soluções bio-inspirados, além do suporte da investigação do referencial da natureza, deve considerar diferentes técnicas de análise as quais possibilitem a geração e multiplicação de escolhas, como por exemplo métodos generativos, a serem aplicados como caminho projetual.

A biologia da natureza pode ser representada a partir de padrões da matemática de sua geometria e, para tanto, o projetista pode incorporar tais padrões nas soluções projetuais. Um conjunto de passos os quais possam ser percorridos até chegar à proposta bio-inspirada é uma metodologia de apoio ao projetista durante as diferentes fases de projeto.

Colocados estes fatos, fica evidente a importância deste estudo no que tange as contribuições para o entendimento das relações entre design e tecnologias com o fono em projetos bioinspirados.

### 1.5. Estruturação e organização do estudo realizado

A proposição da estrutura para este estudo, está organizada de forma sequencial em cinco capítulos, descritos a seguir:

- **Capítulo 1:** apresenta a introdução, as hipóteses de pesquisa e os objetivos do trabalho.
- **Capítulo 2:** revisão da literatura: levantamento bibliográfico sobre o estudo da natureza como fonte de inspiração (biônica, biomimética, bio-inspiração e biomorfismo), questões sobre as texturas e dobras em superfícies de objetos a partir de referenciais naturais e o emprego de elementos de plantas (sementes e frutos); geometrização de formas da natureza, gramática da forma e gramática da forma a partir das regras dos modelos naturais, parametrização da forma geométrica e uso de ferramentas computacionais de parametrização.
- **Capítulo 3:** materiais e métodos: apresenta o método de pesquisa adotado, descreve o objeto da investigação, identifica, caracteriza e seleciona as potencialidades dos modelos naturais referencias escolhidos – frutos de casca dura – como síntese de soluções formais e geométricas que as habilitam para a aplicação de Gramáticas da Forma - fundamentos teórico-analíticos para a análise formal;
- **Capítulo 4:** apresenta os resultados obtidos e as discussões: formulação das bases para o método de antecipação de alternativas;
- **Capítulo 5:** apresenta as conclusões, sugestões e possibilidades de continuidade da pesquisa em trabalhos futuros.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA (REFERENCIAL TEÓRICO)**

Neste capítulo, estão apresentadas as definições conceituais tomadas para a elaboração do estudo. Na revisão estão consideradas as questões que envolve a natureza como referencial de projeto, os fundamentos sobre métodos generativos, concentrando-se no entendimento da gramática da forma.

### **2.1. As estruturas biológicas como fonte de inspiração: origem, terminologia e nomenclatura**

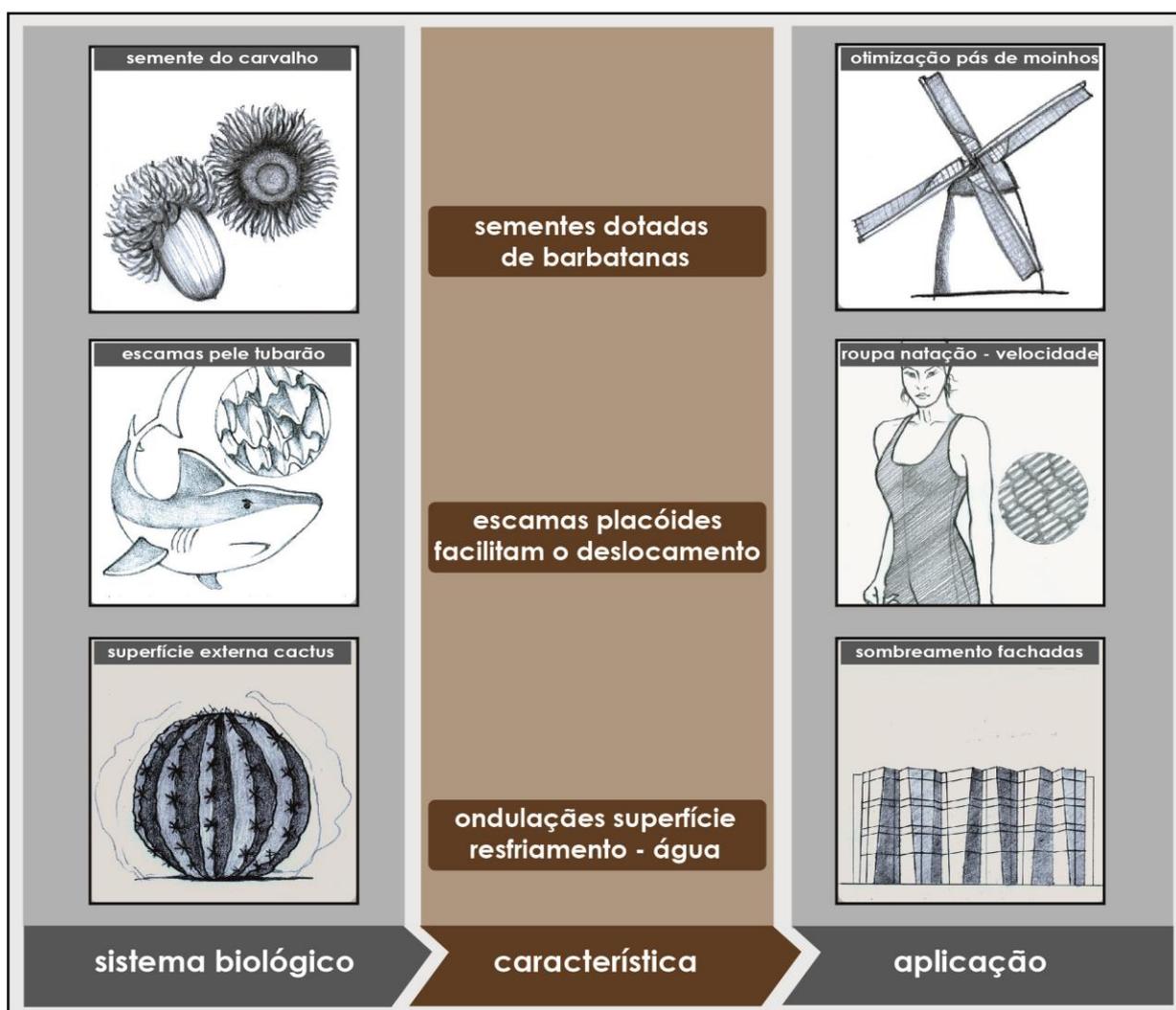
A incorporação da biologia como fonte de recursos para a solução de problemas enfrentados pelo homem remonta ao início da civilização. A produção de ferramentas, ainda que primitivas, aproveitando-se de galhos, pedras e ossos, dentre outros, tinha na natureza uma maneira de imitar ou de se inspirar conscientemente ou ao simples acaso. Sabe-se que a vida no planeta terra é resultado de processos evolutivos e da seleção natural ao longo de alguns bilhões de anos, quer pela adaptação dos seres vivos para a sua sobrevivência ou como resultado da melhor eficiência e funcionalidade que atravessam cada geração. Esta experiência da natureza, cujo tempo é muito superior ao do homem, ganhou expressão há mais de mil anos e vem a ser estudada há algumas décadas a partir de uma metodologia científica.

Além desse desenvolvimento, os mais recentes problemas sociais e físicos como o desperdício, o consumo e a escassez de materiais e energia, o impacto da emissão de gases, causado pelos processos artificiais, passam a ser objeto de estudo do potencial das soluções desenvolvidas pela natureza e sua aplicação em processos ou produtos. Integrar novas descobertas, buscar inspiração, estudar ou entender as teorias da natureza desde uma abordagem sustentável é associar-se a um processo de evolução considerando a sabedoria contida em princípios já resolvidos pela natureza.

O avanço deste conhecimento somado aos problemas contemporâneos pelos quais a humanidade atravessa, quer sociais como a pobreza e as condições de vida e quer físicos como o aquecimento global, tem feito com que o estudo da natureza ganhe evidência. A investigação e análise do potencial das soluções encontradas na natureza, apropriadas e acumulados ao longo de sua existência, para a aplicação em processos, sistemas e produtos vem ganhando espaços nos diferentes campos da ciência. Incorporar e integrar novas descobertas, recorrer a inspiração, estudo, análise e entendimento de princípios da natureza além da abordagem focada na sustentabilidade, acrescenta e incrementa o saber contido nas soluções adotadas pela natureza. Sua investigação poderá se iniciar por uma simples analogia avançando até o entendimento mais pormenorizado do seu funcionamento.

Conforme Kayat & Magalhães (2019), as analogias exercem um papel importante e estratégico para a resolução de problemas, tomada de decisão, percepção, memória, comunicação, criatividade e inovação. Uma das maneiras de sistematizar seu emprego no design é buscar a natureza como fonte de inspiração. Através de analogias com a natureza, as informações e o significado são transferidos de um sujeito particular (a natureza) para outro sujeito particular (produtos, formas, edifícios, ...). Um exemplo destas analogias pode ser visto na figura 1, a seguir.

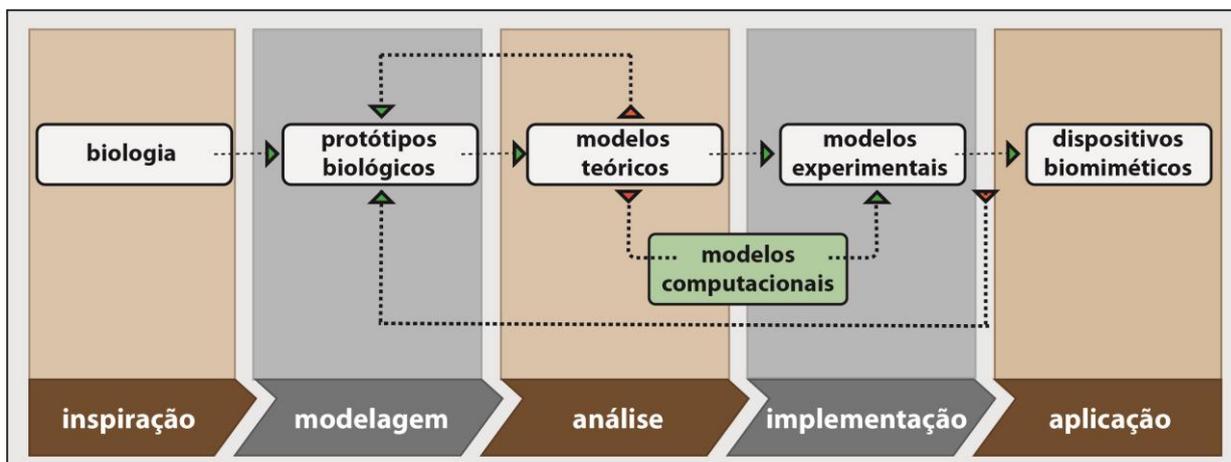
Figura 1: Exemplos de analogias naturais e soluções de aplicações úteis ao homem.



Em uma outra abordagem, a qual também trata de analogias com sistemas biológicos, é possível encontrar o termo Bioinspiração (*Bioinspiration*), que pode ser aplicado quando os fenômenos e aspectos da natureza servem de inspiração para o desenvolvimento de artefatos ou tecnologias pelo homem (BIGGINS *et al.*, 2011). O emprego de referências da natureza por similaridade, aparência visual ou forma conceitual serve para o desenvolvimento de soluções inspiradas na natureza, mas pode também se prestar como caminho para um

desenvolvimento de soluções sustentáveis. Para tanto, o projetista pode se ocupar de métodos para projetos bioinspirados como por exemplo o apresentado na figura 2, a seguir.

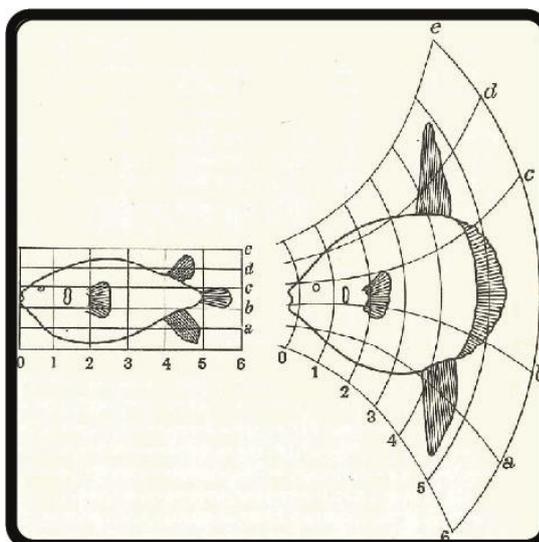
Figura 2: Método de projeto bioinspirado.



Fonte: adaptado de Hu *et al.* (2009).

Os pesquisadores e cientistas, mais significativamente a partir do início do século XX, tem buscado na biologia respostas para o equacionamento de problemas enfrentados pelo homem. Um exemplo de um destes pioneiros é o biólogo e matemático escocês Darcy Thompson que, em seu livro *On Growth and Form*, investiga as geometrias de organismos naturais apoiado em estudos de alterações de malhas (figura 3) capaz de inferir a dinâmica do crescimento e seus processos físicos, que pode ser apropriado por outros processos projetuais na obtenção de princípios referidos em analogias da natureza (THOMPSON, 1961).

Figura 3: Transformações geométricas de uma espécie de peixe, *Diodon*, em outra espécie, *Orthogoriscus mola*.



Fonte: *On Growth of Form*, Thompson (1961).

A natureza entendida como fonte de soluções para questões de projetos de produto tem sido tratada em áreas de conhecimento como a biônica. A biônica, conforme Bahamon & Perez (2007), é um processo projetual que remonta aos povos antigos e que inconscientemente a incluíam para o desenvolvimento das suas ferramentas, através de aprendizagens obtidas da natureza. Estes autores dizem que o homem teve nos animais uma fonte de inspiração para diferentes técnicas que o habilitaram em aplicá-las a diversos usos presentes no seu cotidiano. Um exemplo disto é a própria habitação onde o homem, na busca do local e forma de proteção, vai ao encontro de situações análogas em outros seres vivos que elaboravam ou escolhiam suas habitações, como o vespeiro, a toca do rato, o covil do urso, o corredor da toupeira dentre outros. Os autores afirmam ainda que considerando a forma pela qual Darwin demonstrava ser a vida como uma luta permanente pela sobrevivência, em que no final apenas as formas que melhor se adequam ao ambiente subsistem, o mesmo pode servir às analogias naturais nos elementos artificiais, em que a “seleção natural” não permite que, a longo prazo, aquilo que é ineficaz sobreviva.

Bonsiepe *et al.* (1984), afirmam que devido ao termo biônica ter sido empregado algumas vezes de forma equivocada, é preciso fazer uma separação entre a biônica tradicional e a biônica moderna, uma mudança de paradigma que surge desde o momento em que se começa a estudar e aplicar mais o comportamento análogo do que a forma análoga. Assim, o ponto de partida do modelo de análise biônica dos fenômenos formais da natureza parte da fonte de inspiração de um fenômeno natural, do qual se desenvolve uma solução projetual.

Mais recentemente surgiu a definição do termo biomimética como um pensamento sistêmico envolvendo projeto, biologia e todas aquelas disciplinas das quais surgem um desafio de projeto. Embora a bioinspiração possa ser um processo de projeto envolvendo a natureza como referencial, dele não envolve necessariamente a produção de soluções sustentáveis como a biomimética.

Benyus (1997), afirma que a biomimética tem por princípio o aprendizado e a compreensão da ordem natural das coisas, em uma compreensão holística do ecossistema visando promover uma real adaptação do homem ao meio. Para tanto, ela propõe a ampliação do conceito clássico de biomimética e de biônica através da delimitação em três abordagens, quais sejam:

- a natureza tomada como modelo;
- a natureza tomada como medida, ou seja, o emprego dos padrões da natureza como um critério capaz de classificar a riqueza de uma inovação;
- a natureza tomada como mentora, ou seja, a biomimética passa a ver e valorizar a natureza de forma sustentável.

A este respeito, Andrade (2014), afirma que, embora possam existir discordâncias entre os diversos autores no diz respeito às diferentes maneiras de apropriação do repertório de conhecimento acumulado na natureza, os quais podem servir para a concepção de soluções projetuais, parece ser consensual que a biomimética é capaz de contribuir significativamente para a inovação tecnológica ao se apresentar com exemplos e estímulos ricos em entendimentos que relacionam forma e função.

Em um entendimento generalista pode-se afirmar que a biônica tem como objeto extrair da natureza tudo o que pode ser útil ao homem e com a sua contemplação engendrar possibilidades de manipular e controlar tais princípios. A biomimética, por seu lado, não se concentra em retirar ensinamentos e princípios da natureza para aplicá-los ou manipulá-los, mas de entender o que se pode aprender com ela diante de um contexto mais amplo na qual o homem também pertence.

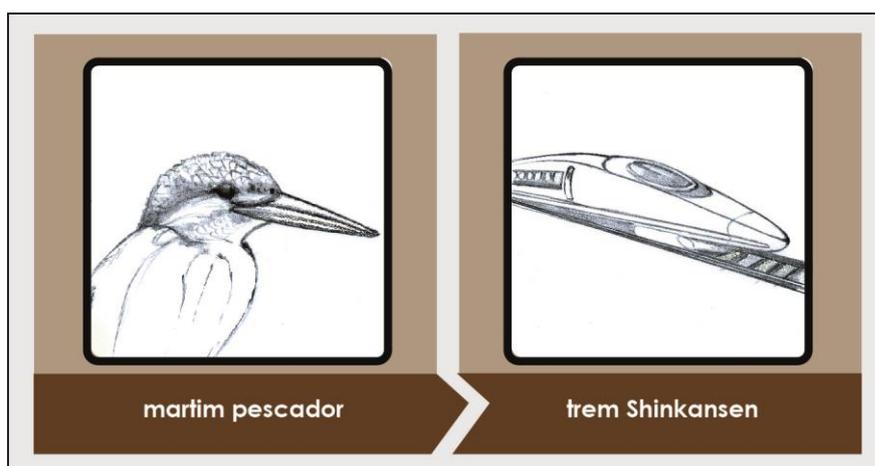
Agkathidis (2015), por seu lado, diz que os novos termos que procuram explicar dentro da natureza sua fonte, tais como zoomorfismo, geomorfismo e antropomorfismo, surgiram com o propósito de especificar uma a origem particular de inspiração ou mimese de cada caso (nestes, respectivamente: animais, geologia e humanos). Ainda que tais denominações terminológicas somente tenham aparecido já no século XX, a natureza sempre foi uma referência presente para os estudos artistas, posteriormente arquitetos e designers. A natureza comparece em tais estudos com um importante papel a desempenhar, mais do que forma e aparência, mas também da definição de proporções, ritmos e estrutura.

Bonsiepe (1978), define a analogia morfológica como a busca experimental de modelos elaborados da tradução das características estruturais e formais para transpor em projetos. Sendo assim, procura estudar e analisar o porquê da forma natural, as inter-relações da sua geometria, observando e compreendendo suas texturas, atentando para as características do *shape* (forma externa), das partes e componentes, dos detalhes de alguma parte a nível macro ou microscópico, assim como, para as suas formas estruturais.

Neste entendimento, o estudo da forma se encontrar em um primeiro estágio de compreensão da natureza, conforme as visões apresentadas pela biomimética e biônica, está longe de ser uma simplificação reduzida à estética. A este respeito Bonsiepe (1978), afirma que a análise de fenômenos morfológicos da natureza visa facilitar e estimular a capacidade de percepção de detalhes e princípios presentes em sua estrutura. Ideias inovadoras sobre sistemas e propriedades naturais já mostraram que nem sempre se traduzem apenas na estética, mas que a forma natural favorece também o ganho em outros fatores, como a eficiência. Um exemplo (figura 4), que pode traduzir este aspecto é o trem de alta velocidade Shinkansen, desenvolvido pelo engenheiro Eiji Nakatsu. Conforme Silveira *et al.* (2010) este projeto tem

como referência a forma do bico alongado do pássaro Martim-Pescador, forma esta que facilita o mergulho na água sem espirrar. O emprego desta analogia serviu para solucionar o problema da vibração e o ruído provocado pela alta velocidade. Como resultado obteve-se uma melhoria na velocidade, redução do consumo de energia e da pressão do ar em relação ao modelo anterior deste trem.

Figura 4: Analogia formal entre a forma do bico do pássaro martim-pescador resultando na forma do trem de alta velocidade Shinkansen.



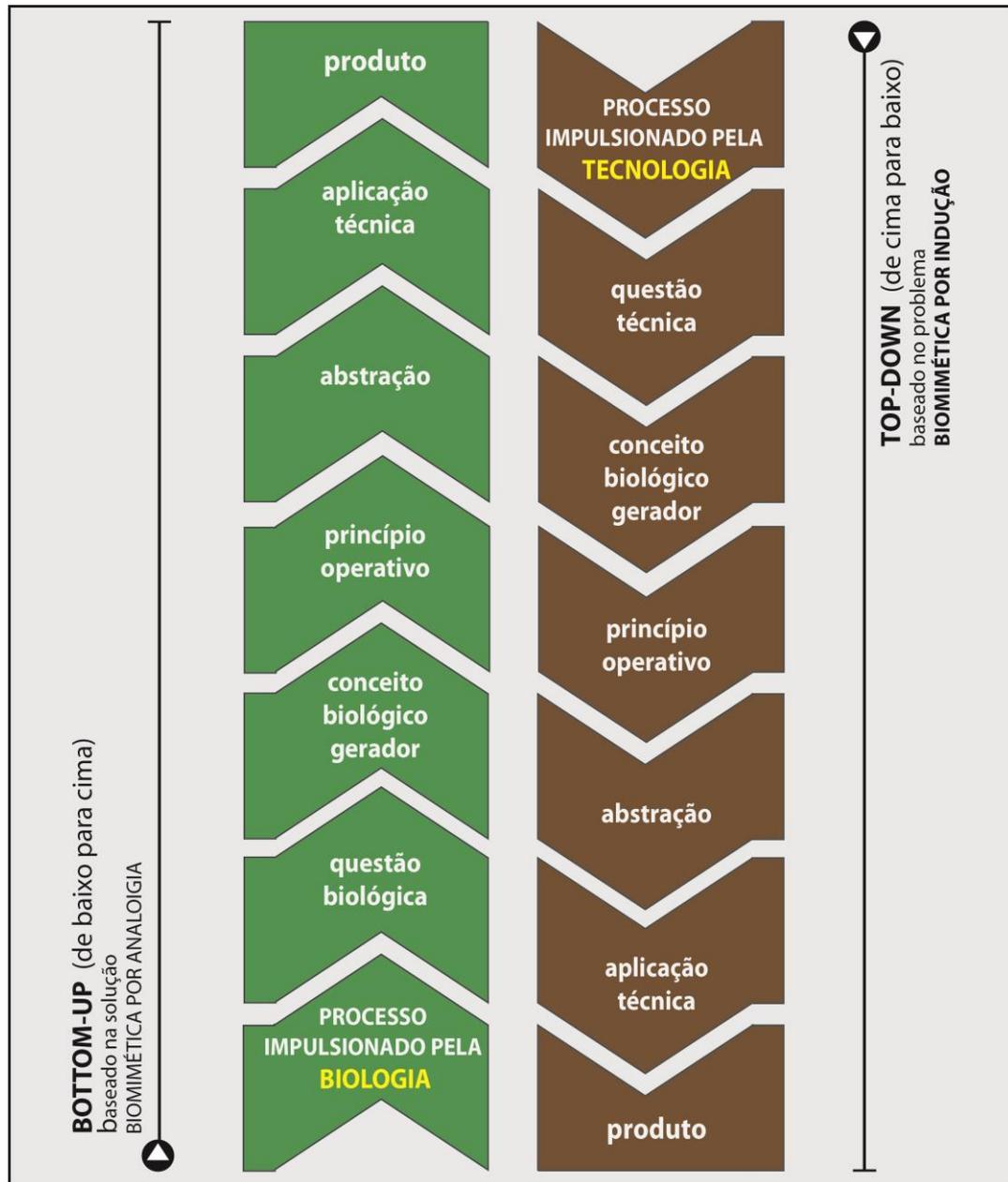
Conforme Agkathidis (2015), particularmente na arquitetura, o termo biomorfismo foi relacionado a formas inspiradas na natureza, ocorrendo naturalmente padrões e formas. Desta maneira, o design biônico pode ser visto como um aspecto de biomorfismo. Arquitetura biônica, ou biomimética, no entanto, implica não apenas os aspectos relacionados com a forma de mimetismo, mas as qualidades inerentes à construção como bem.

Conforme Andrade (2014) uma vertente mais recente da biomimética é o *Morphogenetic Design* (Design Morfogenético), um processo projetual que utiliza recursos computacionais para emular padrões de crescimento e hierarquia na concepção de projetos. Tais padrões podem ser encontrados em processos de formação estrutural de organismos ou no crescimento e diferenciação dos tecidos em seres vivos. A emergência destes padrões é resultado de um processo de crescimento interativo *bottom-up*, ou seja: hierarquicamente de baixo para cima, hierárquico.

Na concepção de Hensel *et al.* (2006), *apud* Andrade (2014) empregar esse processo no projeto de design pode tornar o seu resultado melhor a cada etapa, fazendo com que sua performance e capacidades passem a ser cada vez mais inter-relacionadas de maneira coerente e sinérgica. Em contraste, em um processo de design *top-down*, ou seja, hierarquicamente de cima para baixo, típico, onde o produto é fruto da simples escolha entre uma ou outra configuração, com um aumento na incerteza da coerência da organização.

Desta forma, pode-se afirmar que o primeiro método parte de uma questão de tecnologia, engenharia ou design, a partir do qual é realizada uma busca de soluções encontradas na natureza que, por analogia, possam ser capazes de encaminhar alguma solução. Enquanto que o segundo método parte do estudo de um elemento ou referencial da natureza para encontrar uma aplicação tecnológica no design ou na engenharia que possa conter tais soluções (figura 5).

Figura 5: Síntese das duas abordagens da Biomimética (*top-down* e *bottom-up*) descritas pela maioria dos autores na área.



Fonte: adaptado de KNIPPERS, et al., 2019.

No campo da arquitetura, pode-se ver muitos exemplos que são influenciados pela natureza. Construções como a forma dos galhos de uma árvore, analogias de flores, configurações de

rede, etc. inspiraram o pensamento de design arquitetônico desde há muito tempo. Esta inspiração pode ser observada de duas maneiras;

- para reproduzir um formulário com o objetivo em encontrar a forma;
- para transferir o processo de emergência de uma entidade da natureza (como material, forma, estrutura, etc.) para projetar o pensamento.

A maneira é apenas uma preocupação de encontrar formas e na maioria das vezes não se refere a uma abordagem funcional e ecológica. No entanto, o segundo caminho é uma abordagem diferente, que oferece observar e compreender a funcionalidade e a harmonia dentro da natureza. Poderia-se afirmar que o primeiro está no campo da biomorfose enquanto que o segundo está no campo da biomimética.

Gruber (2011), afirma que integração entre a biônica e o design arquitetônico, mais recentemente, tem incorporado tecnologias emergentes e ferramentas, como as paramétricas, algoritmos e métodos generativos de design. É comum saber que profissionais da arquitetura e da engenharia afirmem que suas proposições estão além da imitação da geometria e da ordem, mas atuem também em melhorar o meio-ambiente, o desempenho estrutural e material através do reconhecimento e aprendizagem dos mecanismos e propriedades encontrados em elementos na natureza e suas interrelações.

Conforme Özek & Yeler (2009), as capacidades de adaptabilidade do mundo biológico em seu funcionamento dinâmico são interpretadas como um modelo de "variabilidade" e "flexibilidade" de objetos, como por exemplo o arquitetônico. Este processo é dependente em sua auto-organização no que se refere aos objetos arquitetônicos e elementos como na vida da natureza. A montagem de cenários em programas de sistemas inteligentes, aqui tratando-se de sistemas computacionais e de realidade virtual, se transformam em critérios morfológicos, que resultam em uma função automatizada de soluções de flexibilidade do espaço e da forma arquitetônica.

No que se refere à viabilidade técnica, as construções da natureza se pautam pela similaridade elástica (como se expandem ou se deformam) e não pela similaridade geométrica. Entende-se, desta forma, que não seria possível aumentar-se continuamente a escala de um ser vivo, uma vez que isto acarretaria resultados biomecanicamente inviáveis, ainda que do ponto de vista de um mero desenho isto poderia acontecer. Pode-se dizer, assim que a escala é um fator fundamental que deve ser considerado quando se tratar da transposição de formas encontradas na natureza para artefatos tecnológicos (ANDRADE, 2014).

## 2.2. Os padrões de estruturas bio-inspiradas em plantas: as formas da natureza

Segundo Broecke (2000), as formas presentes na natureza são determinadas pela interação de forças intrínsecas e extrínsecas, ou seja, toda forma é um equilíbrio entre estas duas forças. Exemplo disto é floco de neve, onde as opções de formas externas são controladas pela simetria interna do arranjo atômico e a forma particular adotada pelo cristal é determinada pela ação do meio-ambiente (temperatura, pressão, umidade, etc.). Por detrás da aparente diversidade das manifestações da natureza, existe uma unidade apropriada que resultam de algumas combinações.

A pesquisa biológica e os modelos que perseguem a natureza informam cada vez mais que as soluções tecnológicas apresentadas são propostas por projetistas que procuram a natureza para se inspirar. Informações sobre o ambiente e seu comportamento, as condições, podem ser transferidas ao longo das gerações. Esta capacidade de adaptação também se relaciona com a alta resiliência das estruturas resultantes, com pressupostos como:

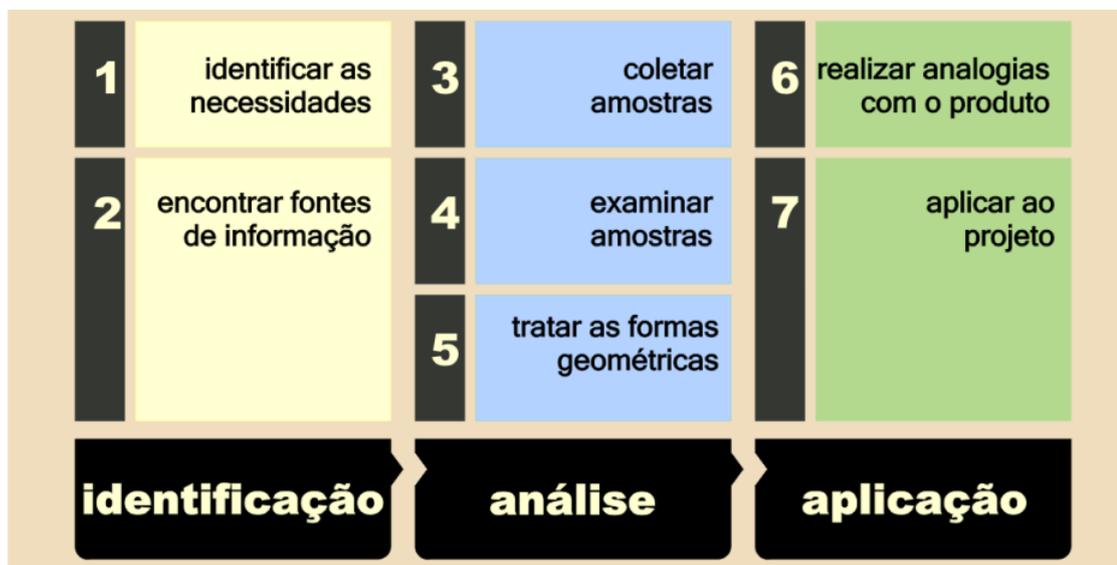
- o crescimento biológico assume materiais e recursos locais;
- materiais biológicos são produzidos em condições ambientais, não havendo a necessidade de energia e tratamentos de alta temperatura;
- estruturas biológicas são projetadas em vários níveis de escala, com hierarquias estruturais alinhadas, comandando soluções extremamente eficientes, leves e diferenciadas com propriedades de materiais emergentes;
- em muitos organismos, condições prévias de crescimento e suas fases podem ser claramente discernidas, e o crescimento adicional (diferente da propagação) é baseado em um tecido existente;
- organismos biológicos geralmente crescem ao mesmo tempo. A funcionalidade é mantida durante os processos de crescimento (GRUBER & IMHOF, 2017).

A biônica caracteriza-se como uma ciência multidisciplinar que estuda e aplica elementos naturais no desenvolvimento de novos produtos e na resolução de problemas técnicos (KINDLEIN JÚNIOR & GUANABARA, 2005). Tais elementos compreendem sistemas estruturais, funcionais, organizacionais e inter-relacionais, que podem ser estudados matematicamente e, portanto, ensaiados com redução em suas variáveis. Os autores apresentam uma metodologia para que se possa organizar os conhecimentos do estudo da biônica, facilitando a organização em uma lógica sequencial de etapas básicas para o projeto de novos produtos a partir da biônica, conforme mostra a figura 6, a seguir.

Esta metodologia está dividida em três etapas principais. Uma primeira etapa, a identificação, ocupa-se com a identificação das necessidades de projeto ao qual se deseja encontrar alternativas na natureza, assim como selecionar características naturais que possam ser

aplicadas em projetos. Obter fontes de informação podem ter como referências pesquisas, dados de materiais, métodos de estudos entre outros (KINDLEIN JÚNIOR & GUANABARA, 2005). A segunda etapa diz respeito às amostras, sua coleta, exame, preparação e observação.

Figura 6: Etapas básicas de identificação, análise e aplicação de design de produto baseado no estudo de biônica.



Fonte: Adaptado de Kindlein Júnior & Guanabara (2005).

Pode-se dizer, que ultimamente com o uso do ambiente virtual pode acontecer o tratamento das formas geométricas, através da parametrização do elemento da natureza tomado como referencial de estudo, com a edição destas informações através de recursos computacionais, de forma a desenvolver a partir de parâmetros dos dados adquiridos e, ao mesmo tempo, simplificar as formas pelo regramento matemático de geometrias e padronagens capaz de identificar determinadas características. Na etapa de aplicação (etapa 3), são realizadas as analogias do sistema natural com suas aplicações, através de análises que podem ser: funcionais, morfológicas, estruturais as quais podem viabilizar tais informações em um sistema ou produto, assim como sua validação.

### 2.3. Materiais e formas leves como solução de design sustentável

Conforme Maluf (2013), investigar a ideia de leveza no campo do design pode resultar em dois aspectos: o qualitativo 'leve', que se aplica a aspectos físicos objetivos sobre a matéria, e também um aspecto que pode adquirir sentido subjetivo (algo simples). Essa dualidade vem ao encontro da própria tensão que existe tradicionalmente no design entre sentidos subjetivos de coisas objetivas.

Por outro lado, Manzini (1993), afirma que, ao referir-se a um objeto leve, deve-se considerar uma das categorias a qual deverá estar associada, pressupondo-se ideias como:

- a. a dos objetos cuja leveza é um desempenho primário e em torno da qual se organiza uma grande parte da sua produção;
- b. a dos objetos que se tornam mais leves como efeito secundário das vantagens econômicas proporcionadas por tecnologia mais evolutiva;
- c. a dos objetos que se tornam de fato mais leves, embora não o mostrem, visto que existe um código linguístico que exige uma imagem de peso.

Os referenciais da natureza tomados para este estudo podem considerar a leveza observada do ponto de vista material, ou seja, dos aspectos físicos e morfológicos do material como por exemplo a densidade ou a espessura. Um outro aspecto a ser pensado é o da leveza como propriedade contextual do objeto, ou seja, o objeto assume características cuja leveza possa ser entendida como sua identidade a partir de fatores formais, visuais e estruturais, além do aspecto material.

Por outro lado, conforme Beukers & Hinte (2001) *apud* Maluf (2013), fazer as coisas leves não diz respeito a escolher materiais leves pois, além da escolha dos materiais, suas construções precisam ser eficientes para serem passíveis de uso real. Outros aspectos contornam a leveza física do objeto de design, especialmente a relação entre forma, material e processo, uma vez que todo o artefato é resultado de um processo que transforma o material em forma. Objetos mais leves não são necessariamente, feitos a partir dos materiais mais leves.

Contribuindo com isto, Manzini (1993), investiga os princípios estruturais da leveza na escala do objeto, da superfície do material e na sua escala molecular. Fazer objetos leves é uma questão de pensar na estrutura, a relação material/forma. O emprego de vincos ou dobras, como por exemplo, em uma folha de papel que, ao ser vincada, transforma-se de um objeto flexível em uma estrutura dotada de certa rigidez; o material não sofre qualquer alteração qualitativa ou quantitativa, mas a rigidez é obtida pela simples alteração da forma.

Diante de um quadro de esgotamento das fontes de recursos naturais, a redução do consumo de material para a produção de objetos tem na leveza destes uma maneira de identificar os fluxos de consumo de material, energia e da geração de resíduos. Neste sentido Beuker & Hinte (1998), conduzem a ideia do peso como problema e a leveza como desafio para uma economia sustentável. Se as estruturas e os produtos são leves, empregam significativamente menos energia, garantindo o desempenho mais útil, redução na queima, da infraestrutura – não apenas estradas, mas também infraestruturas de energia e água. Assim como a escolha do processo produtivo e as soluções formais que possam obter o máximo da relação leveza e resistência, aproveitando-se dos recursos das soluções de design e tecnologia.

#### **2.4. A superfície dos materiais como fator de desempenho do objeto – a natureza como referência**

A engenharia de materiais é um campo amplo que tem produzido uma enorme gama de materiais para satisfazer um também vasto conjunto de funções. Muitos dos materiais, até agora desenvolvidos, têm qualidades excelentes no que diz respeito à sua função. Materiais naturais ou seus derivados, ainda são amplamente utilizados, em parte por causa de seu baixo custo de obtenção e disponibilidade, mas também porque têm características específicas que as tornam superiores a alguns materiais produzidos de maneira sintética, ou mesmo materiais compósitos artificiais. Estes materiais naturais não recebem a classificação como "de materiais de alto desempenho", embora tenham atributos, como densidades, muito menores do que a maioria. Eles são bem sucedidos não tanto por causa do que eles são, mas por causa da maneira em que eles são constituídos; os compostos podem ser legitimamente considerados como a chave para o sucesso de materiais biológicos (BEUKERS & VAN HINTE, 1998).

Por seu lado a natureza também apresenta excelentes exemplos de como as superfícies dos diferentes seres vivos representam soluções funcionais contribuindo para a melhoria do desempenho dos organismos. Segundo Smith *et al.* (2015), entende-se superfícies funcionais como as texturas microscópicas e químicas embutidas em materiais biológicos que possuem um grande número de funções variáveis. Colaborando com isto Katthick & Maheshwari (2008), em seu estudo sobre a superfície das folhas da flor de lótus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.), afirmam que as mesmas ao possuírem microscópicas saliências com material ceroso permitem a água escoar para fora da folha levando junto a sujeira e suas partículas.

Os materiais, com os seus vários pontos fortes, acabamentos e funções, são a base de todas as indústrias, mesmo aqueles que envolvem produtos e serviços intangíveis. Desta forma a criação de materiais que proporcionam um desempenho superior a um custo mínimo é fator importante para a economia dos negócios. Organismos, que produzem seus tecidos em condições ambientais usando materiais disponíveis localmente e com baixo consumo de energia, são exemplos de utilização eficiente dos recursos para a fabricação de produtos. A natureza construiu, ao longo de sua existência, materiais com uma enorme gama de funções as quais são difíceis de serem mimetizados pelos diferentes materiais sintéticos produzidos pelo homem. A natureza faz isso através de uma precisão em escala muito reduzida, utilizando relações como de elementos químicos em diferentes proporções e arranjos atômicos muito mais complexos do que os materiais sintéticos.

Projetos, como de arquitetura de ambientes, tem se ocupado da questão de adicionar ou retirar calor, de ventilar o fazer o ar circular e de iluminar de forma eficiente. Isto tem feito com que, no caso dos países de clima quente, edifícios tenham que adotar um maquinário de

operação em escala industrial. Fluxos e flutuações de calor são gerenciados e determinam a eficiência da solução de um projeto e esta termo-regulação pode ser dispendiosa tanto para fabricantes como para usuários-consumidores. No entanto, a natureza como fonte de inspiração, mostra que muitos organismos desenvolveram estratégias de baixo consumo de energia para manter a temperatura corporal constante, apesar das flutuações da temperatura em seu habitat, enquanto que outros desenvolveram métodos para funcionar apesar das temperaturas extremas. Isto tem sido visto ultimamente, com o aquecimento global, onde estudos têm mostrado as alternativas de adaptação de alguns seres vivos a isto.

Smith *et al.* (2015) dizem, a este respeito, que plantas e animais em regiões de climas quentes normalmente são dotados de áreas de superfície relativamente grandes em relação ao seu volume e, por outro lado, em climas frios se apresentam organismos com áreas de superfície relativamente pequenas. Além disso, os organismos contêm ramificações, como teias de veias e outros canais contendo fluídos para troca de calor com seu entorno. São duas estratégias que podem sugerir ao homem soluções de formas de adaptação a transferência de calor convectiva em edifícios, processos de fabricação, e máquinas avançadas. Estas soluções apresentadas podem ser comparadas àquelas que, em processos industriais, incorporam canais de refrigeração internos em seus moldes de injeção, imitando sistemas vasculares para remover o excesso de pressão térmica.

Por outro lado Gruber *et al.* (2011) afirmam que a diferenciação entre material, estrutura e superfície deixou de ter validade quando se quer trabalhar com a natureza como modelo. A investigação e o desenvolvimento tem lugar em mais de uma escala; de modo que, por exemplo, o tema da eficiência energética esteja fortemente ligado à influência da nanotecnologia. A nanotecnologia é a disciplina da pesquisa e manipulação de materiais em escala de moléculas e átomos, proporcionando inteiramente novas possibilidades para o desenvolvimento de materiais com propriedades desejadas. O uso de materiais inteligentes que podem reagir às mudanças nas condições ambientais já tornaram-se comuns na indústria de edifícios. Soluções da auto-limpeza ou de superfícies mais fáceis de limpar, são aplicadas na indústria do vidro assim como no revestimentos de materiais de construção e produtos. Existem outras funções já disponíveis como as do revestimentos de superfície nanotecnológicas como o anti-reflexo, a transparência comutável e escurecimento fotocromático do vidro, anti-impressão digital, proteção contra incêndio, anti-bacteriano, a limpeza de ar e as microcápsulas para fragrâncias. Auto-cura, auto-reparo e autônomos e o fornecimento de energia são funções que já exigem nano-estruturas, além da superfície revestimento.

As superfícies biológicas representam a interface entre os organismos vivos e o meio-ambiente e servem para muitas funções diferentes: delimitar as dimensões, dar forma ao organismo e proporcionar estabilidade mecânica ao corpo; ser barreiras contra os ambientes secos, molhados, frios ou quentes; tomar parte na respiração e no transporte de diversas secreções, e servir como um reservatório para o armazenamento de produtos químicos de resíduos metabólicos; uma variedade de estruturas de superfície são partes especializadas do sistema mecano e quimiorreceptores; a coloração e componentes químicos de superfícies são componentes importantes para a termorregulação e são frequentemente envolvidos em diversos sistemas de comunicação. Uma série de estruturas de superfície são especializadas e podem servir a uma variedade de outras funções, tais como a retenção de ar, trituração de alimentos, limpeza corporal, etc. (GORB & BAR-COHEN, 2005).

Conforme Gorb & Bar-Cohen (2005), ainda, as superfícies biológicas escondem um potencial praticamente inesgotável de ideias tecnológicas para o desenvolvimento de novos materiais e sistemas. Por causa da grande diversidade de funções, de inspirações para superfícies biológicas pode ser interessante a uma ampla gama de tópicos em ciências de engenharia: adesão, atrito, desgaste, lubrificação, filtragem, sensações, fenômenos umectantes, auto-limpeza, anti-incrustantes, termorregulação, ótica e tantos outros. O que demonstra que as superfícies biológicas são multifuncionais, o que as torna ainda mais interessantes do ponto de vista da biomimética.

Um exemplo disto Vaucher (2003), descreve o significado da casca para a árvore, esta a protege de ameaças externas como a chuva, neve, granizo (além do calor, geada e os raios ultravioleta) e que não podem atingir ou danificar o macio e vulnerável câmbio vascular. Esta proteção contra invasões, isolamento, proteção contra incêndio, proteção da água com permeabilidade, mais capacidade de armazenar resíduos e dos transportes nutrientes se assemelha ao anúncio de um edifício com uma fachada eficiente.

## **2.5. Superfícies vincadas dos materiais: características morfo-estruturais**

O problema em associar a resistência das superfícies destinadas a suportar uma determinada carga ao material ou forma tem tido uma investigação constante. Substituir materiais escassos pode resultar em processos dispendiosos ou de um número excessivo de partes que geram volume, peso e manutenção complexa, mas é sempre uma tarefa exaustiva do design de produto. Uma das possibilidades que se apresentam é o emprego das superfícies dobradas ou vincadas. Isto diz respeito a superfícies delgadas que através de dobras ou vincos aumentam, em muito, sua resistência sem a necessidade de aumento do material. A associação entre a forma e a alocação destas dobraduras é capaz de produzir objetos leves a partir de soluções que aumentam a resistência da sua superfície.

A combinação de geometrias com vincos ou dobras presente nas superfícies das paredes da casca de alguns frutos ou sementes pode, ao mesmo tempo, trazer a contribuição para uma expansão dos seus princípios de funcionamento em outras aplicações em objetos e superfícies. Soluções como os princípios de vincos ou dobras podem aumentar a capacidade resistente de uma superfície ou material sem que ocorra a necessidade de aumentar sua espessura ou número de camadas.

Na natureza as dobras e vincos estão muito presentes em insetos, asas de pássaros, folhas e flores de plantas. São caracterizadas por estarem presentes em estruturas leves que precisam resistir a grandes esforços, como o vento, precisam se sustentar em movimento ou que devam ser dobradas para economizar espaço quando não estão em uso e a empregar habilidades aerodinâmicas (o caso das asas). Algumas folhas e flores funcionam com um padrão de vinco como se fossem um origami, uma sequência de dobras até chegar ao seu formato final. As dobras se caracterizam pela mudança de direção de um plano, o que lhes confere a resistência sem alteração no material, quando desaparece a situação de dobra para a plana ela deixa a marcação ou a delimitação do plano em uma linha a qual pode-se denominar de vinco. Isto pode servir como bio-inspiração para formas projetadas a partir de materiais leves.

As características básicas das estruturas vincadas são fornecidas pelas linhas de dobraduras que distinguem sua superfície. Isto, de certa forma, apresenta uma ligação com os princípios do origami, o qual possui muitas formas de realizar dobraduras a partir de um material tão esbelto que é a folha de papel. A geometria resultante destas dobras é o que conduz a rigidez ou resistência da forma. Isto, como na forma da semente de Jupati, apresentada adiante, poderá apresentar indicadores para os métodos de design da forma resultante.

A este respeito Rocha (2000), afirma que as estruturas tridimensionais por vincagem mostram como, a partir da flexibilidade de uma superfície plana como o papel, é possível organizá-la, conferindo-lhe consistência.

Conforme Lee *et al.* (2011), dobrar algo é colocar uma parte em volta de si mesmo, neste sentido, a dobra não é nem subtrativa e nem aditiva, mas em vez disto é auto-referencial. O momento mais intrigante da dobra é quando ultrapassa de uma dimensão para outra. Por exemplo, ao se amassar um pedaço de papel o qual assume as propriedades de uma forma tridimensional, este papel passa ser ao mesmo tempo uma superfície bi e tridimensional. Com uma combinação de dobras simples um pedaço de papel pode como, por exemplo na arquitetura, abordar dois aspectos fundamentais: servir ao mesmo tempo de estrutura e como revestimento.

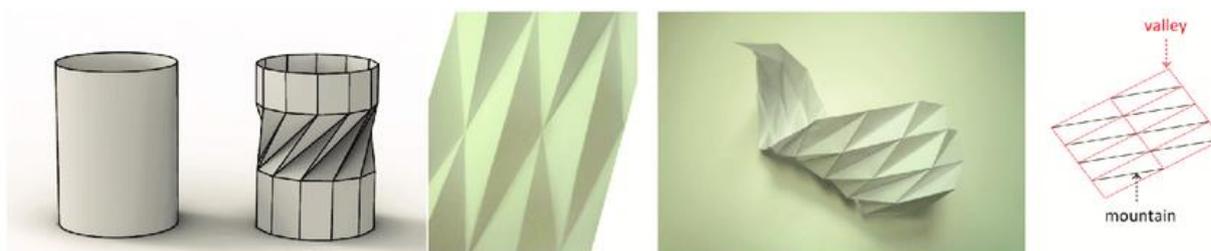
Concomitantemente com suas propriedades mecânicas, alternativas de aplicações poderão ser estendidas através de estruturas que se aproveitam da textura de sua superfície para tal. A textura da superfície, tais como ondulações, dobras ou vincos podem ser úteis para paredes de superfícies esbeltas podendo melhorar o desempenho ao esforço aos quais estejam submetidos. A textura deverá observar soluções de posição, escala ou grão no material da superfície de objetos de forma a contribuir para melhorar seu nível estrutural.

Pesquisas em formas da natureza apontam este caminho, como as conchas marinhas, cujas formas e características de suas superfícies combinam requisitos de pouca espessura do material, leveza e resistência. Observar na natureza, como a flora, especialmente no invólucro de frutos cujas cascas possuem a função de suportar cargas garantindo e protegendo o material genético da semente. Isto poderá apresentar possibilidades formais outras, especialmente na aplicabilidade na produção de objetos, de formas complexas como a cilíndricas de forma direta ou de objetos de outras formas buscam analogias de soluções presentes nestas cascas.

### 2.5.1. Dobras e vincos como elemento de enrijecimento de placas

As estruturas vincadas podem ser definidas como estruturas tridimensionais compostas por elementos de superfície planos unidos em conjunto ao longo de suas bordas para, desta maneira, suportar a carga espacial. As dobras obtidas em superfícies planas e delgadas proporcionam uma solução de leveza e ao mesmo tempo de determinada rigidez. Desta forma esta estrutura modular pode cobrir grandes espaços ou vencer grandes vãos com seus componentes estruturais, as placas vincadas, de espessura bastante fina, conforme exemplifica a figura 7, com soluções que podem, por exemplo, serem aplicada a produtos e à construção de edificações.

Figura 7: Princípios das estruturas vincadas aplicados a placas delgadas.

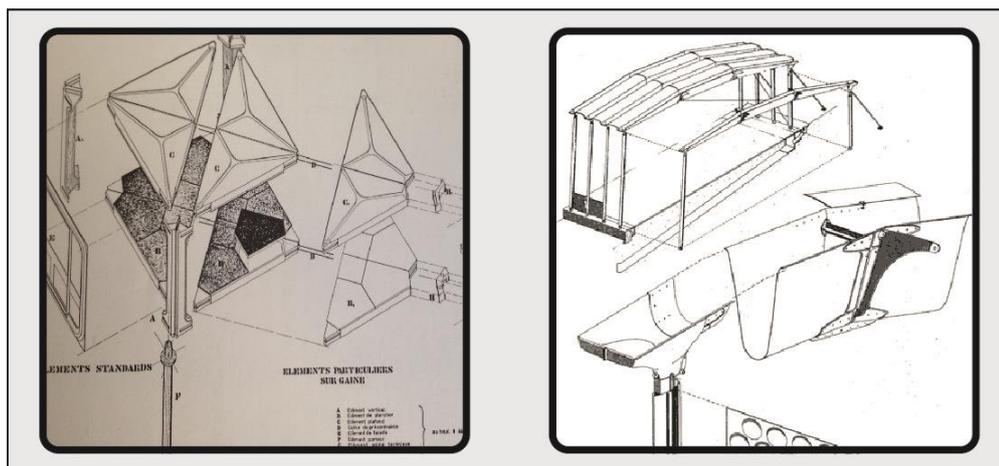


Fonte: STAVRIC & WILTSCHE (2014).

A economia de material associada a um baixo peso pode ser comparada a modelos da natureza os quais observam os mesmos princípios. Exemplos disto são as asas de insetos que por sua rigidez e dobras permitem que eles voem sem a carga excessiva de suas asas que são compactas e dobráveis. As folhas de plantas, especialmente de algumas árvores

como as de palmeiras que apesar de sua altura tem as folhas como estruturas dobráveis que se sustentam com a necessária a rigidez e a estabilidade. Na engenharia de produtos e de edifícios estas soluções são exploradas de muitas formas, desde os perfis em chapa dobrada em determinados formatos “C”, “U” ou “Z”, em telhas ou chapas trapezoidais ou mesmo com o enrijecimento de placas por vincos, soluções que remontam aos experimentos do arquiteto francês Jean Prouvé em meados do século XX, conforme a figura 8, a seguir.

Figura 8: Experimentos do arquiteto Jean Prouvé em chapas dobradas.



Fonte: adaptado de Pedreschi (2008).

As características estruturais das formas vincadas dependem do padrão de vinco ou dobra, sua forma geométrica básica, o material, a conexão dos diferentes planos de dobramento e os seus vínculos de apoio. As formas estruturais vincadas podem ser divididas em estruturas de superfícies de placas vincadas, estruturas em quadros de placas vincadas e estruturas de chapas dobradas espaciais.

Conforme Lebée (2015) existe uma diversidade extremamente ampla de formas dobradas, no entanto, as aplicações da vida real não são tão comuns, especialmente pela simplificação e seu entendimento apenas nas formas da geometria pura. Um caso típico da complexidade é o do movimento de dobramento em uma estrutura desdobrável na qual a espessura das faces deve ser levada em consideração, especialmente quando a dobra está quase fechada e acontece o contato entre as faces antes de completar o fechamento da dobra. É, portanto, necessário o entendimento de um processo baseado em técnicas de dobragem para que se produzam as formas dobradas adequadas, uma vez que elas envolvem uma cinemática bastante complexa. Existem vários graus de complexidade ao dobrar, a partir da dobra simples; a cinemática é direta, em dobras complexas, onde todas as dobras podem ter movimento no mesmo tempo a dificuldade do complexo aumenta.

O fechamento de uma superfície dobrada é inevitável porque o dobramento está transformando continuamente uma superfície plana em um espaço tridimensional. Lebée (2015) afirma, ainda, que uma forma dobrada não é uma estrutura, mas sim um mecanismo. Isso contradiz o senso comum de que as estruturas vincadas ou dobradas são estruturalmente eficientes. Na verdade, a chave para transformar uma superfície vincada em uma estrutura consiste no fechamento deste mecanismo. Esta espécie de encerramento do processo está, muitas vezes, implícito em aplicações práticas.

A subdivisão gradual das placas vincadas ou dobradas aumenta o número total de costuras que direcionam as linhas de força que respondem aos momentos de flexão da estrutura. Quando a superfície é dobrada, o aumento da profundidade de cada uma das dobras aumenta a sua resistência global, permitindo que a superfície da placa funcione como feixe. Uma outra maneira de aumentar a resistência deste tipo de placa é reforçar as dobras com mais material constituindo-se em uma espécie de nervura linear associada as quais direcionam as cargas ao longo de suas superfícies e ao longo destas nervuras. Para introduzir flexibilidade à superfície, variando o perfil da geometria, essas subdivisões (tesselação - recobrimento de uma superfície com polígonos) poderão ser tanto horizontais como verticais.

Conforme Jackson (2011), a partir de chapas, placas, lâminas e todo o tipo de material no formato plano de uma folha, podem-se obter diferentes objetos. A criação da maioria dos objetos acontece partindo-se de um material básico, apresentado na forma de uma folha laminar (metal, plástico, madeira, tecido ou papel) ou fabricado a partir de componentes para que se possa obter a forma de uma folha plana (como tijolos formam uma parede ou telhas um telhado), desta forma a vincagem ou dobradura pode ser considerada como uma das técnicas de concepção da forma espacial mais simples.

A maneira de apresentação da dobradura ou da forma vincada, de natureza sensorial e exploratória, é essencialmente tridimensional. Uma determinada lâmina ao ser dobrada, uma folha de papel, por exemplo, transforma-se o plano bidimensional em estrutura tridimensional; processa-se uma passagem da folha à forma. Através de procedimentos básicos como vincar ou dobrar, o papel é estruturado, o que permite a experimentação da forma tridimensional, exercício fundamental em design e arquitetura, uma vez que envolve o raciocínio e visão espacial, fundamentais no processo criativo (LODDI, 2014).

A configuração geométrica em vincos em uma folha de papel antes do dobramento, as propriedades topológicas do papel de origami em modelos tridimensionais, assim como as membranas em geral podem ser consideradas superfícies de espessura mínima. Os princípios que regem a arte e a matemática do origami podem encontrar aplicações na

concepção e design de estruturas em uma membrana transformável para arquitetura (LIAPI, 2002).

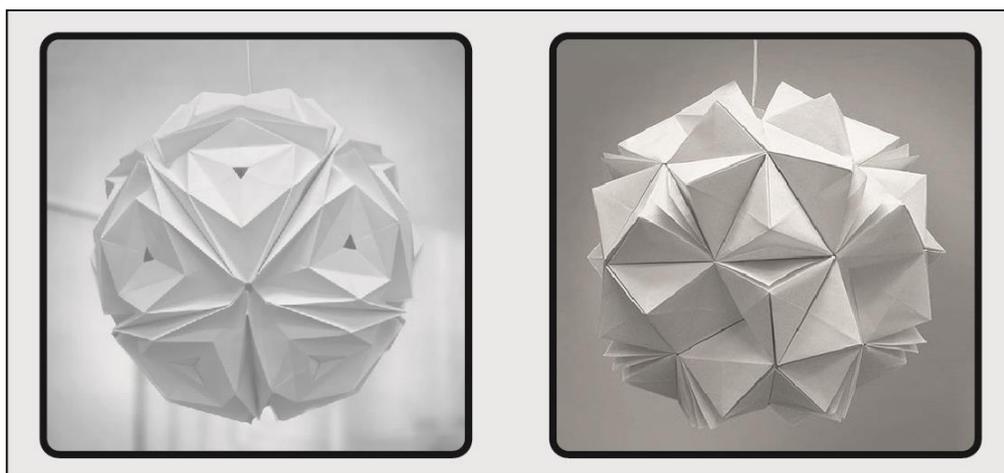
### **2.5.2. Padrões de textura (ondulações, vincos, dobras e ranhuras): solução estrutural para elementos de espessura delgada**

A elaboração de padrões de textura (ondulações, vincos, pregas, ranhuras) pode trazer para as estruturas de paredes esbeltas (finas) uma modificação nas suas propriedades mecânicas além de soluções de flexibilidade como para acomodar tensões térmicas, melhora nas reações de flexão, assim como na solução dos padrões estéticos de textura. Rocha (2000), diz que os resultados da vincagem podem assentar em superfícies planas, prismáticas, piramidais, cilíndricas, esféricas, cônicas, parabolóide-hiperbólicas, etc. Com tais resultados podem obter-se diretamente do trabalho da produção de vincos ou ainda pela subsequente aplicação de tensões.

Existem muitos exemplos disto, como é o caso de luminárias que empregam papéis ou materiais muito delgados aproveitando os princípios de dobras e vincos gerando uma forma resistente. A figura 9, a seguir, traz uma solução do designer Jiangmei Wu, a qual guarda semelhança formal com o fruto da palmeira Jupati, apresentada neste estudo.

Rocha (2000), afirma que as formas organizadas obtidas por este processo podem ter virtuais aplicações em campos do design, nomeadamente coberturas, estruturas, embalagens e até na pesquisa espacial.

Figura 9: Luminárias em papel reciclado e lâmpadas LED empregando técnicas originais de dobradura de origami.



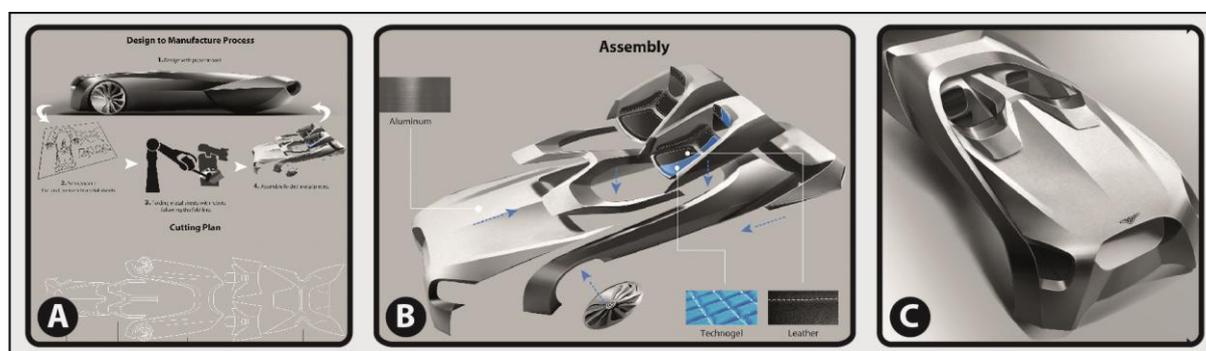
Fonte: adaptado de WU (2016).

Conforme Lebéé (2015), a classe mais geral das dobras são as dobras curvas, onde o vinco produzido pela dobra não é uma linha reta e sim uma curva, o que gera uma compreensão mais complexa da dobradura e uma difícil descrição destas geometrias. Atualmente, existem

programas gráficos de simulação capazes de permitir a exploração promissora de dobras curvas. Um exemplo disto é o modelo de automóvel desenvolvido pelo designer Kyungeun Ko para a fábrica de automóveis Bentley cujo protótipo, conforme a figura 10, foi produzido pela empresa Robofold que desenvolveu robôs especializados em dobras curvas.

Este processo de montagem, onde poucos robôs dobras e moldam uma carroceria a partir de uma folha de alumínio mostra a possibilidade de produzir formas aerodinâmicas e mais fluídas do que seria a construção considerando a modelagem em argila. Aliado a este fato poderá obter-se a redução de custos financeiros e do impacto ambiental, ou seja, o sistema de dobras a partir de superfícies esbeltas.

Figura 10: Modelo de automóvel, desenvolvido por Kyungeun Ko para a empresa Bentley, prototipado pela empresa RoboFold. Processo de produção **(A)**, processo de montagem **(B)** e carroceria montada **(C)**.



Fonte: adaptado de RoboFold (2016).

James (2008) afirma que as estruturas superficiais, realizadas pela repetição de vincos de uma única superfície ou folha, podem transformar-se facilmente entre uma configuração estrutural estendida (estado ativo) e um invólucro compacto (fechamento). Estruturas de superfície, por sua vez, agem como placas rígidas articuladas, permitindo comportamentos cinéticos desde que o sistema atue como um mecanismo definido pela matriz das dobras. As dobraduras tem sido uma ferramenta para a exploração morfogênica de programas e no espaço e, em menor medida, como a investigação de um revestimento (pele) estrutural.

As estruturas vincadas, também conhecidas como superfícies ou cascas plissadas ou dobradas constituem-se em uma alternativa bastante econômica, tanto em material como em peso próprio, para a sua aplicação em construções com montagem rápida, as quais baseiam-se em princípios da mecânica e da geometria que são aplicados a uma superfície de folha única. Neste caso as dobras ou vincos aplicados ao material assim como a espessura da própria folha estão comprometidas com a integridade estrutural do sistema.

Conforme Solomon *et al.* (2012) muitos objetos fabricados, tais como aqueles feitos em folhas de metal, papel, papelão, madeira compensada e outros, são feitos anexando juntas peças

evolutivas. Em geral, essas construções são bastante próximas das superfícies desenvolvíveis as quais contém regiões lisas ou planas, interrompidas por vincos afiados.

Considerando-se o fato de se obter uma forma resistente a partir de materiais de pouca espessura, é possível que um projetista possa alterar a forma e ao mesmo tempo a função de um material delgado através de uma propositada manipulação de sua superfície criando dobras e vincos que venham a apresentar um comportamento estrutural que possibilite sua aplicação em objetos e sua estrutura obtendo-se soluções de maior leveza.

## **2.6. Biomorfose e formas bio-inspiradas e as cascas vincadas como estruturas e envelopamentos de produtos e edifícios**

A escassez de recursos naturais e a demanda crescente por novos produtos ocasionaram a necessidade de obtenção das formas que necessitem uma menor quantidade de material e que sejam ao mesmo tempo leves, mantendo a resistência aos esforços. São formas que demandem menor quantidade de matéria-prima sem perder a eficiência e que tem recebido uma crescente consideração pelo design de produtos. A este respeito Kazazian (2005) afirma que designers e construtores elaboram objetos que têm uma dupla vocação: prestar eficientemente o serviço para o qual foram concebidos, reduzindo ao mesmo tempo a utilização de matéria.

A natureza de há muito revela mecanismos intrínsecos de eficiência e de adaptabilidade em seus processos. A biomimética tem se encarregado desta abordagem associando mecanismos funcionais da natureza em soluções para muitos problemas investigados pelo homem.

O problema de associar a resistência das superfícies destinadas a suportar uma determinada carga tem tido uma investigação constante. Substituir materiais escassos e fruto de processos dispendiosos ou de um número excessivo de partes que geram volume e peso é tarefa do design de produto. Uma das possibilidades investigadas é o das superfícies dobradas ou vincadas. Isto diz respeito a superfícies delgadas que através de dobras ou vincos aumentam em muito a sua resistência sem a necessidade de aumento do material. A associação entre a forma e a alocação de vincos ou dobras é capaz de produzir objetos leves a partir de soluções que aumentam a resistência de sua superfície.

As formas geométricas de muitos frutos lenhosos, cujas paredes são delgadas, são concebidas de maneira a poderem suportar as cargas externas e proteger o seu conteúdo interno adotando a conformação apropriada para esta função. Esta caracterização da natureza, apresentada em alguns frutos, pode servir como possibilidade de referencial formal e estrutural para algumas aplicações no design de produtos.

A elaboração de padrões de textura (ondulações, vincos, dobras, pregas ou ranhuras) pode trazer para as estruturas de paredes esbeltas (finas) uma modificação nas suas propriedades mecânicas além de soluções de flexibilidade como para acomodar tensões térmicas, melhora nas reações de flexão e, também, na solução dos padrões estéticos de textura.

## **2.7. As geometrias como padrões das estruturas biológicas**

Segundo Leopold (2006), a geometria é a ciência fundamental das formas e da ordem. As figuras, formas e transformações geométricas constroem o material de design arquitetônico. Na história da arquitetura, as regras geométricas baseadas nas ideias de proporções e simetrias formaram ferramentas fixas para o projeto arquitetônico. As proporções foram analisadas na natureza e encontradas como categorias estéticas gerais em toda a natureza e arte. Portanto, proporções como a seção áurea foram vistas como o poder de criar harmonia na arquitetura, bem como na arte e na música. O conceito de simetria é combinado com a ideia de harmonia e proporção. Operações de simetria se ocupam com movimentos de figuras e formas. A este respeito Wren, *apud* Rowe (1978) afirmava que a beleza é uma harmonia de objetos, criando prazer pelo olho e que sempre o verdadeiro teste é a beleza natural ou geométrica.

Leopold (2006) afirma, ainda, que a geometria pode ser vista também como uma ciência estrutural. O design arquitetônico baseia-se em estruturas geométricas desenvolvidas a partir da ideia de transformações. As transformações de simetria são visíveis como conceitos de design através do histórico da arquitetura. Na arquitetura contemporânea não existem regras fixas sobre conceitos de design, no entanto, ainda há relações com conceitos de espaço geométrico.

Wren, *apud* Rowe (1978), diz que a beleza tem duas origens: uma natural e uma outra por costume. A beleza natural provem da geometria e consiste na sua uniformidade, ou seja, em igualdade/equilíbrio e proporção. A beleza por costume é gerada pelo uso, pois a familiaridade cria afeto por aquilo que lhe é agradável. As figuras geométricas naturalmente mais belas que as irregulares: o quadrado e o círculo podem ser considerados as figuras de geometrias mais bonitas, seguidas do paralelogramo e do oval. As linhas retas só tem duas posições consideradas belas: a posição perpendicular e a horizontal; esta é a forma da natureza e é, por conseguinte, uma necessidade, tal como o ereto da firmeza. Conforme Pires (2010), Wren traz em seu discurso a certeza da essencialidade da geometria das estruturas, tanto as naturais como aquelas produzidas pelo homem.

A maneira de projetar atualmente pode ser apoiada pelas tecnologias digitais de representação, possibilitando que o controle da forma seja realizado não somente por arquitetos diferenciados, o que tem possibilitado difundir, assim, o emprego de formas mais

complexas na arquitetura. Dessa maneira, podem-se desenvolver famílias de objetos com coerência formal e construtiva, ou seja, desenvolver um conjunto de objetos baseados nas mesmas regras, dos quais pode se escolher os mais bem sucedidos (FISCHER & HERR, 2001). De acordo com Mitchell (1975), um sistema generativo pode produzir uma variedade de soluções em potencial para um mesmo problema.

Leopold (2006), descreve a relação entre a geometria e o design como ciência fundamental das formas e da sua ordem sendo as figuras geométricas, formas e transformações objeto material do design. As regras geométricas são baseadas nas ideias de proporções e simetrias formaram ferramentas fixas, especialmente para o design e arquitetura. Esta autora acrescenta ainda, que as proporções analisadas na natureza são referendadas como categorias estéticas gerais associando natureza e arte. Desta forma, proporções como a seção áurea tem o poder em criar harmonia nas formas, produtos, arquitetura, arte e até mesmo na música.

Aqui entendida como uma ciência fundamental das formas e da sua ordem, a geometria contribui para o processo de composição em design e arquitetura. Suas relações carregam em si a noção de harmonia como princípio para todas as ciências e criações. A composição se inicia com elementos e as suas relações sendo a geometria capaz de fazer uma contribuição importante para esse processo, negociando com figuras geométricas e formas como elementos, assim como proporções, ângulos e transformações como relações entre estas.

Leopold (2006), afirma que a estrutura de uma forma, construída a partir de suas composições, pode indicar sistemas gerais de ordem em várias disciplinas científicas, partindo de uma noção de estrutura, que “significa juntar-se em ordem.” Portanto a matemática pode ser vista como uma ciência das estruturas, considerando sistemas de elementos e suas relações ou operações.

Hamjhehnejhad (2006), a este respeito, afirma que a geometria é uma parte importante das leis da arquitetura. Por analogia e, de sua relação com outros objetos produzidos pelo homem, na formação de diferentes especialidades de sistemas naturais decorrentes da variação entre elementos e a organização destes elementos ou sua geometria para formar especialidade de cada estrutura. O modo de relação e disposição dos elementos é mais importante do que o próprio elemento, porque, sem elementos comuns, surgem diversas evidências e isso decorre de diferentes geometrias e maneiras de seu arranjo.

A relação da geometria com a natureza Pourjafar; Mahmoudinejad; Ahadian (2011) afirmam que o segredo das diferenças de estruturas em diferentes elementos comportamentais e de desempenho é tal que admitiu características especiais. Por exemplo, as raízes e seu sistema

vertebral de plantas, possuem geometria independente, enquanto a flor, os frutos, as hastes e toda a sua forma possuem uma geometria bem organizada. A geometria independente da natureza (geometria correspondente), em todos os tipos de seres, tem forças internas inclinadas à geometria e a uma forma particular; no entanto, as forças externas (ambientais) aderiram com base na conformidade real com o meio ambiente.

A pesquisa da geometria em elementos da natureza tem apresentado diferentes estudos como o realizado por Agkathidis (2015), o qual apresenta um método de design baseado em três fases principais: análise, morfogênese e metamorfose, visando a produção de propostas arquitetônicas. A análise focou-se em estudos de precedentes originados na natureza, onde foram identificadas propriedades de design e sua geometria, a partir disto estabeleceram-se as intenções de projeto e a identificação dos parâmetros. Durante a geração abstrata da morfogênese foram desenvolvidos modelos incorporando os parâmetros de fase anterior. Finalmente, durante metamorfose, os protótipos anteriores foram transformados em propostas de construção.

Pourjafar; Mahmoudinejad; Ahadian (2011) tomam como exemplo as bolhas de sabão as quais estão sempre conectadas sob a forma de grelhas triangulares irregulares. Estes *grids* triangulares são a base da geometria do organismo natural, que funcionam nas partes mínimas e tem sua operação máxima inspirada nas plantas. A geometria das formas, pode adotar padrões de um organismo natural que a define que, segundo estes autores, diz respeito a:

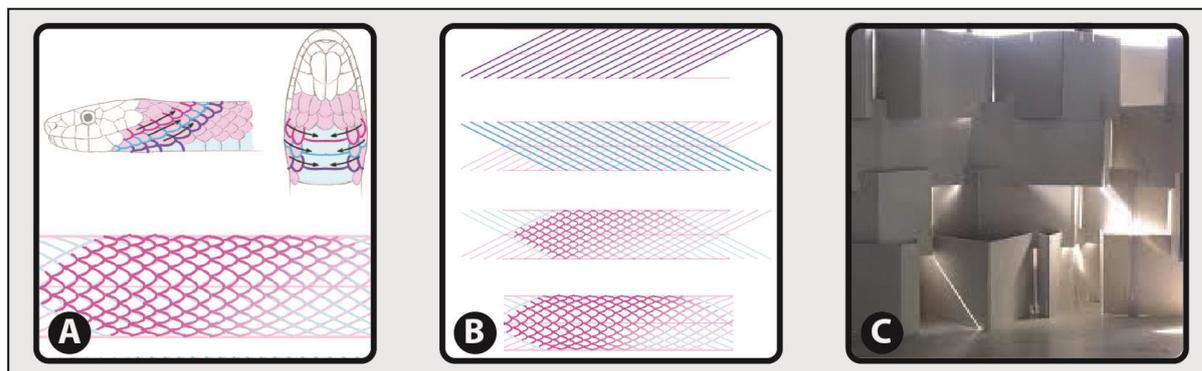
- a. padrão formal:** neste tipo de imitação de padrões, não há atenção aos fundamentos a estrutura. Por exemplo, as camadas da Terra podem formar a força que a afeta e toma sua forma enquanto os arquitetos omitem essas forças e usam apenas as camadas que se formam;
- b. padrão metafórico:** uma forma abstrata de natureza é usada para equilíbrio e sustentabilidade. Esta metáfora impede a superficialidade em relação a extensões daquilo que se conhece como uma forma criadora;
- c. observação das regras naturais:** a aplicação de regras naturais é a melhor forma para se obter inspiração natural. Organismos escolhem materiais com base no desempenho e conformidade com as forças naturais e em harmonia com a forma;
- d. escolha da geometria das peças:** organismos desenvolvem sua geometria com base no desempenho e coordenação com suas outras partes, bem como para responder as circunstâncias funcional, econômica e de firmeza. Por exemplo, as redes triangulares são vistas na natureza repetidamente, o que é um padrão típico de organização;
- e. hierarquia:** a prioridade e a ordem hierárquica na forma e na proporção são a maneira de transferência de forças e forma de distinguir seu curso;

- f. contiguidade das peças:** as peças se definem e se controlam. Na maioria dos casos, a natureza usa uma parte intermediária no lugar da junção e, como tal, essas articulações atuam da melhor maneira que a hierarquia em criaturas vivas. As partes de uma estrutura natural estão em harmonia entre si e a ausência de qualquer uma confunde todo o sistema. As partes de um organismo são complementares entre si e, portanto, devem estar em junção completa e fixadas ordenadamente. Em outras palavras, omitir qualquer parte danifica todo o sistema;
- g. unidades e solidez das partes:** nas estruturas, uma vez que o objetivo é alcançar um objetivo definido e unificado, a unidade será compreensível em todas as partes. Uma simples peça não significa unidade de estrutura, pois esta é alcançada pela harmonia e solidez do seu conjunto. Nos organismos naturais, as partes que se juntam fazem um complexo, da forma como ele tem uma unidade real. Na diversidade da natureza, ramos e folhas em torno do eixo principal de uma planta não são por acaso, mas é algo previsto e em harmonia com detalhes e arranjo funcional;
- h. usos de estruturas combinadas:** a existência de estruturas combinadas é um dos princípios fundamentais dos organismos, usado para enfrentar diferentes forças. Seres humanos também são multi-estruturais além de viver em um mundo multi-estrutural;
- i. organização axial:** existem dois tipos de eixos em qualquer organismo vivo: eixo primário e eixo secundário. O eixo primário é aquele em que os elementos reais são estabelecidos simetricamente, enquanto que o eixo secundário é aquele em que as partes não assimétricas são instaladas. O eixo primário nas plantas é vertical e em animais é horizontal, no entanto, em seres humanos também é vertical.

Em um estudo produzido por estudantes do Raffles Design Institute em Xangai, quando de um projeto denominado *Snakeskin*, tratou de realizar um experimento que analisou a pele de répteis e suas escalas com vistas gerar soluções compositivas para uma parede componível (figura 11). Em uma segunda etapa os padrões da pele de cobra, em uma escala ampliada, foram transformados em uma superfície dobrável, composta por unidades as quais pudessem ser encaixadas entre si, remetendo ao modelo biomimético referencial, a pele de uma serpente. A aplicação dos princípios de geometrização e encaixe gerou uma superfície final considerada flexível o suficiente para formar uma grande variedade de formas.

Conforme Agkathidis (2006), os modelos de tiragem, feitos à mão, foram construídos a partir de módulos, mas aproveitando como design final uma solução baseada em um unidade dobrada criada com base em um algoritmo paramétrico desenvolvido com o *software* de programação visual denominado Grasshopper®. Assim, o protótipo evoluiu para uma solução feita partindo de módulos irregulares.

Figura 11: Desenhos e diagramas da análise geométrica da pele de uma cobra (A) e (B), e aplicação deste diagrama em uma estrutura tridimensional (C).



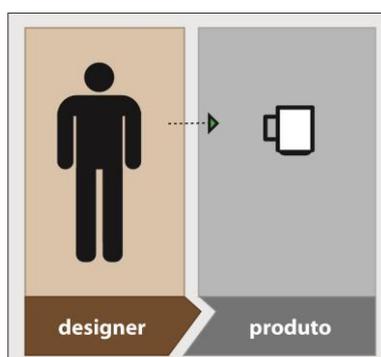
Fonte: Adaptado de Agkathidis (2015).

Os protótipos foram transformados em soluções de sombreamento, soluções para parede divisória de espaços, com um protótipo em escala real construído a partir de painéis de papelão reciclado sendo cada módulo foi cortado a laser e depois montado camada a camada. O autor afirma que a produção final provou possuir rigidez e estabilidade estrutural, também permitindo efeitos de iluminação.

## 2.8. Emprego de sistemas generativos

Sistemas generativos servem para gerar um grande número de soluções com a finalidade de multiplicar as opções disponíveis ao projetista. Trata-se de um processo que gera formas a partir de um conjunto preestabelecido de orientações. As orientações, por sua vez, podem ser expressas através de programas computacionais ou de um conjunto de operações lógicas, direcionadas para solucionar um problema de projeto em especial ou, por exemplo, a concepção formal de um projeto de arquitetura ou de design. Um sistema generativo de projeto ou *generative design system* trata de um método de projeto que difere de outras abordagens principalmente porque, durante o processo de projeto, o projetista elabora métodos para a produção em vez de projetar diretamente o produto (figuras 12 e 13).

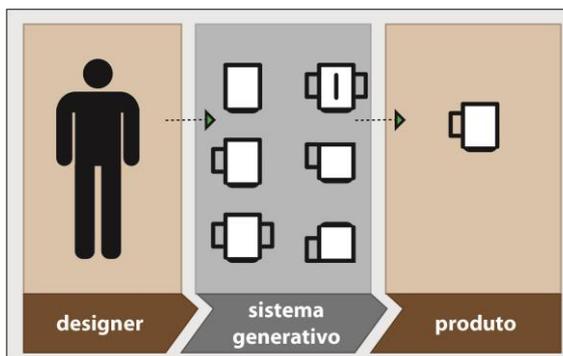
Figura 12: Abordagem tradicional de projeto.



Fonte: adaptado de Fischer & Herr (2001).

Dessa maneira, podem-se desenvolver famílias de objetos com coerência formal e construtiva, ou seja, desenvolver um conjunto de objetos baseados nas mesmas regras, dos quais pode se escolher os mais bem sucedidos (FISCHER & HERR, 2001). De acordo com Mitchell (1975) um sistema generativo pode produzir uma variedade de soluções em potencial para um mesmo problema.

Figura 13: Abordagem de projeto por meio de um sistema generativo.



Fonte: adaptado de Fischer & Herr (2001).

Os sistemas generativos não precisam ser necessariamente implementados em computador. O mais importante é entender o trabalho de aplicação de regras e permutação de atributos, o que pode ser feito por meio de representações simbólicas, com desenhos a mão. De acordo com Celani (2008), como o objetivo de um sistema generativo pode ser utilizado em três situações:

- **otimização de problemas:** uso de sistemas generativos em problemas de projeto com critérios bem definidos. Como não existe um método direto para se encontrar uma solução é necessário gerar e testar todas as possibilidades a fim de se encontrar a alternativa que melhor corresponda aos critérios exigidos;
- **criação de uma família de objetos:** situações onde há necessidade de variedade, ou seja, problemas de projeto que exigem um determinado número de soluções similares, mas ligeiramente diferentes. Este é um problema comum em design industrial;
- **experimentos em design exploratório:** situação onde os critérios para solução de problemas de projeto estão mal definidos, de forma que é importante avaliar para diferentes possibilidades para verificar os seus prós e contras para se encontrar uma solução satisfatória, ou o melhor possível.

Enquanto a primeira situação acima normalmente visa cumprir critérios econômicos e funcionais, a segunda e a terceira situações são mais específicas para soluções preocupadas com a criatividade e originalidade.

Alguns tipos de sistemas generativos apresentados neste estudo com maior destaque referem-se à Gramática da Forma, *Shape Grammar*, por ser o objetivo desta pesquisa. Um

método que tem sido usado há séculos pelos arquitetos é a simetria. Operações simétricas podem ser aplicadas a uma determinada forma, resultando em diferentes modelos possíveis.

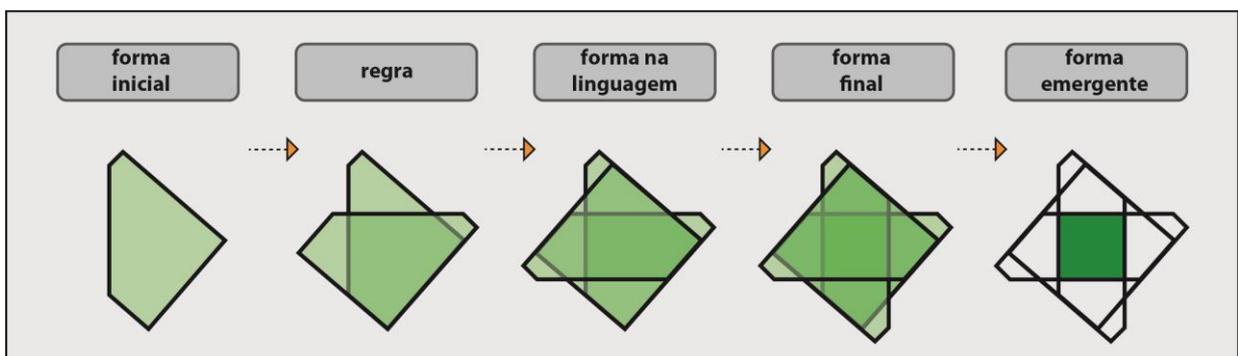
Um outro tipo de sistema generativo muito utilizado é o paramétrico. Nele as dimensões não são especificadas *a priori*, mas representadas por meio de parâmetros que são substituídos por valores após a aplicação das regras de composição. Dessa forma, dá-se mais atenção às relações espaciais entre as formas, e não a dimensões específicas. Uma forma interessante de obtenção de novidade e variedade formais é a combinação dessas descrições parametrizadas com a atribuição de valores aleatórios. Uma forma interessante de obtenção de novidade e variedade formais é a combinação dessas descrições parametrizadas com a atribuição de valores aleatórios.

## 2.9. Gramática da Forma

Para Knight (1999) uma Gramática da Forma é um conjunto de regras que se aplicam em um passo-a-passo de maneira de gerar um conjunto, ou idioma, de projetos. A Gramática da Forma é descritiva e generativa. Para este autor as regras de uma Gramática da Forma servem para gerar ou calcular desenhos, e as regras em si são descrições das formas dos desenhos gerados.

Conforme Pires (2010) a Gramática da Forma permite a identificação e a descrição de determinadas regras de transformações geométricas, específicas, que, após compreendidas, podem ser aplicadas a uma forma inicial em determinado sequenciamento de maneira a resultar combinações, ou seja, sua preocupação principal é a transformação geométrica, pois permite composições por meio destas transformações (figura 14).

Figura 14: Gramática da forma: forma inicial, regra, forma da linguagem e forma final (e forma emergente).

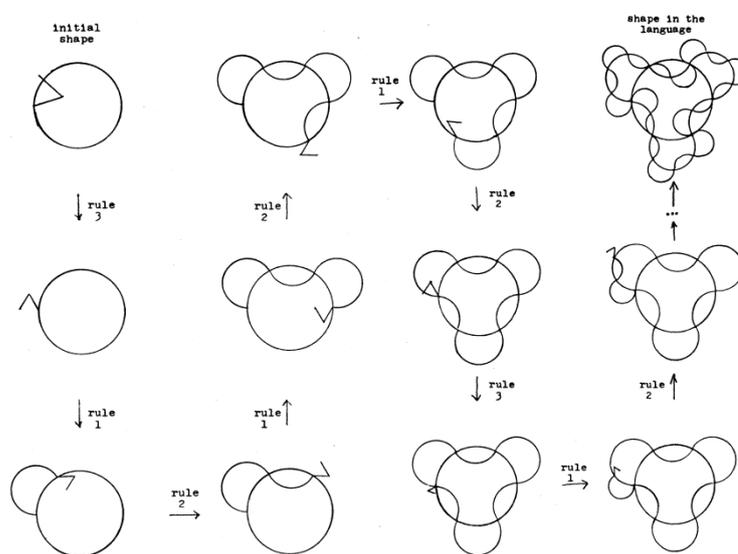


A Gramática da Forma (*shape grammar*) é considerada um formalismo por esta ter como uma de suas características a valorização do aspecto geométrico, os resultados obtidos com a

experiência visual e a estética reforçando a forma e o conteúdo (CELANI; CYPRIANO; VAZ, 2006).

Inicialmente, a Gramática da Forma foi desenvolvida para pintura e escultura, no início dos anos 70 (Séc. XX), por George Stiny e James Gips. Tal gramática consistia na aplicação de um sistema de geração de formas baseado em regras, originada no sistema de produção do matemático Emil Post (1943) e na gramática generativa do linguista Noam Chomsky. Conforme Celani (2006) o objetivo inicial da Gramática da Forma era servir de sistema de geração de formas para a pintura e escultura. Ao invés de projetar diretamente a pintura ou escultura, o artista projetaria suas regras de composição, sendo então capaz de combiná-las de diferentes maneiras e, assim, criar uma variedade de obras de arte (Figura 15).

Figura 15: Aplicação de um sistema de geração de formas baseado em regras.



Fonte: Gips (1975).

De acordo com Trescak; Rodriguez; Estevam (2009), esta primeira tentativa levou a um amplo uso de gramáticas em múltiplas atividades artísticas, campos científicos e industriais. Este método foi empregado para analisar e recriar obras de vários artistas e arquitetos os quais foram analisados pela Gramáticas da Forma, e posteriormente apresentados novos estudos e alternativas de acordo com o design original. Afirmam ainda, que os inventores da Gramática da Forma mostraram, a partir do emprego de formas geométricas simples, ser possível analisar e recriar estilos visuais de projetos originais complexos. Pode-se considerar como uma forma de encapsulamento de estilos, podendo ser também usado para fins educacionais para melhor compreender a estrutura e composição do design original e como ajuda a descobrir os princípios por trás deste desenho. É possível também gerar novos designs no estilo do padrão definido.

Esse sistema é particularmente adequado para a geração de formas e estilos (SINGH & GU, 2011) e tem sido utilizado em áreas ligadas às artes visuais: na pintura, na escultura, na arquitetura, no ensino do design, em projetos de engenharia e design de produtos (GIPS, 1999). O seu desenvolvimento e utilização pode ser feito de duas formas diferentes: simular a gramática manualmente ou desenvolver um programa de computador. Sua utilização pode ter como fim tanto a análise de projetos existentes, como o desenvolvimento de uma nova linguagem de projeto (SINGH & GU, 2011) e seu processo de projeto se define basicamente em modificações (adição, subtração e realocação) de elementos finitos e na definição ou alteração das relações existentes entre esses elementos levando em conta determinadas regras estabelecidas.

### 2.9.1. Elementos de uma Gramática da Forma

Segundo Celani (2006), uma Gramática da Forma, a partir da abordagem construtivista de Stiny (1980), é desenvolvida partindo da definição, em ordem sequencial, dos seguintes elementos:

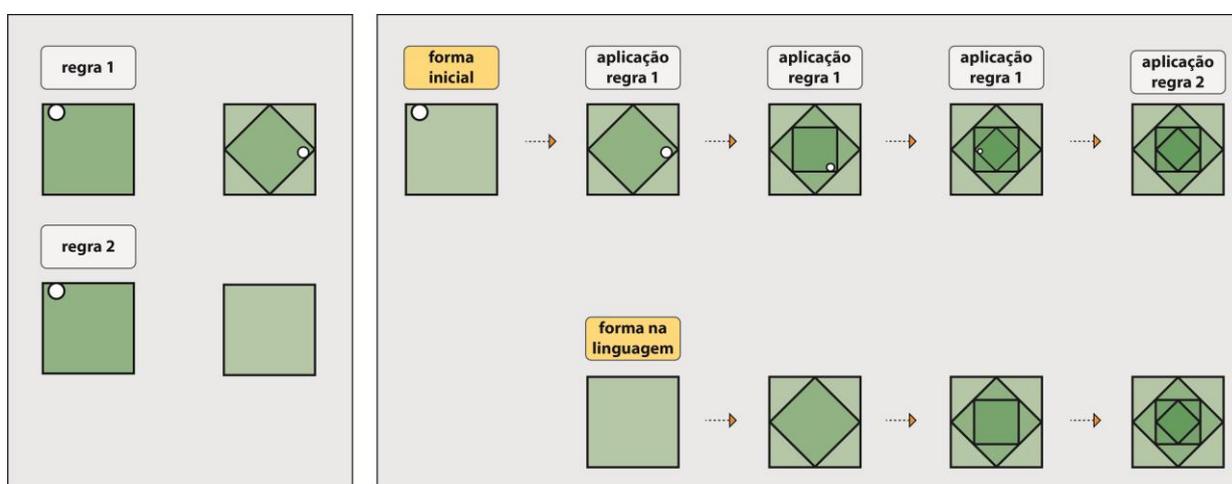
1. **Vocabulário de formas:** definição de um conjunto finito de formas primitivas que tomarão parte da gramática. Essas formas podem ser bi ou tridimensionais;
2. **Relações espaciais:** estabelecimento das combinações espaciais desejadas entre as formas primitivas do vocabulário;
3. **Regras formais:** a partir das relações espaciais, definição de regras de transformação do tipo  $A \rightarrow B$  (ao encontrar A, substituir por B). Essas regras podem ser do tipo: aditivas ou subtrativas;
4. **Formas iniciais:** servem para dar início à aplicação das regras que pertencem ao vocabulário, ou seja, são elementos iniciais de construção da concepção de um projeto, locais de incidência das regras formais, mantêm a localização, orientação e tamanhos definidos em um sistema de coordenadas, não obrigatoriamente explícito. É necessário selecionar uma forma inicial, pertencente ao vocabulário de formas;
5. **Gramática da Forma:** resulta do desenvolvimento de um sistema generativo de projeto que percorre todas as fases anteriores e incorpora a ideia de desenvolvimento. Uma derivação, conjunto dos estágios que ocorrem na geração de uma linguagem, é delimitada por um marcador final, que determina onde se encerra o processo de desenvolvimento de um projeto.

Após a definição destes cinco elementos, tem início uma interação, ou seja, a aplicação sucessiva de regras sobre a forma inicial selecionada, até que se obtenha a composição desejada. Conforme Trescak; Rodriguez; Estevam (2009), a estrutura da gramática da forma desenvolvida permite que designers obtenham projetos gerados de maneira automática e, ao

mesmo tempo, participem do processo de design. Desta forma, o projeto gerado cumpre com a funcionalidade desejada e possui um aspecto atraente. Um grande esforço foi dedicado a ter uma maneira confortável de definir formas e depois usá-las em regras de gramática de forma e processo de geração de projetos.

O método generativo de formas inicia-se a partir da aplicação sucessiva de regras sobre a forma inicial. O resultado da aplicação de uma determinada operação em um elemento (alfa) consiste e outro elemento (beta) da relação  $\alpha > \beta$ . Este processo, conforme Gips (1975), termina quando as regras não podem mais ser aplicadas sobre os elementos (figura 16).

Figura 16: Exemplo de uma gramática da forma e linguagem resultante das operações realizadas.



Fonte: adaptado de Gips (1975).

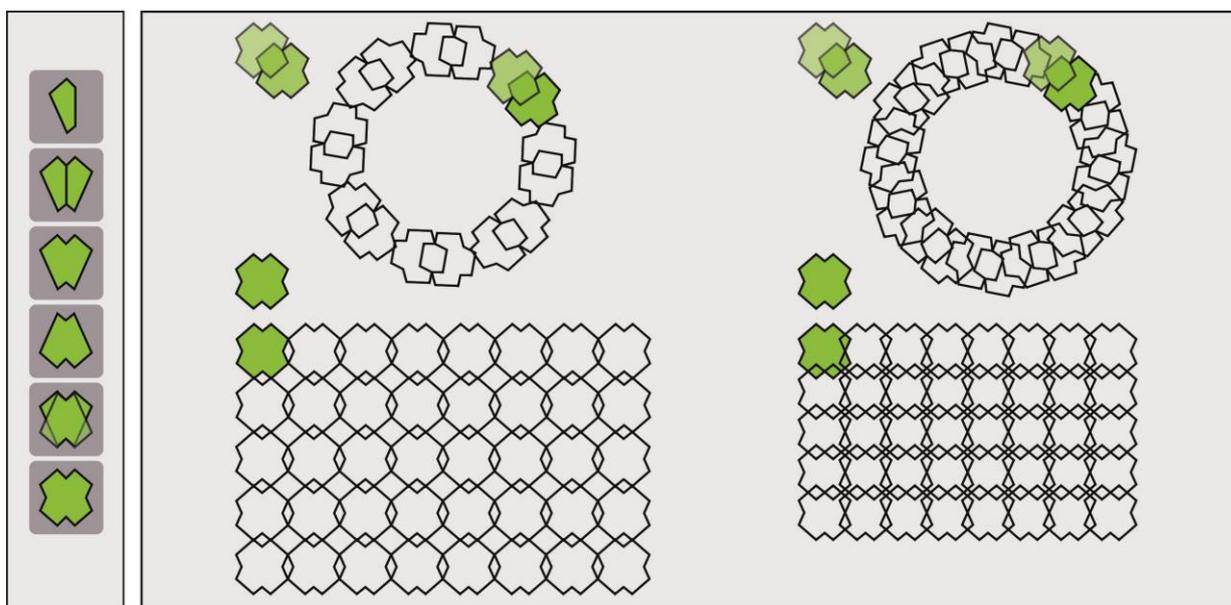
A gramática da forma, escolhida como método a ser explorado, se presta porque pode ser utilizada tanto para a análise como para a síntese de projetos. Segundo Knight (1999), existem três aplicações para a Gramática da Forma:

- a. **síntese:** de projeto sem referências prévias, extraído desde o princípio, um processo mais livre e menos objetivo. Isto, segundo Vaz (2009), deve-se ao conjunto de soluções a ser alcançado a partir de regras criadas pelo próprio autor da gramática, que possui a liberdade de modificá-las se assim ver da conveniência para a observação de seus objetivos;
- b. **análise:** se presta para extrair as regras e vocabulário de um exemplar e criar alternativas análogas na mesma linguagem. É empregada para interpretar um conjunto de regras existentes de um determinado projeto ou obra. A Gramática da Forma, quando empregada como método de análise, conforme Vaz (2009), é um grupo de projetos que se torna a referência para a extração das regras, num processo de descoberta de composições que sejam semelhantes às existentes nos exemplares estudados;

**c. síntese/análise combinadas:** propõe a extração de regras e vocabulário através da análise de exemplares e utilização destes em conjunto ou separadamente com outros propósitos. A partir dela, regras compositivas que envolvem operações matemáticas e geométricas tais como adições e rotações, são criadas a fim de se elaborar uma linguagem formal possibilitando, assim, variações múltiplas.

Celani (2006) afirma que após o desenvolvimento inicial da gramática da forma, com objetivos sintéticos, seus inventores e outros pesquisadores continuaram incrementando o sistema original, acrescentando-lhe novas características e dando-lhe novas aplicações. A autora afirma ainda, que é possível defini-la através da parametrização tornando-a capaz de gerar uma enorme variedade de resultados, isto considerou que desde as primeiras definições da gramática da forma já sugeriam a possibilidade de que certos valores fossem deixados em aberto para serem definidos no momento de sua implementação (figura 17).

Figura 17: Aplicação da gramática da forma – exemplos da geração de padrões.



Fonte: baseado nos trabalhos de Cenani & Cagdas, 2006.

Mitchell (1975), tratando dos sistemas generativos de projeto afirma que o projeto é um processo que procura a solução de problemas, podendo ser realizado de diversas formas, mentalmente, através de esquemas, diagramas e croquis ou mesmo através do emprego de ferramentas como o computador. A este respeito Celani (2008), afirma que os métodos de projetos generativos auxiliados por computador começaram a ser desenvolvidos a partir das décadas de 1950 e 60, tendo como característica principal serem métodos projetuais indiretos, nos quais o projetista não se concentra em um problema específico, mas sim com a inserção de parâmetros, regras e critérios para que o computador possa solucionar problemas análogos em contextos diferentes.

Pode-se afirmar que, com o advento desta ferramenta poderosa, que são os métodos computacionais, é possível a geração de uma grande quantidade de resultados o que possibilita uma gama de alternativas para o processo de projeto, que ora aumenta o campo de visão e ora o modifica (ou ambos), mas com uma tendência a possibilitar um acréscimo de qualidade dos processos projetuais.

### **2.9.2. A utilização de princípios da gramática da forma no processo de concepção do projeto**

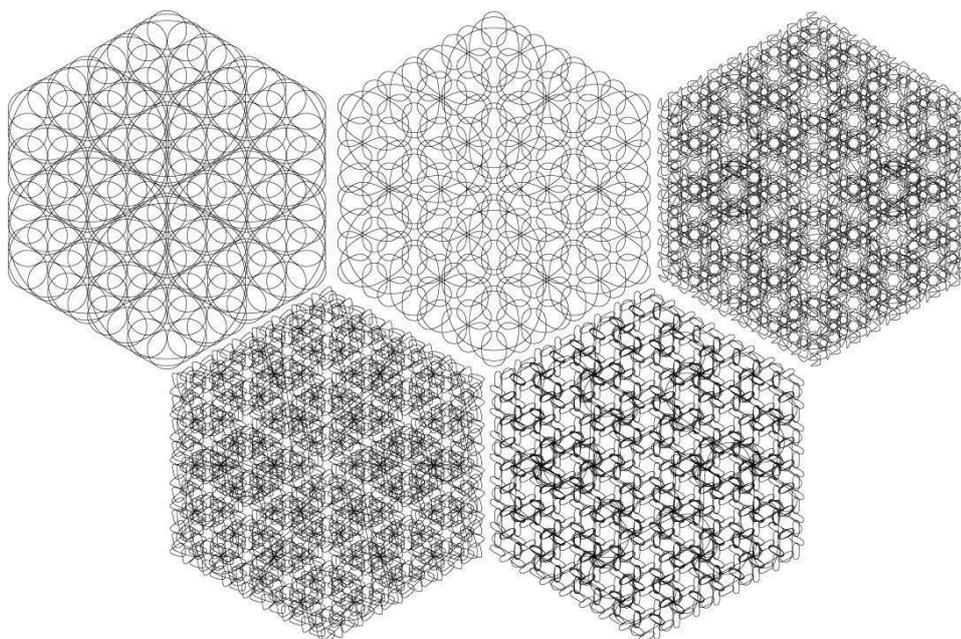
Para Knight (1995) uma maneira de projetar com eficiência, utilizando a Gramática da Forma, parte da compreensão de que regras formais de uma gramática interferem, diretamente, em requerimentos projetuais. Esta compreensão pode antecipar a eliminação de relações espaciais que não atendem a requisitos projetuais, como a compatibilização entre forma e função (CELANI, 2005). Para que o designer tenha domínio das relações espaciais e, conseqüentemente, das regras de um projeto é preciso que ele tenha domínio dos fundamentos da simetria (KNIGHT 1995). O domínio dos fundamentos da simetria permite a identificação de diferentes relações espaciais para exploração consciente de diferentes possibilidades projetuais através do espaço e do tempo (figura 18).

A proposição deste estudo está composta em três etapas:

- a. primeira etapa:** familiarização com o tema, através de uma revisão bibliográfica de uma maneira mais ampla, dos frutos de casca dura escolhidos e sobre Sistemas Generativos de Projeto e Gramática da Forma, o que proporcionaram uma base teórica para um experimento prático;
- b. segunda etapa:** a leitura analítica da Gramática da Forma, neste caso aplicado a forma de frutos de casca dura. A contar da leitura da forma geométrica e sua organização estas informações, a definição da(s) forma(s) inicial(is), ou seja, a geometria a partir da qual seriam executadas as diversas modificações e aplicadas as regras) serão manipuladas e extraídos dos arquivos em formato digital, e modelos geométricos, que permitam a obtenção de medidas precisas de seus elementos;
- c. terceira etapa:** como passo seguinte, a busca da determinação das regras de aplicações com base na Gramática da Forma analítica realizada.

Para a implementação da Gramática Paramétrica devem ser utilizados programas computacionais de modelagem assim como da modelagem por meio de programação de algoritmos, resultando em uma grande variação de alternativas, a quais permitem inúmeras análises e testes. O emprego do *software* Grasshopper®, uma linguagem de programação visual de edição gráfica generativa, embutido dentro do programa de computação Rhinoceros® é uma destas possibilidades.

Figura 18: Exemplo da aplicação da Gramática da Forma Paramétrica.



Fonte: CENANI & CAGDAS (2006).

Por fim como hipótese a ser confirmada neste estudo a potencialidade do uso de Sistemas Generativos de Projeto, a partir de modelos geométricos da natureza, como maneira de potencializar e aperfeiçoar o número de resultados que podem ser utilizados como ferramenta de apoio na elaboração e tomada de decisão na etapa de concepção de novos produtos, considerando referenciais biomiméticos.

### 2.9.3. Gramática da forma paramétrica

Segundo Duarte (2007), uma gramática da forma paramétrica é uma gramática na qual as regras são parametrizadas de modo que cada regra representa, de fato, um conjunto de regras, já que os valores dos parâmetros são deixados em aberto para serem definidos no momento da implementação, possibilitando dessa forma uma gramática capaz de gerar grande variedade de resultados. Muito utilizada em sistemas generativos de projetos arquitetônicos é a Gramática da Forma, *Shape Grammar*, foi desenvolvida na década de 70 por George Stiny e James Gips, e representa um método sistemático de geração de formas baseado em regras, podendo ser utilizada de maneira analítica ou sintética. A aplicação analítica da gramática da forma consiste no estudo de obras arquitetônicas já estabelecidas a partir das quais podem ser determinadas regras de composição e conseqüentemente a geração de novos indivíduos baseados na mesma linguagem. Já a aplicação sintética consiste na definição de novas regras para a produção de uma nova linguagem arquitetônica.

Na década de 60 surgiram os primeiros sistemas de CAD (*computer-aided design*) específicos para arquitetura. Os arquitetos, então, começaram a desenvolver sistemas de

auxílio ao projeto com utilização das ciências computacionais, inteligência artificial e estratégias de resolução de problemas (MITCHELL, 1975). Estes sistemas possuíam três objetivos principais: otimização de projeto, automatização das tarefas de desenho e geração criativa de formas.

Conforme Godoi (2008), dentro do contexto da geração de formas, destacam-se as pesquisas na área de sistemas generativos de projeto, cujo objetivo é a elaboração de ferramentas projetuais em vez da produção específica de uma só forma. A vantagem desta utilização está na produtividade e inovação das formas a serem criadas, pois desta maneira diversos projetos pertencentes a uma mesma família podem ser criados com economia de tempo e explorando uma maior quantidade de alternativas. Outro aspecto interessante da gramática analítica é que ela permite gerar novos exemplares pertencentes à linguagem analisada.

Conforme Chouchoulas & Day (2007), gramáticas da forma podem ser definidas, em síntese, como a combinação de um vocabulário de formas, além de um conjunto de regras e uma forma inicial. O objetivo das regras é transformar uma forma, ou uma coleção de formas, em uma nova forma. Serve tanto para produzir várias soluções pertencentes ao mesmo idioma ou para criar soluções originais, ou seja, novas linguagens de design. Sendo um sistema generativo, como os demais, é um sistema algorítmico que envolve uma sequência de instruções capazes de resolver um determinado problema ou para algum fim, escritas em vocabulário fixo e detalhado passo-a-paso ou em etapas distintas.

Em computação, gramáticas da forma são um tipo de sistema de produção que produz formas através de algoritmos, os quais são fundamentais pela maneira como os computadores processam informações, onde podem lidar com números, alfabetos e entidades geométricas como também para criar geometrias complexas com pequenas quantidades de dados tais como: formas, propriedades de forma, etc.

#### **2.9.4. Modelagem paramétrica**

Durante o processo de criação e desenvolvimento de um projeto, como por exemplo um projeto de arquitetura, características específicas de partes representadas na forma de desenhos precisam ser revistas e modificadas muitas vezes. Como resposta à esta questão e, considerando o uso do computador como uma ferramenta de projeto, foi desenvolvida uma estrutura embutida em programas gráficos (CAD), baseada em parâmetros e hierarquias, para que operem em variações paramétricas. Este emprego de parâmetros onde se pode obter respostas rapidamente com a modificação de variáveis os quais servem para definir as geometrias de formas e elementos construtivos tem se mostrado muito eficaz no processo de projeto (FLORIO, 2007).

Os sistemas paramétricos, como a gramática da forma, são um sistema generativo e podem ser classificados como um caso especial de sistemas algorítmicos. Desta forma um projeto paramétrico é definido como aquele que emprega variáveis e parâmetros ao invés de usar formas. Tais variáveis são hierárquicas e controladas por relacionamentos de uma direção. No projeto paramétrico, algumas partes do design são independentes, enquanto que outras são dependentes e ambas estão conectadas por dependências. Desta forma a propagação de mudanças é produzida por essas dependências (de partes independentes às dependentes). Desta forma projetistas, quer no design, na arquitetura ou na engenharia, passam a projetar ao invés de formas, uma combinação de princípios codificados como uma sucessão de equações paramétricas (KOLAREVIC 2003).

A este respeito Estevez (2003), afirma que design generativo é um método computacional que não se destina à projeção final de um objeto, mas à projeção de um sistema que por si próprio constrói o objeto, permitindo gerar uma série de variações infinitas. Este processo permite trabalhar a genética de um objeto ou sistema ao invés de modelar apenas a sua forma final, isto é, se utiliza de parâmetros e suas inter-relações para a definição de uma forma geométrica, onde o design do objeto é substituído pelo design do processo que gera o objeto.

Uma modelagem paramétrica exige que as porções sejam agrupadas em componentes constituídos por parâmetros, de modo a facilitar a manipulação de acordo com a necessidade do usuário. Desta forma o emprego de um sistema parametrizado torna-se uma poderosa ferramenta digital para explorar diferentes configurações geométricas em projetos com o auxílio do computador (FLORIO, 2009a).

Conforme Kolarevic (2003) a vantagem do emprego de equações no processo de projeto é que o projetista pode gerar e também variar as instâncias do ato de projetar a qualquer instante em função das suas necessidades. A partir disto esta abordagem paramétrica tem alterado profundamente não apenas a natureza inteira e hierarquias estabelecidas na própria cadeia de produção, como é o caso da indústria da construção, mas também o papel do projetista quer arquiteto ou designer.

A visão do projetista torna-se algorítmica, libertando-se das imagens predeterminadas e focando a sua atenção nas regras do processo gerador. A visão holística ou a visão algorítmica são apenas exemplos de muitas das alternativas de caráter biônico ou biomimético que existem para solucionar “problemas abertos”, bastante comuns na atividade de um arquiteto ou um designer (COSTA & SOUSA, 2006). Os algoritmos servem para interpretar informações tais como: dados climáticos, esforços estruturais das formas

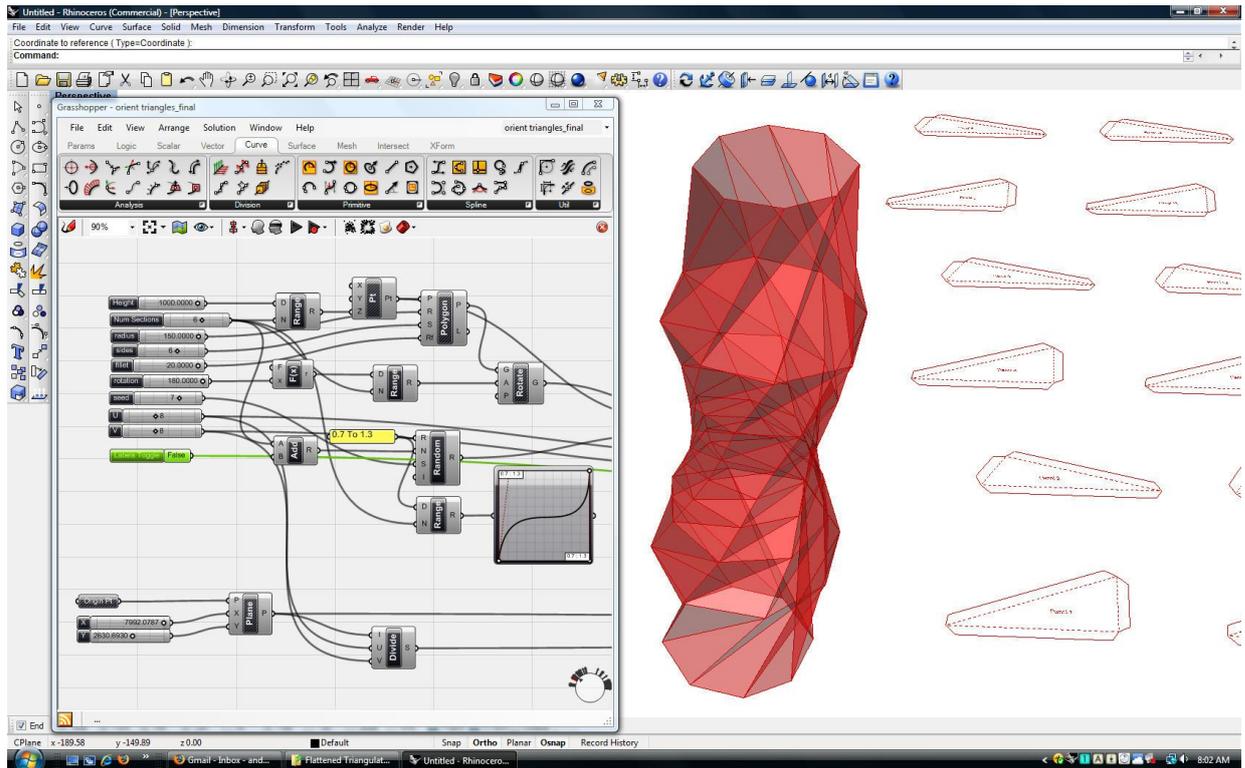
modeladas, geometrias, comportamento dos usuários, entre muitas outras informações e apropriadas de maneira direta nas várias etapas do projeto.

O poder cada vez maior dos computadores atuais reside na sua capacidade em calcular extremamente rápido a partir de fórmulas matemáticas de grande complexidade. Se for considerando o âmbito do projeto de edifícios e do design, com a utilização dos parâmetros para a criação de geometrias em interfaces gráficas torna-se possível viabilizar geometrias complexas, introduzindo a possibilidade de criar e manipular novas famílias de formas e de superfícies de maior dificuldade, como são as curvas, resolvidas com muito esforço e morosidade pelas metodologias tradicionais do desenho. Conforme Florio (2007), novas ferramentas computacionais, em ambientes paramétricos, permitem programar as dependências entre componentes, por meio do uso de variáveis, chamadas parâmetros. Estes permitem construir regras, traçar relações entre os pontos de uma curva, e definir o relacionamento e dependência entre eles. Portanto, as curvas derivadas deles capacitam a criação de superfícies curvas controladas parametricamente.

Os parâmetros são valores e informações os quais interferem diretamente no resultado do processo. Tais parâmetros variam, desde informações mais simples, como a quantidade utilizada de material até equações complexas relacionadas à estrutura. Na arquitetura, por exemplo, os parâmetros são capazes de codificarem e quantificarem opções e variáveis disponíveis em um sistema. A linguagem de programação visual Grasshopper®, com *scripts* embutidos nos comandos, apresenta uma atratividade por operar com *scripts* embutidos nas sequências de comandos, que os antigos meios de programação não conseguiram. Sua facilidade de operação tem incentivado a produção de componentes de grande complexidade, com parâmetros claramente definidos. Conseqüentemente, nota-se que tais recursos tecnológicos têm contribuído para avanços significativos sobre o domínio de formas de grande complexidade, sobretudo para novos estudos sobre a geometria topológica.

O Grasshopper®, como ferramenta de programação visual, integrada ao Rhinoceros® 3D, serve para a geração de formas paramétricas que não requer conhecimento prévio de programação e *scripts*. Tal ferramenta, que opera com uma linguagem de programação cujo desenvolvimento de códigos acontece de forma visual, facilita a apresentação e a organização de comandos complexos de maneira mais objetiva e, em tempo real, acompanhar o trabalho que se acontece visualmente ao mesmo tempo em que as rotinas vão sendo construídas. Exemplo disto são as dimensões da forma que estão sujeitas a restrições, podendo ser facilmente alteradas com poucos cliques nos componentes que compõem o algoritmo na interface do Grasshopper® (figura 19).

Figura 19: Exemplo de aplicação paramétrica através da ferramenta de programação visual Grasshopper® para o software Rhinoceros®.



Fonte: Moczydlowski *apud* Reis Santos (2014).

Uma apresentação visual com o aparecimento simultâneo do que está sendo desenvolvido serve para auxiliar de maneira facilitada a localização de eventuais erros os quais podem ser corrigidos e imediatamente visualizados e, por outro lado, possibilita a implementação de automações mecânicas reais que futuramente poderão vir a ser adotadas.

A implementação dos códigos por modelagem paramétrica além de permitir o desenvolvimento de estratégias generativas através da manipulação de um ou mais aspectos dos parâmetros possibilitando a variação de formas que atendam determinadas características previamente elaboradas e permitindo, ainda, uma grande variedade de soluções podendo ser geradas e otimizadas. Ferramentas digitais mais recentes desempenham um papel relevante na concepção, análise e produção de formas (MONEO, 2001).

Estes novos automatismos trazem consigo a visão de que algum dia projetistas e outros não especialistas em biologia terão a possibilidade de desenvolver novos sistemas e dispositivos biológicos, sem ter conhecimentos detalhados dos comportamentos moleculares das partes biológicas, no entanto, continuará a ser imperativo, que artistas, designers e arquitetos tenham um profundo conhecimento dos processos e técnicas biológicas (MYERS, 2012).

Reis Santos (2014), afirma que os princípios de concepção natural são agora bem entendidos e capazes de serem replicados por sistemas *CAD*. Os sistemas digitais começam a familiarizar-se com novos conceitos, como design generativo ou design paramétrico. O design generativo parte, por base, de um modelo paramétrico, e gera possibilidades projetuais úteis e viáveis através de um conjunto de regras ou algoritmos, que obedecem às leis naturais. O modelo paramétrico é um processo de modelação, que pode ser simulado através do computador, mas que se assemelha aos desenvolvimentos morfogenéticos estudados na biologia

Estevez (2003) designa como “arquitetura genética”, uma nova direção a tomar na qual o arquiteto não só pretende criar na natureza, mas criar com a natureza, sendo que o objetivo passa por ele próprio criar a natureza, um conceito facilmente incorporado no biodesign. Cada vez mais, as novas tecnologias possibilitam o projetista de manipular os dados da natureza, as suas formas, texturas, cores e até sons. O designer deixará de pensar na forma final e passará a ser um criador de “famílias” de objetos com uma infinidade de variações ao seu dispor.

Desta forma, pode-se afirmar que um projeto paramétrico foge da forma determinista, a qual o projetista desenvolve um projeto pensando em sua forma final. Neste caso, são as diretrizes (parâmetros) que determinam a forma, cabendo ao projetista apenas a escolha dentre as várias opções de formas finais que o sistema apresenta, a partir dos parâmetros previamente definidos no *software*, se obtém uma série de opções formais para atender um mesmo objetivo. Como as partes do projeto estão inter-relacionadas qualquer mudança acontece em conjunto e de forma coordenada.

#### **2.9.5. Padrões da natureza, gramática da forma e sistemas generativos**

Conforme Knippers & Speck (2012) no reino dos organismos biológicos, a abundância de formas e superfícies é uma consequência direta do processo evolutivo que os seres vivos sofrem ao encontrar e responder constantemente às mudanças das condições ambientais. As características morfológicas de cada indivíduo correspondem ao resultado desta constante interação entre o organismo e seu ambiente, sob as influências do seu meio, os seres vivos se adaptam através da seleção e reprodução, desta forma aumentando a probabilidade da sua sobrevivência. A natureza se encarrega de resolver questões para a satisfação de requisitos parcialmente conflitantes em função da limitação do potencial de seleção natural como um agente de otimização.

Na natureza existe uma ampla diversidade morfológica entre os organismos, mesmo entre aqueles que habitam um mesmo ambiente, demonstrando que uma solução ideal está longe de existir, mas sim um apanhado de estratégias diferentes buscando um desempenho ideal

sob determinado contexto. Ao projetista que procura a natureza como fonte de inspiração, quer ele designer, arquiteto ou engenheiro, cabe identificar quais quais as regras, subjacentes aos princípios, que a natureza emprega para sua sobrevivência. Uma vez identificadas cabe a este projetista realizar suas abstrações do modelo referencial de natureza biológica para que possa implementar como referência ao seu projeto.

Na natureza é possível identificar sua habilidade em usar a forma ou as superfícies ao invés de empregar a adição de material ou de mais energia para atender as suas necessidades funcionais, ou seja, ela é econômica. Estas formas e superfícies apresentadas na biologia que são subjetivamente, com raras exceções, as razões funcionais de seus organismos. A este respeito Casti (1989), *apud* Rian & Sassone (2014), diz que frequentemente a natureza como inspiração está combinada como a matemática para que possa ir além da inspiração superficial e realizar projetos estruturalmente racionais. A matemática aporta regras que orientam arquitetos e engenheiros a compreender as formas naturais. Na matemática, além da geometria euclidiana, se ocupa com a não euclidiana irregular, a qual possibilita explicar as formas através da matemática pelo conceito das geometrias complexas não lineares e fractais.

Se é possível, partindo deste entendimento da geometria associada à natureza, aportar regras para o seu entendimento, é possível dizer que há uma leitura da linguagem da natureza através das suas regras gramaticais que a constroem. No caso das formas e superfícies da natureza o emprego de analogias desta linguagem formal ou visual é estabelecido como uma gramática da forma, a qual usa regras que descrevem um vocabulário inicial. A aplicação pelos projetistas de regras a partir de abstrações das formas da natureza permite transformações as quais produzem multiplicidades de forma em um espaço projetual. A este respeito March & Stiny (2014), dizem que os projetos de design derivados de um sistema de regras devidamente especificado, entendido como uma gramática, se constituem em uma linguagem. As transformações e as regras fornecem uma tradução de um idioma para outro.

Considerando que esta maneira possibilita uma geração de formas, geometrias e construções seguindo uma metodologia generativa a qual consiste na recombinação de elementos e suas transformações recursivas, fornecendo a uma, ou mais formas iniciais, uma série de regras de transformações, fazendo com que novas formas possam ser geradas por regras sucessivas. Este estudo busca na biologia de determinados frutos ou sementes fonte de inspiração para soluções de projeto a partir de uma gramática da forma. A este respeito Lopez *et al.* (2015), afirmam que as sementes possuem diferentes estratégias formais e geométricas, mas todas

geram formas construídas leves e otimizadas para dispersão. As sementes são superfícies funcionais que consideram a economia de forma.

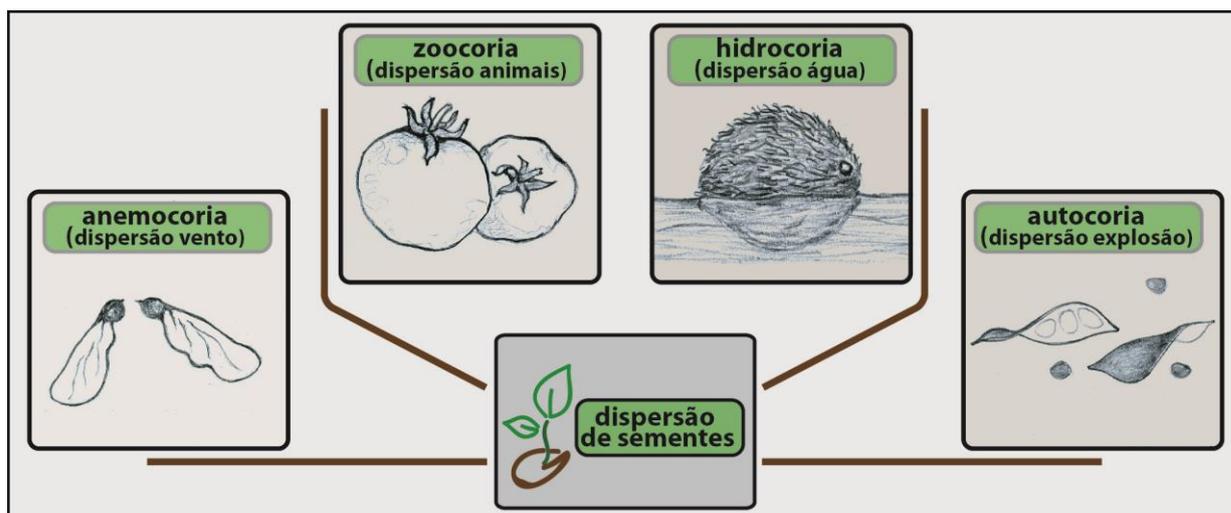
## **2.10. As estruturas biológicas e a forma geométrica de frutos e sementes**

Hsuan-An (2002), afirma que: qualquer elemento ou objeto que tenha vida própria pode ser chamado de um “sistema vivente.” É possível que, através de uma hierarquização de sistemas maiores e menores dentro de um sistema global dos objetos naturais, alguns destes elementos da natureza, como frutos e sementes, sejam um subsistema de um outro subsistema maior. Desta forma é possível ser analisada uma série muito limitada de tipos de frutos ou suas respectivas sementes, com objetivo de mostrar a grande potencialidade dos recursos que esses sistemas viventes oferecem, apesar da delimitação em quantidade. A análise desses frutos e sementes servirão como exemplos do procedimento com seus recursos específicos.

Segundo Pandolfi & Izzo (2013), os frutos e suas sementes fornecem o vínculo genético vital e o agente de dispersão entre gerações sucessivas de plantas. Sem a dispersão das sementes como meio de reprodução, muitas plantas desapareceriam rapidamente. As plantas não têm qualquer tipo de mobilidade e permanecem no mesmo local para toda a vida, por isto precisam confiar na dispersão de sementes para transportar seus descendentes no meio-ambiente. Assim, estratégias de dispersão de sementes são caracterizadas por robustez, adaptabilidade, inteligência (tanto comportamental quanto morfológica), e eficiência em massa e energia (incluindo a capacidade de utilizar fontes ambientais de energia disponível): todas as qualidades que os sistemas de engenharia avançados visam, em geral, e em particularmente aqueles que precisam habilitar empreendimentos complexos.

Desta forma a caracterização dos frutos e das sementes, ainda que sob um aspecto mais superficial estético-funcional, representa um universo grande de possibilidade soluções para o design e arquitetura. A evolução e adaptação estratégica das plantas em acordo com o seu meio apresenta características, conforme afirmam Pandolfi & Izzo (2013), de controle do desenvolvimento das sementes, de produção de componentes estruturais para sua dispersão (figura 20), em criar mecanismos moleculares para manter as sementes adormecidas até o período para sua germinação e monitoram o meio-ambiente para liberá-los no momento certo. Isto pode fornecer várias soluções de projeto e design que podem ser referenciais de biomimética para prática em outros projetos. Fatores como a miniaturização, maior eficiência de integração e embalagem, eficiência energética e maior autonomia e robustez, são características requeridas na maioria dos projetos de design e arquitetura, boas razões para considerar soluções biomiméticas do reino vegetal.

Figura 20: Principais modos de dispersão de sementes (agentes dispersores).



### 2.11. Grupos vegetais: evolução e o funcionamento de frutos e sementes

A respeito da dispersão das sementes, pode-se afirmar que os principais agentes de dispersão são abióticos (vento e água) ou biótico (animais e a própria planta). As sementes podem tomar vantagem de uma ou mais dessas estratégias usando ao máximo as formas abundantes de energia disponíveis. Para isso, elas evoluem suas formas, estruturas, cores, sabores e cheiros específicos para mover-se no meio-ambiente.

A dispersão dos frutos (e por consequência das sementes), assim como pode-se classificar as flores em acordo com seus polinizadores, pode ser agrupada de acordo com seus agentes de dispersão. São chamados frutos anemocóricos aquelas plantas que possuem frutos ou sementes extremamente leves e que por isso podem se dispersarem através do vento. No caso deste estudo a semente de Cedro - *Cedrela fissilis* (Meliaceae). A dispersão por animais, a zoocoria, é o caso da Noz comum - *Juglans regia* (L.) e dos frutos da palmeira Jupati - *Raphia taedigera* (Mart.). Outros empregam a dispersão chamada hidrocoria a qual acontece através da água ou da umidade assim como a dispersão autocorica quando a disseminação das sementes acontece por meios próprios próximos da planta mãe ou por explosão espontânea do fruto, liberando as sementes. Neste caso, geralmente, as sementes são aladas e se o objetivo for segmentar ainda mais a dispersão zoocoria, tem-se, dentre outras, a distribuição pelo homem, a chamada dispersão antropocórica.

Estas estratégias de dispersão indicam que, em uma análise biomimética da dispersão de sementes, podem trazer soluções para melhorar o design, podem apresentar alternativas, as quais fazer evoluir as formas, estruturas, cores, sabores e cheiros específicos como estratégia de movimentação no meio ambiente. Assim existem frutos que abrigam sementes ou mesmo estas, como por exemplo das suculentas, adaptadas para atrair animais, sementes

flutuantes que flutuam milhares de quilômetros, em formato de asas e pára-quadras capaz de se fazer transportar de forma aérea e de frutas balísticas que podem lançar sementes a vários metros de distância.

Algumas plantas dispersam a sua prole sozinhas, e também neste caso, as estratégias são muitas e merecem destaque. Eles podem usar algumas fontes externas de energia para dobrar suas estratégias para que as sementes se separem da casca que as contém, caindo mais distantes da planta-mãe. Às vezes eles dependem de estruturas higroscópicas que alteram sua configuração de acordo com o nível de umidade do meio externo, liberando as sementes de seus invólucros, ou propulsando eles no solo. Os movimentos higroscópicos nas plantas são bastante comuns e são possíveis graças à estrutura particular da parede celular, exemplo disto são as plantas com dispersão balística, que utilizam a abertura explosiva dos frutos ou lançando alavancas que promovam a retirada as sementes.

Do ponto de vista biomimético, conforme Pandolfi & Izzo (2013), são muito interessantes os métodos de auto-dispersão nestas duas categorias: balísticos e dispersão higroscópica. Tecidos higroscópicos tocam muitas funções diferentes: eles podem ser responsáveis por contrações elásticas utilizadas na dispersão balística, mas também podem prejudicar o tempo certo de dispersão. Em cones de pinheiro, uma diminuição da umidade relativa provoca uma abertura gradual das escalas, do qual, em um clima seco, muitas sementes aladas são liberadas.

Existe uma forte necessidade de encontrar formas mais simples para abordar problemas complexos e a natureza pode ajudar neste processo, pois apresenta muitos exemplos a partir dos quais é possível extrair princípios de trabalho muito bem-sucedidos. Pandolfi & Izzo (2013), os quais buscavam *insights* para programas de exploração espacial, encontraram exemplos como as superfícies auto-limpantes, anti-incrustantes e antimicrobianas que poderiam encontrar aplicações para o gerenciamento de contaminação microbiana em uma placa espacial ou dentro das salas esterilizadas usadas para construir e testar uma nave espacial. O comportamento auto-enterrado poderia contribuir para a exploração sub-superficial de corpos planetários, e a implantação de sondas com para-quadras poderia melhorar a compreensão das atmosferas extraterrestres. Entendendo em detalhes como as plantas controlam a dispersão de sementes poderia trazer soluções em programas complexos da exploração espacial.

As plantas, seus frutos e sementes, exibem muitos exemplos de um design rico e de funcionalidades especializadas que merecem estudo além do campo da biologia. As adaptações morfológicas em plantas e sementes surgiram ao longo do tempo para aumentar

a eficiência da dispersão de sementes, objeto de sua distribuição e continuidade. No caso da dispersão do vento, as sementes que possuem características tais como: tamanho reduzido, leveza, formato alado ou asas, filamentos de aderência, etc., se desprendem da planta mãe caem mais lentamente, flutuando mais tempo no ar, fatores que promovem uma maior e melhor dispersão de sementes.

Frutos e sementes podem se constituir em um modelo biológico interessante como fonte de inspiração na natureza e para aplicações da biomimética. Um exemplo disto, em uma analogia direta, trata da incorporação ao edifício do Esplanade Theatre em Singapura, projeto dos escritórios DP Architects e Michael Wilford. Este edifício é revestido por uma superfície de sombreamento cuja elaboração é inspirada pela fruto do Durião ou Durian (*Durio zibethinus* Rumph.). Esta árvore, da família das *Malvaceae*, é muito comum na região da Ásia, produzindo um fruto com uma superfície externa espinhosa, que guarda uma semelhança, forma e tamanho, com a fruta jaca conhecida no Brasil. Esta fruta, com forte odor, é considerado como um fruto muito delicioso, especialmente para os asiáticos. Para este edifício, a criação de uma segunda pele, baseada na superfície do fruto do Durian, conforme apresenta a figura 21 a seguir, funciona como sistema de sombreamento externo e foi desenvolvida através de um conjunto de grelhas triangulares tridimensionais que se ajustam durante o dia conforme o ângulo e posição do sol.

Figura 21: Bioinspiração: Fruto Durian ou Durião (*Durio zibethinus* Rumph). **(A)**; Esplanade theater **(B)**; superfície piramidal da segunda pele **(C)**.



Fonte: adaptado de Szymon (2016).

Szymon (2016) afirma que assim como a fruta, muito popular no país, o edifício ao empregar sua forma referencial, tornou-se rapidamente conhecido. A superfície espinhosa desta fruta, formada por pequenas pirâmides na casca externa, atendem a funções diversas. Estes picos piramidais são fortes o suficiente para proteger a polpa da fruta dos impactos mecânicos, especialmente quando os frutos caem no solo (alguns frutos do durian pesam até cerca de 30 quilos). De outra forma, os picos são afiados o suficiente para evitar que animais e pássaros ataquem a fruta enquanto os durians encontram-se na fase do amadurecimento. E, por fim, a

forma piramidal permite que a fruta acumule calor necessário para o amadurecimento, ao mesmo tempo que preserva as sementes do superaquecimento.

Foi com base em tais funções, especialmente nesta última, antes exposta, que serviu de fonte de inspiração biomimética para o projeto do edifício Esplanade (figura 22): considerando que luz solar direta faz com que as temperaturas no mês mais quente cheguem a atingir até 45 graus Celsius o teto, em analogia formal ao fruto do Durian (*D. zibethinus*), serviu como dispositivo para atenuar este calor que atua sobre a grande superfície da edificação.

Figura 22: Esplanade theater, conceito de design: objetivos e resultados.



Fonte: adaptado de Szymon (2016).

Com fonte na biomimética os arquitetos projetaram uma esfera com atributos semelhantes ao sistema funcional da fruta tomando, desta forma, emprestado a ideia da natureza para este cotidiano, com os pressupostos de organização, funcionalidade e racionalidade.

## 2.12. Frutos e sementes de casca dura e suas funções

Conforme Gloria & Guerreiro (2006), o fruto é o desenvolvimento do ovário após a fertilização do óvulo e possui no seu interior a semente. Ele tem como funções básicas a proteção e a conservação de forma a garantir o desenvolvimento das sementes sem que as mesmas possam secar antes da sua dispersão. O formato do fruto está ligado à sua forma de polinização, o que implica que alguns frutos podem manter seu interior mais úmido para o desenvolvimento das sementes enquanto que outros podem formar alas que irão se abrir e liberar as sementes em algum processo que lhes facilite a dispersão, como por exemplo o vento ou água.

Por outro lado, conforme Gloria & Guerreiro (2006), a semente é basicamente o óvulo fecundado que é formado pelo embrião e tecidos nutritivos (endosperma e perisperma). As sementes são revestidas por um envoltório protetor, os tegumentos (cascas) em no máximo duas camadas, que é proveniente das paredes do óvulo. No entanto algumas sementes não apresentam esta estrutura, quase sempre de caracterização lenhosa ou dura, e estas são protegidas pelo pericarpo do fruto. O embrião já possui as estruturas jovens que darão origem

a uma nova planta: a radícula (dará origem a raiz), epicótilo (o caule) e os cotilédones (originará as folhas), indicando a grande importância deste envoltório que a embala.

Gloria & Guerreiro (2006) dizem, ainda, que uma semente pode ser considerada uma fase de repouso (dormência) no desenvolvimento de uma nova planta pois consiste em uma planta em seu estágio inicial (embrião) protegida em uma espécie de embalagem a qual possa ser transportada para longe da planta que lhe deu origem e retomar tal desenvolvimento em um outro local geográfico quando as condições lhe forem propícias.

Pode-se dizer então que frutos, entendidos como estruturas que são responsáveis por envolver as sementes, tem como principais funções as de proteger as sementes enquanto amadurecem e auxiliar na dispersão das mesmas. O invólucro externo, uma parede, a qual recebe o nome de pericarpo, possui desde uma forma carnosa e suculenta até sua forma seca, considerando ainda que existem casos em que o fruto é a própria semente sem qualquer envoltória de proteção. A semente, por sua vez, que contém o embrião, tem como funções proteger, nutrir e conservar este embrião sob as mais diversas condições ambientais, nas quais as plântulas, pós sua germinação, poderiam ter dificuldades de enfrentar. Os frutos são condicionadores importantes considerando que as sementes podem tolerar situações de seca hídrica, fogo, temperaturas elevadas, baixas temperaturas até o congelamento dentre outras condições adversas.

Conforme Medeiros & Zanon (1999), a germinação, para todas as sementes, não é uma condição imediata após o amadurecimento do fruto e sua colheita. Algumas sementes, após seu processo de dispersão, passam por um período denominado de dormência, caracterizado pela impossibilidade de germinação, ainda que tenham condições ambientais que lhes favoreçam.

A dormência da semente é um recurso que a natureza define para que as plantas possam germinar nas condições favoráveis ao seu desenvolvimento adequado, considerando fatores como: umidade (excesso ou déficit hídrico), temperatura, luz e oxigênio. Esta dormência, uma espécie de bloqueio até que as condições estejam favoráveis, podem ser de forma endógena pela semente, ou de forma exógena. Conforme Metivier (1979), a dormência exógena acontece em função do tegumento, endocarpo, pericarpo ou por órgãos extras florais. Mecanismos como o da impermeabilidade dos tecidos, um tegumento duro, impermeável à difusão de água ou gases ao embrião, impedindo sua expansão assim como à presença de substâncias que inibem o crescimento do embrião e que estão presentes nestes tecidos e impedem mecanicamente o avanço do embrião.

Os frutos ou sementes de casca dura os quais não conseguem absorver água e/ou oxigênio necessitam que a natureza se encarregue de soluções como a escarificação ou abrasão mecânica pela quebra da camada endurecida, mas que não danifique o embrião, animais roedores por exemplo, ou pela degradação destes tecidos por micro-organismos, ácidos do aparelho digestivo de animais, fungos ou mesmo por ácidos fracos do solo associados à condições de umidade e temperatura, situações que facilitam a absorção de água pela semente.

Medeiros & Zanon (1999) afirmam, ainda, que as sementes possuem diferentes níveis de dormência (mesmo sendo originadas da mesma planta), ou seja, um processo complexo tanto em níveis e formas em espécies diversas. De uma maneira geral pode-se dizer que existe uma dormência primária que é um processo caracterizado pelo atraso do processo de germinação, multiplicando as chances de dispersão e sobrevivência, reduzindo a competição intraespecífica e uma dormência secundária, atribuída a alterações fisiológicas após a colheita causadas pela exposição das sementes a condições desfavoráveis.

A dormência de frutos de casca dura é um recurso de sua adaptação evolutivo para que as plantas germinem no período mais propício ao seu desenvolvimento, a natureza da vida e seu plano para perpetuação da espécie. Desta forma estes frutos se mostram como uma importante fonte de inspiração quer em sua biomorfose ou na biomimética uma vez que se constituem em importantes invólucros de soluções múltiplas, o que, por analogia, poderia se apresentar, por exemplo, como referência para o envoltório (fachadas) de edificações.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão apresentados os materiais, métodos e procedimentos empregados para realizar o estudo de doutorado assim como as amostras coletadas e a investigação realizada em cada uma delas. A metodologia empregada foi entendida como um processo que envolve um conjunto de passos os quais encaminham para o estudo de caso realizado.

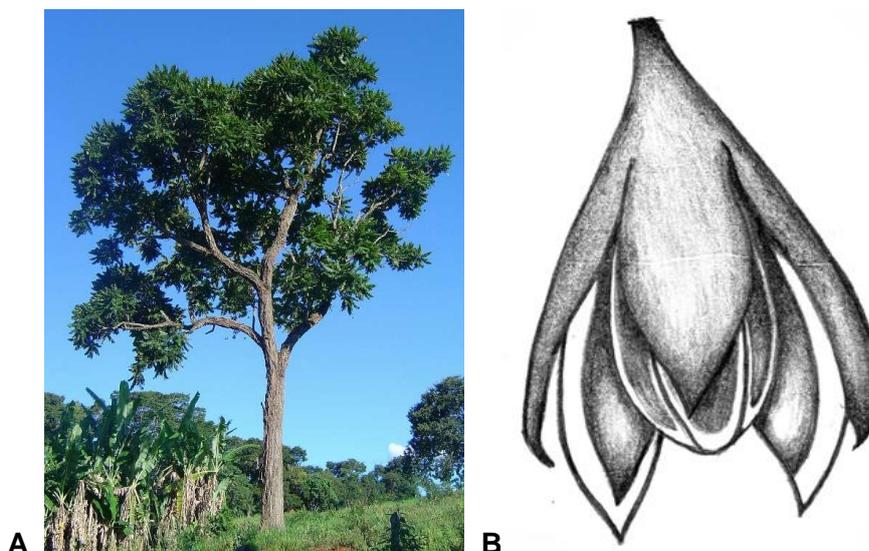
#### 3.1. Escolha de frutos de cascas dura para estudo de sua estrutura

Este estudo tem como objetivo investigar a superfície da casca dura de três frutos e sementes, observadas sobre determinadas características, particularmente da superfície do material endurecido que envolve as sementes. As características a serem buscadas na aplicação referem-se especialmente à espessura do material que lhe dá o atributo da leveza, à face externa lenhosa e sua conformação como forma resistente, às rugosidades, como resultado do conjunto de dobras e vincos, um mecanismo que melhora a resistência mecânica sem aumentar a quantidade de material empregado na sua constituição.

#### 3.2. O estudo da casca dura do fruto de Cedro - *Cedrela fissilis* (Meliaceae)

O Cedro, conhecido pelo nome científico *Cedrela fissilis* (Meliaceae), é uma árvore de beleza ornamental (figura 23), empregada tanto no paisagismo como na arborização urbana. Além disto, segundo Lorenzi (1998) é uma árvore de grande importância por seu uso na recuperação florestal de áreas degradadas e de matas ciliares, também para recuperação de solos contaminados por metais pesados. Normalmente, o cedro ocorre em solos profundos e úmidos, de textura argilosa a areno-argilosa e em solos bem drenado, mas não se desenvolve adequadamente em solos mal drenados, rasos ou com lençol freático superficial.

Figura 23: Árvore do Cedro - *Cedrela fissilis* (Meliaceae) (A) e fruto. (B).



Fonte: adaptado de Lorenzi (2010).

Caracterizada por ser leve, a madeira do cedro é muito apreciada na construção civil, naval e aeronáutica, moveleira, marcenaria, confecção de instrumentos musicais e esculturas. Seus taninos naturais e sua caracterização como madeira com taninos naturais as quais a caracterizam como a chamada madeira de sabor amargo que, por exemplo, faz com que apresente grande resistência ao ataque de organismos xilófagos. Da madeira do Cedro (*C. fissilis*), extrai-se óleo essencial com perfume que caracterizam esta madeira.

Conforme Carvalho (1994) os frutos desta árvore são cápsulas que apresentam a forma de uma pera, uma cápsula sub-esférica, em forma abobadada e até oblonga, pendente, com cinco valvas lenhosas, de cor escura, pardo escura, áspera, com lenticelas arredondadas palidamente pardas e salientes, conforme apresentada na figura 24.

Estes frutos são deiscentes (abrem-se na maturação), com características lenhosas, ásperas, medindo de 25 mm a 50 mm de comprimento e que alojam de 30 a 100 sementes. No interior desde fruto apresenta uma coluna central na qual se alojam as sementes dentro desta cápsula.

As sementes, abrigadas no pedunculo central do interior do fruto, são aladas (morfologia que possibilita ser levada longe da planta mãe pelo vento – agente dispersor das sementes desta planta), de coloração bege a castanho-avermelhada, de brilho pardo, e apresentam dimensões entre 20 mm a 40 mm de comprimento e até 15 mm de largura. A coloração do fruto indica a maturação, pois passa de verde para marrom-clara, indicando a maturidade fisiológica da semente.

Figura 24: Fruto de Cedro - *Cedrela fissilis* (Meliaceae): em fase inicial de abertura (A), totalmente aberto após seco (B) e fruto e sementes (C).

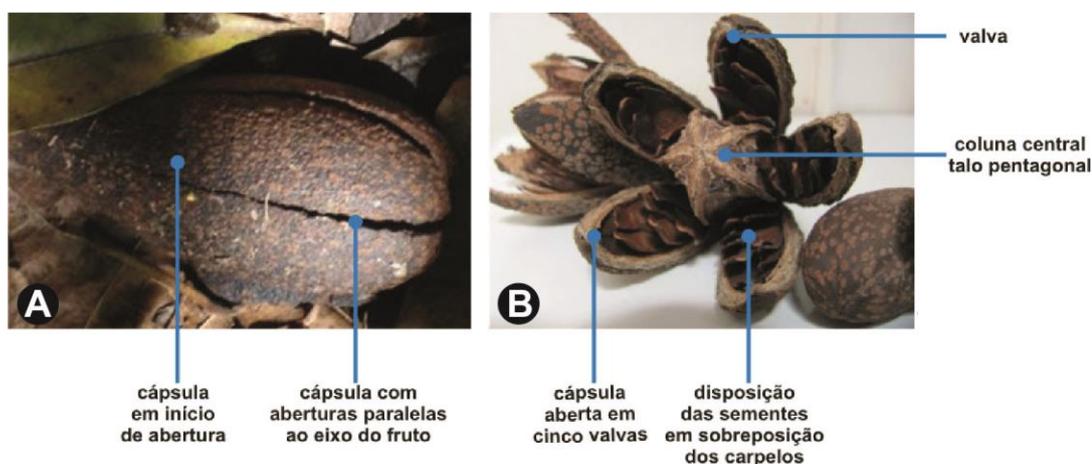


Fonte: adaptado de Carvalho (1994).

Estes frutos, que secam e abrem-se na maturação, liberando as sementes diretamente sobre o solo ao redor da árvore mãe ou, ao abrirem, são transportadas pelo vento a distâncias maiores, aumentando as possibilidades de propagação da espécie. Este fruto, em forma de uma cápsula, derivado do ovário, 2 a multicarpelar, possui como modo de deiscência ser septícida, ou seja, abre pela linha de união dos carpelos. Em frutos capsulares, secos, é

comum o mesocarpo ou o epicarpo estarem suprimidos, enquanto a camada restante assume consistência lenhosa (figura 25).

Figura 25: Fruto de Cedro - *Cedrela fissilis* (Meliaceae): componentes em fruto fechado (A) e aberto (B).



Fonte: adaptado de Carvalho (1994).

### 3.2.1. Características morfo-estruturais dos frutos de Cedro- *Cedrela fissilis* (Meliaceae)

No estágio amadurecido os frutos se abrem ainda no galho apresentando uma casca aberta, dividindo-se em cinco partes iguais e dentro uma coluna central, em formato de talo (figura 26), junto ao qual se alojam as sementes dispostas sequencialmente umas sobre as outras.

Figura 26: Fruto de Cedro - *Cedrela fissilis* (Meliaceae): aberto, após a dispersão das sementes.

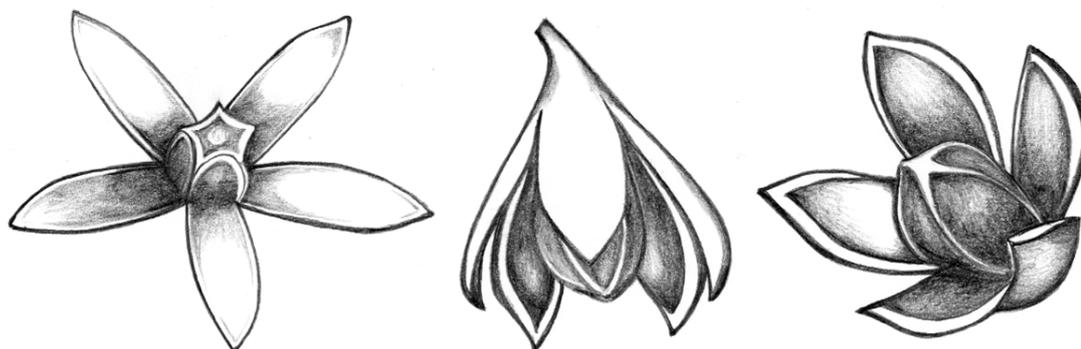


Conforme Hsuan-An (2002), a casca do fruto do Cedro (*C. fissilis*), possui algumas características estético-formais bastante comuns a outros organismos vegetais, caracterizando um padrão de estrutura simétrica que se assemelha às flores de cinco pétalas. Por outro lado, vários detalhes formais e estruturais criam alta resistência contra ações de forças externas e apresentam aspecto esteticamente atraente por suas curvaturas, variação gradual de espessura, dentre outras características. Esta estrutura de casca aberta (figura 27)

é bastante resistente e sua forma similar se destaca esteticamente quando associada a algumas superfícies regradas existentes na arquitetura de algumas edificações.

A coluna central, um talo interno, é caracterizada como um volume, dividido em cinco pequenas concavidades de dimensões iguais e, considerando uma vista superior, a sua extremidade tem uma configuração estrelar ou pentagonal. A forma alongada, em vista lateral, apresenta linhas levemente sinuosas e superfícies nas reentrâncias com suaves marcas em relevo no lugar ocupado pelas sementes.

Figura 27: Fruto de Cedro - *Cedrela fissilis* (Meliaceae): desenhos de observação de um fruto aberto.



### 3.2.2. Escolha e seleção de amostras do referencial, fruto e semente de Cedro - *Cedrela fissilis* (Meliaceae)

#### 3.2.2.1. Critérios gerais

A amostra foi obtida de uma árvore de Cedro (*C. fissilis*), junto ao pátio da Fundação Zoobotânica em Porto Alegre. De um conjunto de amostras, de frutos secos já em estágio aberto, na maioria dos casos sem a presença, ou apenas com presença parcial, de sementes. No entanto, a amostra tomada estava íntegra e apresentou todas as partes constituintes, como anteriormente visto (Figuras 24 e 25). A pretensão inicial era digitalizar tridimensionalmente uma destas amostras, escolheu-se aquela que apresentasse a menor quantidade de imperfeições e defeitos e observasse o padrão de simetria comum a este fruto.

As tentativas da digitalização tridimensional esbarraram em um problema que dificultava uma melhor união das partes digitalizadas para formar o todo. O fruto do Cedro (*C. fissilis*), traz uma grande quantidade de áreas “sombreadas” que exigem a digitalização de inúmeras vistas para posterior montagem.

Considerando-se tais dificuldades e como tratava-se de uma fase de investigações prévias optou-se, inicialmente, por fazer apenas estudos de abstrações na forma de desenhos e da representação gráfica pela geometrização da forma usando a linguagem dos softwares gráficos Vector Works® e Corel Draw®. A possibilidade de digitalização ou do emprego de

tomografia computadorizada poderia ser retomada uma vez escolhido este fruto dentre aqueles estudados.

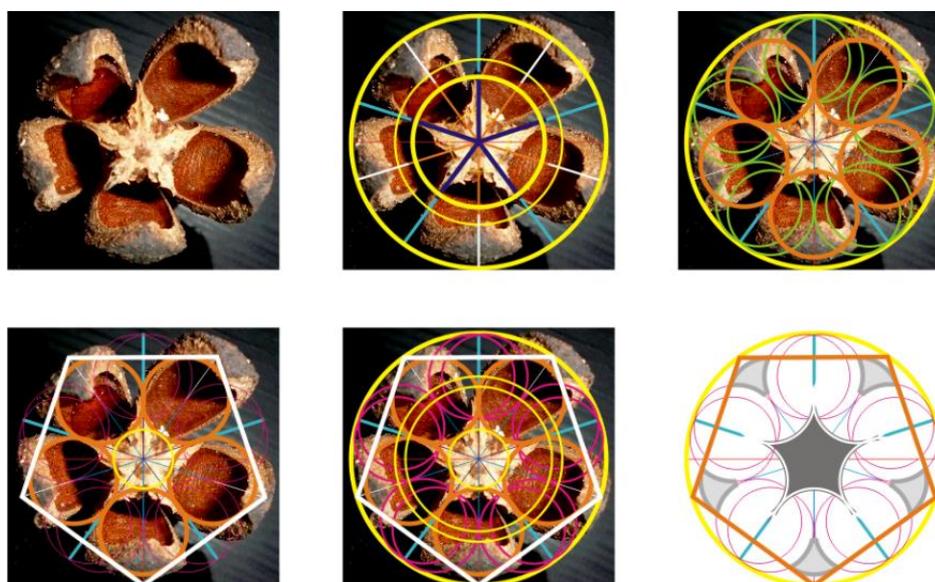
### 3.2.2.2. Estudos da composição geométrica a partir do fruto seco aberto de Cedro - *Cedrela fissilis* (Meliaceae)

O fruto da semente de Cedro (*C. fissilis*), tem a característica de abrir-se em cinco partes para que possa liberar as sementes as quais encontram-se alojadas no pedunculo pentagonal em seu interior. Esta caracterização cinética da fruta poderia ser explorada em uma solução tridimensional que pudesse ser aplicada em um projeto ou alguma solução para um produto que exigisse o movimento de abertura ou fechamento.

No entanto como o objetivo inicial era o da geometrização da forma optou-se pela leitura geométrica de todo para que, a partir desta geometrização básica pudesse ser aplicado em uma estrutura laminar através da repetição desta abstração geométrica observando determinadas regras como translação, simetria, deslocamento, além de outras.

No exercício de abstração da forma geométrica da semente de cedro, conforme mostra a figura 28, empregou-se uma circunferência externa e várias circunferências inscritas as quais geometrizavam a forma de cada uma das cinco pétalas que, no seu conjunto, apresentam uma forma pentagonal inscrita na circunferência que contém tal forma da semente. Cada um dos raios deste pentágono coincide com a realização de 5 rotações ângulos de  $72^\circ$ ,  $144^\circ$ ,  $216^\circ$ ,  $288^\circ$ ,  $360^\circ$  e as 5 reflexões em relação às linhas que ligam o centro desta semente, com os vértices do pentágono. Estas operações para formar um grupo e este grupo indica um tipo de simetria que contém uma estrela interna, conforme figura a seguir.

Figura 28: Fruto de Cedro (*Cedrela fissilis* Meliaceae): sequenciamento da geometrização considerando o fruto aberto.



Considerando a abstração geométrica, como um desenho base desta forma pentagonal que engloba tal semente, conforme apresentado na figura 29, foram experimentadas inúmeras composições geométricas deste fruto e, em um segundo momento, buscou-se a experimentar o desenvolvimento da composição repetitiva em uma linguagem visual gerando uma superfície através da reprodução com princípios como o deslocamento, espelhamento e padrões de simetria da forma que tinha no fruto sua referência.

Figura 29: Fruto de Cedro - *Cedrela fissilis* (Meliaceae): criação de padrão geométrico conforme o fruto aberto.

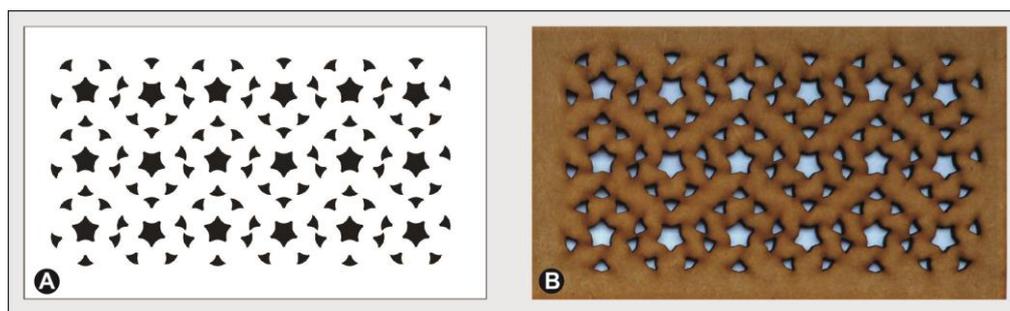


Cabe aqui salientar que para a elaboração de padrões de textura de uma superfície, a descrição dos elementos entrelaçados está intimamente ligada à idéia de resolução da textura, que se poderia pensar como uma espécie de quantidade média de pixels para cada elemento perceptível desta. Se esse número for muito grande, pode-se tentar descrever os elementos individuais em algum detalhe. No entanto, quando este número se aproxima da unidade torna-se cada vez mais difícil de caracterizar estes elementos individualmente pois eles se fundem menos em padrões espaciais distintos.

Em uma exploração inicial, em conformidade com os objetivos deste estudo, considerando-se a abstração geométrica do fruto do Cedro e o conseqüente estabelecimento de uma gramática da forma, a partir de princípios de desenhos e da forma bidimensional, criou-se composições por repetição. Tais composições geraram uma gramática visual, escolhendo-se aquela que pudesse representar uma textura mais regular, observando-se o resultado na figura 30 (A). Esta composição visual pode ser explorada também com uma possibilidade de tratamento de superfícies, como por exemplo produzir vazios na multiplicação da forma singular em uma composição que estivesse referenciada na análise geométrico-morfológica do fruto do Cedro.

Através de equipamento de corte laser, foram produzidas perfurações (vazios) em material de suporte, uma placa de MDF - figura 30 (B), que pudessem evidenciar os resultados propostos para este efeito de textura superficial e, ao mesmo tempo, induzindo que tais vazios podem produzir permeabilidade, o que poderia gerar soluções para questões como a redução dos efeitos da condutividade térmica ou da melhoria da permeabilidade lumínica dentro de um padrão de superfície, por exemplo. São características exigidas quando se trata de elementos aplicáveis a determinadas superfícies, especialmente àquelas ligadas a arquitetura.

Figura 30: Padrão compositivo desenvolvido em *software* gráfico (A) e aplicação do padrão compositivo em placa de MDF - produção da superfície vazada do material (B).

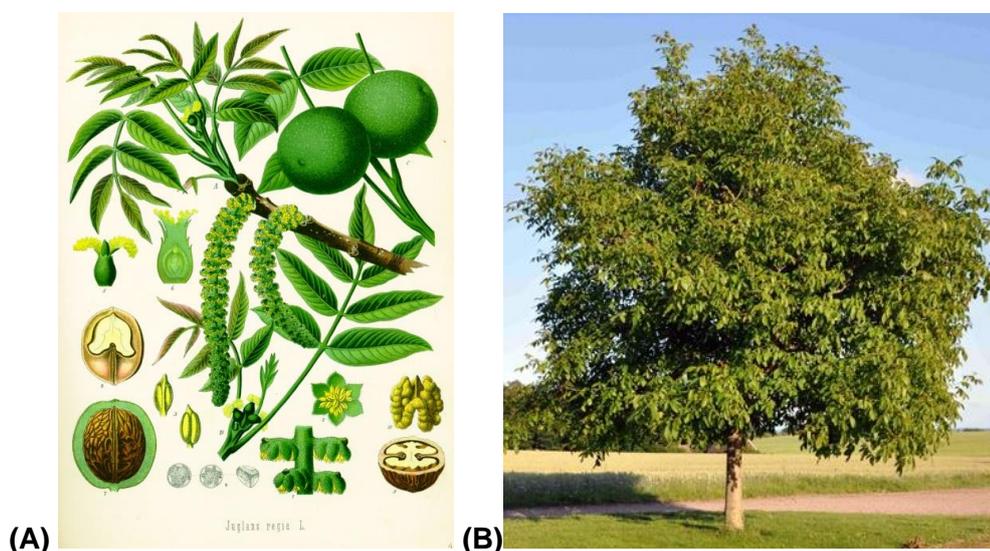


### 3.3. O estudo da casca dura do fruto da Noz comum - *Juglans regia* (L.)

O gênero *Juglans* pertence à família Juglandaceae e compreende cerca de 20 espécies de árvores de folha caduca. O gênero *Juglans* distribui-se, atualmente, pela América do Norte e do Sul, Sudeste Europeu, Ásia Oriental e Japão, embora com uma distribuição descontínua entre a Ásia Oriental e a América do Norte (ARADHYA *et al.* 2007). A espécie *Juglans regia* L., também denominada como noqueira inglesa, persa ou comum, é o membro do gênero *Juglans* com maior importância a nível econômico (BAYAZIT *et al.* 2007).

Conforme Cabral (2008) a noqueira (*J. regia*) é originária da região localizada entre as montanhas da Ásia Central. Há milhares de anos atrás, os gregos introduziram germoplasma selvagem de *Juglans regia* L. na Península dos Balcãs, na Turquia e no Sudeste Europeu. A contar deste período, houve uma grande dispersão destas espécies para a Europa Ocidental e para o norte de África, através do comércio Romano. No século XVIII, a noqueira (figura 31), foi introduzida na América do Sul pelos espanhóis, que trouxeram genótipos da Europa. E no século XIX, foi importada da França para a América do Norte (norte da Califórnia).

Figura 31: Noz - *Juglans regia* (L.): conforme desenhos de Otto Wilhelm Thomé (A) e árvore Noqueira em estágio adulto (B).



A Noz da espécie *Juglans regia* L., é denominada no Brasil, como noz chilena ou também noz comum, sendo cultivada em regiões temperadas não só pela qualidade da madeira, mas especialmente pelos frutos que produz (BAYAZIT *et al.* 2007).

Por ser, fundamentalmente, cultivada pelos seus frutos, as nozes, a maior parte da pesquisa se concentra neste fato, embora se encontrem descritas variadas utilizações de outras partes da árvore. A aromatização de licores, a utilização em cosméticos, tintas, mobiliário e em medicina tradicional são exemplos das diferentes aplicações da nogueira. As nogueiras adaptam-se facilmente a diversos tipos de solos. As principais condicionantes no seu cultivo são as propriedades físicas do solo, o qual deve permitir uma rápida drenagem e ao mesmo tempo uma boa retenção de água. Em termos reprodutivos, a nogueira (*J. Regia*) é uma planta com flores unissexuais, em que a polinização é exclusivamente anemófila (por ação do vento), sendo o pólen libertado a partir dos amentilhos (inflorescências formadas por pequenas flores sem pétalas. Considera-se que a floração nesta espécie envolve o período ao longo do qual as flores se encontram ativas e o início e duração desta etapa está condicionada pela cultivar da espécie e por fatores ambientais.

### 3.3.1. Frutas e sementes de paredes duras: drupas e nozes

A Nogueira (*J. regia*) tem como fruto uma noz grande, drupácea, com mesocarpo carnoso e endocarpo duro. A casca da noz é uma parede do carpelo endurecido enquanto que o interior comestível é a semente. Das flores femininas nascem frutos sub-globulares com dimensões entre 30 e 60 mm, com um invólucro semi-carnoso verde e liso – ao secar-se este invólucro se torna escuro e se desprende, conforme figura 32. São chamadas habitualmente de “noz”, ainda que não possam estar classificadas sobre este tipo botânico de fruto, senão em um tipo de drupa envolvida, como o são as azeitonas, pêssegos, ameixas e abacates.

Figura 32: Noz - *Juglans regia* (L.): revestimento do endocarpo.

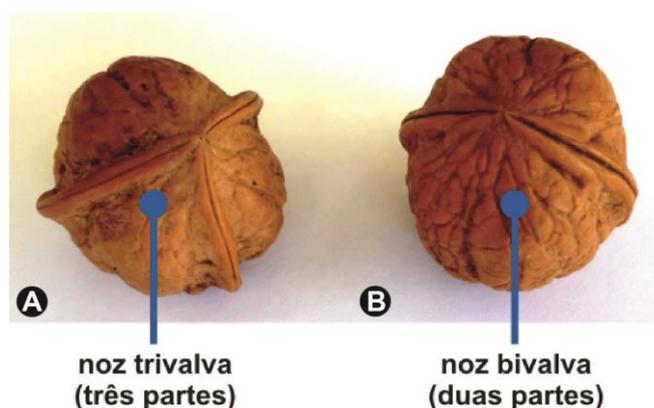


Fonte: adaptado de Bayazit *et al.* (2007).

No interior deste invólucro encontra-se um caroço, a noz (*J. regia*), com aspecto externo enrugado e dividido em dois folhetos sendo seu interior dividido incompletamente em duas ou quatro células, a semente tem dois ou quatro lóbulos e muitos vazios (espaços não

ocupados). O termo noz se aplica a este endocarpo pétreo e corrugado bivalvo (duas peças), excepcionalmente trivalvo (três peças, e neste caso com três cotilédones e três divisórias), em seu interior encontra-se uma semente em formato que se assemelha a figura de um cérebro humano que é comestível, conforme apresentado na figura 33. Esta é composta, por dois cotilédones enrugados de cor parda e separados por uma divisória perpendicular as duas valvas da noz e sua sutura.

Figura 33: Noz - *Juglans regia* (L.): dividida em três: trivalvo (A) e duas partes: bivalvo (B).



O endocarpo, aquela região do fruto a qual tem a função de proteger a semente e, em muitos casos, possui uma aparência lenhosa, como são os casos de nozes e os caroços de pêssegos. Além das nozes, este endocarpo está presente na maioria das frutas oleaginosas, tais como castanhas, amêndoas e avelãs. No caso das nozes ele tem a casca dura dividida simetricamente em duas partes ou, de forma mais rara, em três partes (conforme a figura 33), a qual envolve totalmente, abrigando, a semente em seu interior. Tem um formato ovoide com nervuras definidas as quais servem para promover a resistência, a proteção e um melhor aproveitamento do espaço interno destas frutas.

### 3.3.2. A casca da Noz - *Juglans regia* (L.) e as possibilidades do emprego através da bio-inspiração ou da biomorfose

As plantas produtoras de sementes provavelmente apareceram há cerca de 350 milhões de anos e as sementes teriam surgido como uma extensão da heterosporia em resposta a pressões ambientais (CARVALHO & NAKAGAWA, 2000). O grande evento de resultado positivo da semente, como órgão de perpetuação e de disseminação das espécies vegetais, deve-se a sua capacidade de distribuir a germinação no tempo e no espaço. A semente, com seu papel biológico da conservação e propagação da espécie, deve germinar quando as condições são adequadas para a manutenção do crescimento da plântula e subsequente desenvolvimento da planta.

A dispersão das sementes é um processo fundamental do ciclo de vida de cada espécie vegetal, e isto diz respeito ao deslocamento dos propágulos vegetais a partir da planta mãe, para distâncias seguras para sua germinação e desenvolvimento (CORDEIRO & HOWE 2003). Segundo Pandolfi *et al.* (2013), o deslocamento destes propágulos vegetais da planta-mãe é importante diante da competição entre dentro da própria flora e a proteção ante animais predatórios que tem nestas sementes fonte de alimentação, ou seja, à medida que as sementes se afastam da planta mãe, maiores são as suas chances de sobrevivência e, tornam-se ao mesmo tempo, em novos agentes de dispersão entre as gerações sucessivas de plantas.

A dispersão das sementes para o transporte de seus descendentes em todo o ambiente pode ser realizada coletiva ou individualmente; em qualquer caso, como sementes que não dependem de seu movimento autônomo, elas dependem de fatores ambientais. As estratégias de dispersão de sementes são caracterizadas pela robustez, capacidade de adaptação, a inteligência comportamental e morfológica, massa e eficiência energética.

Existem muitas razões pelas quais a dispersão de sementes é parte integrante da sobrevivência de espécies de planta:

- sementes fornecem a ligação genética vital e agentes dispersores entre gerações sucessivas, viajar no tempo;
- plantas não têm qualquer tipo de mobilidade e eles dependem da dispersão das sementes, viajar no espaço, para conquistar novos habitats;
- encontrar ambientes favoráveis sem o perigo de cruzamento em habitats locais próximo da planta-mãe;
- para reduzir a competição com outras sementes a partir da mesma planta;
- para reduzir mortalidade por predadores ou doenças podendo estar presentes na área.

Ao longo de milhares de anos as plantas evoluíram e adaptaram a sua estratégia de sobrevivência e continuidade de acordo com o seu ambiente. Uma destas estratégias é a sua distribuição, a qual pode acontecer por vários fatores, como por exemplo, pelo vento (ar), água, e por animais. Considerando a noz (*J. regia*) como uma semente que possui uma casca dura, pode-se dizer que ela está vinculada as estratégias de dispersão que envolvem as demais sementes de casca dura. Em geral estas são dispersas pela água, como por exemplo o coco (*Cocos nucifera* L.) e por animais, como roedores, no caso desta noz (*J. regia*).

Do ponto de vista da biomimética o entendimento de como plantas controlam o desenvolvimento de sementes, fabricam os componentes estruturais para a sua dispersão, constroem espécies de complexas máquinas moleculares para manter as sementes dormentes até o período mais adequado e monitorar o ambiente para liberá-los no momento

apto para sua germinação. Sob este ponto de vista, ser uma embalagem com adjetivos de sofisticação, pode fornecer indicativos para soluções diversas, apresentando possibilidades interessantes às práticas atuais de projeto em design e arquitetura.

Desta forma a semente da noz (*J. regia*) constitui-se em um importante referencial de investigação. Sua dispersão, acontece normalmente por roedores na forma conhecida como zoocoria, os quais não só transportam mas as enterram e, ao abandoná-las ou esquecer onde as enterraram, as sementes germinam formando novas plantas distantes da planta mãe.

No entanto, cabe dizer que, além das formas de transporte e acondicionamento do material vital da semente, para que ocorra tal tal germinação são necessárias condições ideais de solo (nutrientes e espessura da camada do substrato), umidade (presença de água no solo), luz (a planta precisa da incidência da luz solar, mesmo que a mesma esteja enterrada) e a temperatura (dependerá da estação do ano para que possa ocorrer a quebra da dormência). Assim o estudo deste envelope lenhoso, que é a casca da noz, sua ligação entre as capas que a compõe, sua resistência, rugosidade, porosidade e dureza mostra uma quantidade significativa de processos de miniaturização integradora em uma embalagem de bastante aplicabilidade do ponto de vista de proteção e eficiência energética os quais permitem a perpetuação da espécie.

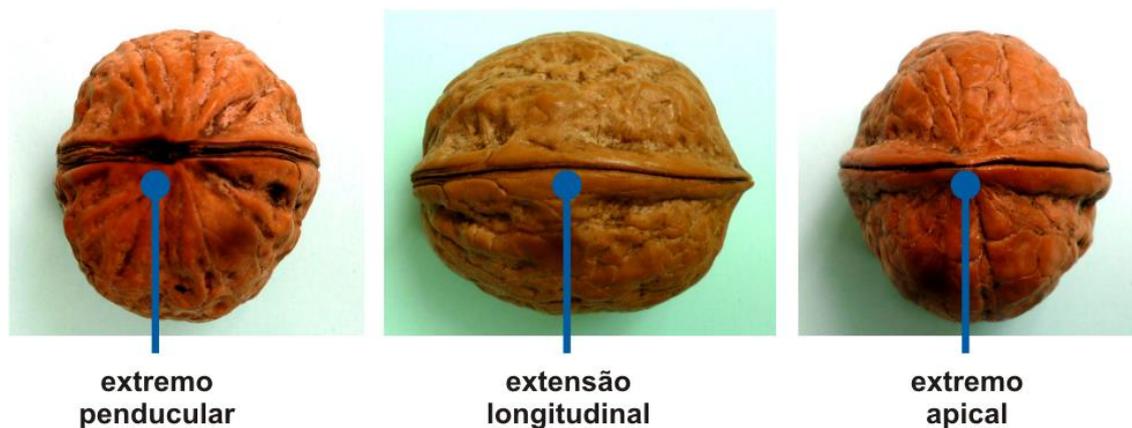
Conforme Taha *et al.* (2011), as paredes de frutas como nozes e drupas são de especial interesse para o desenvolvimento da resistência ao impacto. Servem também de inspiração a materiais resistentes à punção. Como os seres humanos têm de proteger-se de grandes quantidades de energia liberados instantaneamente (por exemplo, durante um acidente de automóvel), algumas frutas devem lidar com o impacto no solo depois de terem se soltado da árvore. Entender como são produzidas as várias combinações hierárquicas de estruturas e materiais totalmente funcionais em suas camadas protetoras permitirá a construção de novos materiais bio-inspirados que sejam ao mesmo tempo leves e tenham grande resistência ao impacto e punção.

Taha *et al.* (2011), afirma ainda que cabe comparar como modelos biológicos como por exemplo o revestimento extremamente resistente da noz Macadâmia (*Macadamia integrifolia* Maid), que do ponto de vista estritamente botânico é um folículo, o grande mesocarpo esponjoso do Pomelo (*Citrus maxima*), e do mesocarpo fibroso combinado e endocarpo duro do Coco (*Cocos nucifera*). Em todas as frutas, as paredes são organizados de acordo com pelo menos cinco níveis hierárquicos: integrais, macroscópicas, microscópico, ultra-estrutural e bioquímico. Além disso, diferentemente da maioria dos materiais técnicos utilizados hoje, os diferentes níveis hierárquicos geralmente exibem gradientes de materiais em uma estrutura.

### 3.3.2.1. Características importantes a serem observadas

As características estruturais (figura 34) e prático-funcionais da Noz (*J. regia*), envolvem aspectos da forma externa, como os extremos peduncular e apical e a extensão longitudinal. Sua forma característica globular de superfície endurecida, a qual lembra uma espécie de capacete, é marcada por uma ou duas divisões como um encaixe colado de um estojo que mantém protegida a semente em seu interior.

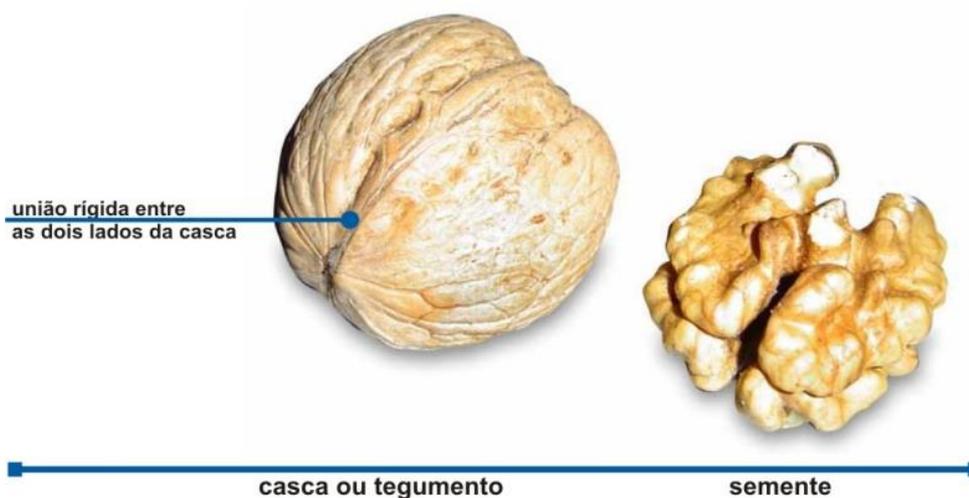
Figura 34: Noz - *Juglans regia* (L.): vistas do extremo peduncular, extensão longitudinal e extremo apical



#### 3.3.2.1.1. Estrutura autoportante

Neste caso a investigação acontece não pela caracterização do material em si, mas sim pela sua estrutura formal – auto estruturação da forma por meio de dobras e curvaturas (figura 35). São exemplos de aplicação destes aspectos, aquelas formas moldadas de um material em uma única peça capazes, sob determinadas condições, de suportar e proteger o seu interior sem rompimento.

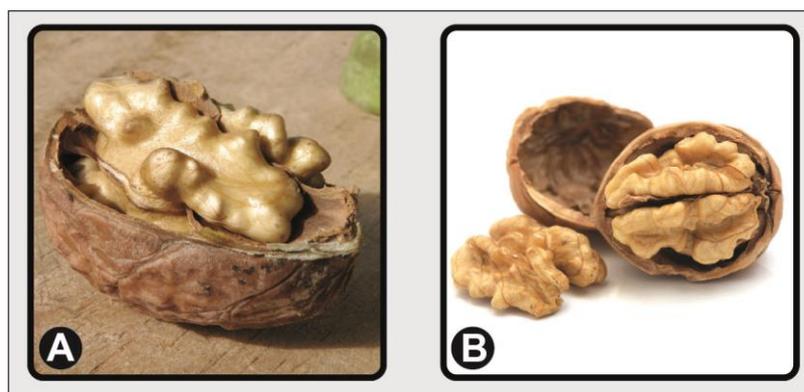
Figura 35: Noz - *Juglans regia* (L.): casca ou tegumento e semente.



### 3.3.2.1.2. Envolturas em camadas

O aspecto da resistência contra forças externas é aumentado através da envoltura em camadas. Neste caso, a investigação inicial se concentrou na compreensão da forma e superfície do revestimento da semente, o tegumento externo e o consequente sistema de proteção. Posteriormente investigou-se o processo ou os mecanismos que interferem na liberação do seu conteúdo embrionário, a semente propriamente dita, quando do amadurecimento. A casca/tegumento e a semente estão apresentadas na figura 36, a seguir.

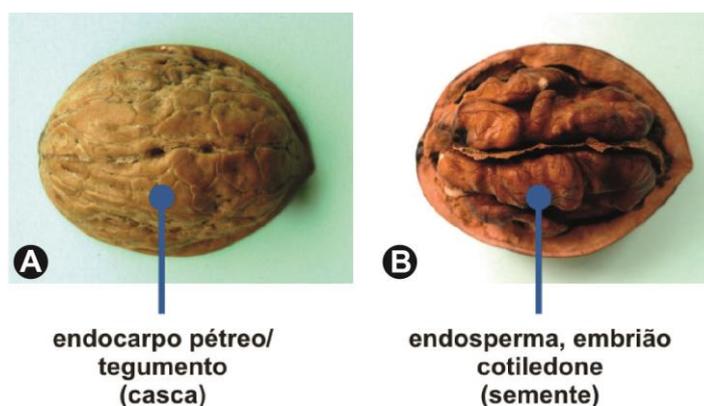
Figura 36: Noz - *Juglans regia* (L.): casca/tegumento (A) e casca, casca e semente e valva separada (B).



### 3.3.2.1.3. Invólucro

A casca é entendida aqui como aquela forma que envolve, protege e conserva totalmente um outro elemento ou um determinado conteúdo. Todas as cascas de frutos são invólucros que tem como funções – envolver, guardar, conservar e liberar os elementos do seu interior, como o é a casca da Noz (*J. regia*), conforme apresenta a figura 37. Cabe salientar que as ascas de frutos e sementes tem como uma função principal específica a garantia das condições de transporte e guarda do embrião, evidenciado nesta casca, e promover, sob determinadas condições, a germinação.

Figura 37: Noz - *Juglans regia* (L.): casca externa (A) e semente interna (B).

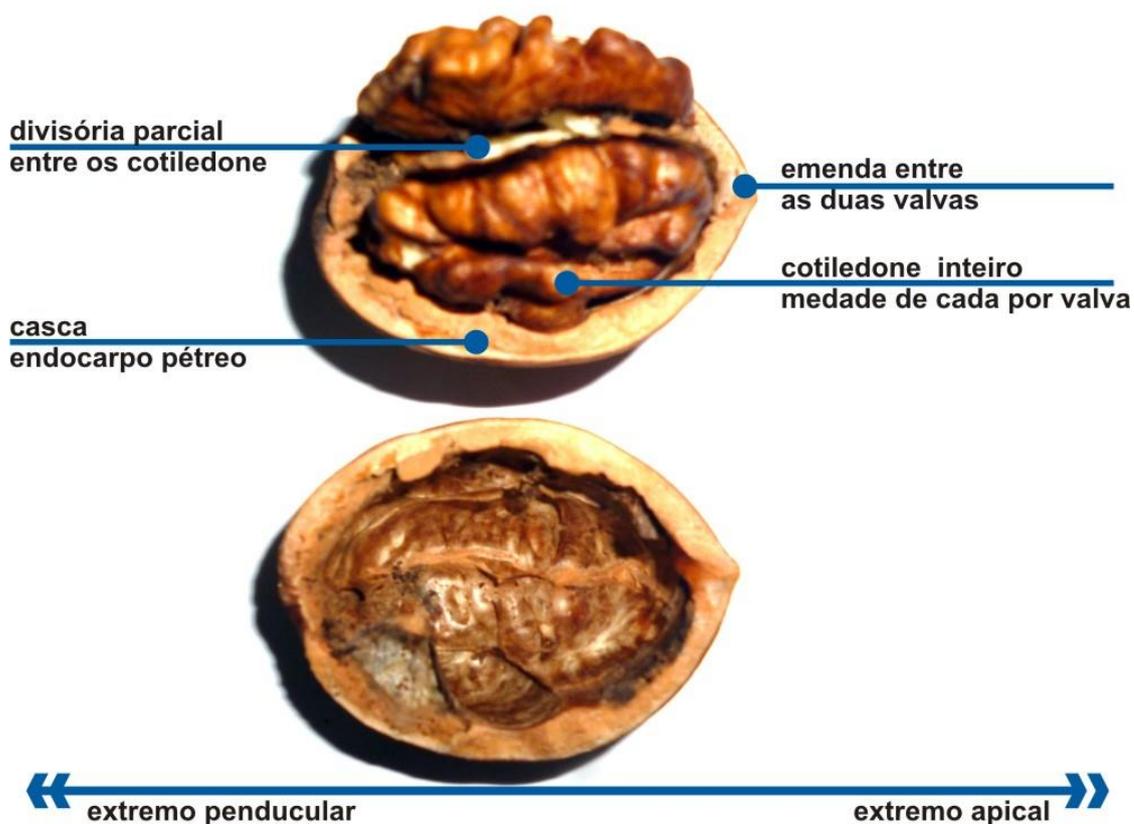


### 3.3.2.1.4. Compartimentos e encaixe

As divisões internas que guardam polpas e sementes servem para, além de acomodar, dividir o conteúdo, conforme apresenta a figura 38.

Muitos destes compartimentos mostram encaixes com grande elaboração, perfeitos no seu ponto de vista funcional, que sugerem ideias para processos e o design de produtos, especialmente em sistemas de fechamento, embalagens e recipientes.

Figura 38: Noz *Juglans* - *Juglans regia* (L.): discriminação dos componentes da casca e semente.



### 3.3.2.1.5. Dobras

As dobras aumentam a resistência estrutural do material que compõe a casca, as mesmas podem estar associadas a diminuição da quantidade do material reduzindo seu peso e também influenciam na aparência visual e na configuração estético-formal. Desta forma, este aspecto, pode sugerir percursos ou caminhos dos reforços, que acontecem através destas dobras ou vincos no material, associado à sua forma.

Outras características, as quais podem se mostrar também interessantes em serem observadas como aspectos importantes, conforme sua aplicação, são: porosidade, lisura,

opacidade, leveza, compacidade, espessuras, angulações, densidade e peso. Para o caso dos frutos de casca dura a transparência não é um atributo presente.

### 3.3.3. Escolha de amostra para caracterização e análise

#### 3.3.3.1. Critérios gerais

A amostra foi obtida através de nozes envoltas em casca comercializadas nos mercados da cidade de Porto Alegre, identificadas como noz chilena. O objetivo inicial foi o de investigar tanto externa como internamente, para tanto, tal escolha levou em consideração a inexistência de qualquer tipo de ruptura ou dano tanto na casca como na semente para que isto não pudesse ter qualquer influência na investigação.

Este fruto, assim como na maioria das nozes, é um fruto endurecido e com bastante resistência na sutura que associa uma capa a outra (valva), ou seja, nos pontos em que o fruto está unificado em duas partes (às vezes em três). Desta forma buscou-se também, com maior dificuldade de encontrar, àqueles frutos que se apresentassem naturalmente abertos, (figura 39) evitando que processos artificiais de aberturas provocassem fissuras, trincas ou danos que interferissem na investigação.

Figura 39: Noz - *Juglans regia* (L.): abertura da sutura, a partir da extremidade apical.



**abertura da sutura  
na extremidade apical**

#### 3.3.3.2. Quantidades e dimensões

Inicialmente, considerando a investigação em microscopia foi tomado um fruto inteiro, bivalvo, sadio com as duas partes (valvas) unidas rigidamente. Este foi seccionado transversalmente à sua dimensão maior para que se pudesse observar como se esabelece a ligação entre as duas partes (valvas), além de dispor para a análise dos componentes destes materiais, tanto da casca como da semente, conforme apresenta a imagem na figura 40, a seguir.

Figura 40: Noz - *Juglans regia* (L.): seccionada transversalmente – casca e semente.



Para este experimento tomou-se inicialmente 10 frutos inteiros, sempre bivalvos, ou seja, unidos em duas partes, pois apresentam-se em maior quantidade na natureza. Posteriormente abertos, de modo a facilitar sua digitalização e os testes de compressão mecânica, o que gerou em um primeiro momento 20 metades de frutos de noz, os quais são representativos em dimensões e forma da noz (*J. regia*). Após os tratamentos iniciais fez-se uma nova seleção destas metades e descartou-se quatro destes frutos permanecendo com seis nozes que foram aqueles amostrados, conforme mostra a figura 41. Cabe observar que as amostras 01 e 02 correspondem a apenas a metade (uma valva) de cada um dos frutos.

Figura 41: Noz - *Juglans regia* (L.): três dimensões principais das amostras consideradas.

<b>amostras</b>	<b>comprimento</b>	<b>largura</b>	<b>altura</b>
<b>amostra 01 A</b>	39,0 mm	32,5 mm	14,5 mm
<b>amostra 02 B</b>	39,1 mm	33,0 mm	11,7 mm
<b>amostra 03 A</b>	39,0 mm	31,5 mm	17,2 mm
<b>amostra 03 B</b>	38,8 mm	31,5 mm	16,8 mm
<b>amostra 04 A</b>	44,5 mm	33,2 mm	12,6 mm
<b>amostra 04 B</b>	44,5 mm	32,5 mm	12,5 mm
<b>amostra 05 A</b>	36,8 mm	32,5 mm	12,5 mm
<b>amostra 05 B</b>	36,8 mm	32,4 mm	11,8 mm

### 3.4. Metodologia

A metodologia adotada neste estudo, para a análise das características da Noz (*Juglans R.*) pode compreender – alguns de seus aspectos, a qual inclui o seguinte:

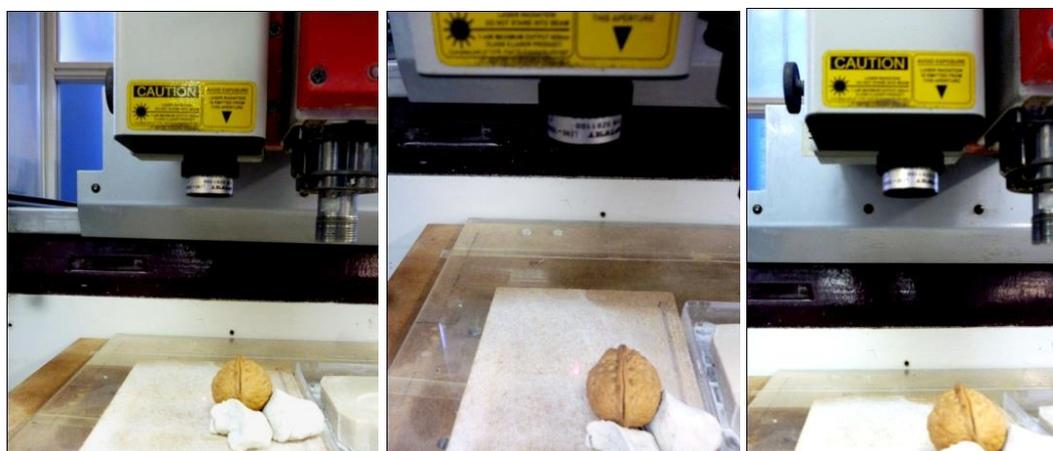
- observação através do registro fotográfico e gráfico (ângulos e maneiras), das amostras escolhidas;
- digitalização tridimensional das amostras das cascas das nozes e tratamento dos dados obtidos para a geração de imagens;
- análise a partir de microscopia óptica;
- análise a partir de microscópio eletrônico de varredura (MEV);
- análise a partir de testes de compressão;
- análise a partir de testes de tração (realizado sem resultados satisfatórios);
- análise a partir de desenhos esquemáticos, croquis e abstrações geométricas;
- desenvolvimento gráfico de detalhes em esquemas bi e tridimensionais.

#### 3.4.1. Digitalização tridimensional

A primeira etapa deste processo consistiu-se na digitalização das cascas das amostras das nozes através do *Scanner* 3D marca Tecnodrill, modelo Digimill 3D, instalado nas dependências do Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LdSM) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). A figura 42 mostra o equipamento utilizado assim com uma noz inteira preparada para tal.

Esta digitalização, dado ao formato ovoide destas nozes, que fossem digitalizados em 3 ou 4 posições para que houvesse uma posterior montagem. Após a abertura de algumas de 6 pares de sementes fez-se o escaneamento em três ou quatro posições diferentes de 6 destas nozes com duas cascas para depois separá-las na montagem.

Figura 42: Posicionamento da Noz - *Juglans regia* (L.), inteira, junto ao aparelho digitalizador.



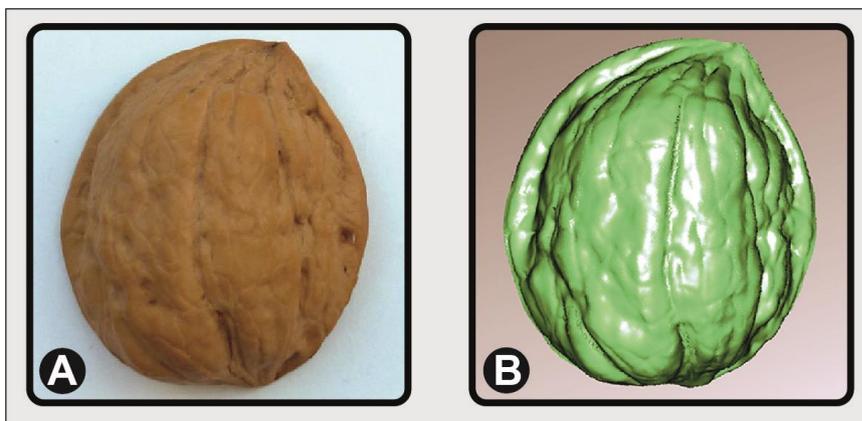
Também o aspecto corrugado, com muitas reentrâncias, gera pontos onde não permitem a correta leitura do equipamento digitalizador em uma única vez. Desta forma, optou-se pela solução da digitalização em posições diferentes, o que permitiu obter o necessário grau de precisão dos detalhes da superfície, para a montagem *a posteriori* destas imagens em única.

#### 3.4.1.1. Tratamento dos dados

O conjunto de dados obtidos por esse processo é denominado nuvem de pontos. Uma vez de posse deste conjunto de pontos, a nuvem de pontos, é editada e montada em *software* específico para tal, neste caso o GEOMAGIC®, especializado na criação de modelos tridimensionais a partir de dados digitalizados.

A seguir abre-se no *software* uma imagem mostrando a noz em uma posição e outra em posição oposta e se procura unir com precisão através da conexão de pontos comuns. Neste caso as inclinações iniciais tratavam-se de laterais da noz. A seguir, em terceira ou uma quarta união com uma nova imagem e as extremidades apicais ou penducular da noz. Uma vez definida a imagem procurou-se corrigir aqueles pontos que apresentavam alguma ruptura e está pronto a gerar as imagens, conforme os resultados apresentados a partir da figura 43.

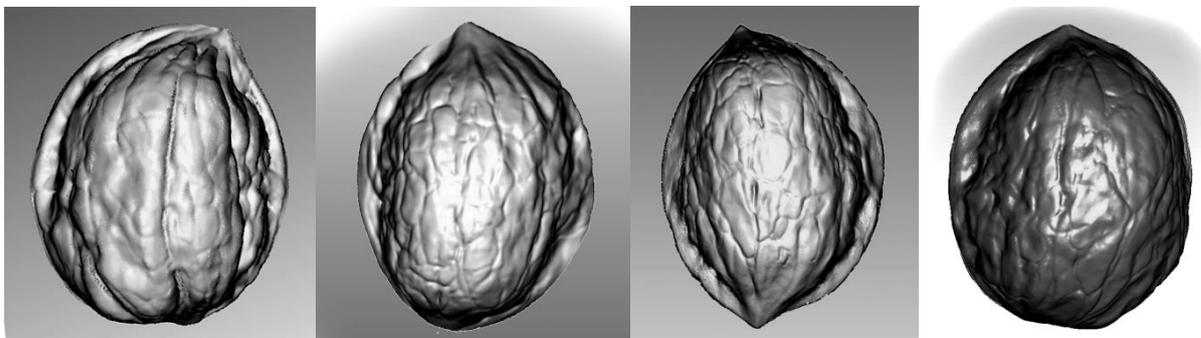
Figura 43: Noz - *Juglans regia* (L.): casca em seu aspecto natural (A) e casca digitalizada (B).



Para este estudo, cujo objetivo se tratava apenas de investigações iniciais buscando um melhor entendimento deste fruto, optou-se apenas por gerar vistas em uma única posição mostrando o potencial da qualidade das imagens geradas em uma boa qualidade de definição, conforme mostra a figura 44, que podem servir tanto para simulações envolvendo a forma como também da sua superfície. Esta imagem tridimensional após seu correto tratamento poderia, ainda, se prestar para a geração dos caminhos da ferramenta *CNC*, em usinagem por controle numérico computadorizado, em experimentos, como por exemplo com outros materiais para determinadas simulações e análises.

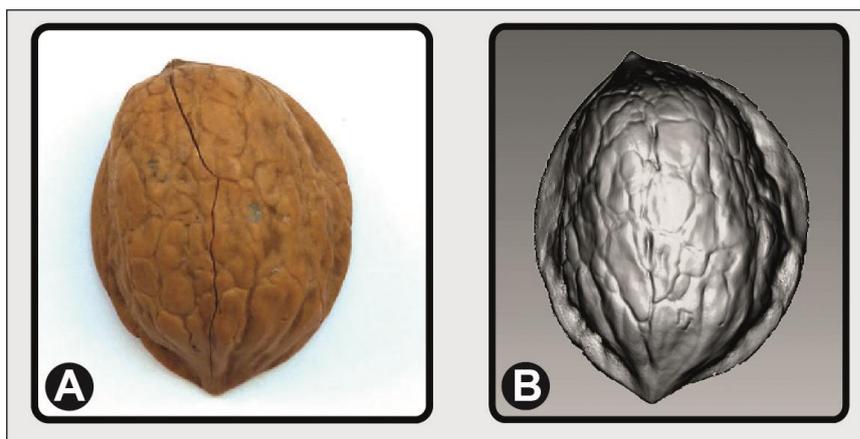
A usinagem não se mostrou necessária para este estudo uma vez que foram buscadas algumas caracterizações em aspectos específicos, mas que não visavam objetivamente um experimento para determinada aplicação, no entanto, ficando em aberto a possibilidade de vir a ser objeto de outros estudos considerando o aqui levantado.

Figura 44: Noz - *Juglans regia* (L.): imagens obtidas a partir da digitalização de amostras.



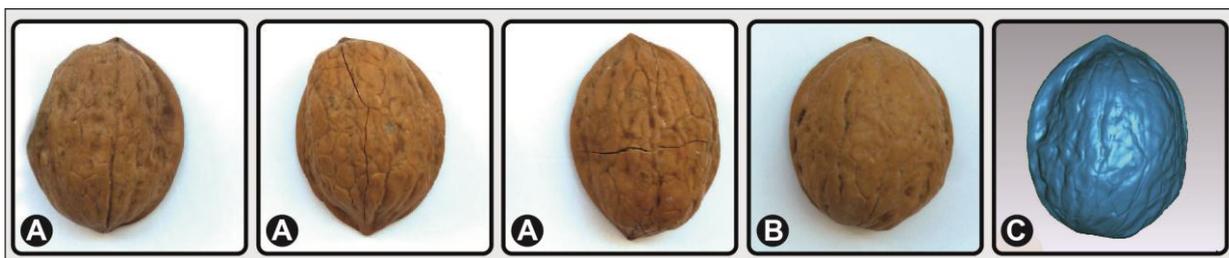
Após a digitalização estas mesmas amostras seguiram para os ensaios de compressão mecânica até sua ruptura conforme mostra a figura 45.

Figura 45: Noz - *Juglans regia* (L.): casca apresentando a linha de ruptura após o ensaio de compressão **(A)** e imagem digitalizada da casca da noz **(B)**.



Na figura 46, a seguir, é possível comparar a amostra digitalizada, figura em destaque, com a amostra após a ruptura e montada apenas para esta imagem, ou seja, nas possibilidades de investigações futuras do entendimento do caminho das forças até sua ruptura.

Figura 46: Noz - *Juglans regia* (L.): cascas após a ruptura por ensaio **(A)** casca antes da realização do ensaio **(B)** e imagem digitalizada desta casca antes da ruptura **(C)**.



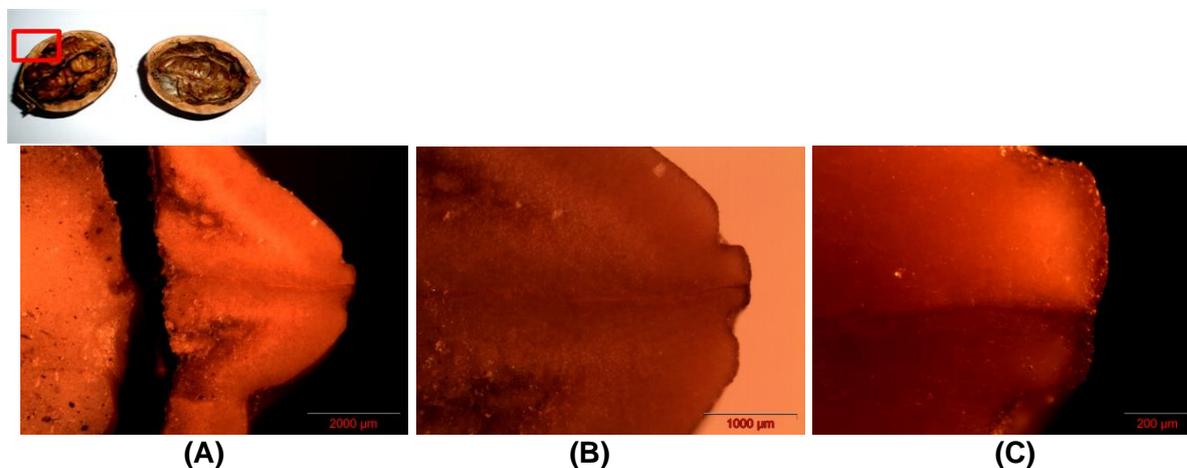
### 3.4.2. Microscopia óptica

A microscopia óptica, também denominada “microscopia de luz”, consiste em uma técnica de observação de objetos e sistemas com ampliações de algumas dezenas de vezes das dimensões físicas, tipicamente 10X a 1000X. O microscópio óptico mais simples consiste de duas lentes, uma objetiva e outra ocular, montadas em uma estrutura com um suporte para o material a ser observado, denominada porta-amostra.

A distância entre as lentes e a amostra, pode ser alterada através do sistema de engrenagens, permitindo ajuste do foco do observador. Conta ainda com um sistema de iluminação, filtros, colimadores, e outras partes, para otimizar a qualidade da imagem obtida. Neste caso, para a amostra em microscopia, tomou-se uma noz inteira, seccionada no eixo transversal ao encontro das duas valvas.

Nas figuras a seguir são mostradas micrografias de uma seção transversal de uma noz, casca e semente, analisado em microscópio eletrônico. A busca inicial, conforme figura 47, concentrou-se em, a partir da secção da casca/sememente, identificar a região da emenda das duas “calotas” da noz (*Juglans R.*), de seu elemento de ligação.

Figura 47: Noz - *Juglans regia* (L.): fotomicrografias da seção da noz através do encontro das duas valvas – casca e a semente **(A)**, somente a casca **(B)** e a casca em ponto ampliado da sutura das duas valvas **(C)**.

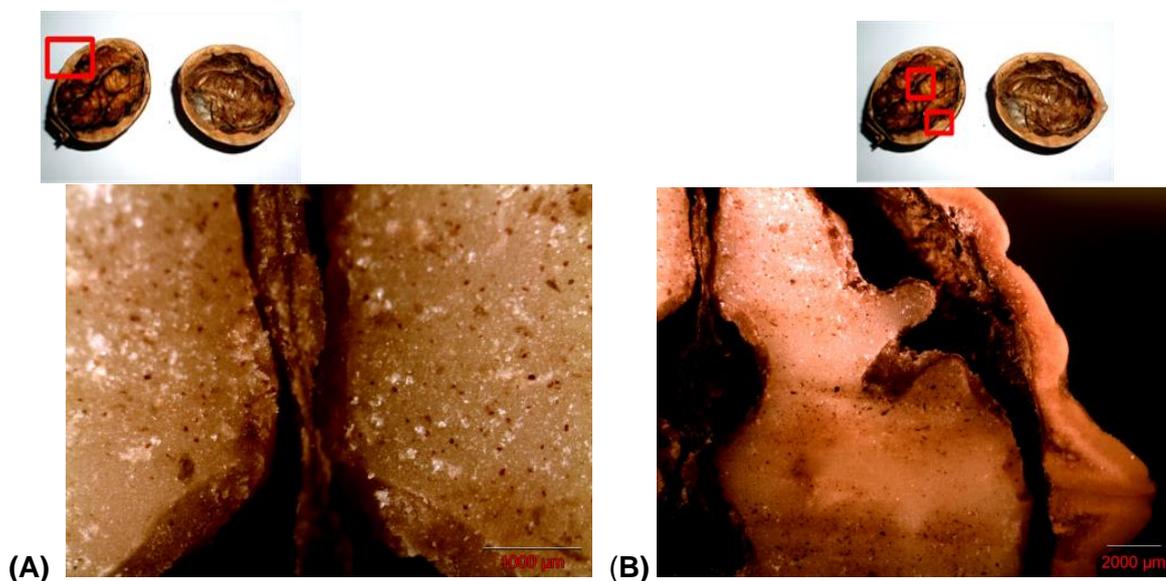


Por outro lado, a investigação procurou também, conforme figura 48, buscar o posicionamento da membrana de ligação entre os cotilédones que fixam a semente a casca, pois esta forma um vazio, não aderido ao pericarpo endurecido, apesar de estar firmemente conectado.

Para uma outra análise, referente ao comportamento das fibras, seria necessário um seccionamento no sentido paralelo ao das fibras, e não somente no sentido transversal o que não permite tal visualização levando a crer tratar-se de um material somente calcinado. Para

tanto, caso seja investigada o comportamento do lenho fibroso, isto se mostrará necessário visando um estudo a este respeito.

Figura 48: Noz - *Juglans regia* (L.): Fotomicrografias da seção transversal da noz através do encontro das duas valvas – miolo da semente e da membrana de ligação que a une o cotiledone à casca (A), e a casca mais a semente mostrando as rugosidades, externas e internas da casca e da semente, além do corte transversais das fibras (B).



### 3.4.3. Microscopia eletrônica de varredura – MEV

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) é um tipo de microscópio capaz de produzir imagens de alta resolução da superfície da amostra. Devido ao seu processo de criação, as imagens de MEV tem uma aparência tridimensional característica e são úteis para avaliar a estrutura superficial de uma dada amostra.

A seguir, nas Figuras 49 e 50, estão apresentadas as imagens em microscopia eletrônica de varredura, MEV, para a seção transversal da noz (*J. regia*). Com tais imagens buscou-se entender a ligação entre as duas valvas da casca da noz assim como a ligação da semente da noz através de lamelas internas as quais permitem a fixação desta semente junto à casca.

Figura 49: Noz - *Juglans regia* (L.): imagens obtidas por MEV – diferentes pontos de ampliações áreas da região da semente e seus vazios, interior da casca noz.

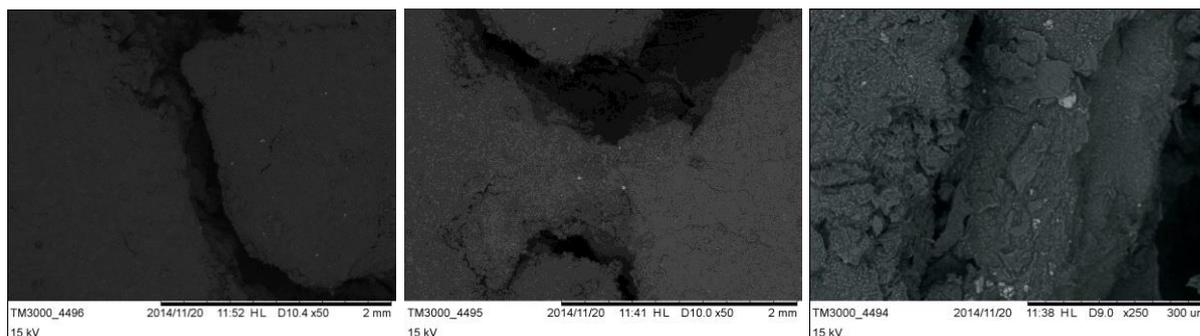
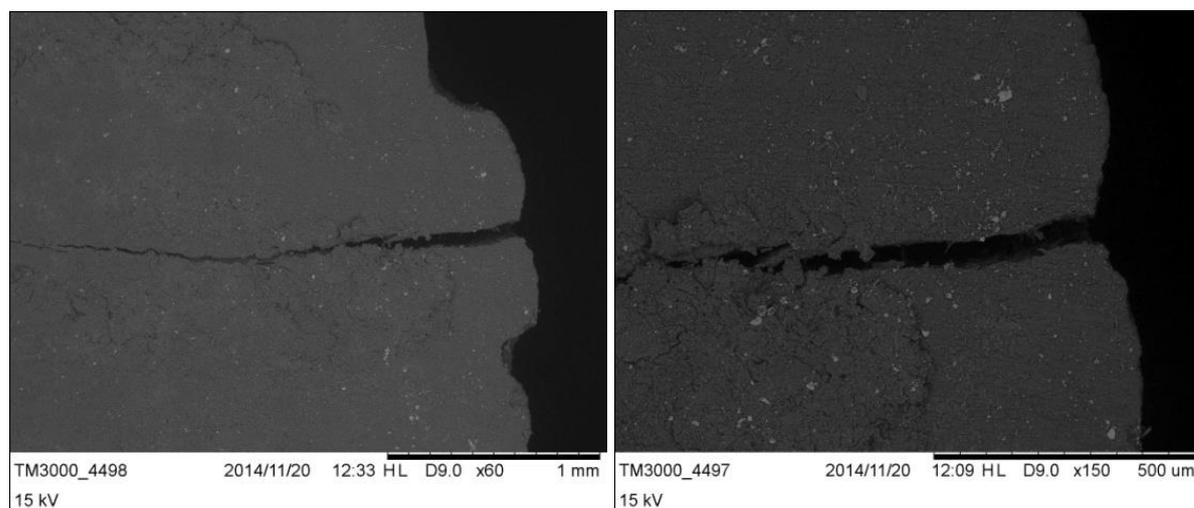


Figura 50: Noz - *Juglans regia* (L.): imagens obtidas por MEV – ampliações o ponto de sutura das duas valvas, duas ampliações do ponto de sutura das duas valvas (capas) que envolvem a semente.

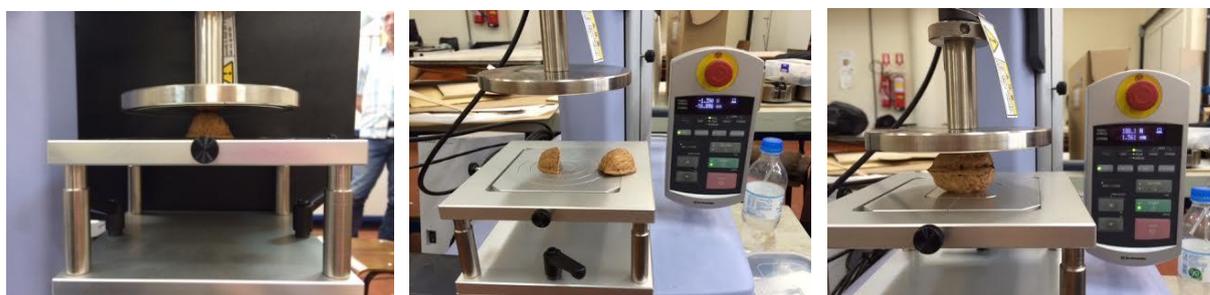


#### 3.4.4. Análise a partir de testes de compressão mecânica

O teste de compressão mecânica em cada uma das amostras da casca da noz adaptou-se ao que determina a norma *ASTM D695-10*, empregado para materiais plásticos rígidos, denominada de *Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics*.

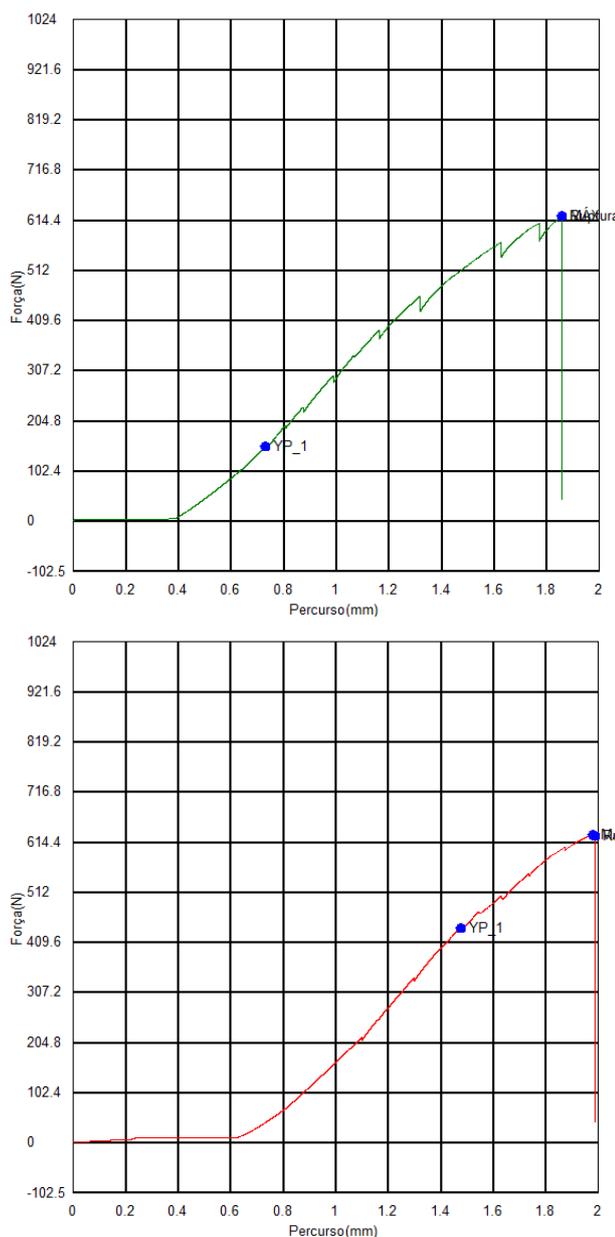
Este método de ensaio abrange a determinação das propriedades mecânicas de plásticos rígidos reforçados ou não, incluindo materiais compósitos de alto módulo, quando cargas de compressão a velocidades uniformes de esforço ou de cargas relativamente baixas. A figura 51, a seguir, mostra o ensaio de ruptura por compressão da casca da noz e também da noz inteira.

Figura 51: Noz - *Juglans regia* (L.): ensaio compressão – casca da noz (ruptura compressão x deslocamento).



A figura 52 mostra o comportamento, através de gráfico, de duas destas amostras das cascas da noz (*J. regia*) sob o ensaio de compressão mecânica.

Figura 52: Noz - *Juglans regia* (L.): ensaio compressão comportamento gráfico – tensão x deformação.



A tabela 01 mostra um quadro com os resultados das 6 amostras ensaiadas as quais apresentam um comportamento semelhante na relação tensão deformação, com exceção da amostra (1a) a qual apresentou um comportamento diferenciado, isto atribui-se algum sinal de ruptura na superfície da casca quando da sua abertura (separação das duas valvas).

Os ensaios aos esforços de tração, os quais poderiam mostrar o comportamento das duas valvas (metades) da noz deixaram de ser realizados nesta etapa, uma vez que os mecanismos de fixação no equipamento adotados não se mostraram eficientes e interferiram no resultado.

As proposições neste sentido, decorrentes de adaptações, não encontraram o sucesso esperado, pois ao invés de promoverem a ruptura na sutura de encontro das duas calotas acabavam por romper no elemento de fixação.

Tabela 01: Noz - *Juglans regia* (L.): ensaio de compressão de amostras das cascas (velocidade 0,5 mm/min.).

nome/amostra parâmetros unidade	Força/Ruptura sensibilidade 10 N	Tensão/Ruptura sensibilidade 10 N/mm <sup>2</sup>	Desloc./Ruptura sensibilidade 10 mm	YP (% F) Força 0,1% N
amostra 04 A	584.782	7.59457	1.34225	----
amostra 04 B	627.035	8.14331	1.98963	437.171
amostra 03 A	491.080	6.37767	1.61613	168.266
amostra 03 B	622.296	8.08176	1.86150	151.005
amostra 02 B	412.841	5.36157	1.68963	114.070
amostra 01 A	178.108	2.32608	1.79063	136.919
média	486.190	6.31416	1.71496	201.486
desvio padrão	171.922	2.23275	0,22448	119.172
faixa	447.927	5.81723	0,64738	323.101

### 3.4.5. Sobre as caracterizações obtidas nos diferentes métodos de análise

Materiais de inspiração biológica que possam assumir funções de proteção, que combinem requisitos formais e materiais, que sejam ao mesmo tempo leves e resistentes além da sua durabilidade, sob determinadas condições, se mostram como alternativa interessante a serem explorados em projetos com caráter de inovação através da incorporação de princípios biomiméticos. Esta investigação trouxe alguns *inserts* os quais apresentam a casca da noz (*J. regia*) como um elemento promissor para investigações mais aprofundadas para diferentes aplicações.

Pode-se inferir que, apoiados no biomimetismo, existe um campo de aplicação de determinados princípios formais e de funcionamento, sua conformação em desenho de cúpula e seus vincos internos, além das bordas reforçadas das valvas, mostram-se como elementos de resistência do invólucro da semente. A forma como está associada a semente a casca também é uma solução que pode servir como analogia em projetos bio-inspirados. Para uma aplicação mais específica em estudos futuros, considerando este como também um elemento referencial da natureza, deverão ser consideradas, em maior ou menor intensidade, as propriedades químicas, mecânicas ou físicas do referencial aqui estudado, a noz (*J. regia*).

### 3.5. O estudo da casca dura do fruto de palmeira Jupati - *Raphia taedigera* (Mart.)

A palmeira referida é popularmente conhecida pelo nome Jupati, cujo nome científico *Raphia taedigera* (Mart.) é uma palmeira de estipe de pouca altura, porém, de folhas grandes e muito compridas (figura 53). Cresce nos terrenos alagados pela maré, na beira dos rios e nas ilhas baixas do norte do Brasil até a América Central (LORENZI, 2010).

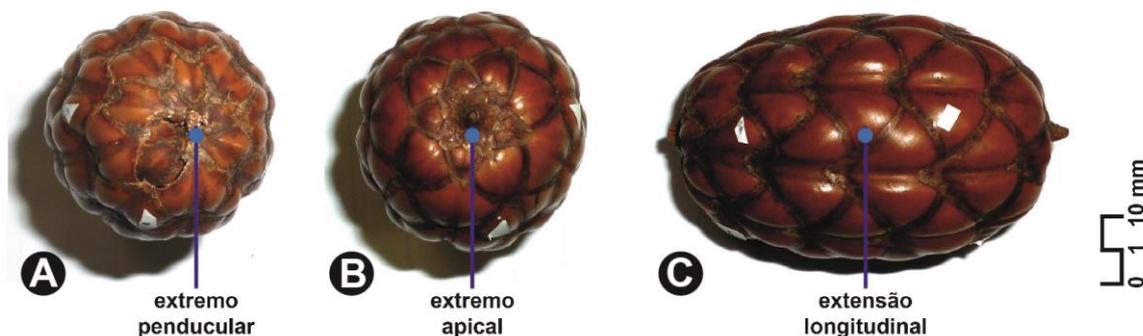
Figura 53: Palmeira Jupati - *Raphia taedigera* (Mart.): árvore (A) e frutos (B).



Fonte: Lorenzi (2010).

Segundo Pesce (2009), os frutos formam um cacho grande pesando, às vezes, mais de 50 kg. O fruto, de forma cilíndrica oval e arredondada nas extremidades (figura 54), tem o volume de um ovo grande de uma galinha, com cerca de quatro a sete centímetros de comprimento e três a quatro centímetros de diâmetro.

Figura 54: Fruto da palmeira Jupati - *Raphia taedigera* (Mart.): aspectos gerais da casca externa e dimensões: vista extremidade penducular (A), vista extremidade apical (B) e vista lateral (C).

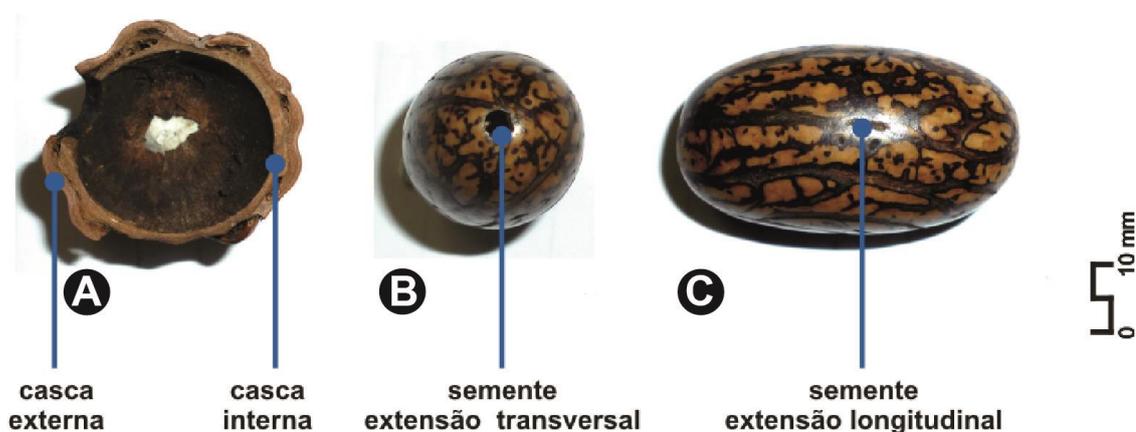


O fruto desta palmeira é composto por um caroço na forma do fruto, ovoide, duro, lenhoso e recoberto por uma casca na qual não está aderida. Por seu lado a casca é constituída,

quando madura, por uma massa amarela ou amarelo-alaranjada, oleosa, recoberta por uma epiderme formada de escamas duras, cartilaginosas, lustrosas e de tonalidade vermelho-escura (PESCE, 2009).

A figura 55, a seguir, apresenta a casca dupla da semente, ou seja, uma casca externa apresentando vincos e curvaturas e uma casca interna lisa, e a semente em suas vistas longitudinal e frontal. A característica na qual apresenta desenhos em alternando intensidade da cor marrom a tornou muito empregada em artesanato, ou seja, aliado à sua dureza deste caroço lenhoso a estética dos desenhos na sua superfície a tornam plasticamente atrativa.

Figura 55: Fruto da palmeira Jupati - *Raphia taedigera* (Mart.): seção apresentando os aspectos da casca externa e interna (A) vistas da semente abrigada por tais cascas (B) e (C).



Conforme Pesce (2009), o peso médio de um fruto de Jupati (*R. taedigera*) é de 45 gramas e sua composição contem cerca de 27% de casca externa escamosa, 23% de massa oleosa da casca e aproximadamente 50% de caroço lenhoso, a semente propriamente dita.

### 3.5.1. Escolha e seleção de amostras do referencial, fruto e semente Jupati - *Raphia taedigera* (Mart.)

#### 3.5.1.1. Critérios gerais

As amostras da fruta e semente da palmeira Jupati (*R. taedigera*) tem procedência do mercado público de Belém do Pará onde este fruto é comercializado com a finalidade de produção de artesanato. Estas amostras eram frutos secos, íntegros e fechados, apresentando a caracterização geométrica e de superfície que a identificam por grande precisão geométrica tanto da forma como das escamas que revestem este fruto.

#### 3.5.2. Obtenção da forma geométrica tridimensional

Conforme exposto anteriormente partiu-se do estudo da forma e da superfície do fruto da palmeira Jupati (*R. taedigera*). Com base neste fruto foi proposta uma sequência que vai deste a captura desta superfície em terceira dimensão, passando pela união e tratamento do

que fora capturado, gerando um modelo tridimensional, discretizando este modelo para a aplicação de cargas e análise das reações, neste modelo referencial a partir de um *software* CAE (*Computer Aided Engineering*) pelo método de elementos finitos.

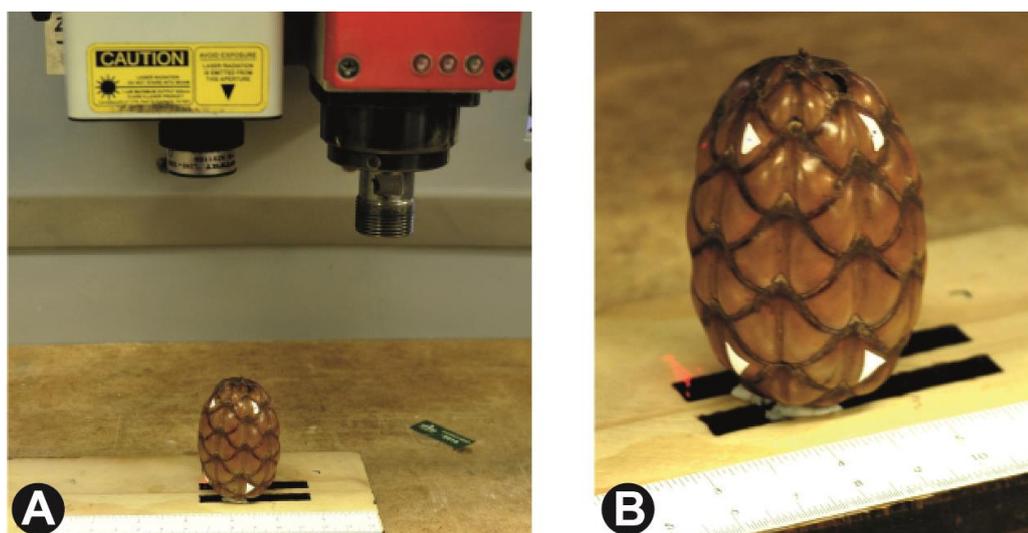
Trata-se em princípio de um estudo do comportamento desta forma elíptica ou ovoide, ainda que possa vir a ser comparado com testes de carga em um exemplar real podendo, desta forma, se estabelecer um comparativo com alguma outra superfície lisa, para que possa avaliar este comportamento de ambas sob a ação de carregamentos.

### 3.5.3. Digitalização tridimensional a laser (por holografia conoscópica).

Para a digitalização do fruto da palmeira Jupati (*R. taedigera*) foi empregado o equipamento para digitalização 3D Digimil da marca Tecnodrill, o qual está instalado nas dependências do Laboratório de Design e Seleção de Materiais da UFRGS.

A resolução da varredura da amostra, ou seja, o espaçamento entre os pontos, em acordo com a boa qualidade da amostra de para este trabalho, utilizou-se a resolução de 0,5 mm, uma vez que esta não apresentava uma textura mais fina que necessitasse uma melhor definição, gerando uma captura da forma e volume. Para esta digitalização considerando o formato deste fruto ser ovoide foram realizadas seis vistas a partir de uma preparação prévia através de *targets*, conforme figura 56, a seguir, os quais facilitassem a montagem a *posteriori*.

Figura 56: Fruto da palmeira Jupati - *Raphia taedigera* (Mart.): preparação para a digitalização tridimensional – (A) posicionamento do fruto, (B) marcação dos targets para posterior união.



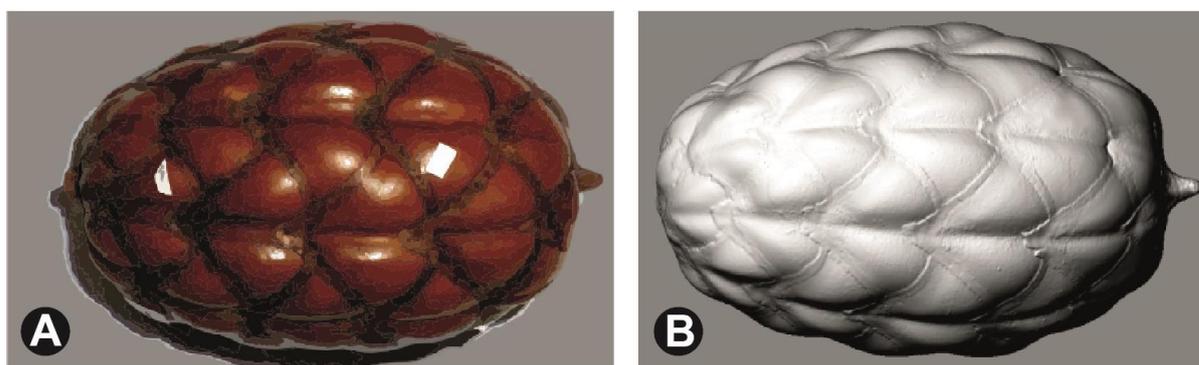
Após a digitalização foi realizada, em computador, a combinação destas vistas digitalizadas através do processamento através do uso do *software* GEOMAGIC® Studio, assim como a filtragem e geração da malha de triângulos.

### 3.5.3.1. Homogeneização da malha

Conforme Fernandes (2014), uma vez obtidos os pontos através da digitalização, torna-se um fator importante a avaliação da qualidade da malha gerada para possíveis modificações de geometria em CAD (*Computer Aided Design*). O resultado de uma digitalização neste processo estará sempre associado diretamente em fatores como: a qualidade do equipamento de digitalização, a forma como tenha sido realizada a preparação da amostra, além da qualidade da própria amostra. Exemplo deste processo está apresentado na figura 57.

São ainda importantes as condições externas tais como: temperatura, vibrações, luminosidade, dentre outras. Silva (2006), ressalta que por mais controlado que seja o processo, sempre acontecerão ruídos elétricos ou mecânicos, os quais implicam em distorções indesejadas na nuvem de pontos tomada, por isso, é sempre necessária a homogeneização da malha do objeto.

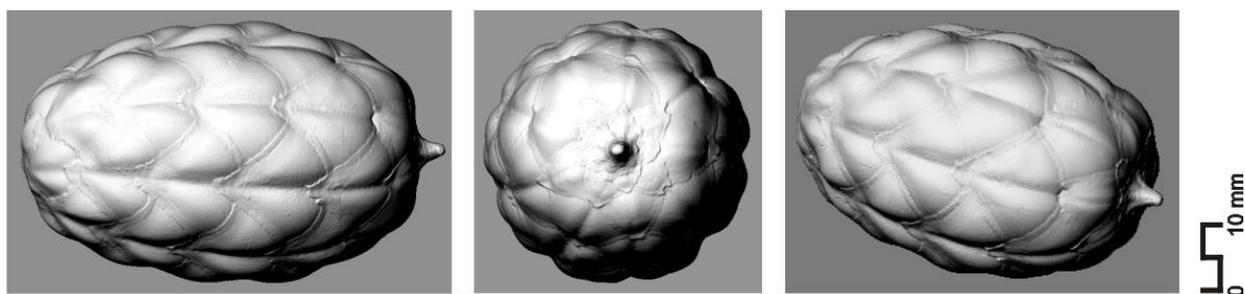
Figura 57: Fruto da palmeira Jupati - *Raphia taedigera* (Mart.): (A), e modelo tridimensional obtido a partir da digitalização 3D (B).



Silva (2011) diz ainda que, a partir da nuvem de pontos já filtrada, é possível unir os pontos três a três formando inúmeros triângulos, criando-se assim uma malha tridimensional da superfície do objeto digitalizado. Com a malha criada, pode-se fazer uma série de alterações, tais como: como suavizar a superfície, criar furos, alterar cantos vivos, entre outras possibilidades. Arquivos com dados de malhas de triângulos planos podem ser salvos com a extensão STL (*STereoLithography*), formato padrão da indústria para os sistemas de manufatura aditiva.

Após a nuvem de pontos ter sido filtrada, e também depois a criação da malha tridimensional da superfície da peça, o arquivo foi salvo no formato STL (*STereoLithography*), que é o formato padrão utilizado na indústria para os sistemas de prototipagem rápida. Este formato foi aberto no *software* Rhinoceros® o qual possibilitou o tratamento das imagens, conforme a figura 58, a seguir.

Figura 58: Vistas do modelo tridimensional obtido a partir da digitalização 3D do fruto da palmeira Jupati - *Raphia taedigera* (Mart.).



Uma vez obtido o modelo tridimensional a amostra está apta à submissão de determinadas simulações para obter informações sobre o seu comportamento. Para este estudo podem ser consideradas as simulações de cargas, empregada para entender o comportamento de reação e identificar os pontos que absorvem a maior quantidade de tensões empregando o Método dos Elementos Finitos (MEF).

#### 3.5.4. Simulações pelo método dos elementos finitos

O Método dos Elementos Finitos (MEF), segundo Kaminski (2008), pode ser entendido como uma ferramenta pela qual são simuladas estruturas submetidas a cargas para se conhecer seu comportamento. Para tanto os passos necessários para se trabalhar com esse método podem ser entendidos como:

- a) criação do modelo geométrico computacional;
- b) análise do modelo;
- c) análise dos resultados;
- d) modificações, atualizações e análises dos modelos e dos resultados.

Segundo Alves (2000), é próprio da mente humana querer subdividir os sistemas em seus componentes individuais (elementos), assim, surge a ideia que, entendendo-se o comportamento de cada trecho da estrutura ou elemento, entender-se-á o conjunto, por mais complexo que possa parecer. Alves (2007) afirma que é exatamente neste ponto que entra em cena o Método dos Elementos Finitos. Com ele é possível dividir uma estrutura complexa em uma montagem de elementos de geometria simples (malha de elementos finitos), como triângulos, quadriláteros, tetraedros, paralelepípedos, etc, ou seja, a estrutura é formada a partir da montagem de elementos individuais, os elementos finitos. Esses elementos são conectados uns aos outros por intermédio de nós, esta é a grande diferença em relação ao modo analítico.

O entendimento do método dos elementos finitos (MEF) é por subdividir uma malha, o domínio formal em pequenas regiões, denominados elementos, considerando elementos de topologia pré-definidos tais como triângulos, quadriláteros, tetraedros, etc, no qual este

comportamento dentro do campo de interesse, como tensões ou deslocamentos, pode ser aproximado por funções matemáticas simples. Conforme Söderberg, 2006, os valores em questão deste campo, são determinados pela solução numérica nos vértices (nós) destes elementos de onde, através da interpolação destes valores, obtêm-se os valores do campo dentro do referido elemento.

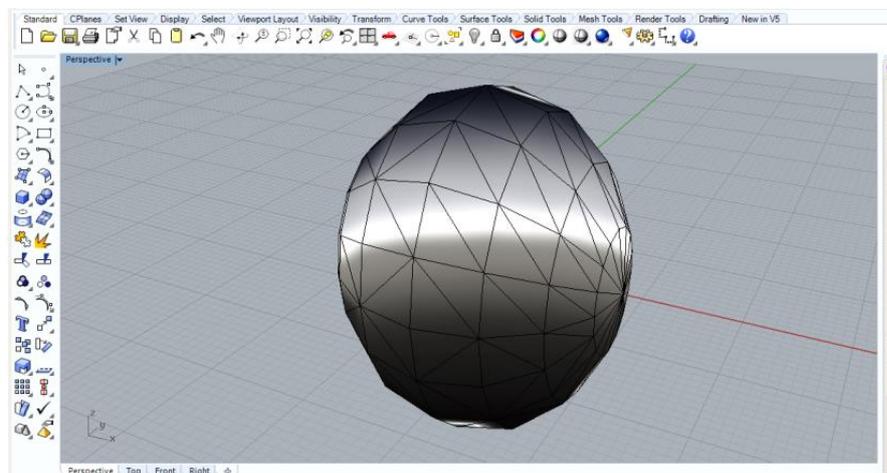
De uma maneira geral, no *software* de elementos finitos são definidos os parâmetros como propriedades dos materiais, condições de contorno, forças que o objeto em estudo estará submetido, geração de malha de elementos e processamento da simulação. O refinamento dessa malha significa mais precisão na análise. O tamanho e quantidade dos elementos de malha também serão definidos pela capacidade de processamento do computador onde está sendo rodado este programa de computação de elementos finitos.

A análise do modelo é feita em um sistema, automaticamente pelo *software*. São executadas e resolvidas uma quantidade de equações proporcionais à complexidade da análise.

#### 3.5.4.1. Criação de modelo virtual referenciado no fruto da palmeira Jupati - *Raphia taedigera* (Mart.) - modelagem digital tridimensional referencial

Paralelamente a correção da qualidade da malha do modelo tridimensional obtido a partir da digitalização 3D do fruto da Jupati (*R. taedigera*) foi criado no *software* Rhinoceros®, através de modelagem digital (modelagem 3D), um modelo referenciado no fruto da Jupati (*R. taedigera*) o qual apresentava dimensões muito próximas do modelo digitalizado deste fruto, modelo em formato .STL. Os primeiros experimentos de modelagem não econtraram as respostas esperadas e ficaram bastante aquém ao referencial real. Em uma destas primeiras tentativas, conforme figura 59, testou-se a aplicação de uma malha triangular única, a qual resultava em uma textura na superfície de um elemento ovoide com as dimensões descritas.

Figura 59: Modelo tridimensional – simulação do fruto da palmeira Jupati - *Raphia taedigera* (Mart.) - obtido a partir da modelagem no *software* Rhinoceros® considerando uma única malha de triângulos

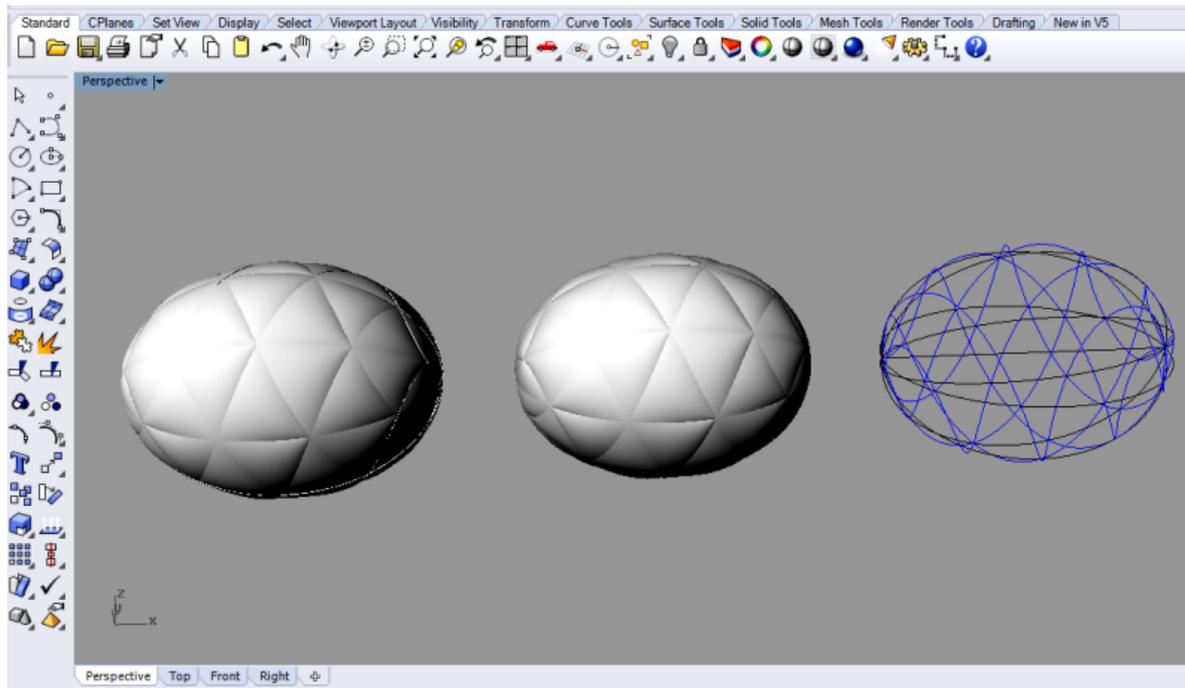


Este modelo, com tais princípios, não se mostrou eficiente pois a estrutura apresentava um comportamento como uma treliça curva, uma espécie de geodésia, desconsiderando que a casca do fruto referenciado tem um comportamento como superfície contínua, como são as cascas estruturais.

Considerando a falta de êxito da primeira modelagem, realizou-se uma nova proposição, a qual evidenciou-se formalmente mais exitosa. Para este caso considerou-se a espessura da superfície da casca proposta, para a qual tomou-se uma espessura de 1 mm. Para tal trabalhou-se com dois elementos: uma malha que estará funcionando como vincos e uma superfície lisa, que estará funcionando como preenchimento.

Baseado nisto, permitiu-se que a superfície, ao penetrar entre a malha de vincos pudesse gerar a tridimensionalidade, estabelecendo-se como se fosse um elemento pneumático (figura 60).

Figura 60: Modelo tridimensional – simulação do fruto da palmeira Jupati - *Raphia taedigera* (Mart.) – obtido a partir da modelagem no software Rhinoceros® considerando uma malha de triângulos e uma superfície que opera entre os triângulos.



Foram geradas três possibilidades de modelos: *surface*, *solid* e linhas. Para a aplicação em um programa de computador para a simulação do comportamento em ação de carregamentos, elementos finitos, aqui escolhido o software **ABAQUS™**, sendo ainda considerado o modelo *solid*, o qual foi exportado como a casca do fruto referenciado.

Inicialmente foram salvos em três formatos, considerando os formatos de arquivos que o software **ABAQUS™** pudesse importar. Conforme o Manual do programa, ABAQUS/CAE

(2012), diz em seu capítulo Importação e exportação de arquivos, que o *software* **ABAQUS™** reconhece e grava dados de geometria exportados pelo *software* Rhinoceros® em:

- IGES - *Initial Graphics Exchange Specification* – formato neutro e simples para troca gráfica entre sistemas de CAD.
- STEP - *Standard for the Exchange of Product* – projetado como um substituto de alto nível para IGES que tenta superar algumas das falhas do IGES.
- VDA – *Verband der Automobilindustrie* – padrão de geometria desenvolvido pela indústria alemã. Ambos os arquivos, VDA e IGES, contém uma representação matemática da peça em um formato ASCII. No entanto, o padrão VDA concentra-se em informações de geometria. Informações adicionais abrangidas pelo padrão IGES, como dimensões, texto e cores, não são armazenados em um arquivo VDA.

Como o formato .IGES mostrou com maior rapidez na obtenção de resultados e com menor exigência em seu processamento, foi este o formato importado pelo *software* **ABAQUS™**

### 3.5.4.2. Resultados, a partir do modelo virtual, extraídos do *software* **ABAQUS™**

A aplicação das cargas tomou por base os conceitos básicos da mecânica que, conforme Gaspar (2005), os quais baseiam-se em: espaço (coordenadas de um ponto material), tempo (instante em que o evento ocorre) e força (ação do corpo sobre outro – ponto de aplicação, intensidade, direção, sentido). Para a aplicação de cargas considerou-se o diagrama de tensão-deformação conforme o comportamento de cada material, conforme tabela 02 a seguir.

Tabela 02: Propriedades mecânicas típicas: relação peso específico e módulo de elasticidade de alguns materiais.

propriedades mecânicas típicas		
material	peso específico (kN/m <sup>3</sup> )	módulo de elasticidade (GPa)
aço (liga)	78,5	207,0
alumínio	28,0	69,0
cobre	89,0	110,0
madeira (cedro)	5,0	8,1

Fonte: adaptado de ABNT (1980) e ASTM (2001).

Para o caso deste estudo considerou-se o material como sendo aço e, portanto, um Módulo de Elasticidade  $E$  de  $200 \times 10^5 \text{ N/cm}^2$ , adaptando-se as dimensões do modelo referencial.

Conforme Gaspar (2005), quando uma barra é tracionada, o alongamento axial é acompanhado por uma contração lateral, isto é, a largura da barra torna-se menor enquanto cresce seu comprimento. Quando a barra é comprimida, a largura da barra aumenta.

A relação entre as deformações transversal e longitudinal é constante dentro da região elástica, e é conhecida como relação ou coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), sendo definido como:

$$\nu = \text{deformação lateral} / \text{deformação longitudinal}$$

Se o material em estudo possuir as mesmas propriedades qualquer que seja a direção escolhida, no ponto considerado, então é denominado, material *isotrópico*. Se o material não possuir qualquer espécie de simetria elástica, então é denominado material *anisotrópico*. Um exemplo de material anisotrópico é a madeira pois, na direção de suas fibras a madeira é mais resistente. Desta forma, para este estudo, apesar do material referencial apresentar-se mais próximo da madeira, dada esta condição de anisotropia do material, adotou-se o aço como material.

Para a simulação do *software* **ABAQUS**<sup>TM</sup> foram considerados os seguintes parâmetros, que vão desde os diâmetros do modelo referencial, espessura da parede, considerando ser uma casca, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson para o aço e a carga aplicada, descritas a seguir:

D maior = 5,0 cm

D menor = 3,5 cm

Espessura = 1 mm

E - 200 E5

$\nu$  - 0.3

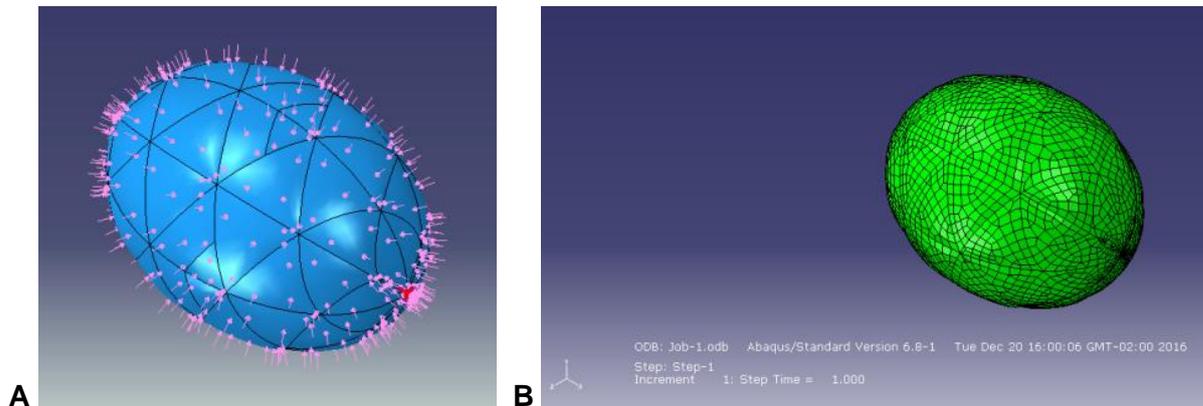
F = 01 N/cm

Um primeiro experimento de simulação da aplicação de cargas, considerando-se o material como o aço (valores de Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson).

Neste caso, considerou-se o engaste em uma das extremidades, como o fruto, objeto da forma referencial, encontra-se pendurado na árvore, e a aplicação de uma carga de 0,1 N/cm ou 0,01 Kg, carga esta aplicada perpendicularmente a dimensão maior do modelo ovoide.

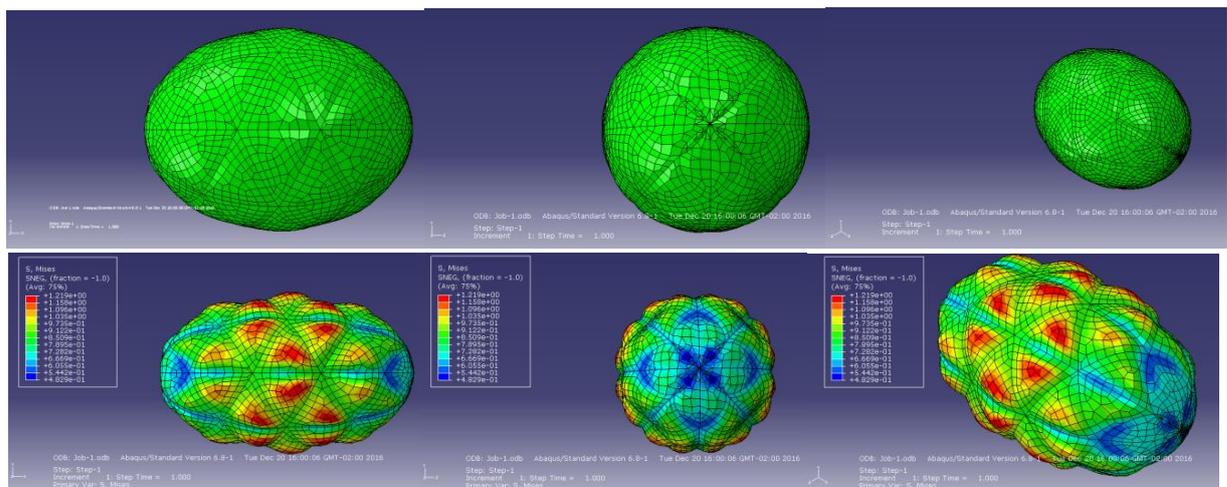
No modelo digital (virtual), figura 61, está representada a malha de elementos finitos considerada.

Figura 61: Aplicação das cargas a partir do engaste da extremidade do modelo **(A)** e malha em elementos finitos **(B)** do modelo de uma casca referenciado em uma casca do fruto da palmeira Jupati - *Raphia taedigera* (Mart.).



Conforme mostra a figura 62, a seguir, a concentração dos esforços acontece do centro para as extremidades da superfície e, especialmente, no miolo de cada um destes triângulos que formam a malha da superfície. Pode-se, por analogia, identificar uma semelhança entre uma superfície pneumática cujas deformações maiores poderiam ser também observadas.

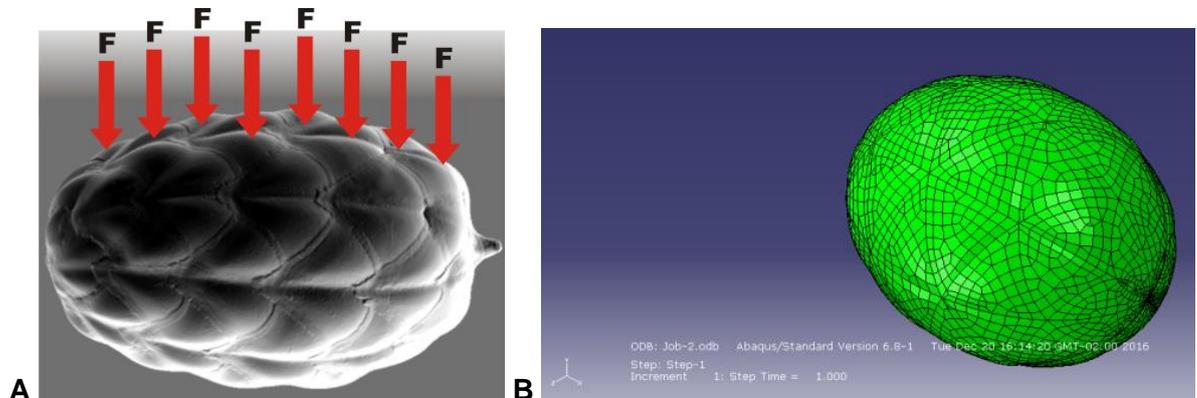
Figura 62: Configuração deformada com tensões de Von-Mises



Uma segunda simulação de aplicação de cargas, considerando o mesmo material, o aço (valores de Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson iguais ao experimento anterior). Neste caso, conforme figura 63, considerou-se o engaste nas duas extremidades do modelo (bi-engastado) e a aplicação de uma carga de 0,1 N/cm ou 0,01 Kg, carga esta aplicada perpendicularmente a dimensão maior do modelo ovoide.

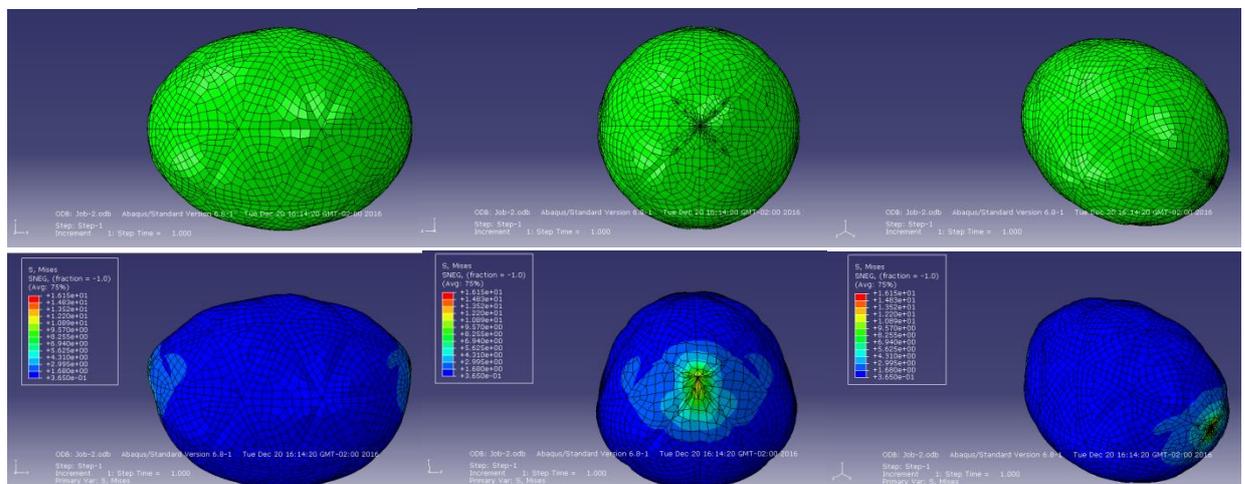
No modelo digital (virtual), figura a seguir, está representada a malha de elementos finitos, considerada e o sentido da aplicação das cargas nas condições de vínculo adotada.

Figura 63: Modelo referenciado no fruto da palmeira Jupati - *Raphia taedigera* (Mart.): sentido da aplicação das cargas “F” engastada nas duas extremidades (bi-engastada) (A) e aplicação de uma carga perpendicular a dimensão maior do modelo e malha em elementos finitos (B).



Conforme mostra a figura 64, a seguir, a concentração dos esforços acontece nas duas extremidades do engaste do modelo. Para um melhor entendimento poderia ampliar-se o espectro dos valores pois outras regiões estão sendo afetadas pelos esforços que, dado ao limite pré-estabelecido deste espectro, não foi possível visualizar tal comportamento.

Figura 64: Modelo referenciado no fruto da palmeira Jupati - *Raphia taedigera* (Mart.) e a configuração deformada com tensões Von-Mises.



Uma vez finalizada esta etapa, os resultados tornam-se acessáveis no módulo ABAQUS/Viewer, o que possibilita o acesso a uma grande variedade de resultados disponíveis na base de dados (.odb). Podendo nesta forma receber novos incrementos e outra variáveis como é o caso de uma melhor definição dos elementos de malha (o conjunto de elementos e nós utilizados na discretização de um modelo geométrico, para o cálculo com o método de elementos finitos (SÖDERBERG, 2006). Quanto maior o número de elementos e nós, maior é a precisão do resultado. A malha deve se ajustar da melhor forma possível ao formato geométrico do modelo da peça estudada. Entretanto, a sua densidade pode variar localmente, conforme a necessidade geométrica. Isto significa que, em regiões com detalhes

muito pequenos, é necessária uma densidade maior da malha para melhor representá-la. Quando se trata de ruptura, a região mais provável a sofrer-la deve sempre ter um bom refinamento na malha, pois a precisão do resultado das tensões obtidas naquela região deve ser a melhor possível.

Pode-se afirmar que a eficiência de um modelo depende da rigidez dos vincos em comparação com a esbeltez de sua superfície. Lebée (2015), afirma que com as dobras ou vincos compatíveis com a espessura das superfícies, a abordagem da rigidez das dobras é mais relevante e a maior parte das deformações ocorrerão nestes vincos. Quando as faces ou superfícies são delgadas com vincos não compatíveis, a elasticidade das superfícies não poderá ser negligenciada. No referencial analisado, a fruta da palmeira Jupati (*R. taedigera*), pode-se tratar de uma analogia estrutural. As dobras da superfície desta fruta mostraram nas linhas de vincos a formação de uma sequência de triângulos.

#### **3.5.4.3. Resultados, a partir do modelo tridimensional obtido pela digitalização 3D do fruto da Jupati (*Raphia taedigera* Mart.), extraídos do software ABAQUS™**

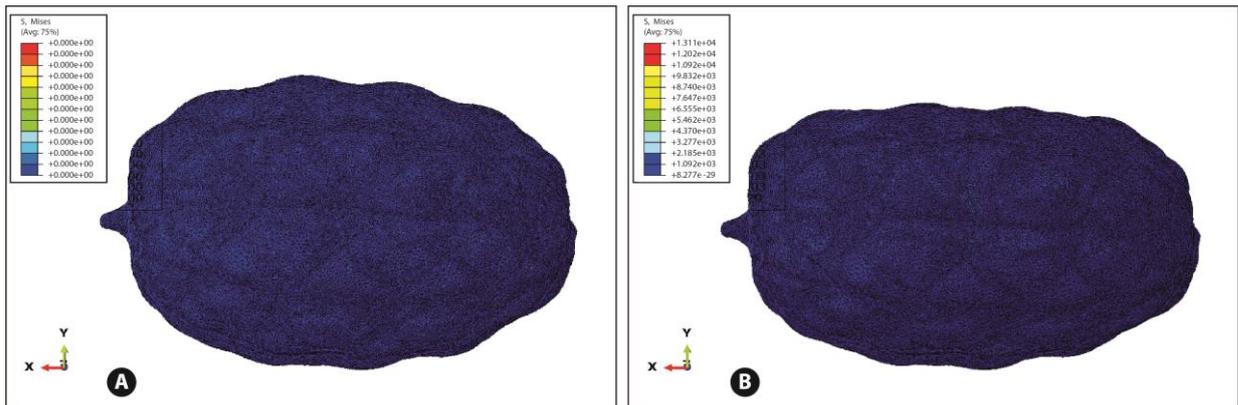
O modelo tridimensional obtido através da digitalização pode ser representado por uma malha geométrica que aproxima qualquer superfície ou volume do objeto real. Neste modelo obtido pela digitalização do fruto da Jupati (*R. taedigera*), considerando sua boa qualidade visual, é aplicada uma malha de elementos finitos, criada sobre o modelo geométrico, em um processo que subdivide este domínio e é chamado de discretização. Em um *software* de discretização do contorno deste sólido, em um conjunto (vértices, arestas e faces), resulta em um modelo discretizado denominado de malha de elementos finitos (MEF).

No entanto, esta malha pode apresentar pequenas imperfeições que contém as informações deste modelo e devem ser corrigidas. Para tanto fez-se necessário a aplicação de um comando dentro de um *software* para tal, para o refinamento dessa malha o que significa mais precisão na análise. Isto pode, por exemplo, eliminar ângulos muito grandes (podem causar erros de interpolação), ângulos muito pequenos (podem causar o mau condicionamento da matriz de rigidez) ou elementos muito pequenos ou esbeltos (podem induzir a instabilidade nas simulações).

Uma vez discretizada a malha do modelo tridimensional do fruto da palmeira Jupati (*R. taedigera*) este modelo foi importado pelo *software* ABAQUS™ para que fosse realizada a simulação da aplicação de cargas sob determinadas condições.

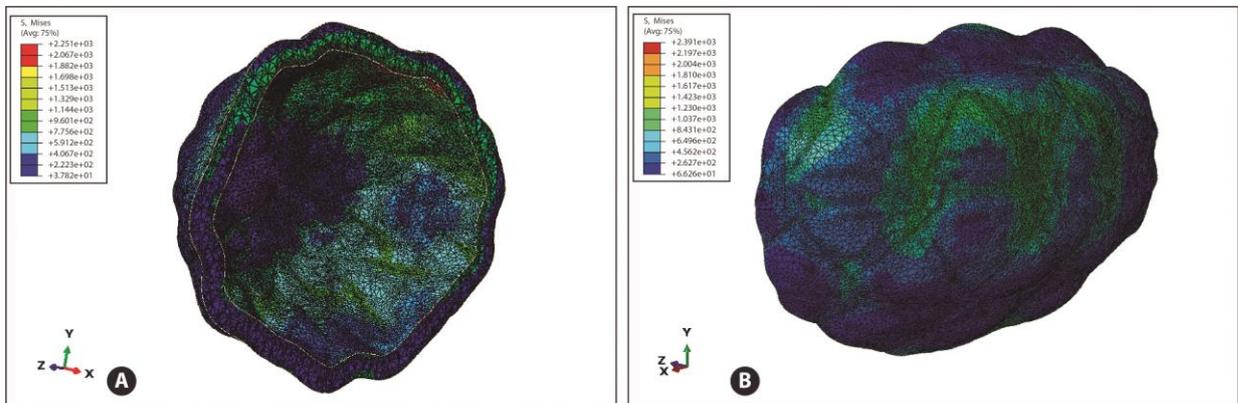
A figura 65 mostra este modelo discretizado sem a aplicação da carga **(A)** e com a aplicação da carga **(B)**, para este caso optou-se por aplicar a carga no sentido transversal ao a dimensão maior deste fruto.

Figura 65: Modelo discretizado referenciado no fruto da palmeira Jupati - *Raphia taedigera* (Mart.): sem a aplicação de carga **(A)** e com a aplicação da carga **(B)**.



Nesta figura não é possível ainda identificar claramente na malha discretizada os pontos que apresentam a concentração dos esforços. No entanto, como se pode ver na figura 66, a partir de uma seção deste modelo foi possível verificar aonde se concentram tais esforços de reação. Desta forma pode ser confirmada a hipótese de que os esforços se concentram nos vincos da superfície enquanto que as demais áreas desta não reagem desta forma cumprindo uma função de preenchimento.

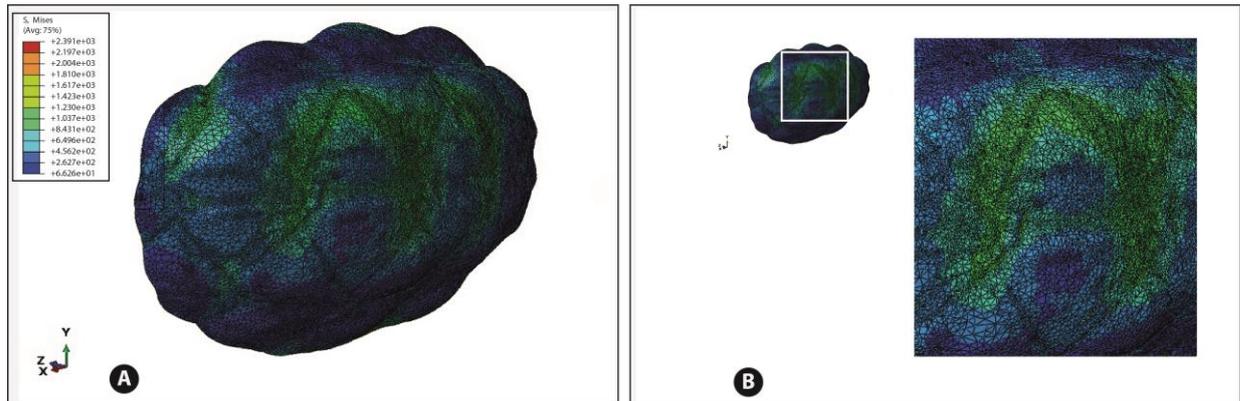
Figura 66: Modelo discretizado referenciado no fruto da palmeira Jupati - *Raphia taedigera* (Mart.): com a aplicação de carga – seccionado transversalmente **(A)** e seccionado longitudinalmente **(B)**.



Ainda que isto possa ser explorado de outras maneiras com a aplicação de diferentes cargas ou das posições de tal aplicação a simulação pelo método dos elementos finitos (MEF), através do pelo *software* ABAQUS™, apresentou o caminho da concentração dos esforços.

Pode-se notar, conforme figura 67, uma concentração de esforços junto aos vincos da superfície, ou seja, ao aplicar-se uma carga os vincos da superfície mostram-se como suas áreas principais de assimilação.

Figura 67: Modelo discretizado referenciado no fruto da palmeira Jupati - *Raphia taedigera* (Mart.): Modelo seccionado transversalmente com a aplicação de carga (A) e ampliação do trecho que recebe maior esforço (B).



No referencial analisado, o fruto da palmeira Jupati (*R. taedigera*), pode-se tratar de uma analogia estrutural. As dobras da superfície desta fruta mostraram nas linhas de vincos a formação de uma sequência de triângulos, como se cada uma destas linhas formasse as barras de uma treliça conformando uma estrutura rígida em torno de superfícies delgadas que lhe transferem cargas. A concentração destes esforços demonstrada na simulação pelo método dos elementos finitos leva ao entendimento de que as superfícies dobras faz com que seus vincos se comportem como estruturas.

Neste caso, comparativamente ao modelo desenvolvido exclusivamente no computador, o resultado da simulação do modelo escaneado está mais em acordo com o que se espera: a concentração de esforços acontece nos vincos e não topo das calotas (escamas) do fruto da palmeira Jupati (*R. taedigera*).

### 3.5.5. Tomografia Computadorizada (CT)

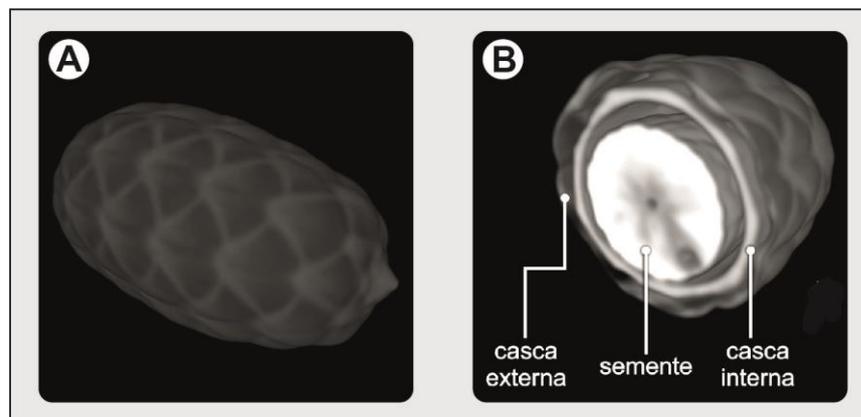
Os diferentes métodos de observação da superfície do fruto da palmeira Jupati (*R. taedigera*), através de desenhos, diagramas, fotografias e mesmo do modelo tridimensional obtido pela digitalização sempre apresentaram a representação externa da forma. Considerando que os métodos convencionais de investigação do interior de uma forma decorrem de métodos destrutivos de obtenção de informações, foi necessário buscar uma solução não invasiva a qual permitisse a visualização do interior deste fruto e da sua semente qualquer interferência na integridade do fruto em amostragem. Neste caso foi empregada a técnica de tomografia computadorizada (CT), a qual permite uma visualização não destrutiva da amostra com boa definição, permitindo ainda a montagem e o seccionamento do fruto de diferentes maneiras para a verificação das camadas e detalhes existentes.

Esta técnica, a qual tem amplo domínio na área da saúde, utiliza projeções radiográficas no comprimento de onda de Raios X no objeto a ser digitalizado, permitindo sua reconstrução

interna virtual realizada em 3D, de maneira não invasiva (PALOMBINI et al., 2017). Para a investigação deste fruto, um material biológico, buscou-se um tomógrafo empregado por laboratório privado da área da saúde, sendo a amostra foi tomografada com um equipamento de CT modelo Discovery CT750 HD (GE® Healthcare, Milwaukee, WI, EUA), utilizado como *scanner* para estudos na área da medicina humana. Após a preparação desta amostra, fixação em suportes internos ao equipamento, e seu entendimento dos parâmetros a serem considerados, calibragem para materiais biológicos de origem vegetal, aplicou-se uma corrente e tensão do tubo de Raios X de 260 mA e 140 kV, respectivamente, com projeções helicoidais resultando em 243 fatias com tamanho de pixel de 0,1563 mm.

A aquisição das tomografias, segmentação de imagem, resultou em fatias as quais foram exportadas e combinadas utilizando o *software* de acesso aberto Fiji, uma distribuição do ImageJ. Este *software* permite a utilização de *plugins* para edição e visualização 3D de imagens sequenciais, como as obtidas por CT, no caso apresentada na figura 68, além da realização de operações quantitativas e exportações para diversos formatos de arquivos (PALOMBINI et al., 2020).

Figura 68: Fruto da palmeira Jupati - *Raphia taedigera* (Mart.): imagem de tomografia computadorizada, após sua montagem – vista externa (A) e corte transversal (B).

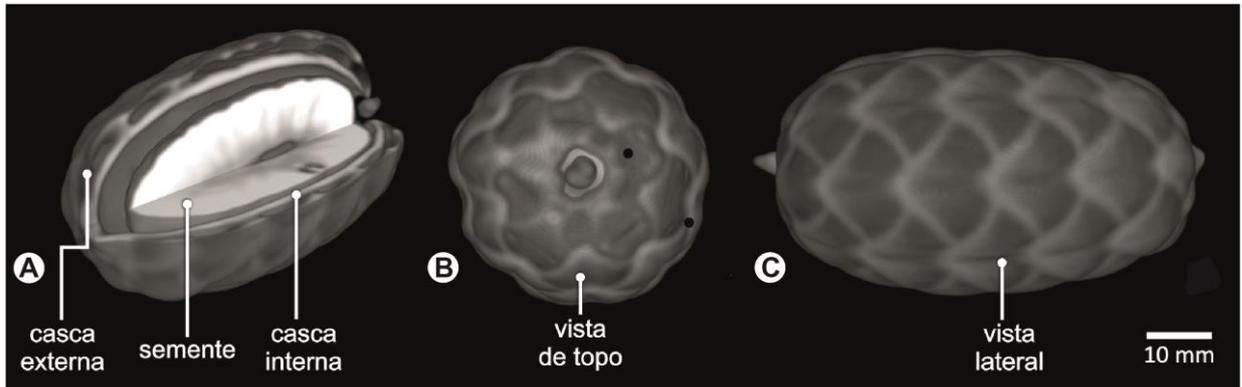


A reconstrução do fruto de maneira digital tridimensional do fruto da palmeira Jupati (*R. taedigera*) pelo processo da tomografia (CT) evidenciando uma visualização em corte axial (longitudinal), apresentando os aspectos internos. Embora já havia sido possível a visualização interna através do seccionamento de uma outra amostra, entendendo a existência de uma casca externa em formato de escamas e de uma casca interna lista na qual estão aderidas parcialmente tais escamas, e da semente, bem como os aspectos externos foi possível visualizar todo o comportamento interno das diferentes partes e as soluções formais que a natureza emprega.

Pode-se afirmar que, dentre as técnicas inovativas da digitalização de objetos os métodos baseados na tomografia computadorizada se potencializam para a obtenção de imagens e

modelos sem a destruição da amostra, permitindo não somente a visualização da superfície externa e seus atributos mas também do conteúdo interno e a superfície inversa e detalhes o que possibilitam a leitura e compreensão dos atributos da morfologia do objeto mantendo intacta a amostra e preservando a sua configuração natural para novos estudos ou como referencial (figura 69).

Figura 69: Fruto da palmeira Jupati - *Raphia taedigera* (Mart.): imagem de tomografia computadorizada com corte (longitudinal) (A), vista do extremo apical (B) e vista longitudinal (C). Escala: 10 mm.



Através das imagens obtidas, e sua montagem, percebe-se que a textura da superfície possui um aspecto bem característico determinado pelos componentes da casca externa na forma de escamas, os quais possuem alto brilho e reflexão. Estas propriedades, considerando os objetivos deste estudo, se tornam interessantes em função das possibilidades de aplicação em envelopes de edifícios (fachadas) devido a fatores possíveis como o controle de temperaturas e gastos de energia.

Também é observado que a casca externa é caracterizada por ser de espessura bastante delgada, apesar de apresentar boa rigidez. Provavelmente, deve-se a sua geometria específica em um segmento de escamas curvas e vincadas, esta solução da natureza também se apresenta com potencial de exploração em projetos bio-inspirados para revestimentos de edificações uma vez que pode aliar leveza e menor consumo de materiais com a resistência físico-mecânica, por exemplo.

Amostras de diferentes tamanhos podem ser analisadas, graças à variação de tipos de equipamentos e resoluções espaciais disponíveis. No entanto, o equipamento disponível para a análise desta amostra, um tomógrafo da área médico-hospitalar, em que pese permitir uma série de imagens interessantes e que se prestam a boas análises, através da sua reconstrução, não permite uma alta resolução da microestrutura interna da amostra, o que seria possível se o equipamento fosse um microtomógrafo (*micro CT*), o qual permite a aquisição de imagens em pequena escala com um aumento exponencial da resolução.

Neste caso, a tomografia CT foi importante para o entendimento de como se vinculam as dobras da casca externa com a casca interna, o que referenda a informação de que esta superfície funciona como uma casca vincada (estrutura plissada) e, ainda na determinação das espessuras destas superfícies. No entanto não foi possível em aplicar o método dos elementos finitos, em *software* de simulação de cargas, uma vez que não se tratava de uma tomografia com um melhor grau de definição de imagem. Uma simulação em um modelo adquirido através da microtomografia CT resultaria, em maior precisão e certeza, do que aquela simulação realizada a partir do modelo digitalizado, anteriormente apresentada.

### **3.6. Formulação das bases para o método de antecipação de alternativas**

Considerando a investigação de três frutos de casca dura do referencial formal da natureza buscou-se identificar as características gerais de cada um procurando identificar aquele que reunia o maior número de qualitativos para o emprego de um método generativo a partir da Gramática da Forma. O uso da Gramática da Forma, *Shape Grammar*, proposta neste trabalho consistiu na definição de regras de composição começando pelo levantamento dos componentes de uma superfície de um fruto de casca dura, suas proporções, modulações e padrões de simetria.

Uma vez realizado o levantamento coube iniciar um sequenciamento de passos, empregando as mais diferentes técnicas e equipamentos e, com início na geometrização da forma, aplicar a Gramática da Forma gerando soluções referenciadas no elemento natural escolhido. Um passo seguinte foi o da simplificação dessas regras para possibilitar seu uso na aplicação em um algoritmo paramétrico para gerar um elemento de fachada e suas variações na superfície.

As regras servem para, em um primeiro momento, produzir variações que melhorem as soluções de composição formal em sua aplicação, nesse caso visando placas de revestimento. Uma vez da definição do módulo e de suas combinações em uma gramática de forma experimentou-se uma variação nas aberturas visando, no caso da possibilidade de revestimentos de envelopes de fachadas, proporcionar maior ou menor ingresso de luz e ventilação. Neste caso buscou uma solução que envolvia a parametrização tendo o computador como recurso para a aplicação em uma solução de movimentos cinéticos.

Considerando que em ambas as soluções tais placas sirvam tanto para composição estética, revestimento da superfície e sua proteção como de elementos de sombreamento de fachadas. Desconsiderou-se para este estudo a resistência da placa sem a variação na sua espessura uma vez que se ingressaria em busca de alternativas de diferentes materiais o que extrapolaria aos objetivos da atual pesquisa. Desta forma baseado na forma natural de um fruto de casca dura trazer padrões e suas variações parametrizadas para produzir variações estético-funcionais de placas de fachada aplicadas às edificações.

A biomorfose associada a técnicas de projeto generativo envolvendo parâmetros pode resultar em proposições de design. Neste estudo o caso considerado se presta para revestimentos de edificações, como envelope de fachadas, os quais se inspiram em soluções formais de superfícies encontradas na natureza. Para tal, o elemento da natureza, como fonte deste design inspirado na natureza, foram frutos de casca dura os quais, além das questões formais, guardam uma correspondência, na condição de material envoltório que considera requisitos visuais considerando a disposição e o funcionamento encontrado em sua geometria, de onde é possível a obtenção de regras para uma Gramática da forma associada e, per se, para outros métodos generativos de projeto.

A identificação geométrica a qual possibilita experimentos em uma gramática da forma de conteúdo gráfico-formal, pode se constituir em uma ou mais regras. Esta multiplicidade de regras pode tornar complexa a escolha da alternativa mais apropriada. A alternativa mais apropriada, a ser considerada, é aquela que busca selecionar um número de regras a serem aplicadas a formas associadas, as quais contenham alguns atributos de geometria, como por exemplo faces, vértices e arestas.

A abordagem aqui buscada, a partir da inspiração na natureza, com a finalidade de ser aplicada em processos de projetos de engenharia, arquitetura e design, pode estabelecer vinculações a formas naturais em associação que fogem a uma resposta óbvia ou convencional, visando permitir que o projetista possa encontrar soluções bio-inspiradas que sejam mais ricas em alternativas ou mesmo mais interessantes do ponto de vista estético e/ou formal.

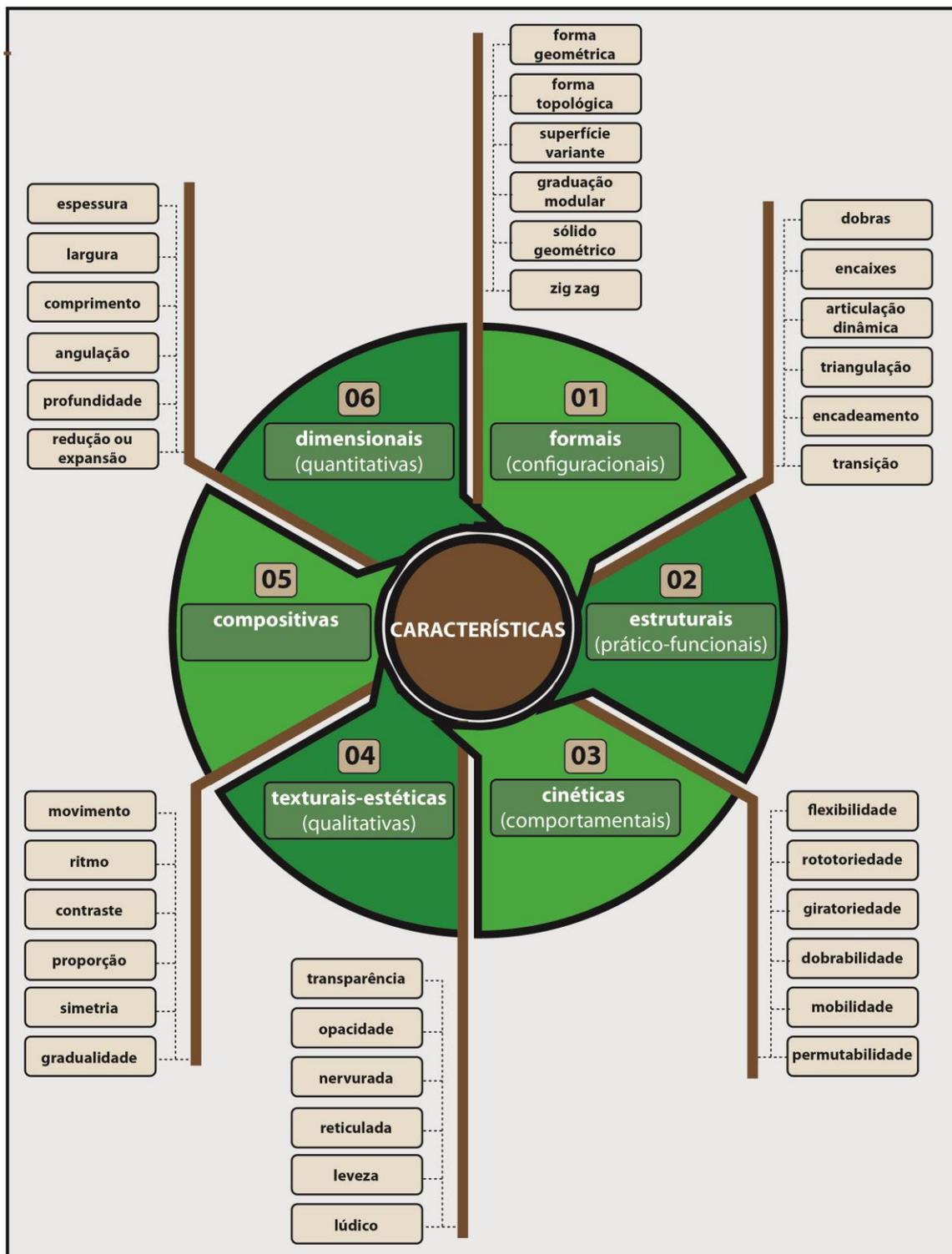
### **3.6.1. Escolha das características das formas naturais – frutos e sementes**

A natureza apresenta uma infinidade de formas as quais podem servir de inspiração para o emprego em produtos desenvolvidos pelo homem. Por seu lado, Hsuan-An (2002) afirma que o estudo estético-morfológico das formas naturais e artificiais, uma vez efetuado de maneira adequada e sistemática deve estar apoiado em informações mais amplas sobre as características (qualidades evidentes de todos os níveis) e propriedades (qualidades essenciais) apresentadas por estas formas.

Considerando seu estudo sobre sementes do cerrado brasileiro Hsuan-An (2002), afirma que devido a grande complexidade da natureza, exige que isto seja classificado em categorias de modo a facilitar a sua utilização como um recurso na análise morfológica. Para tanto, o autor, agrupou as características das formas naturais em seis categorias, definidas como: formais e configuracionais; estruturais prático-funcionais; cinéticas e comportamentais; texturais, estéticas e qualitativas; compositivas; e dimensionais e quantitativas.

Além de estabelecer estas seis categorias (figura 70), associa-se uma série de características para cada uma delas, as quais poderão servir como critérios, parâmetros ou fatores empregados em todas as etapas, desde a análise do modelo biológico, passando pela abstração geométrica, até chegar à proposição de uma solução bio-inspirada qualquer.

Figura 70: Categorias e características adotadas como referenciais biológicos desta pesquisa.



Fonte: adaptado de Hsuan-An (2002).

Tais características não podem ser adotadas de forma independente, pois elas estão intimamente correlacionadas. Uma vez realizada a análise morfológica de uma forma natural específica, suas características poderão ser registradas e exploradas com os diferentes recursos de visualização e representação gráfica, como uma primeira etapa da análise.

Na medida em que se progride o processo da síntese, eliminando-se o secundário e preservando o essencial, iniciam-se os processos de abstração da forma, inicialmente por sua geometrização como método de facilitação da sua posterior análise do que será considerado como elementos de parametrização. Considerando as características das categorias empregadas para análise, e adotando como referencial o amplo estudo de Hsuan-An (2002), foram escolhidas aquelas que se relacionam com o componente biológico empregado – fruto de casca dura (figura 71).

Considerando este estudo, que busca na natureza sua fonte de inspiração, mais especificamente na natureza vegetal em frutos de casca dura, a escolha do elemento de análise teve como premissa frutos cuja casca apresentasse em sua macro-estrutura a superfície texturizada em padrões geométricos. Adotando-se a metodologia desenvolvida por Hsuan-An (2002) procurou-se evidenciar as categorias de características como foco principal do levantamento inicial dos referenciais amostrados, conforme a figura 71. Os três frutos que apresentavam potencial para este estudo: Cedro - *Cedrela fissilis* (Meliaceae), Noz comum - *Juglans regia* (L.) e Jupati - *Raphia taedigera* (Mart.), foram cotejados junto com as características que se adequavam para as superfícies de revestimentos de fachadas. Desta forma, uma solução impulsionada pela natureza visando atender determinadas características de um projeto específico. Como ponto de partida da geometrização da forma considerada destes frutos de casca dura, foram explorados o seu regramento individual e a sua aplicação sob determinados critérios de malha construída a partir de módulos.

Como visto anteriormente um encaminhamento geométrico para definir uma gramática da forma deve, em primeiro lugar, tornar clara a semelhança de estrutura e aparência com o elemento que lhe deu origem, neste caso o fruto referencial; em um segundo lugar deve fornecer método de composição que possa desenhar ou gerar novas formas que sejam instâncias deste referencial.

Para a síntese formal do referencial de estudo, de modo a extrair suas regras compositivas e combiná-las entre si, buscou-se a formulação daquelas características geométricas que permitam a criação de novas formas, satisfazendo determinadas condições pré-estabelecidas. Neste modo convencional, elencou-se algumas regras compositivas deste fruto para posterior aplicação.

Uma forma abstrata, que atua como gerador e como um limite, é obtida baseada na escolha de características geométricas dos perfis dos elementos, buscando identificar o vocabulário mais representativo de formas e associado ao menor conjunto de regras possíveis de combinação e transformação desse vocabulário, capazes de gerar uma significativa quantidade de elementos possíveis.

Como o objeto parte da forma macro e de características da superfície, estão apresentadas, de uma maneira geral, as seis categorias de características (considerando que já foram todas incluídas anteriormente – sintetizados na figura 70) associadas pela leitura visual e experimentos gráficos iniciais envolvendo cada um dos três frutos considerados, chegando-se na figura a seguir.

Figura 71: Características/categorias com maior influência em referenciais biológicos escolhidos, considerando determinada aplicação.

			
<b>características</b>	<b>Cedro</b> <i>Cedrela fissilis</i>	<b>Noz</b> <i>Juglans regia</i>	<b>Jupati</b> <i>Raphia taedigera</i>
<b>01</b> <b>formais</b> (configuracionais)	✓ ✓	✓ ✓	✓ ✓ ✓
<b>02</b> <b>estruturais</b> (prático-funcionais)	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓
<b>03</b> <b>cinéticas</b> (comportamentais)	✓ ✓ ✓	✓ ✓	✓ ✓
<b>04</b> <b>texturais-estéticas</b> (qualitativas)	✓ ✓	✓ ✓	✓ ✓ ✓
<b>05</b> <b>compositivas</b>	✓ ✓	✓	✓ ✓ ✓
<b>06</b> <b>dimensionais</b> (quantitativas)	✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓
<b>importância:</b> ✓ pouca    ✓ ✓ média    ✓ ✓ ✓ muita			

Em conformidade com as características elencadas, e a importância de cada uma destas associada a um dos três frutos em análise, para os propósitos projetuais escolhidos, adotou-se o fruto da palmeira Jupati (*R. taedigera*), uma vez que este fruto reunia um número maior de características referenciais, objeto requerido para o estudo.

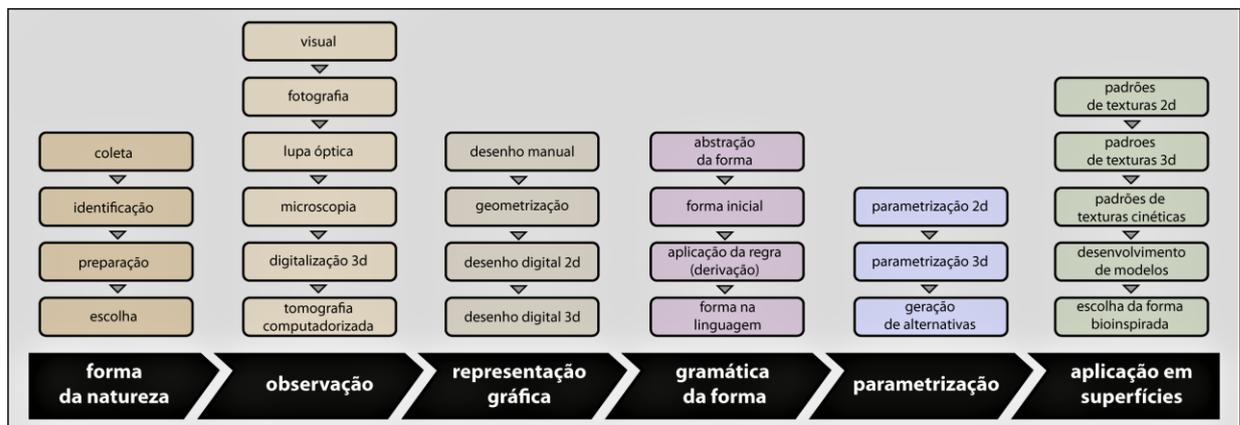
#### 4. RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta a definição do processo de obtenção de soluções de projeto a partir da biomorfose da superfície do fruto de casca dura, especificamente do fruto escolhido: o fruto da palmeira Jupati (*R. taedigera*). A abordagem procura investigar as diferentes possibilidades de aplicação para, desta maneira, validar a hipótese de pesquisa.

##### 4.1. Etapas percorridas para a obtenção de uma forma bio-inspirada

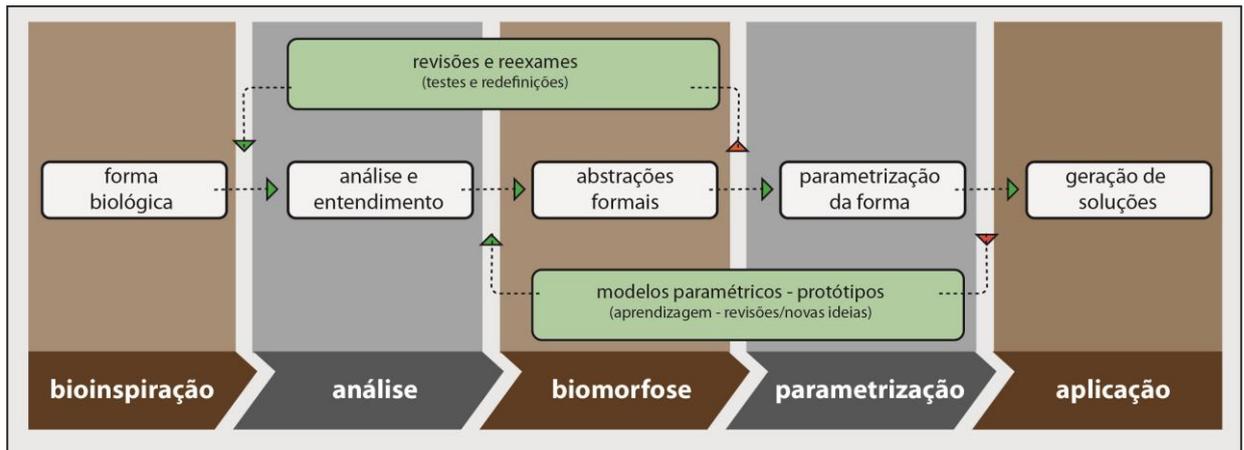
Este estudo considerou uma abordagem biomimética como de baixo para cima (*bottom up*) a começar pela biologia, ou seja, em um processo impulsionado pelas formas da natureza, mais especificamente pelas texturas de frutos de casca dura. Tomou-se como ponte de partida a observação dos princípios formais, sua implicação na geometria da forma, tanto em parte e como um todo, abstração de uma forma básica para uma aplicação fundamentada em métodos generativos de projeto a partir de uma gramática da forma e da parametrização com o auxílio do computador. Uma vez geradas as formas na linguagem, escolheu-se uma família de alternativas a possíveis aplicações técnicas em sistemas de superfícies texturizadas como os envelopes de edifícios, objeto de exploração em fachadas na arquitetura (figura 72).

Figura 72: Sequenciamento de etapas percorridas a partir de uma forma obtida na natureza até uma aplicação em uma forma bio-inspirada (no caso em estudo às superfícies).



Em um modelo simplificado, conforme a figura 73, deste sequenciamento de etapas visando gerar soluções projetuais com base na forma biológica, salienta-se a importância de o mesmo não ser linear uma vez que deve possibilitar revisões e reexames, considerando que eventuais amostras ou entendimentos viesadas não devem comprometer o estudo. O mesmo se pode dizer de que modelos paramétricos ou protótipos, os quais devem ser confrontados com as abstrações da forma referenciada para gerar aquela ou aquelas alternativas que melhor se adequam aos propósitos ou mesmo como fonte de novas ideias a partir destas.

Figura 73: Percurso (não linear) das etapas para obtenção de soluções em superfícies texturizadas baseada em formas da biologia.



#### 4.2. Levantamento das características para a análise estético-morfológica

Considerando as características das seis categorias empregadas para análise, e adotando-as como referencial deste estudo, foram escolhidas aquelas que se apresentaram como de evidência maior, considerando os referenciais biológicos empregados – frutos e sementes de cascas duras. Em um segundo momento fez-se uma nova triagem reduzindo ainda mais as características a serem considerando em um máximo de cinco a cada uma das seis características.

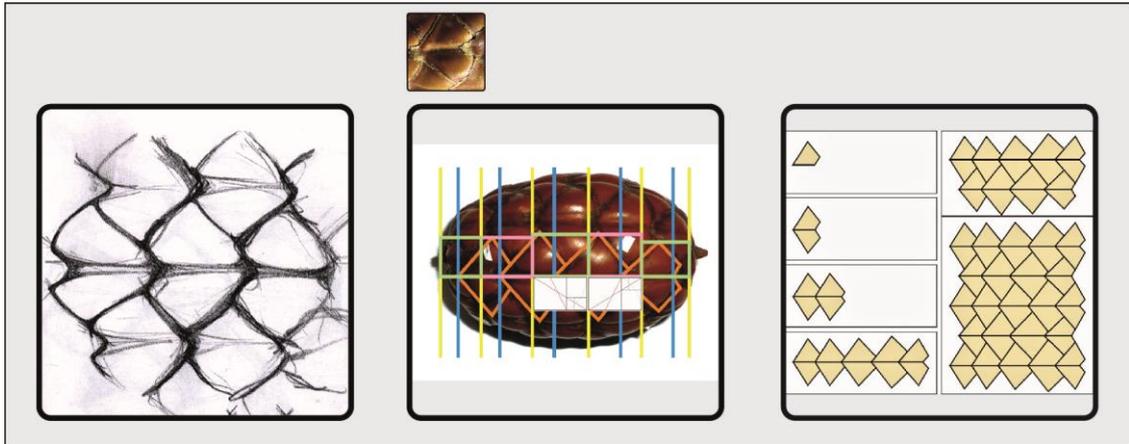
Para este estudo, considerando-se os três frutos e sementes cuja referência principal estava na casca, foram evidenciadas categorias as quais o fruto se apresentava com melhores possibilidades para o estudo. Uma vez definido o fruto que apresentava as características potenciais para os propósitos do estudo, o fruto da palmeira Jupati, partiu-se para o emprego da metodologia que envolve princípios generativos de soluções de projeto.

#### 4.3. Aplicação dos conceitos da gramática da forma a partir das regras dos modelos naturais, descrição e análise dos resultados

De acordo com o visto anteriormente o encaminhamento geométrico para definir uma Gramática da Forma deve, em primeiro lugar, tornar clara a semelhança de estrutura e aparência com o elemento que lhe deu origem; em segundo lugar deve fornecer método de composição que possam desenhar novas formas que sejam instâncias do referencial tomado como modelo de inspiração.

Para a síntese formal destes referenciais, de modo a extrair suas regras compositivas e combiná-las entre si, deve buscar-se a formulação de regras que permitam a criação de novos projetos satisfazendo determinadas condições pré-estabelecidas. Neste modo convencional, buscou-se algumas regras compositivas destes frutos e sementes para posterior aplicação (Figura 74).

Figura 74: Representação gráfica do modelo biológico em estudo, o fruto da palmeira Jupati.

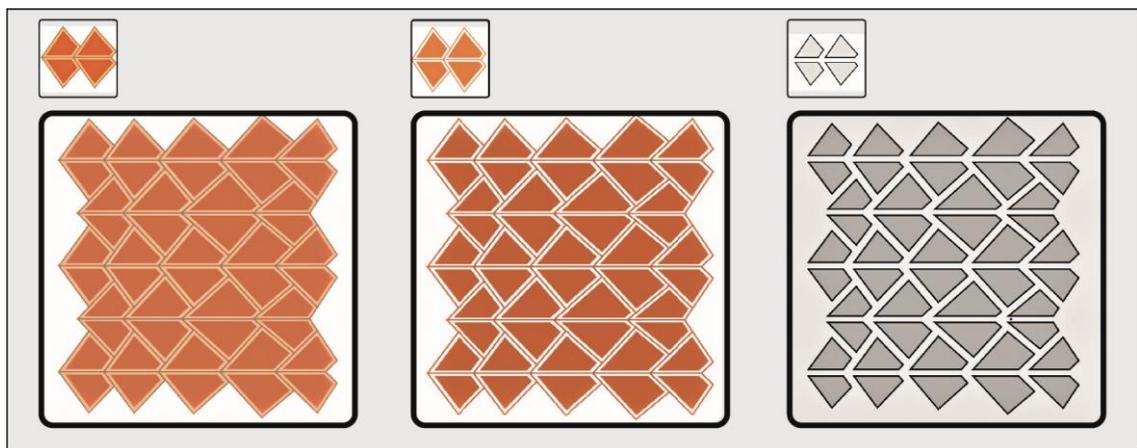


O emprego da gramática da forma proposta neste estudo consiste em uma definição de regras de composição formal realizado a partir do levantamento dos componentes de uma superfície de um referencial biológico (neste caso o fruto de casca dura de uma palmeira), considerando parâmetros como: proporções, padrões de simetria, ritmo e repetições e dimensões. Entendido este processo e suas regras procurou-se, em um próximo passo, simplificar, ou melhor abstrair, tais regras para uma posterior aplicação em um algoritmo paramétrico com o objetivo de gerar um produto através da aplicação destas regras e suas variações. Neste caso para um painel de revestimento de fachadas em formato de placas considerando ainda as variações da superfície tanto em “grão” do módulo como em textura (saliências e reentrâncias).

Neste estudo, focado nas possibilidades formais, através da biomorfose, concentrou-se no emprego de regras para produzir variações com resultados compositivos e estéticos em placas para aplicações em superfícies. Tais regras servem ainda para, em um primeiro momento, produzir variações em fatores como a melhora da resistência física do material aplicado à placa sem a variação na sua espessura, aqui referenciado nos princípios físicos das superfícies vincadas. Ao mesmo tempo, poderá se prestar ainda para uma variação nas aberturas ou perfurações (dimensões, forma, quantidades, etc.) visando, no caso de aplicações em fachadas por exemplo, proporcionar maior ou menor ingresso de luz, temperatura ou de ventilação. Ambas as soluções podem fazer com que tais placas sirvam de elementos de proteção ou de controle do sombreamento de fachadas. Desta forma, a partir da superfície natural texturizada de um fruto de casca dura, objetivou-se a obtenção de padrões e suas variações, adquiridas através de processos generativos, incluindo-se os recursos da parametrização, para produzir variações estético-funcionais para placas de revestimento de fachadas aplicadas em soluções para o envelope de edificações.

Um exemplo inicial desta geometrização pode ser visto na figura 75, a seguir apresentada, as quais apresentam a geometrização da forma e seu regramento individual e a aplicação sob os critérios de malha, já anteriormente descritos. Ao abstrair o elemento da natureza em uma forma inicial, esta atua como gerador e limite a qual atuará a partir da sua característica geométrica dentro de determinadas regras recursivas, buscando identificar uma linguagem com um vocabulário de formas relacionadas entre si. Um conjunto limitado de regras que permitem a combinação e a transformação do vocabulário na linguagem são capazes de gerar uma superfície ou forma considerando os elementos analisados.

Figura 75: Resultado de aplicação de uma Gramática da Forma (envolvendo regras como espelhamento e deslocamento dentre outras) a partir da geometrização da malha.



#### 4.4. Estudos da geometria, parametrização e modelagem generativa do fruto de Jupati - *Raphia taedigera* (Mart.)

Conceitos formais e geométricos podem servir de inspiração para a adaptação, melhora e otimização de envoltórios de objetos, como o caso dos envelopes de fachadas em edifícios. É possível estabelecer analogias na biomorfose de frutos, neste estudo do fruto da Jupati, como formas bio-inspiradas para a aplicações em padronagens de painéis de revestimento, cujas soluções morfológicas desenvolvidas pela biologia podem promover a adaptação do edifício ao seu meio. Isto pode resultar em melhoras no desempenho de fachadas e edifícios, aumento do conforto térmico, lumínico e até acústico e potencialmente reduzir as demandas de energia para aquecimento, resfriamento ou ventilação.

O emprego de ferramentas da linguagem digital os projetos passam a explorar os limites das formas, proporcionando geometrias mais complexas, personalização e mesmo sua construção a contar da fabricação digital. Desta forma projetos auxiliados pelo computador passa a se ocupar da parametrização na entrada de dados que podem gerar uma infinidade de soluções e também controlar o projeto a partir de parâmetros e não da sua forma final. Uma organização estrutural baseada na contribuição de uma variável de crescimento

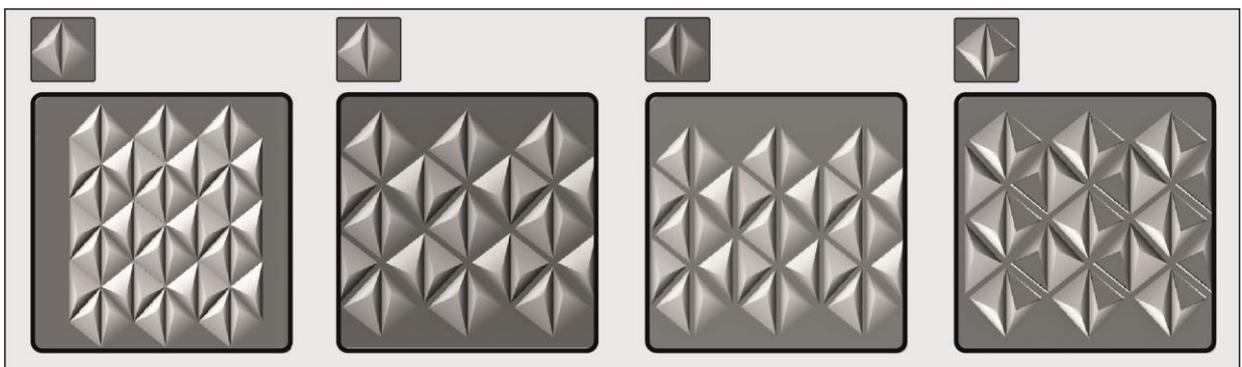
responde positivamente tanto na organização das características geométricas quanto na qualidade das alternativas geométricas da forma emergente.

Foi visto, anteriormente, que as padronagens organizam e definem relacionamentos na natureza e podem ser integrados ao projeto como solução estético-compositiva de forma a produzir uma relação visual com o usuário. Esta mensagem visual com base na linguagem da gramática deste padrão formal pode agregar também questões funcionais visando sua aplicação em determinados produtos.

Um primeiro experimento antes da parametrização, considerando ainda o resultado da aplicação de uma gramática da forma simplificada e, buscando uma solução em uma superfície envolvendo uma textura tridimensional experimentou-se a geração de alternativas a partir da multiplicação dos módulos tridimensionais. Estes estudos envolveram a criação de painéis através do *software* Rhinoceros®, considerando módulos como: conectados, módulos duplicados afastados entre si, módulos individualizados (módulo triangular) afastados entre si e uma última alternativa vazando uma quarta parte dos módulos, o que em um painel aplicado ao envelope de fachadas poderia gerar iluminação ou ventilação (figura 76).

Uma vez definida a possibilidade em programa de geração de imagens tridimensionais levou-se, como exemplo a impressão digital 3D destas. Uma vez que a opção considerava módulos tridimensionais afastados entre si, o que impediria a formação de um painel buscou-se uma estrutura de suporte na qual deveria ser impresso cada módulo. O objetivo ainda era buscar um material flexível o qual pudesse representar a possibilidade destes painéis modulares também serem empregados em fachadas curvas ou irregulares.

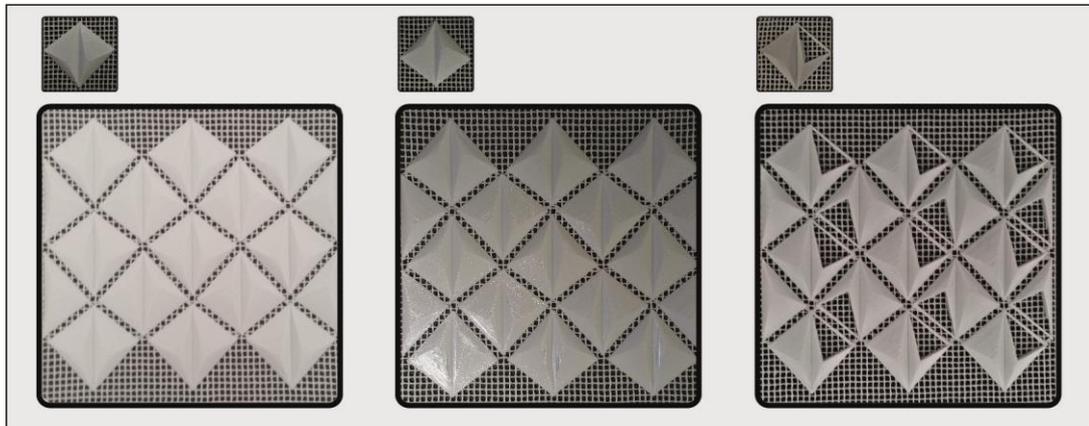
Figura 76: Resultado da geração de uma malha de módulos tridimensionais visando diferentes possibilidades.



Para o experimento, tentou-se soluções com tecidos de fibra de vidro, tecidos metálicos finos e tecidos em malha lisa, mas todos eles se mostraram ineficientes, nas condições estudadas, para os propósitos uma vez que dificultava a aderência do material de impressão. A alternativa foi buscar um tecido de algodão com um grão de malha relativamente afastado

(cerca de 2mm), tecido encontrado no comércio local com o nome comercial de talagarça, o que foi possível, pois além do tecido possibilitar tal ligação, o material de impressão (filamento em polímero plástico) penetrou nos espaços do grão da malha provocando uma união bastante firme, mas sem perder a maleabilidade entre os módulos impressos (figura 77).

Figura 77: Resultado de impressão dos módulos tridimensionais em malha de tecido.



As duas primeiras soluções de aplicação de uma gramática da forma a partir da geometria modular baseada no fruto da palmeira Jupati (*R. taedigera*) constituem-se em solução estática, a qual responde apenas parcialmente às exigências do envelope de uma edificação. Situam-se passivamente dependendo do material e da angulação em função de fatores como sol, vento ou intempéries.

Propor uma solução generativa paramétrica foi um próximo passo, desta forma o estudo se propôs a modular uma superfície com o controle sobre cada módulo e do conjunto em si sob determinados critérios os quais possam responder ativamente às necessidades de um envelope de edificação como são suas fachadas. Este critérios responsivos podem reagir funcionalmente a questões ambientais ou algum comportamento associativo desejado pelo usuário que detenha o comando ou que possam ser acionados a partir de sensores.

A fachada além de revestir a estrutura de um edifício é uma interface entre o interior e exterior, a qual tem atributos funcionais que lhes são próprios incluindo complexidade de funções, heterogeneidade de formas e materiais e multidisciplinaridade. Convencionalmente os elementos de vedação atuam de maneira estática, no entanto, ao se introduzir movimentos cinéticos mudam a concepção de ser apenas contemporânea e estética com limitados atributos funcionais passando a ser compreendida como uma solução dinâmica, adaptável e prático-funcional respondendo às questões do meio-ambiente.

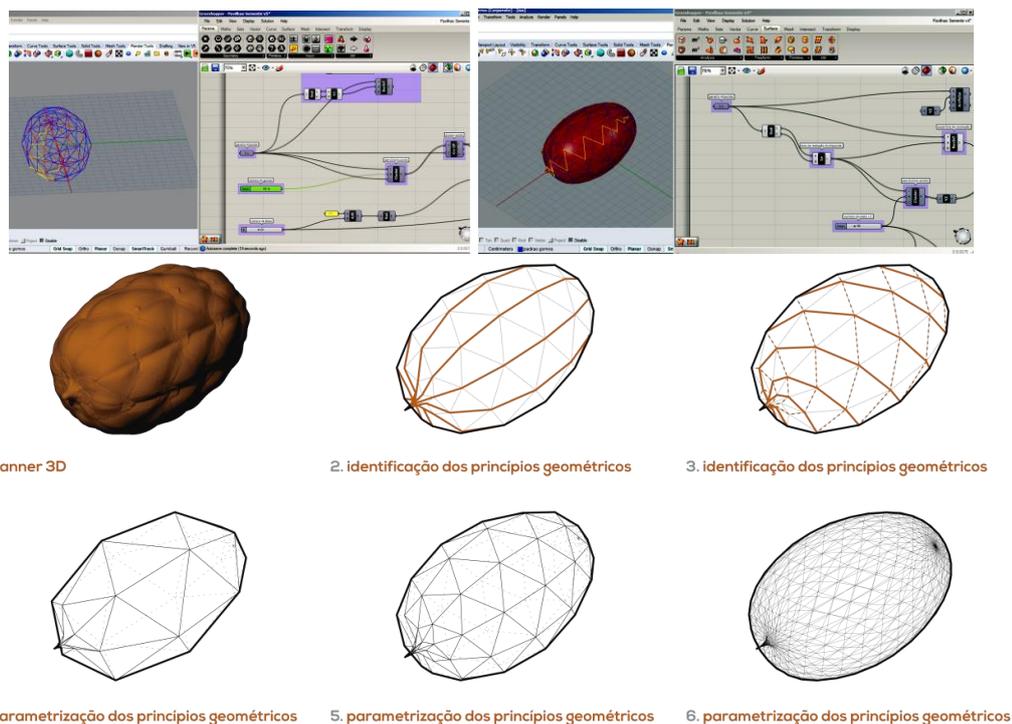
A solução envolvendo a parametrização da superfície modular cuja modelagem provocaria uma quantidade maior de soluções. Antes da definição de parâmetros e das condições envolvidas nos esquemas paramétricos para criar regras dentro de uma linguagem formal a

contar da morfologia deste fruto de casca dura buscou-se parametrizar a própria superfície deste fruto considerando abstração modular. O emprego da linguagem digital através do *software* Rhinoceros® e sua ferramenta integrada Grasshopper®, facilitou a parametrização da superfície fruto. Os princípios geométricos, identificados previamente pelo modelo tridimensional obtido pelo escaneamento do fruto, serviu de base para aplicação de equações que inicialmente trataram como parâmetros apenas o grão triangular da malha que forma o conjunto de escamas e do seu aumento e diminuição como efeito de manipulação da forma. A Tomografia CT e o MEF, que também aportaram entendimento a isto, poderiam servir a outras como por exemplo a questões térmicas, ainda que não sejam o foco deste estudo.

Ainda que possa apresentar uma solução instantânea na variação do tamanho dos módulos desta superfície ela é ainda uma resposta mais visual e bidimensional do que de atributos que apresenta a dinâmica cinética (figura 78).

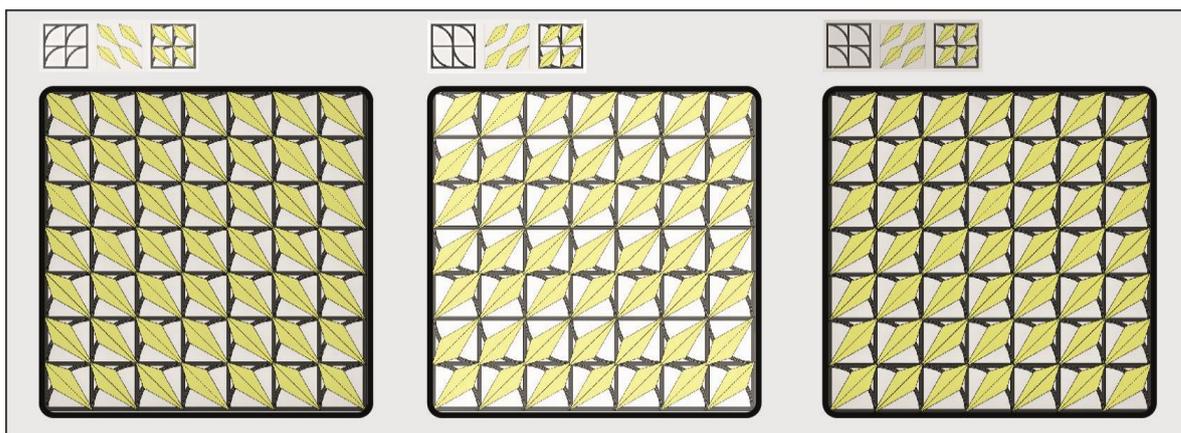
Em um primeiro momento, cabe ao projetista definir os parâmetros considerando desenhos (croquis e diagramas) e de eventuais soluções visando sua movimentação, dado que, para este caso, está se pensando em uma solução modular cinética a ser aplicada em um envelope de fachada. Para a definição dos módulos e o estabelecimento de parâmetros tais como tamanho, rotação, ângulo de giro, orientação, dentre outros, percorreu-se um estágio de experimentação em desenhos, manuais ou em *softwares* gráficos e da prototipagem.

Figura 78: Parametrização dos princípios geométricos do fruto da palmeira Jupati - *Raphia taedigera* (Mart.), empregando o *software* Rhinoceros®, e ferramenta de programação visual Grasshopper®.



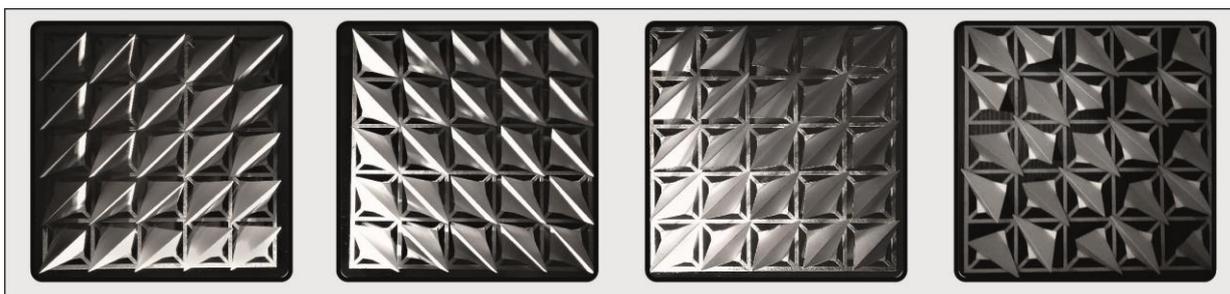
Conforme mostra a figura 79, a geometria que anteriormente era fechada ela passa a ser aberta baseada na elaboração de um módulo quadrado, sobre o qual estaria ancorado a placa cinética, articulada desde um dos vértices deste quadrado e abrindo totalmente em sua diagonal ou fechando-se a partir desta, lembrando o movimento de uma asa de borboleta. Além de definir este módulo procurou-se este módulo e sua associar a estrutura de suporte de maneira a formar uma malha na qual o movimento poderia resultar em diferentes possibilidades.

Figura 79: Experimentações do módulo cinético e sua estrutura de suporte e três composições modulares possíveis.



Uma vez desenhado as possibilidades, conforme mostrada na figura anterior, buscou-se montar um protótipo de estudos experimentando-se o uso da luz e seu efeito plástico pensando como solução aplicada a um envelope de edifício visando o sombreamento, ventilação ou efeitos plásticos com o emprego da luz noturna (figura 80).

Figura 80: Protótipos de simulação de composição modular com o emprego da luz visando antecipar efeitos possíveis.

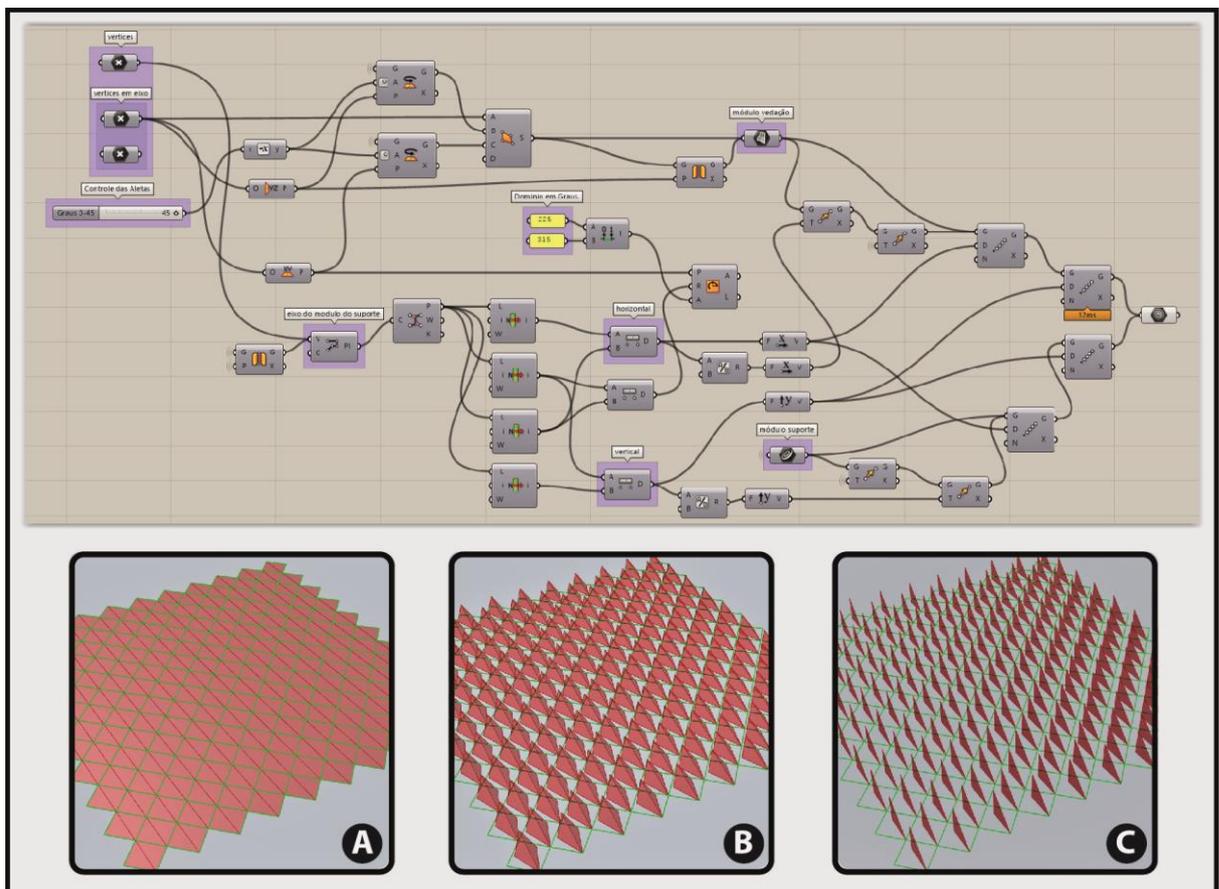


Considerando parâmetros encontrados estudam-se as possibilidades de aplicação em soluções de produtos e gerando formas parametrizadas (figura 81). Para a execução de elementos que permitam movimentação, cinéticos portanto, em uma determinada superfície de revestimento, como o revestimento de uma superfície de fachada, faz-se necessário a simulação das diferentes posições dos elementos móveis que a compõe, visando determinados objetivos que podem envolver estética, iluminação, sombreamento ou

ventilação. Desta forma procurou-se evidenciar movimentos que permitem gerar uma superfície que vai da bidimensionalidade até a tridimensionalidade envolvendo rotação, giro, dobra o que provoca contração e expansão na dinâmica de abertura e fechamento.

A partir da superfície gerada procurou-se otimizar o algoritmo generativo para especificar os ângulos de movimento destes módulos tanto o movimento coplanar com a estrutura de suporte (eixos x e y) como no ângulo que forma a partir da abertura se projetando para fora (eixo z). Tal angulação de abertura pode se situar (desconsiderando a espessura do material e a estrutura de suporte) entre 0 e 45 graus nos três eixos de movimentação. Esta geometria que varia do aberto ao fechado pode comportar responsivamente em acordo com o ângulo entre os raios solares ou da necessidade de abertura para contato visual

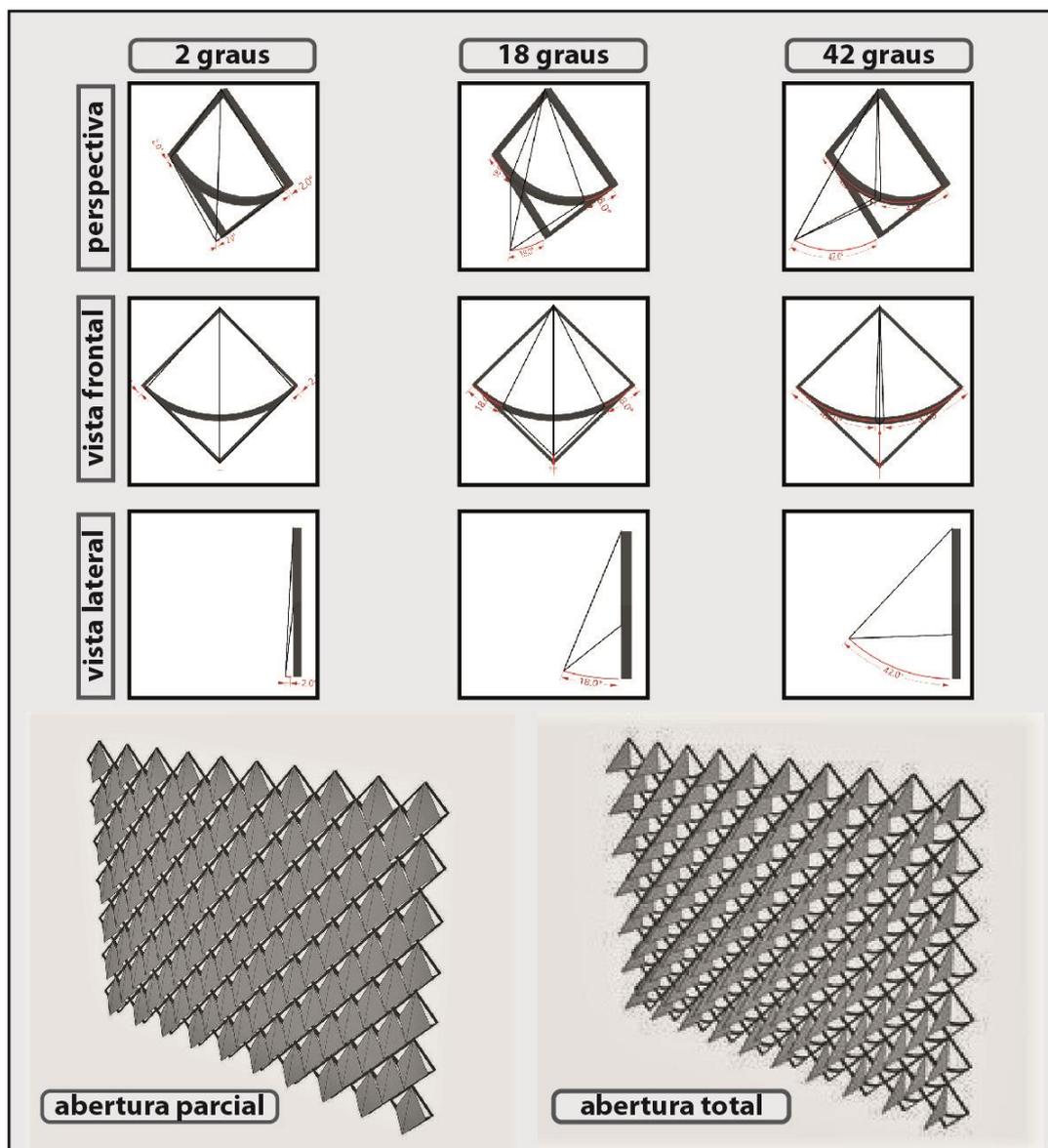
Figura 81: Geração de formas tridimensionais a partir da parametrização da geometria escolhida: **(A)** Código paramétrico do Grasshopper®, **(B)** Simulação do código com aletas abertas, e **(C)** fechadas.



Com resultado estes módulos podem ser controlados conjuntamente, conforme simulado na figura 82, ou então separadamente oportunizando uma fachada flexível e responsiva para diferentes aplicações com geometrias de formas diferentes a qual poderá, ainda, agregar um conceito de eficiência sustentável quanto a iluminação e a ventilação natural.

A complexidade da solução e dos movimentos cinéticos resolvidos por ferramentas de desenho digital com peças que devem cumprir suas funções com a dinamicidade de movimentos também deve ser complementada com soluções automatizadas de movimento e de sensores de luz, umidade ou ventos as quais influenciam na concepção do edifício e na relação com seu envelope de fechamento (as fachadas).

Figura 82: Sistema de abertura e movimentação dos módulos cinéticos individualmente e no conjunto.



Em uma solução convencional de um sistema de proteção solar empregando brise soleil estes, quando móveis, possuem ângulos específicos de giro os quais responde ao movimento do sol. Para que isto aconteça uma equação matemática deve ser desenvolvida para que estes elementos de sombreamento possa obter o ângulo de rotação necessário. Neste caso deve-se substituir na equação o ângulo criado toda vez que o sol muda sua posição, ou seja,

uma resposta mais lenta. Mas se esta equação matemática for uma fórmula parametrizada introduzida em um *software* específico, tal substituição é feita automaticamente. No *software* Grasshopper® uma vez introduzida tal fórmula no algoritmo gráfico um simples deslize pode provocar mudança direta no ângulo.

Em uma modelagem paramétrica a geração de soluções está baseada em parâmetros automatizados de elementos do projeto, onde geração e alteração destes dentro de um projeto são controlados por um conjunto ou conjuntos de regras estabelecidas em algoritmos específicos.

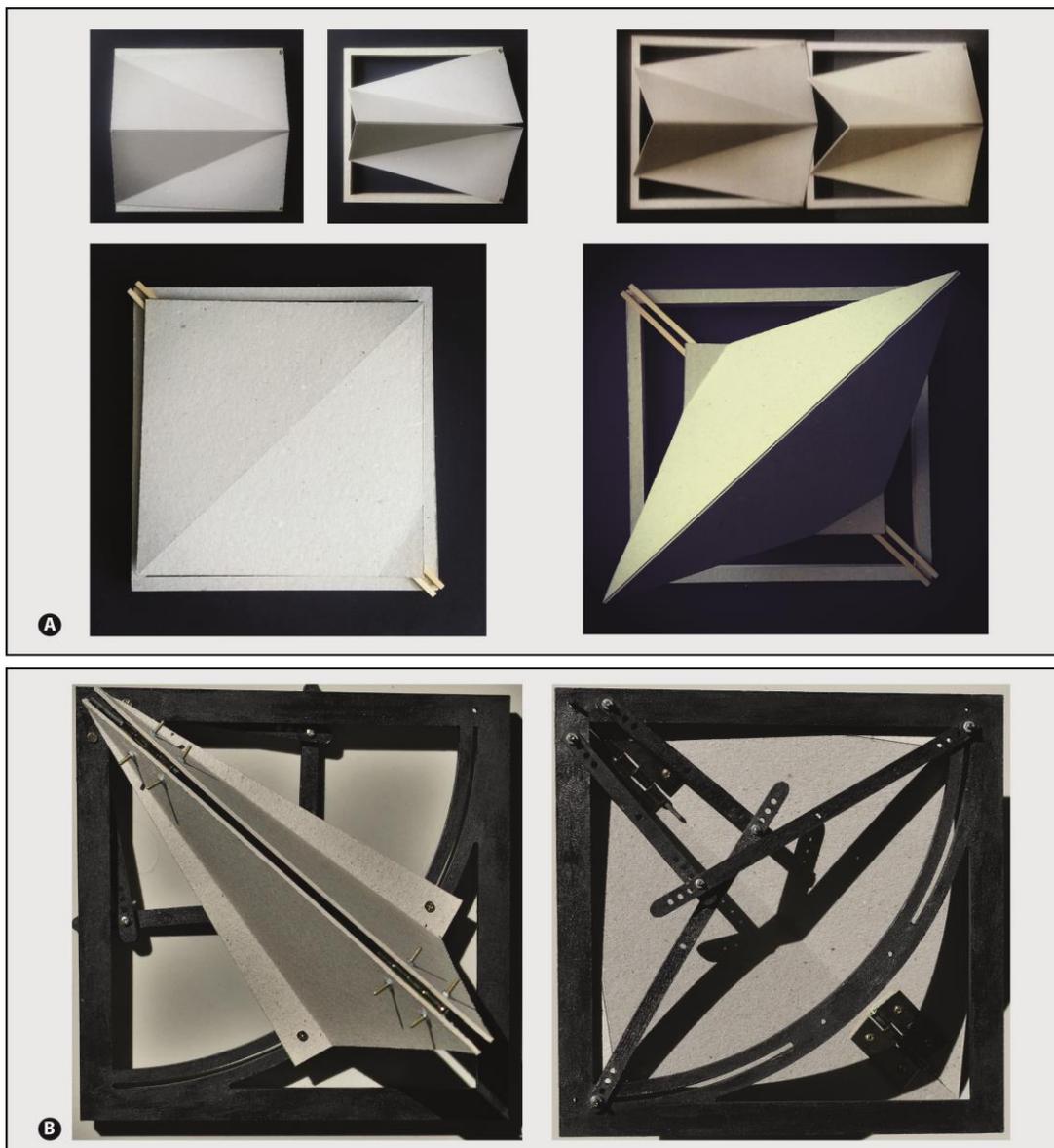
Considerando que uma superfície cinética, neste caso como solução de fachada, é uma estratégia para otimizar funções reguladoras responsiva a diferentes estímulos para atender as demandas dos ocupantes da edificação. Uma fachada cinética deve estar adaptada para atender fatores como à luz solar e suas variações da geometria solar durante o dia ou para o controle das alterações climáticas.

Para estudar melhor o comportamento dos módulos que compõe a fachada cinética no que se refere ao seu percurso e articulação dentro de uma estrutura de suporte empregou-se alguns protótipos físicos em escala reduzida visando soluções para uma posterior automatização do seu funcionamento. A busca por melhores estratégias sob estes aspectos visou apenas trazer uma aproximação de que o simulado pelo modelo digital se viabilizaria em uma situação física real. Com isto foi possível entender através de protótipos físicos, ainda que de forma preliminar e sem um modelo funcional de complexidade maior (figura 83), os principais pontos que tornarão a fachada responsiva e seus pontos de automatização.

Um método generativo parametrizado deve conter soluções que convergem à adaptabilidade à luz e radiação solar e ao clima e suas dinamicidades visando melhorar o conforto visual, térmico e lumínico do usuário de maneira simultânea equacionando questões como a de energia.

O *software* Rhinoceros® e sua ferramenta de programação visual integrada Grasshopper® trabalha com um algoritmo gráfico onde componentes ou nós são conhecidos como pilha e estão conectados como uma rede para construir seu formulário de programação envolvendo diferentes parâmetros. Uma vez alterados os parâmetros mudam-se funções e geometrias de maneira simultânea o que é observado na janela do programa. Esta linguagem de programação visual também é caracterizado por embutir no estudo soluções otimizadas através de diferentes aplicativos para que se possam obter os melhores resultados entre os diferentes parâmetros considerados pelo projetista.

Figura 83: Protótipos cinéticos para estudo do percurso e articulação dos elementos móveis em sua estrutura de sustentação e eixo de articulação. Protótipos iniciais (A) e protótipo da solução final (B).



Desta forma, ainda que não seja o objetivo deste estudo fazer as medições precisas, pois isto dependeria de outros fatores tais como: materiais, dimensões e quantidade de janelas, condições do entorno natural ou edificado ou topografia do local. Considerando-se isto, entendeu-se como importante uma simulação visando obter um melhor desempenho quanto a quantidade de luz no ambiente baseado nos ângulos de abertura e fechamento propostos.

O Grasshopper® dispõe de *plugins* aplicativos em diferentes campos e uma destas ferramentas de simulação destas é o *plu-in* Ladybug®, o qual proporciona a criação de informações abrangentes sobre o estado ambiental para qualquer local específico importando o arquivo meteorológico do padrão EnergyPlus® (.epw). Com a leitura de informações climatológicas importadas de bancos de dados permite gerar análises ambientais. O

Grasshopper e traz com uma grande variedade de gráficos interativos 2D e 3D, os quais servem para realizar estudos ambientais com grande precisão considerando fatores pertinentes às geometrias da forma de uma edificação. para a geração da forma do edifício.

Ainda que o objetivo deste estudo não fosse o de obter uma análise da eficiência energética ou lumínica, os resultados aqui apresentados servem para evidenciar o grau de precisão no qual uma solução bio-inspirada pode chegar. Para tanto, as figuras a seguir (figuras 84 e 85), mostram simulações, diretas no modelo tridimensional desenvolvido no *software* Grasshopper®, para estações de inverno e verão, em uma fachada de orientação norte instalada na cidade de Porto Alegre.

Nas figuras, a escala *sunlight* mostra para diferentes ângulos de abertura a quantidade de horas de luz que a fachada recebe durante estas estações, informação não somente a quantidade de iluminação natural mas o período em que esta fachada fica exposta diretamente a luz solar.

Figura 84: Diagrama de análise da iluminação solar em número de horas. Porto Alegre, **inverno** e fachada orientação norte.

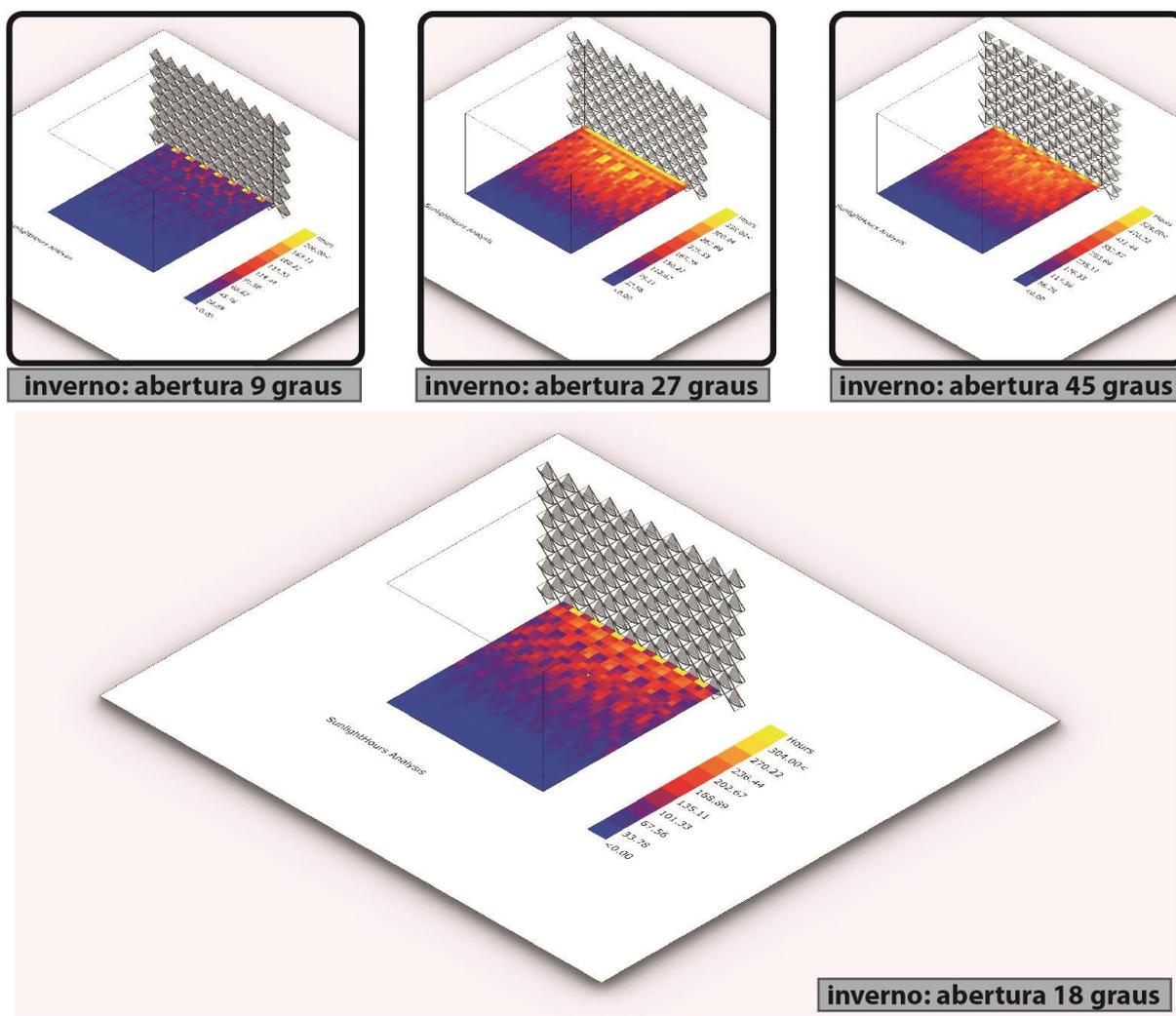
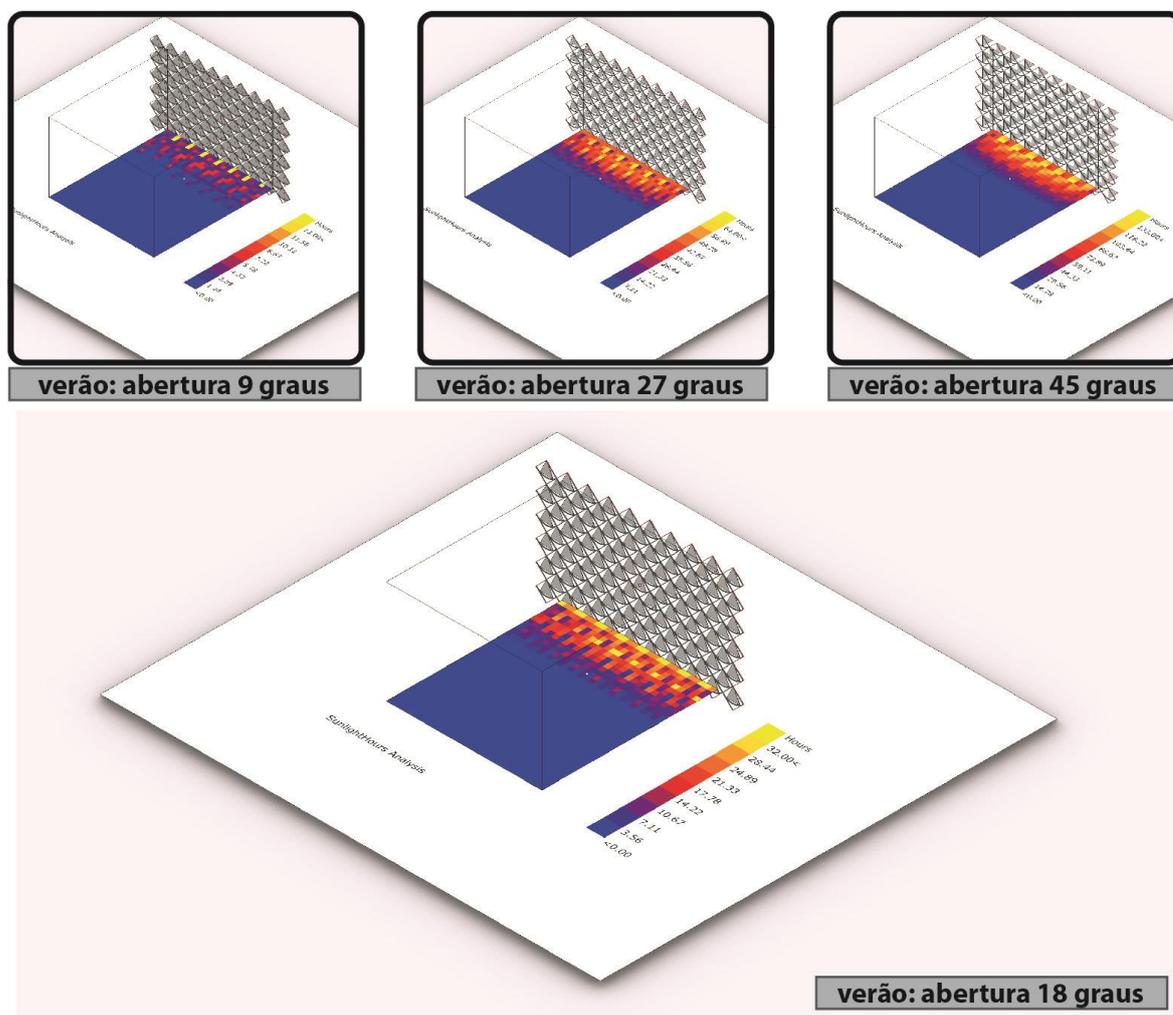


Figura 85: Diagrama de análise da iluminação solar em número de horas. Porto Alegre, **verão** e fachada orientação norte.



Esta escala poderia ser trocada também por uma outra escala de valores como radiação medida em KWh/m<sup>2</sup>. Saber a quantidade de horas que o sol incide na superfície de uma fachada é importante para se levar em consideração mecanismos de sombreamento, podendo-se com tal *plugin* analisar nas simulações a quantidade de radiação recebida na fachada do edifício (figuras 86 e 87).

Já os resultados com relação à radiação solar incidente na fachada, demonstraram que quanto maior a torção maior a exposição à radiação solar em determinados pontos da fachada e maior o auto sombreamento em outros. Quanto ao dimensionamento das aberturas, observou-se melhores resultados nas janelas que apresentavam maior altura, se comparado à largura das mesmas.

A quantidade de radiação solar incidente na fachada, pode ser controlada por um dispositivo cinético o qual acompanha o percurso solar evitando que o ambiente receba radiação direta. Isto poderia ser analisado não somente pelo movimento cinético, mas também pelas

dimensões e quantitativos de tais elementos cinéticos, ainda que sem considerar o material dos mesmos.

Figura 86: Diagrama de análise da radiação solar em KWh/m<sup>2</sup> em Porto Alegre, **inverno** em uma fachada orientação norte.

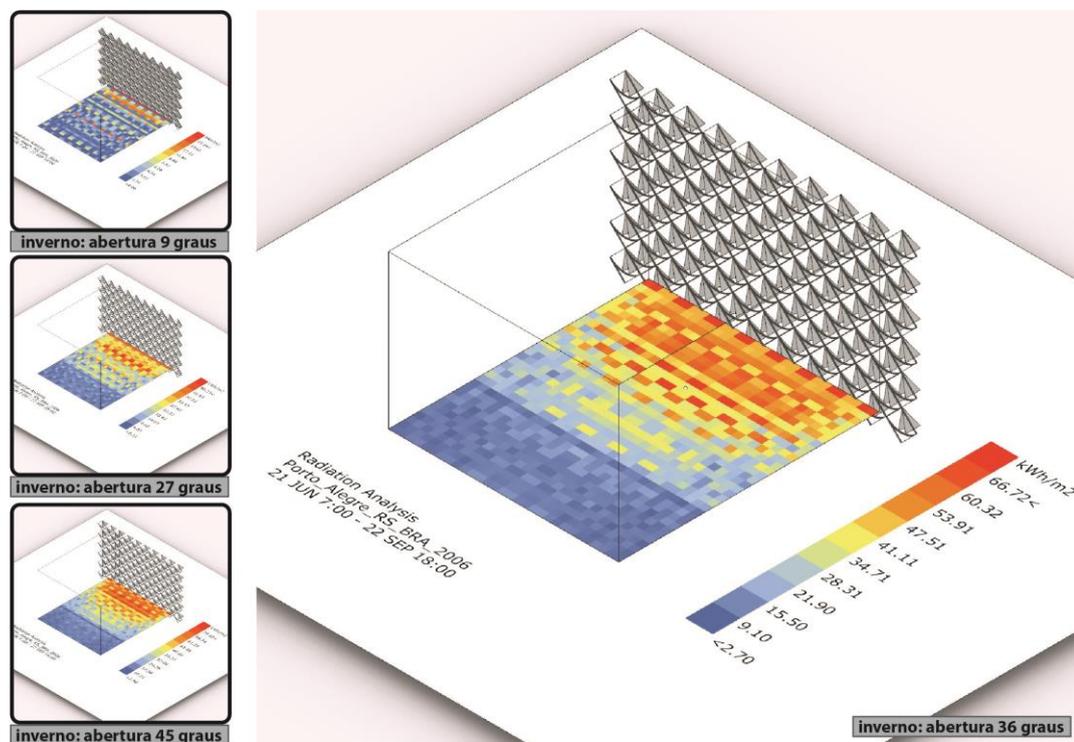
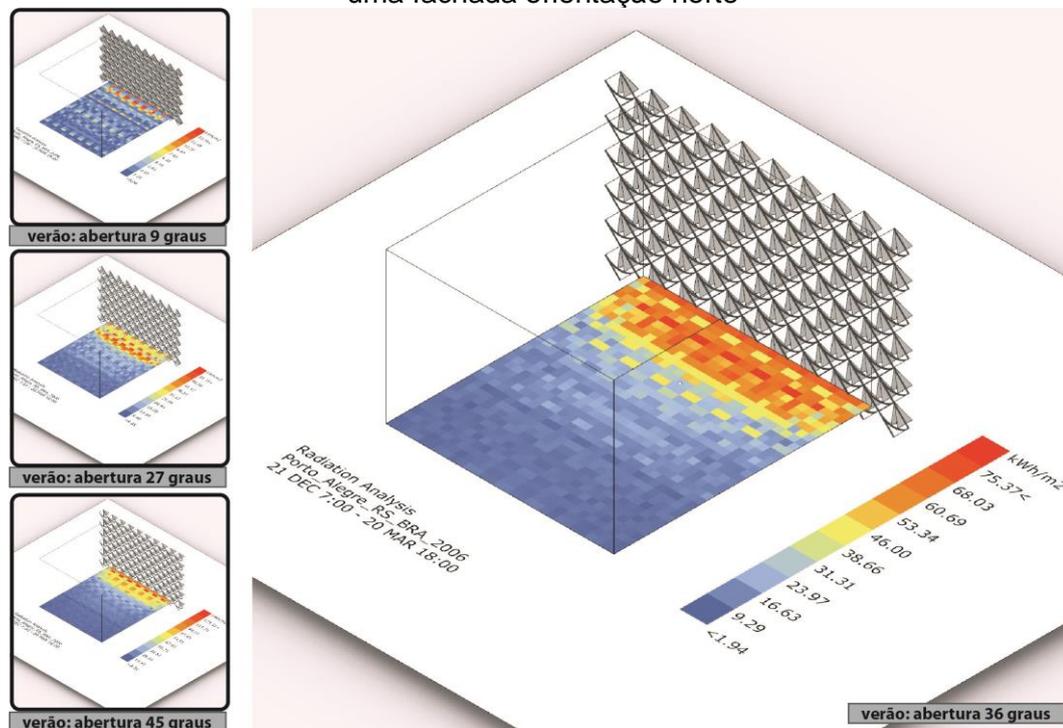


Figura 87: Diagrama de análise da radiação solar em KWh/m<sup>2</sup> em Porto Alegre, **verão** em uma fachada orientação norte



Ainda que como simulação ilustrativa, um dispositivo solar cinético pode contribuir de maneira significativa para a redução média anual da radiação solar horária – radiação direta, assim como da quantidade de sol que incide diretamente em uma superfície ou espaço. Portando a modelagem paramétrica a qual gerou uma solução formal pode estar conectada parametricamente a dados do projeto, como neste caso para verificar a influência do clima e da localização da fachada estudada.

Outros *plugins* estão disponíveis para o Grasshopper<sup>®</sup>, que são ferramentas de simulação as quais servem, além daquela antes apresentada, para medir a radiação solar, estudo de *raytracing*, velocidade do vento, umidade, consumo de energia de aquecimento ou de resfriamento, dentre outros. Além disto eles podem ser conectados de maneira simultânea e interagir com os demais produzindo resultado que permitem modificar ou otimizar as soluções de projeto considerando a modificação de parâmetros ou variáveis.

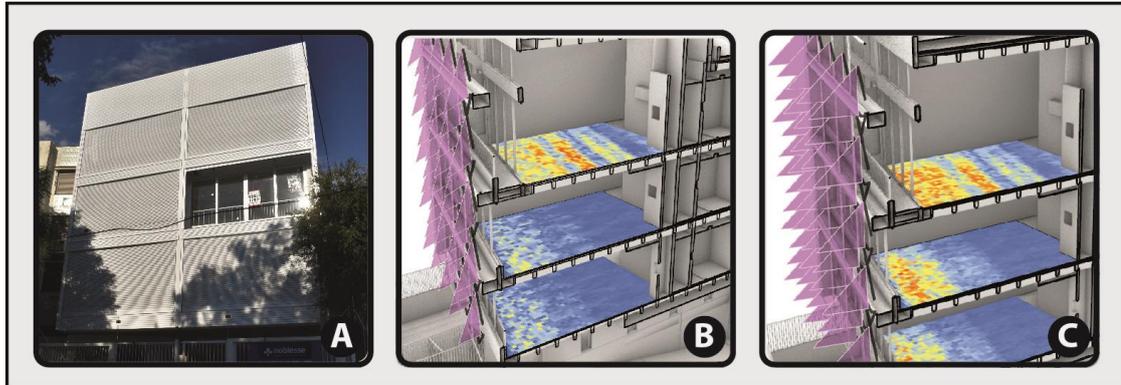
Geometrias e formas complexas, que derivam da biomorfose de elementos da natureza permitem descobrir formas de alto desempenho ou de identificar os parâmetros mais significativos que afetam o desenvolvimento de uma fachada responsiva.

As simulações parametrizadas em tempo real, permitem comparar resultados de desempenho a partir de mudanças que devem levar em consideração a geometria da natureza que a inspirou ou, em um estágio mais aprofundado, dos princípios da biomimética destes elementos.

Considerando, ainda, a potencialidade de uma simulação paramétrica de uma solução bioinspirada tomou-se como exemplo de simulação real experimentou-se em um modelo tridimensional empregado no projeto arquitetônico de edifício existente, o qual possui um sistema de sombreamento não cinético com a mesma orientação norte do que aquela simulada anteriormente.

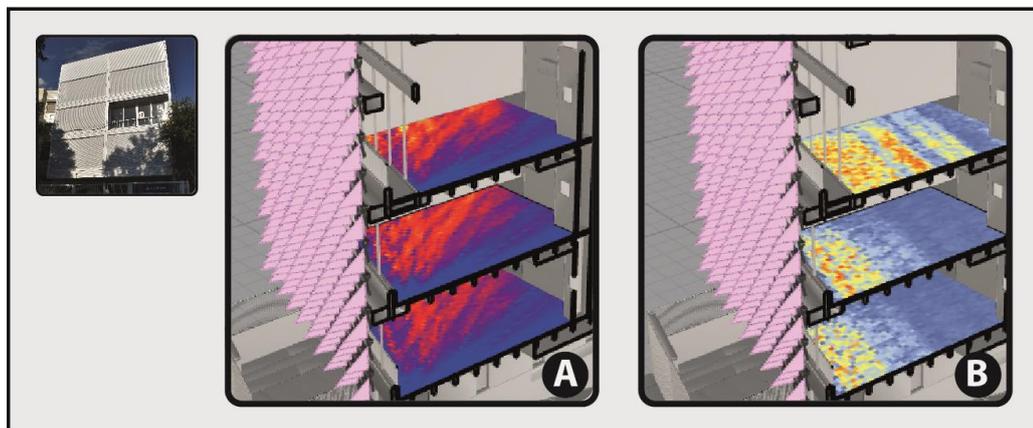
É possível verificar a quantidade de sol recebida pelo ambiente, iluminação solar incidente, através da variação da abertura em diferentes ângulos, gerando alternativas como por exemplo da organização espacial e de lay-outs deste ambiente (figura 88).

Figura 88: Diagrama de análise da iluminação solar em um edifício em Porto Alegre: edificação existente com fachada norte protegida por um sistema de sombreamento através de cortina de enrolar em chapa perfurada **(A)** e simulações no modelo digital para o mesmo edifício em aplicações do modelo cinético estudado em duas posições de abertura **(B)** e **(C)**. Projeto e modelo tridimensional da autoria de Studioprudencio arquitetos.



A figura 89, a seguir, mostra simulações da iluminação solar em número de horas para o espaço atendido pela fachada assim o um diagrama da radiação solar em KWh/m<sup>2</sup> durante o ano, ou seja, estes diagramas permitem simulações de *lay-out* de uso, posicionamento de aberturas, etc. Além disto, em relação a figura 88 é possível notar que diminui o tamanho do módulo da malha de elementos cinéticos o que proporciona novas possibilidades para análise e tomadas de decisões.

Figura 89: Diagrama da iluminação solar em número de horas **(A)** e o diagrama da radiação solar em KWh/m<sup>2</sup> **(B)**, durante o ano - considerando o edifício apresentado na figura 88.



Assim é possível simular a relação entre a quantidade de horas de iluminação solar em diferentes graus de aberturas em uma determinada fachada considerando a orientação solar e a sua localização geográfica. Para este estudo simulou-se para uma edificação real situada em Porto Alegre, no bairro Petrópolis em fachada com orientação norte, em período de verão e inverno que, para tal considerou-se quatro alternativas em graus diferentes de aberturas e o seu correspondente diagrama gráfico em números de horas como uma possibilidade real de controle de abertura e sua resposta (figuras 90 e 91).

Figura 90: Diagrama de análise da iluminação solar em número de horas. Porto Alegre, **inverno** – simulação em edificação existente em aplicação em fachada norte.

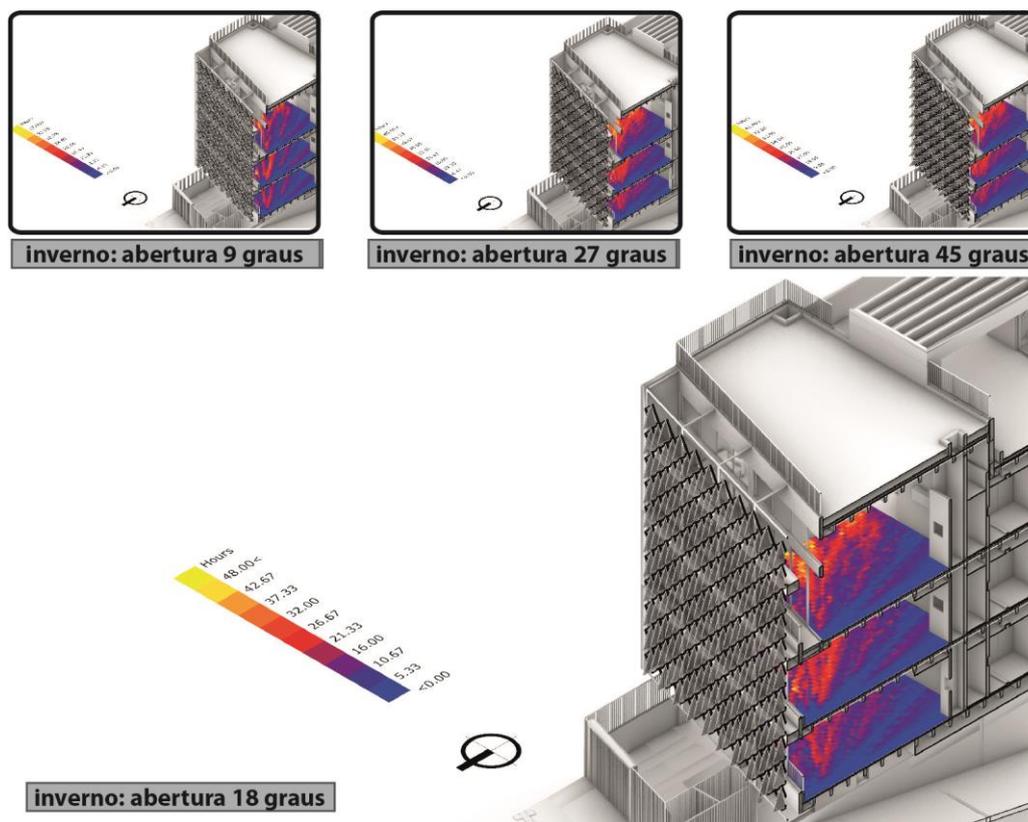
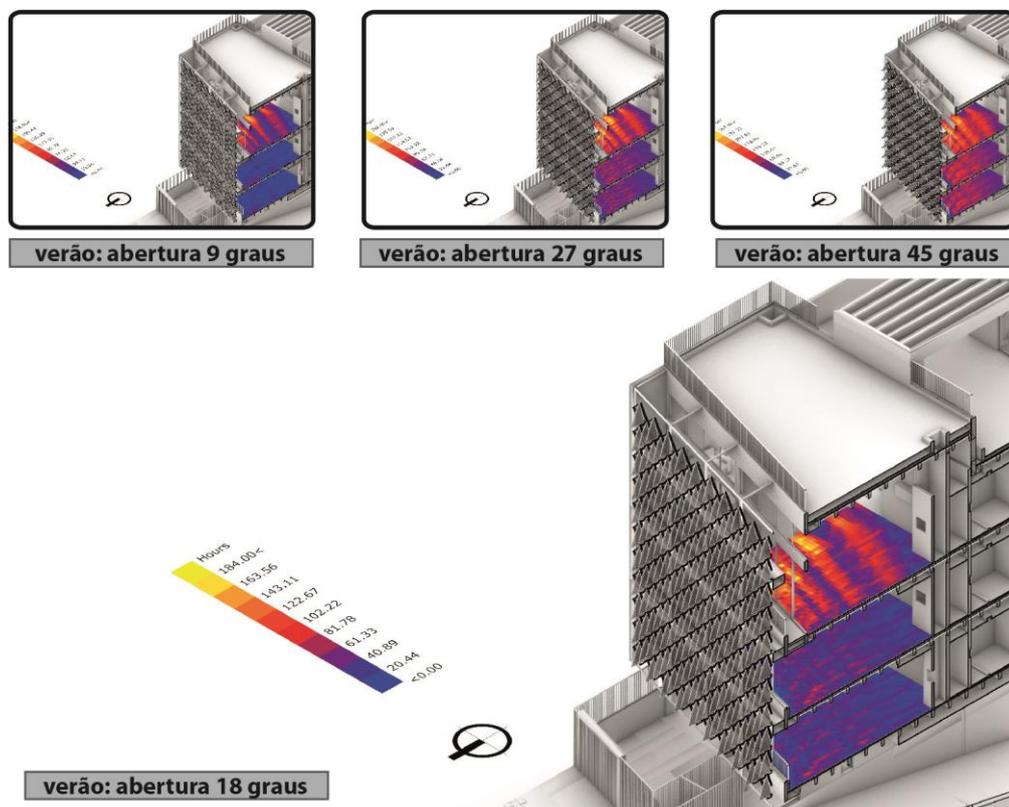


Figura 91: Diagrama de análise da iluminação solar em número de horas. Porto Alegre, **verão** – simulação em edificação existente em aplicação em fachada norte



Foi possível, também, simular a relação entre radiação solar em KWh/m<sup>2</sup> em diferentes graus de aberturas em uma determinada fachada considerando a orientação solar e a sua localização geográfica. Da mesma forma que para a quantidade de horas em iluminação solar simulou-se para uma edificação real situada em Porto Alegre, no bairro Petrópolis em fachada com orientação norte, em período de verão e inverno que, para tal considerou-se quatro alternativas em graus diferentes de aberturas e o seu correspondente diagrama de radiação solar em KWh/m<sup>2</sup> como uma possibilidade real de controle de abertura e sua resposta (figuras 92 e 93).

Figura 92: Diagrama de análise da radiação solar em KWh/m<sup>2</sup> em Porto Alegre, **inverno** – simulação em edificação existente em aplicação em fachada norte

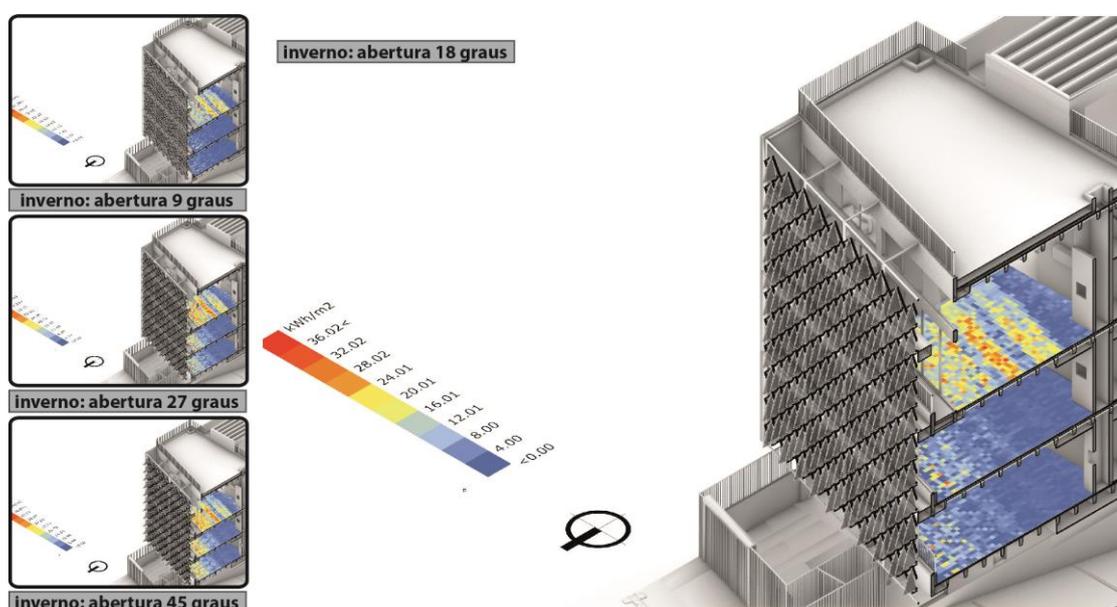
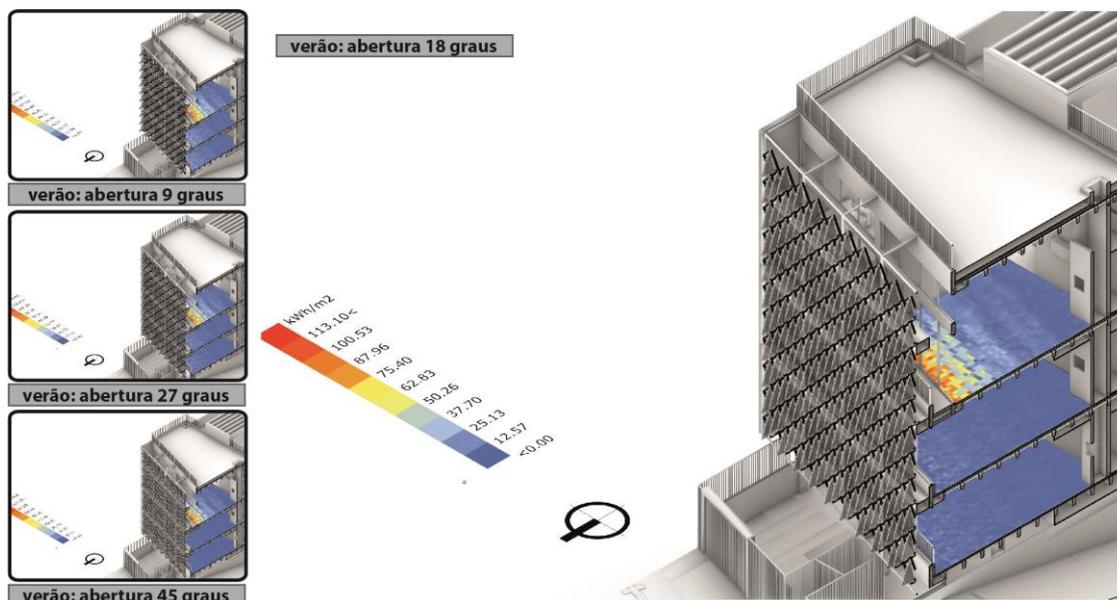


Figura 93: Diagrama de análise da radiação solar em KWh/m<sup>2</sup> em Porto Alegre, **verão** – simulação em edificação existente em aplicação em fachada norte



Portanto, é possível ainda, estabelecer alternativas de paginação ou de modulação da estrutura de suporte assim como as dimensões que melhor se adequam aos elementos móveis. Em climas quentes e úmidos como Porto Alegre as fachadas desempenham importante papel na qualidade no conforto ambiental dos ocupantes das edificações, especialmente aqueles edifícios que tenham grandes fachadas envidraçadas. A parametrização permite o estudo de diferentes variáveis gerando alternativas que melhor se adequem a uma zona climática específica melhor adequando uma fachada como a cinética, como um importante dispositivo de controle solar.

Estas simulações, em um estudo mais aprofundado, necessitariam de outros comparativos tais como material empregado, afastamento dos elementos de sombreamento em relação à fachada da edificação, comparativo entre diferentes tamanhos de módulos considerados, dentre outros. No entanto, para este estudo, o objetivo era o de apresentar o percurso das respostas do modelo paramétrico na ferramenta de programação, com a aplicação de determinados *plugins*, como uma possibilidade de grande potencial para formas bio-inspiradas.

A produção de modelos formais em padronagens modulares, tanto visual, em sua caracterização bidimensional, como em modelos tridimensionais, quer estáticos como padrão de textura ou cinéticos como estruturas dinâmicas, ambos resultando em uma percepção visual através de uma gramática da forma e suas transformações.

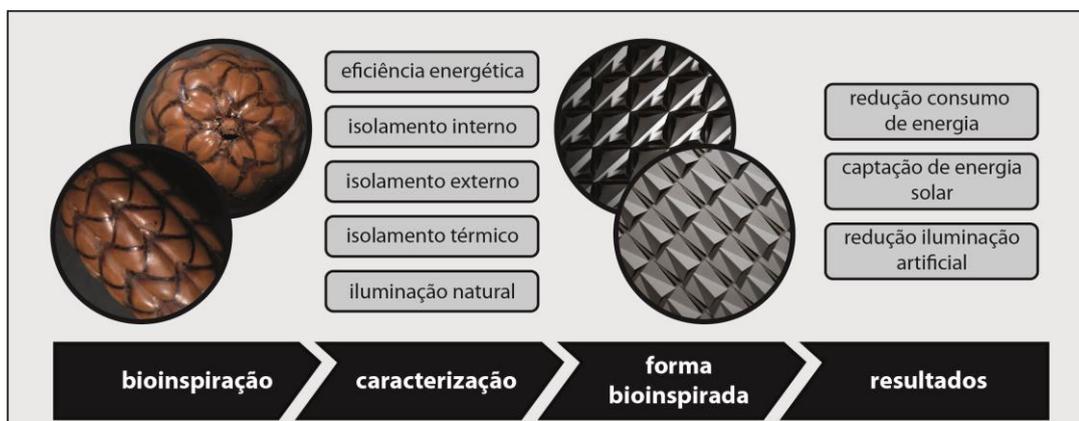
Soluções que podem potencializar este processo se situam na implementação de modelos parametrizados os quais automatizam o processo de geração de formas enfatizando a variação de soluções a partir da definição e controle de determinados parâmetros.

#### **4.5. Bio-inspiração e biomorfose – a aplicação dos padrões da casca do fruto da palmeira Jupati (*R. taedigera*) em superfícies de painéis para envelopes de edifícios**

Fundamentado em parametrizações bi e tridimensionais é possível a geração de uma ampla variedade de padronagens. Por exemplo, superfícies poderiam ser projetadas levando em consideração somente questões estético-formais, funcionais ou ambos estético-funcionais (Figura 94).

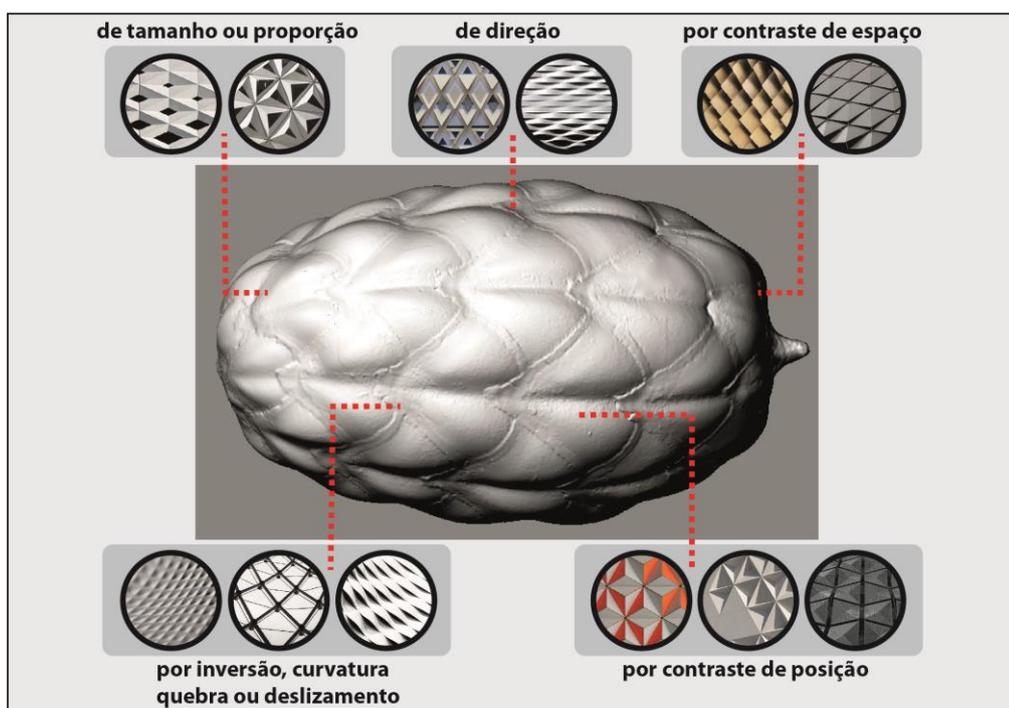
As parametrizações podem empregar diferentes graus de complexidades e dependem muito do número de parâmetros a serem considerados, os quais podem estar relacionados às suas aplicações possíveis. Um exemplo de aplicações mais complexas são as estruturas cinéticas empregadas em sistemas de fachadas, especialmente quando se aplicam em sistemas de fachadas para resultar em sistemas de sombreamento, iluminação, ventilação associados a uma resposta as quesitos de composição como estética e forma.

Figura 94: Características do referencial biológico e alguns resultados esperados em soluções bioinspiradas para fachadas.



Estes painéis cinéticos podem empregar sensores os quais respondem quando certas mudanças acontecem relacionados ao ambiente ao seu redor, um exemplo disto são as variações climáticas, da posição do sol ou do movimento de pessoas ou veículos. Para tanto as simulações as quais se apropriam destes eventos e seus movimentos que implicam em posições em seu percurso que estão associados a parâmetros dinâmicos. Exemplo destas simulações estão apresentadas nos exemplos de possibilidades de painéis modulares a seguir apresentados em composições de gradação presentes na figura 95.

Figura 95: Tipos de estruturas de gradação – mudanças uma possibilidade de aplicação ao fruto referencial (Jupati).



A partir de um módulo se procura, por princípios de repetição, espelhamento ou simetria e de deslocamento formar uma malha. Esta malha irá possibilitar soluções formais em seus aspectos plástico e funcionais as quais relacionam o formato do módulo com a superfície a ser projetada. As estruturas de gradação resultam em diferentes padrões de superfícies nos quais um módulo contras, se curva ou inverte, muda de direção, aumenta ou diminui o tamanho ou proporção em relação ao seu anterior de forma sequencial. É bastante comum encontrar isto na natureza e como a forma de superfícies da natureza se apropriam destes conceitos, como viu-se no caso do fruto da palmeira Jupati (*R. taedigera*).

Para as possíveis aplicações técnicas em sistemas de superfícies texturizadas como podem ser as fachadas em arquitetura procurou-se, como princípio geral, o desenvolvimento de um repertório considerando as regras gerais da natureza observada. A partir das informações destes modelos referenciais para que, neste caso, forma e superfície sejam analisadas de maneira a produzir um modelo geométrico que englobe gramáticas da forma. Uma vez obtidas, procura-se multiplicar soluções que, neste caso, podem se ocupar de processos generativos empregando um *software* de parametrização.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES DA PESQUISA EM TRABALHOS FUTUROS

### 5.1. Considerações finais

A natureza e suas formas aportam uma quantidade enorme de possibilidades para projetos em diversos campos da engenharia, arquitetura ou design. Investigar estas alternativas com todo o seu espectro pode ter o auxílio de um método sistemático que se diferencie daqueles convencionais. Construir projetos bio-inspirados, além do suporte da investigação do referencial da natureza, deve considerar diferentes técnicas de análise das quais possibilitem a geração e multiplicação de escolhas, como por exemplo métodos generativos, a serem aplicados posteriormente como caminho projetual.

Neste estudo foi possível elencar um conjunto de passos os quais podem ser percorridos até chegar à proposta bio-inspirada. Estes passos, apresentados em diagrama na figura 96, estão assim descritos:

**Passo 1: revisão da literatura** - reunir todas as informações teóricas sobre a biomorfose, a biomimética e de referenciais da natureza. Além disto buscar aprofundar o conhecimento sobre o tema associado ao entendimento de métodos generativos para geração de soluções bio-inspiradas, para este caso levando em conta frutos da casca dura, elemento da natureza base do estudo.

**Passo 2: escolha da forma da natureza** - existe na natureza uma quantidade muito grande de elementos, quer na escala, macro ou até na escala nanométrica, que podem servir para soluções bio-inspiradas. Considerando o levantamento da literatura é possível elencar características que se estavam buscando visando envelopes de edifícios (revestimentos de fachadas) e situar aqueles elementos da natureza (neste caso frutos da casca dura) de maior potencial e destes escolher aquele que reúne uma quantidade mais significativa de atributos;

**Passo 3: levantamento fotográfico e óptico** - uma vez escolhido o elemento de inspiração da natureza, e de posse de sua amostra física, cabe iniciar levantamentos fotográficos, quer em nível macro, a fotografia, e quer em nível de microscopia para que se perceba a forma, seus padrões visuais e suas características. Soluções estas que possibilitam ampliações para sua compreensão visual. A macrofotografia é uma das principais técnicas de registro fotográfico de magnitudes inferiores à microscopia, mas que permite excelentes qualidades focais, de modo a explicitar com fidelidade as cores e texturas do elemento fotografado;

**Passo 4: estudos de digitalização tridimensional** - a amostra física possibilita de que se faça uma leitura digital tridimensional gerando um modelo virtual o qual poderá ser tanto analisado como replicado através de impressão tridimensional servindo para o entendimento

da superfície externa, sua textura, saliências, reentrâncias, vincos, etc. A digitalização tridimensional a laser do fruto, com posterior tratamento da imagem, gerou um modelo digital em 3D que possibilitou aplicações em simulações para outros estudos;

**Passo 5: tomografia computadorizada** - embora a digitalização tridimensional gere um modelo digital ele valida-se apenas pelo aspecto externo do referencial. Uma solução de análise não destrutiva é a tomografia computadorizada a qual permite que se visualize o comportamento das superfícies internas e também do material envolvido pelo invólucro do elemento considerado, neste caso da casca do fruto em relação a semente;

**Passo 6: aplicação da relação parâmetro x forma** - uma vez de posse de um modelo tridimensional que diz respeito à forma real do elemento (externa e internamente) é possível levar para *softwares* de simulação de determinados comportamentos, como a resistência a compressão, tração, dentre outros, através de programas que podem, por exemplo, simular carga com o método de elementos finitos. Tais simulações permitem analisar o comportamento do elemento sem que o ensaio de comportamento seja destrutivo da amostra considerada;

**Passo 7: aprimoramento da representação gráfica manual** – com as informações que fornecem um significado maior a biomorfose do elemento estudado torna-se importante aprimorar os desenhos que já haviam sido realizados anteriormente. É possível que em um desenho uma linha que representava um simples risco, apenas com valor estético, passe a ter o significado de um vinco ou uma dobra que possa estar fornecendo resistência ou reforço a uma superfície. Desta forma o desenho passa a ter uma elaboração mais aprofundada;

**Passo 8: geometrização da forma** - uma das possibilidades de abstração e entendimento da forma para estabelecer graus de relação como modulação, ritmo, organização, padrões de simetria, repetição, etc. é o de trazer à forma para padrões matemáticos muito bem definidos pela associação desta a conceitos da geometrização formal;

**Passo 9: modelagem generativa 2D** - identificada a forma inicial, de uma superfície por exemplo, sendo possível buscar através de processos generativos e suas regras e por uma gramática da forma gerar uma quantidade muito grande de alternativas dentro de uma mesma linguagem que permitem sua aplicação em solução bio-inspirada, não necessariamente com o uso do computador, e mesmo com o emprego deste somente com *softwares* gráficos para a representação bidimensional;

**Passo 10: modelagem generativa 3D** - é possível, aproximar ainda mais do elemento estudado dentro de métodos generativos e regras formais empregando *softwares* CAD para

gerar soluções tridimensionais. Sabe-se que um outro método, pelo emprego de modelagem física através de maquetes, não se torna viável quando se necessita um número maior de alternativas para escolha;

**Passo 11: parametrização digital 3D** - métodos generativos que não se baseiam mais na forma em si mas sim em parâmetros e variáveis, podem gerar uma infinidade de alternativas dentro destes parâmetros considerados. Neste caso é necessário recorrer a *softwares* que possibilitam rotinas em algoritmos nas quais o meio digital pode analisar diferentes comportamentos das alternativas em estudo. No caso da parametrização digital ela permite a análise dos modelos e resultados, podendo sofrer constantes modificações e atualizações;

**Passo 12: experimentos em superfícies cinéticas** - como a parametrização possibilita soluções adaptáveis, então permite gerar superfícies que variem ou que se alterem conforme determinado estímulo, limite ou que sejam reativos por sensores a ações pré-determinadas. São soluções que buscam a dinâmica e que escapam das respostas estáticas antes desenvolvidas;

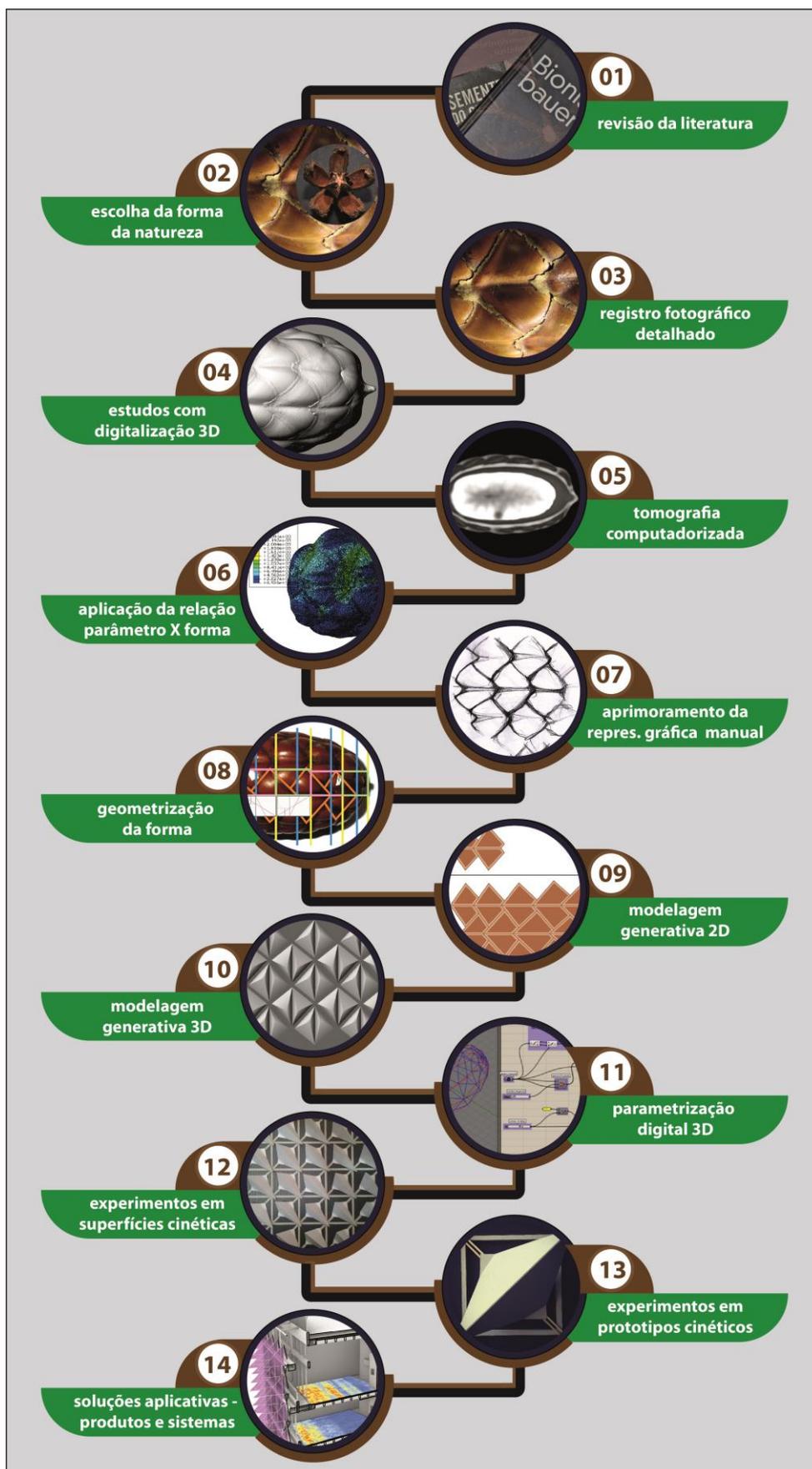
**Passo 13: experimentos em protótipos cinéticos** - uma vez viabilizado no computador uma superfície cinética é preciso gerar alternativas através da prototipagem de soluções para que a movimentação cinética e seu acionamento sejam simulados em estrutura, materiais, mecanismos e movimentos típicos facilitando escolha e definição de alternativas;

**Passo 14: soluções aplicativas em fachadas** - no caso em estudo, soluções aplicativas para fachadas, serve ao produto final a ser incorporado a uma determinada superfície em uma situação real, suas conexões, sua relação com a estrutura de suporte e o comportamento da forma bio-inspirada e na simulação das condições ambientais consideradas.

Quando o projeto é orientado pela natureza considerando soluções de eficiência, beleza e complexidade, requer o emprego diferentes recursos disponíveis desde os mais convencionais e simples até os de tecnologias avançadas, como a parametrização digital, fazendo com que se possa avançar em suas complexidades.

A eficácia no emprego de recursos requer o entendimento das regras e princípios contidos na natureza e destes estabelecer parâmetros e variáveis que possam ser modificadas e multiplicados com a finalidade de encontrar respostas de maior embasamento às questões de projeto.

Figura 96: Obtenção de soluções bio-inspiradas – uma proposta para sequenciamento passo-a-passo tomando o exemplo do fruto da palmeira Jupati – *Raphia taedigera* (Mart.).



Formas e padrões estruturais da natureza, como por exemplo da biomorfose de frutos e sementes, suas características estruturais e formais passam por abstrações geométricas e seu entendimento permite a geração de soluções projetuais bio-inspiradas e também e, com base em métodos generativos, a multiplicação das possibilidades.

Neste estudo, a escolha de frutos de casca dura, como o fruto da palmeira Jupati, e sua caracterização da superfície, permitiu a aplicação de métodos generativos, como a gramática da forma e a parametrização digital, para gerar alternativas de revestimentos referenciados nesta. Neste caso as possibilidades à aplicação em painéis de revestimentos de envelopes de edifícios mostraram-se dentro de uma lógica viável, desde soluções bi ou tri-dimensionais, ainda que estáticas, até soluções cinéticas, as quais podem incorporar outros recursos.

A inspiração na natureza em forma e estética pode agregar componentes importantes em soluções de projeto de produtos e sistemas. Mas, para uma melhor adaptação destes ao meio-ambiente, é importante considerar as razões de ordem matemática que as geometrias da natureza e suas inter-relações possibilitam, considerando que padrões da natureza seguem lógicas possíveis de serem abstraídas. Soluções sustentáveis podem referenciar-se no que a natureza e seus elementos tem incorporado ao longo de sua existência, uma vez que trabalham na lógica de um ambiente vivo no qual também são parte como resultado e como projeto deste, onde o aprendizado e os benefícios são mútuos.

As soluções bio-inspiradas ultrapassam às questões estético-formais e devem incorporar fatores como: adaptabilidade, eficiência (otimização em materiais e energia) e relações que considerem uma resposta mais harmônica com a natureza, e isto pode incluir processos de design que se utilizem da manipulação de parâmetros a partir da referência considerada.

## **5.2. Recomendações para trabalhos futuros**

Considerando que esta pesquisa traz uma abordagem mais ampla a respeito do caminho para uma solução bioinspirada, seria importante, em estudos futuros, agregar novos experimentos e técnicas, os quais poderiam trazer uma análise detalhada da influência dos parâmetros geométricos, da estrutura e da especificação de suporte da superfície, e suas possíveis conexões com a edificação ou com o produto que envolve no caso do design, assim como a forma de acionamento e o comportamento do movimento cinético.

Simulações que envolvam a escolha de materiais da superfície dos painéis e relações geométricas podem ser empregadas para desenvolver alternativas ou combinações de materiais que melhorem o desempenho mecânico, térmico ou visual das soluções. Princípios da natureza são fonte inesgotável que propiciam constante aprimoramento pois eles mudam e se adaptam à medida que evoluem.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAQUS/CAE **User's Manual, Version 6.12**. Providence/USA: Dassault Systèmes, 2012.

AGKATHIDIS, Asterios. **Generative Design Methods Implementing Computational Techniques in Undergraduate Architectural Education**. Proceedings of eCAADe: real time - extending the reach of computation, VOL 2, Vienna, 2015. pp. 47-55.

AGKATHIDIS, Asterios. **Implementing Biomorphic Design: Design Methods in Undergraduate Architectural Education**. CAAD EDUCATION - Design Tools - Volume 1 - eCAADe 34; University of Liverpool, 2016. pp. 291–298.

**ABNT – NBR 6120 – Cargas para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro 1980. 5p.

ALVES, F. A. **Elementos Finitos, a base da Tecnologia CAE**. São Paulo: Érica, 2000.

ALVES, F. A. **CAE – Entenda o método de análise por Elementos Finitos**. CAD Design, número 118. São Paulo: Ibéria Editora, 2007.

ANDRADE, Gabriela Rabelo. **Biomimética no design: abordagens, limitações e contribuições para o desenvolvimento de produtos e tecnologias**. Dissertação (mestrado) – Universidade do Estado de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Design. Belo Horizonte, 2014.

ANZINI, Ezio. **A matéria da invenção**. Tradução de Pedro Afonso Dias. Lisboa: Centro Português de Design, 1993.

ARADHYA, M. K.; POTTER, D.; GAO, F.; SIMON, C. J. **Molecular phylogeny of *Juglans* (*Juglandaceae*): a biogeographic perspective**. Tree Genetics & Genomes, 2007.

ARRUDA, Amilton. **Bionic Basic: Verso un nuovo modello di ricerca progettuale**. Tesi di Phd in Disegno Industriale, Politecnico di Milano – Dottorato in Disegno Industriale e Comunicazione Multimediale, Milano, 2002.

**ASTM E1876-00 – Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration**. USA, 2001. In: [www.astm.org](http://www.astm.org). (Acesso em 22.08.2020).

**ASTM D695 – Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics**. 10. Published April 2010. USA, 2010. In: [www.astm.org](http://www.astm.org). (Acesso em 11.11.2015).

**ASTM E1252 – 98 (2013) E1. STANDARD. PRACTICE FOR GENERAL TECHNIQUES FOR OBTAINING INFRARED SPECTRA FOR QUALITATIVE ANALYSIS.** <http://www.astm.org/Standards/E1252.htm>. consulta em 02.03.2015.

BAHAMON, Alejandro; PEREZ, Patricia. **Arquitectura animal: analogias entre o mundo animal e a arquitetura contemporânea.** Malaga, Dinalivro, 2007.

BAR-COHEN, Yoseph. **Biomimetics, Biologically Inspired Technologies.** Califórnia/EUA: CRC Press, 2005.

BAYAZIT, S.; KAZAN, K.; GÜLBİTTİ, S.; ÇEVİK, V.; AYANOĞLU, H., ERGÜL, A. **AFLP analysis of genetic diversity in low chill requiring walnut (*Juglans regia* L.) genotypes from Hatay, Turkey.** Scientia Horticulturae, 2007.

BENATTI, Lia Paletta. **Inovação nas técnicas de acabamento decorativo em sementes ornamentais brasileiras: design aplicado a produtos com perfil sustentável.** (manuscrito). Dissertação (mestrado) – Universidade do Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte: Programa de Pós-Graduação em Design, 2013.

BENYUS, J. M. **Biomimicry: Innovation Inspired by Nature.** New York: HarperCollins Publishers, 1997.

BENYUS, J. M. **A Biomimicry Primer.** Retrieved from Biomimicry 3.8: Biomimicry.net. 2014.

BEUKERS, A.; VAN HINTE, E. **Lightness: the inevitable renaissance of minimum energy structures.** Publishers: Rotterdam, 1998.

BHUSHAN, By Bharat. **Biomimetics: lessons from nature – an overview.** Nanoprobe Laboratory for Bio- & Nanotechnology and Biomimetics, Ohio State University: Ohio, 2014.

BIGGINS, Peter; HILTZ, John; KUSTERBECK, Anne. **Bio-inspired materials and sensing systems.** Cambridge, U.K., RSC Pub., 2011.

BONSIEPE, Gui. **Teoria y Práctica del Diseño Industrial.** Barcelona, Editorial Gustavo Gilli, 1978. pp.124-34.

BONSIEPE, Gui.; KELLNER, Petra; POESSNECKER, Holger. **Metodologia Experimental: Desenho Industrial.** Brasília: CNPq/Coordenação Editorial, 1984.

BROECK, Fabricio Vanden. **El diseño de la naturaleza.** Ciudad de Mexico. Universidade Autonoma Metropolitana-Unidade Azcapotzalco, 2000.

BURI, H. U.; WEINAND, Y. **Origami – Folded Plate Structures.** EPFL, Lausanne, 2010.

- CABRAL, Eduarda Maria Ferreira de Melo. **Caracterização Molecular de Variedades de Nogueira (*Juglans regia* L.) portuguesas** – estudo comparativo com cultivares internacionais – autenticidades de nozes comerciais de produtos derivados. Dissertação (mestrado), Universidade do Porto. Porto, Programa de pós graduação em Farmácia, 2008.
- CARVALHO, N. M.; NAKAGAWA, J. **Sementes: ciência, tecnologia e produção**. 4ª ed. FUNEP. Jaboticabal, 2000. 588 p.
- CARVALHO, P. E. R. **Espécies florestais brasileiras: recomendações silviculturais, potencialidades e uso da madeira**. Embrapa-CNPQ, Brasília, Embrapa-SPI, 1994.
- CELANI, G.; CYPRIANO, G. G.; VAZ, C. E. **A Gramática da Forma como metodologia de análise e síntese em arquitetura**. Conexão - Comunicação e Cultura, Caxias do Sul, v. 5, n. 10, 2006. pp. 181-197.
- CELANI, M. G. C. **Generative design in architecture: history and applications**. In: INTERNATIONAL ARCHITECTURE CONFERENCE NEW STRATEGIES, CONTEMPORARY TECHNIQUES, nº.13, 2008, Barcelona. Proceedings... Esarq UIC, 2008.
- CENANI, Ş.; ÇAĞDAŞ, G. **Shape Grammar of Geometrical Islamic Ornaments**, eCAADe International Conference 2006 on Communicating Space(s), Ed: V. Bourdakis, D. Charitos, University of Thessaly, Volos, Greece, 2006. pp. 290-297.
- CHOUCHOULAS, O.; DAY, A. **Design exploration using a shape grammar with a genetic algorithm**. *Open House International*, 2007, V. 32(2). pp. 26-35.
- CORDEIRO, N. J.; HOWE, H. F. **Forest fragmentation severs mutualism between seed dispersers and an endemic African tree**. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 2003. 100(24): pp.14052-14056.
- COSTA, M.; SOUSA, J. P. **A Biônica na Arquitetura**. *Arquitetura e Vida*, 74, 2006. pp. 22-28.
- DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.
- DUARTE, J. P. **Personalizar a habitação em série: Uma Gramática Discursiva para as Casas da Malagueira do Siza**. Lisboa: Ed. Fundação Calouste Gulbenkian, 2007.
- EBRAHIMI, Aziz; FATAHI, Reza; ZAMANI, Zabihollah. **Analysis of genetic diversity among some Persian walnut genotypes (*Juglans regia* L.) using morphological traits and SSRs**

**markers.** Department of Horticultural Science, University of Tehran, Karaj, Iran. *Scientia Horticulturae*. 08/2011; 130(1):146-151. DOI: 10.1016/j.scienta.2011.06.028

EL-ZEINY, Rasha Mahmoud Ali. **Biomimicry as a problem solving methodology in interior architecture.** *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 50, 2012. pp. 502-512.

ESTEVEZ, Alberto T. **Genetic Architectures/Arquitecturas genéticas.** Spain: SITES Books & ESARQ UIC, 2003.

FERNANDES, Stephan; SILVA, Fábio; KOLTERMANN, Tânia. **Proposta de Desenvolvimento de Empunhadura Personalizada para Usuários com Mal de Parkinson.** *Blucher Design Proceedings*. Volume 1. Number 4, 2014. pp. 2399-2387.

FISCHER, Thomas; HERR, Christiane M.: 2001, **Teaching Generative Design.** in C. Soddu (ed), *Proceedings of the 4th International Generative Art Conference*, Generative Design Lab DIAP - Politecnico di Milano, Milan (available at <http://www.generativeart.com/>).

FLORIO, Wilson. **Contribuições do Building Information Modeling no Processo de Projeto em Arquitetura.** *Anais do III Encontro Tecnologia da Informação na Construção Civil, TIC 2007*, Porto Alegre, 2007. pp. 571–582.

FLORIO, Wilson. **Modelagem paramétrica no processo de projeto em arquitetura.** *SBQP 2009 - Simpósio Brasileiro de Qualidade do Projeto no Ambiente Construído*. São Paulo, 2009.

GASPAR, Ricardo. **Mecânica dos Materiais** – Notas de aula da disciplina de Resistência dos Materiais, Curso de Engenharia Civil, Leandro Mouta Trautwein. São Paulo: Centro Universitário Nove de Julho, 2005.

GIPS, J. **Shape Grammars and Their Uses: Artificial Perception, Shape Generation and Computer Aesthetics.** Basel: Birkhäuser, 1975.

GIPS, J. **Computer Implementations of Shape Grammars.** *Workshop on Shape Computation*. MIT, 1999.

GLORIA, Beatriz Appezzato da; GUERREIRO, Sandra Maria Carmelo. **Anatomia vegetal.** Viçosa: Ed. UFV 2006. 438p.

GODOI, Giovana de. **Sistemas generativos de projeto: um estudo de campo em Monte Alegre do Sul.** *Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo*. Campinas, 2008. 153p.

- GORB, Stanislav N.; BAR-COHEN, Yoseph. **Functional surfaces in biology: mechanisms and applications**. in *Biomimetics: Biologically Inspired Technologies*. Boca Raton: Taylor and Francis, 2005. pp. 381–397.
- GRUBER, P.; BRUCKNER, D.; HELLMICH, C.; SCHMIEDMAYER, B.; STACHELBERGER, H.; GEBESHUBER, I. C. **Biomimetics – Materials, Structures and Processes. Examples, Ideas and cases Studies**. Heidelberg: Springer. 2011.
- GRUBER, Petra. **Biomimetics in Architecture: Architecture of Life and Buildings**. Wien: Springer, 2011.
- GRUBER, Petra; IMHOF, Barbara. **Patterns of Growth—Biomimetics and Architectural Design**. *Buildings Journal*, Volume: 7. Number: 32, MDPI, Basel, Switzerland, 2017. 17 p.
- HAMJHEHNEJHAD, Mehdi. **Human, Nature and Architecture, Science and Industry**. University of Iran, Tehran, 2006.
- HSUAN-AN, Tai. **Sementes do cerrado e design contemporâneo**. UCG, Goiânia, 2002. 219 p.
- HU, T.; SHEN, L.; XU, H. **Biological inspirations, kinematics modelling, mechanism design and experiments on an undulating robotic fin inspired by *Gymnarchus niloticus***. *Mechanism and Machine Theory*, v. 44, n. 3, 2009. pp. 633–645.
- JACKSON, Paul. **Techniques de pliage pour les designers**. Paris: Dunod, 2011. 223 p.
- JAMES, Andre. M. **Deployable Architecture**. In *Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Master of Architecture*. Georgia: Georgia Institute of Techology, 2008.
- KAMINSKI, C. P. **Desenvolvendo produtos com planejamento, criatividade e qualidade**. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- KARTHICK, Balasubramanian; MAHESHWARI, Ramesh. **Lotus-inspired nanotechnology applications**. *Resonance* 13: 1141-1145, 2008.
- KAYAT, Claudia; MAGALHÃES, Claudio. **Design por analogia impulsionado pela tecnologia: biomimética como exemplo**. In: *Anais do 13º. Congresso Pesquisa e Desenvolvimento em Design*. São Paulo: Blucher, 2019. pp. 2155–2169.
- KAZAZIAN, Thierry. (Org.) **Haverá a idade das coisas leves: design e desenvolvimento sustentável**. São Paulo: Senac, 2005.
- KINDLEIN JÚNIOR, W.; GUANABARA, A. S. **Methodology for product design based on the study of bionics**. *Materials & Design*, 26 (2), 2005. pp. 149-155.

KNIGHT, T. W. **The Forty-one Steps: the language of Japanese tea-room designs.** *Environment and Planning*. B. V. 8, 1981. pp. 97-114.

KNIGHT, T. W. **Applications in Architectural Design, and Education and Practice.** Report for NSF/MIT Workshop on Shape Computation, 1999. Disponível em [HTTP://www.shapegrammar.org/education.pdf](http://www.shapegrammar.org/education.pdf) . (Acesso em 15.12.2018).

KNIPPERS, J.; SPECK, T. **Design and construction principles in nature and architecture.** *Bioinspiration & biomimetics*, 2012, V. 7, 10 p.

KNIPPERS, J.; SCHMID, U.; SPECK, T. **Bionisch bauen – von der Natur lernen.** Basel, Birkhauser, 2019.

KO, Kyungeun. **Bentley and Kyungeun KO.** 2013. URL <http://www.http://www.robifold.com/make/consultancy/projects/bentley-and-kyungeun-ko>. (Acesso em 12.02.2021).

KOLAREVIC, B. **Architecture in the Digital Age - Designing and Manufacturing.** London, UK, Spon Press, 2003.

LEBÉE, Arthur. **From Folds to Structures, a Review.** *International Journal of Space Structures*, Multi-Science Publishing, 2015, 30 (2), pp.55-74. <<http://multi-science.atypon.com/doi/10.1260/0266-3511.30.2.55>>. <10.1260/0266-3511.30.2.55>. <hal-01266686>

LEE, Dave; LEOUNIS, Brian. **Digital Origami: Modeling planar folding structures.** Clemson: Acadia Regional - Parametricism, 2011.

LEOPOLD, Cornelia. **Geometry Concepts In Architectural Design.** Proceedings of the 12th International Conference on Geometry and Graphics. Salvador, 2006.

LIAPI, Katherine A. **Transformable Architecture Inspired by the Origami Art: Computer Visualization as a Tool for Form Exploration.** In *Thresholds – Design, Research, Education and Practice in the Space Between the Physical and the Virtual: Proceedings of the 2002 Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture*, 381-388. ACADIA. Pomona, California, 2002.

LODDI, Laila. **Da folha à forma: o papel da dobradura no ensino de design e arquitetura.** Chaud, E. (Orgs.). In: *Seminário Nacional de Pesquisa em Arte e Cultura Visual*, 7., Goiânia, 2014. Anais. Goiânia: Universidade Federal de Goiás, 2014. pp. 596-608.

LOPEZ, Marlen; CROXFORD, Ben; RUBIO, Ramón; MARTÍN, Santiago; JACKSON, Richard. **Active materials for adaptive architectural envelopes based on plant adaptation**

**principles.** Conference: ICAE 2015 VII Congreso Internacional de Envolventes Arquitectónicas, Journal of Facade Design and Engineering, vol. 3., no. 1, 2015.

LORENZI, Harri. **Árvores Brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil.** Nova Odessa: Editora Plantarum, 1998. v.1, 368p.

LORENZI, Harri. **Flora brasileira Lorenzi: Arecaceae (palmeiras).** Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2010.

MALUF, Marina Kosovski. **Leveza, design e mobiliário no Brasil: aspectos visuais de uma ideia.** 2013. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Design, Departamento de Artes & Design, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

MANZINI, Ezio. **A matéria da invenção.** Tradução de Pedro Afonso Dias. Lisboa: Centro Português de Design, 1993.

MARCH, L.; STINY, G. **Spatial systems in architecture and design: some history and logic.** Environment and Planning B: Planning and Design, 1985, V. 12. pp. 31-53.

MARYA, S.; VILLAR, A.; MONTOYA, J.; UGART, D.; ARRAZOLA, P. J. **Finite Element Modeling of Chip Formation Process with ABAQUS/EXPLICIT,** VIII International Conference on Computational Plasticity – COMPLAS VIII, Barcelona, 2005.

MEDEIROS, A. C. de S.; ZANON, A. **Superação de dormência em sementes de acácia-marítima facada longifolia.** Colombo: Embrapa Florestas, 1999. 12p. (Embrapa Florestas. Circular Técnica, 32).

METIVIER, J. R. **Dormência e germinação.** In: FERRI, M. G., (Coord.). Fisiologia vegetal. São Paulo: EPU/EDUSP, v. 2, 1979. pp. 343-392.

MITCHELL, W. J. **A lógica da Arquitetura: projeto, computação e cognição.** Campinas: Editora da UNICAMP, 2008. 303 p. MITCHELL, W. J. The theoretical foundation of computer-aided architectural design. Environment and Planning B, London, v. 2, 1975. pp. 127-150.

MONEO, R., **The Thing Called Architecture.** In C. Davidson, ed. Anything. New York: Anyone Corporation, 2001. pp. 120–123.

MOREIRA, M. E. CAE. **Menos erros de projetos mais lucro.** CAD Design, número 118. São Paulo: Ibéria Editora, 2007.

MYERS, William. **Bio Design: Nature, Science, Creativity.** New York: Thames & Hudson, 2012.

ÖZEK, Veyis; YELER, Minsolmaz Gülcan. **Biomorphism as a Design Instrument of Architectural Shape: A Discussion on Morphological Concepts**. Livenarch, 4th International Conference of Livable Environments & Architecture, Trabzon, Turkey, 2009.

PALOMBINI, F. L. et al. **Design, biônica e novos paradigmas: uso de tecnologias 3D para análise e caracterização aplicadas em anatomia vegetal**. Design e Tecnologia, v. 7, n. 13, p. 46–56, 30 jun. 2017. DOI: <https://doi.org/10.23972/det2017iss13>. pp. 46-56.

PALOMBINI, F. L. et al. **Materiais e Biônica: sob a Ótica da Análise de Elementos Finitos Baseada em Imagens de Microtomografia de Raios X**. In: ARRUDA, A. J. V. (Ed.). Métodos e Processos em Biônica e Biomimética: a Revolução Tecnológica pela Natureza. São Paulo: Editora Blucher, 2018. pp. 245–260. DOI: <https://doi.org/10.5151/9788580393491-15>

PALOMBINI, F. L. et al. **Combining numerical models and discretizing methods in the analysis of bamboo parenchyma using finite element analysis based on X-ray microtomography**. Wood Science and Technology, v. 54, n. 1, p. 161–186, 14 jan. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-019-01146-4>

PANDOLFI, Camilla; IZZO, Dario. **Biomimetics on seed dispersal: survey and insights for space exploration**. European Space Agency, Noordwijk, The Netherlands, IOP PUBLISHING, BIOINSPIRATION and BIOMIMETICS, Volume 8, Issue 2, 2013.

PAWLYN, M. **Biomimicry in Architecture**. London: RIBA Publishing, 2011.

PEDRESCHI, Remo. **The innovative Lightweight Buildings and Systems of Jean Prouvé**. In: Advancements for Metal Buildings Congress 08. Edinburgh: Edinburgh Research Explorer, 2008.

PESCE, Celestino. **Oleaginosas da Amazônia**. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, Núcleo de Estudos Agrários e Desenvolvimento Rural, 2009.

PIRES, Janice de Freitas. **Construção do Vocabulário e Repertório Geométrico para o Projeto de arquitetura**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2010. 154 p.

PIRES, Júlio Cesar Pinheiro. **Estudo de rotor para turbina eólica de eixo horizontal de pequeno porte com aplicação de modelagem e simulação virtual**. Dissertação (mestrado) – UFRGS. Porto Alegre: Escola de Engenharia. Faculdade de Arquitetura. Programa de Pós-Graduação em Design, 2010.

POURJAFAR, Mohamad Reza; MAHMOUDINEJAD, Hadi; AHADIAN, Omid. **Design with Nature in Bio-Architecture whit emphasis on the hidden Rules of Natural Organism.** International Journal of Applied Science and Technology: Vol. 1, No.4; July 2011. pp. 74–83.

RADWAN, Gehan; OSAMA, Nouran. **Biomimicry, an approach, for energy effecient building skin design.** Procedia Environmental Sciences 34, 2016. pp. 178–189.

REIS SANTOS, Nuno Miguel Teixeira dos. **Integração de Bionica em Design do Produto. Modelos de Design Generativo e Paramétrico em Estruturas Efêmeras.** Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Design do Produto. Faculdade de Arquitectura da Universidade de Lisboa: Lisboa, 2014.

RIAN, Iasef Md.; SASSONE, Mario. **Tree-inspired dendriforms and fractal-like branching structures in architecture: A brief historical overview.** Frontiers of Architectural Research, Volume 2, Issue 3, September 2014. pp. 298–323.

ROBOFOLD. **Bentley and Kyungeun Ko.** A collaboration Project creating a single piece vehicle design folded by robots. <https://www.robofold.com/make/technology>. (Acesso em 22.02.2021).

ROCHA, Carlos Sousa. **Plasticidade do Papel e Design.** Lisboa: Plátano, 2000.

ROWE, Colin. **The mathematics of the ideal villa and other essays.** MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1978.

SALOMON, Justin; VOUGA, Etienne; WARDETZKY, Max; GRINSPUN, Eitan. **Flexible Developable Surfaces.** Computer Graphics Forum. 31(5), 2012. pp. 1567-1576.

SILVA, Fábio P. **O uso da Digitalização Tridimensional a Laser no Desenvolvimento e Caracterização de Texturas Aplicadas ao Design de Produtos.** Dissertação de Mestrado. PPGEM, UFRGS, Porto Alegre, 2006.

SILVA, F. P.; BATISTA, V. J.; KINDLEIN Jr, W.; MORAES, H. S.; BERSCH, R. C. R. **Fabricação de Assentos Personalizados via Modelagem em Gesso, Digitalização 3d e Usinagem CNC.** In V Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. 14 A 17 de abril de 2009 - Belo Horizonte - Minas Gerais – Brasil

SILVEIRA, Flávia L.; BASSO, Liliane; PECHANESKY, Rubem; KINDLEIN JR., Wilson. **Análise Biônica em Projetos de Design: A Fruta-do-Conde Como Referência de Textura em Pisos Para Áreas Externas.** Revista Tecnologia e Sociedade, v. 06, n. 10, 2010. Quadrimestral.

SINGH, V.; GU, N. **Towards an integrated generative design framework.** Design Studies, Milton Keynes, v. 33, n. 2, p. 185-207, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.destud.2011.06.001>.

SMITH, Cas; BERNETT, Alison; HANSON, Erika; GARVIN, Chris. **Tapping into Nature**, New York: Terrapin Bright Green. LLC, 2015.

SODERBERG, Magnus. **Finite Element Simulation of Punching.** MSc Programmes in Engineering Mechanical, Department of Applied Physics and Mecanical Engineering – Lulea University of Technology, 2006.

SPECK, Thomas; MARTONE, Patrick T.; BOLLER, Michael, BURGERT, Ingo; DUMAIS, Jacques, EDWARDS, Joan; MACH, Katharine; ROWE, Nick; RUEGGEBERG, Markus; SEIDEL, Robin. Mechanics without Muscle: **Biomechanical Inspiration from the Plant World.** In: Integrative and Comparative Biology, volume 50, number 5, pp. 888–907. Published by Oxford University Press on behalf of the Society for Integrative and Comparative Biology, 2010.

STAVRIC, Milena; WILTSCHE, Albert. **Quadrilateral Patterns for Rigid Folding Structures.** International Journal of Architectural Computing. Issue I, volume 12. 2014. pp. 61–79.

STINY, G.; MITCHELL, W. J. **The grammar of Paradise: on the generation of Mughul gardens.** Environment and Planning B, London, v. 7, n. 2, 1980. pp. 209-226.

STINY, George. **Introduction to shape and shape grammars.** Environment and Planning B: Planning and Design, volume 7, 1980. pp. 343–351.

SZYMON, Lukasz Szczyrba. **Human and nature symbiosis: Biomimic architecture as the paradigm shift in mitigation of environmental impact.** A Thesis Submitted to the Faculty of Miami University In partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Architecture. Department of Architecture and Interior Design. Miami University, 2016.

TAHA, Na; AL-WADAAN, Ma. **Utility and importance of walnut, *Juglans regia* Linn: a review.** African Journal of Microbiology Research, Volume R, Number 32, 2011. pp. 5796–5805

THOMÉ, Otto Wilhelm. **Flora von Deutschland, Österreich und der Schweiz.** Gera, Germany, 1885. In: [www.biolib.de](http://www.biolib.de). (Acesso em: 18.02.2015).

THOMPSON, D. W. **On growth and form.** Edited by John Tyler, Cambridge: Cambridge University Press, 1961.

TRESCAK, T.; RODRIGUEZ, I.; ESTEVAM, M. **General Shape Grammar Interpreter for Intelligent Designs Generations**. Proceedings of the 2009 Sixth International Conference on Computer Graphics, Imaging and Visualization (CGIV2009), Tianjin, China, 2009. pp. 235-240.

VAUCHER, H. **Tree bark: a color guide**. Cambridge: Timber Press, 2003.

VAZ, C. E. V. **As linguagens compositivas de Roberto Burle Marx: aplicação e caracterização pela gramática da forma**. 2009. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

VERKERK, Nina M. **A general understanding of shape grammar for the application in architectural design**. TU Delft, faculty of Architecture, Urbanism and Building Sciences, the Netherlands. Graduation studio: Explorelab 17, Delft, 2014.

WU, Jiangmei. 2016. **Zushiki light art: form finding and making through paper folding**. In: ACM SIGGRAPH 2016 Emerging Technologies (*SIGGRAPH '16*). ACM, New York, NY, USA, 2016.