



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

THESKA LAILA DE FREITAS SOARES

**A BIOMIMÉTICA E A GEODÉSICA DE BUCKMINSTER FULLER:
uma estratégia de Biodesign**

Recife
2016

THESKA LAILA DE FREITAS SOARES

**A BIOMIMÉTICA E A GEODÉSICA DE BUCKMINSTER FULLER:
uma estratégia de Biodesign**

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

Área de Concentração: Design e Ergonomia

Orientador: Prof^o. Dr. Amilton José Vieira de Arruda

Recife
2016

Catálogo na fonte
Bibliotecário Jonas Lucas Vieira, CRB4-1204

S676b Soares, Theska Laila de Freitas
A biomimética e a geodésica de Buckminster Fuller: uma estratégia de
biodesign / Theska Laila de Freitas Soares. – Recife, 2016.
286 f.: il., fig.

Orientador: Amilton José Vieira de Arruda.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Centro
de Artes e Comunicação. Programa de Pós-Graduação em Design, 2016.

Inclui referências.

1. Biomimética. 2. Cúpulas geodésicas de Buckminster Fuller. 3.
Biodesign. I. Arruda, Amilton José Vieira de (Orientador). II. Título.

745.2 CDD (22. ed.)

UFPE (CAC 2018-187)

THESKA LAILA DE FREITAS SOARES

**A BIOMIMÉTICA E A GEODÉSICA DE BUCKMINSTER FULLER:
uma estratégia de Biodesign**

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

Aprovada em: 07/12/2016.

BANCA EXAMINADORA

Profº Dr. Amilton José Vieira de Arruda (Orientador)
(Universidade Federal de Pernambuco)

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

Profº Dr. Carlo Franzato (Examinador Externo)
(UNISSINOS - RG)

Profº Dr. Danilo Émmerson Nascimento Silva (Examinador Externo)
(Universidade Federal de Pernambuco – Campus Agreste)

À Deus.

“Eu te louvarei, porque de um modo assombroso e tão maravilhoso fui formado; maravilhosas são as tuas obras, e a minha alma o sabe muito bem”

Salmos 139:14

“Porque as suas coisas invisíveis, desde a criação do mundo, tanto os seus eternos poderes, como a sua divindade, se entendem, e claramente se veem pelas coisas que estão criadas, para que eles fiquem inescusáveis”

Romanos 1:2

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradecer à Deus, criador e maestro dessa natureza tão sábia.... Com sua infinita misericórdia, me ajudou a compreender de uma maneira especial os assuntos da minha pesquisa, e também a superar as muitas *pedras do caminho* que surgiram no processo;

À CAPES, pela bolsa de estudos, instrumento que permite que as desigualdades sociais sejam mais dirimidas e que pessoas como eu, sem tantos recursos, possam ter a chance de lutar por uma história diferente e mais justa;

Aos meus familiares, pelo apoio emocional e por vezes, financeiro, que neste momento foi tão necessário;

Aos meus queridos professores da UFPE, todos de alguma forma colaboraram e se dedicaram em transmitir seus conhecimentos, desde o tempo da graduação, nesta mesma instituição, e que me fizeram investigar, criticar e renovar os ensinamentos acerca do Design;

Ao meu orientador, Amilton Arruda, que me deu acesso a uma vasta bibliografia e aos seus documentos com registros dos trabalhos do laboratório de Biodesign (UFPE), com atitude colaborativa, dando apoio na disciplina de Biomimética ministrada, no Workshop apresentado na Universidade de Palermo (ARG) e nas Apresentações de artigos em congressos e eventos, estando sempre disponível para dirimir dúvidas;

Ao professor Pedro Aléssio do Departamento de Expressão Gráfica da UFPE, pela dedicação e esforço em me ajudar na modelagem dos modelos da Pesquisa.

Ao professor Tai Hsuan-An da UCG, por ter gentilmente me presenteado e enviado seus livros esgotados nas livrarias, tão somente por bondade e amor ao conhecimento, e que tanto foram úteis para agregar na minha pesquisa.

Aos diversos pensadores que me emprestaram seus pontos de vistas, conhecimentos e visões inspiradoras, dentre os quais, Buckminster Fuller e Janine Benyus, que tanto influenciaram este trabalho e a minha perspectiva frente ao design;

Por fim, aos meus amigos, em especial, Cecília Tomaz, Amanda Oliveira, Pricila Silva e Rosa Cândida, embora todos tenham participado direta ou indiretamente para manutenção da minha sanidade emocional durante este período em que diversas dificuldades foram superadas.

À tudo e à todos, a minha sincera gratidão por todo apoio e contribuição no processo.

“Satisfaz-me o mistério da eternidade da vida e o mais leve indício da maravilhosa estrutura da realidade, juntamente com o esforço sincero para compreender uma parte, mesmo que ínfima, da razão que se manifesta na natureza”. (EINSTEIN, 1949, p. 5)

RESUMO

Esta dissertação visa relacionar os aspectos da Biomimética com as geodésicas de Buckminster Fuller através de uma investigação sobre os fundamentos que norteiam estes assuntos, a fim de demonstrar as vantagens construtivas na aplicação destas como estratégia de Biodesign. A pesquisa utiliza métodos qualitativos através de um levantamento bibliográfico mais extenso sobre os conceitos, os processos metodológicos, técnicas e aplicações relativas a investigação de elementos e estruturas naturais e sua aplicabilidade em projetos de design, assim como também investiga as geodésicas com seus fundamentos, características e aplicações no contexto contemporâneo, para estabelecer um elo entre os dois assuntos e justificar o uso destas emblemáticas configurações como soluções coerentes para um cenário de complexidade e sustentabilidade. No final, se apresentará um breve experimento de Biodesign com as cúpulas que trará a estratégia de construção de duas novas configurações de geodésicas com referência em elementos da natureza para evidenciar o potencial de novos estudos destas estruturas.

Palavras-chaves: Biomimética. Cúpulas Geodésicas de Buckminster Fuller. Biodesign.

ABSTRACT

This dissertation aims to relate the aspects of Biomimetics to Buckminster Fuller's geodesics through an investigation of the fundamentals that guide these subjects in order to demonstrate the constructive advantages of applying these as a Biodesign strategy. The research uses qualitative methods through a more extensive bibliographical survey on the concepts, methodological processes, techniques and applications related to the investigation of natural elements and structures and its applicability in design projects, as well as investigates the geodesics with their foundations, characteristics and applications in the contemporary context, to establish a link between the two subjects and justify the use of these emblematic configurations as coherent solutions to a scenario of complexity and sustainability. In the end, we will present a brief Biodesign experiment with the domes that will bring the strategy of building two new configurations of geodesics with reference in elements of nature to evidence the potential of new studies of these structures.

Keywords: Biomimicry. Geodesic Domes of Buckminster Fuller. Biodesign.

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CRIED	Centro Recherche di Istituto Europeo di Design
IED	Istituto Europeo di Design
UCG	Universidade Católica de Goiás
UFPE	Universidade Federal De Pernambuco
CNC	Computer Numerically Controlled
CAD	Computer Aided Desing (Projeto Assistido por Computador)
CAM	Computer Aided Manufacturing (Fabricação Assistida por Computador)
ONU	Organizações das Nações Unidas
DNA	Ácido Desoxirribonucléico
PVC	Policloreto de polivinila
ICD	Instituto de Design Computacional (Universidade Stuttgart)
ITKE	Instituto de Estruturas de Construção e Design Estrutural (Universidade Stuttgart)
MIT lab	Laboratório do Instituto de Tecnologia de Massachusets
ABS	Acrylonitrile butadiene styrene (Tipo de plástico)
SMIT	Sustainably Minded Interactive Technology
AIA	American Institute of Architects (Instituto Americano de Arquitetos/)
ETFE	Poly(ethene-co-tetrafluoroethene)
Led	Light Emitting Diode (Diodo emissor de luz)
CEO	Chief Executive Officer

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Problemática	14
1.2 Objetivo Geral	15
1.3 Objetivos Específicos	15
1.4 Justificativa	16
1.5 Metodologia do Projeto de Pesquisa	18
2 FUNDAMENTOS DA BIOMIMÉTICA E SUA INTERFACE COM O DESIGN	21
2.1 Conceitos e Definições	22
2.2 Metodologias em Biomimética	27
2.2.1 ANALOGIA	29
2.2.1.1 Analogia Morfológica.....	32
2.2.1.2 Analogia Funcional	34
2.2.1.3 Analogia Simbólica (Semântica)	38
2.2.2 PADRÕES DA NATUREZA	43
2.2.2.1 Proporção Áurea	45
2.2.2.2 Números de Fibonacci.....	52
2.2.2.3 Espirais.....	56
2.2.2.4 Fractais	60
2.2.2.5 Esferas.....	71
2.2.2.6 Modulação.....	77
2.2.3 MÉTODOS DE PESQUISA BIOMIMÉTICA	80
2.2.3.1 CRIED (Centro Ricerche/ Istituto Europeo di Design-Milano/IT).....	80
2.2.3.2 Laboratório de Biodesign (UFPE/BRA)	87
2.2.3.3 Universidade Católica de Goiás (UCG/BRA).....	99
2.2.4 BIOMIMICRY THINKING – DESIGN LENS (Biomimicry Institute 3.8)	109
2.2.5 O GRASSHOPPER E A IMPRESSÃO 3D À SERVIÇO DA BIOMIMÉTICA	116
2.3 Projetos de Design e Arquitetura em Biomimética	128
3 AS GEODÉSICAS DE BUCKMINSTER FULLER	153

3.1 Buckminster Fuller: Um Breve Histórico.....	153
3.1.1 AS PRIMEIRAS CÚPULAS GEODÉSICAS DE FULLER	158
3.2 A Geometria das Cúpulas Geodésicas de Fuller.....	178
3.3 Vantagens da Geometria das Geodésicas	196
3.4 A Biomimética nas Geodésicas de Fuller	211
3.5 Projetos Contemporâneos com Cúpulas Geodésicas.....	218
3.5.1 APLICAÇÕES NO BRASIL.....	229
3.5.2 APLICAÇÕES MODERNAS	236
3.5.2.1 Hotel Ecocamp Patagônia.....	240
3.5.2.2 Spheres (Os Domos da Amazon).....	254
3.5.3 APLICAÇÕES NO DESIGN DE PRODUTO.....	260
4 EXPERIMENTAÇÃO: AS GEODÉSICAS COMO ESTRATÉGIA DE BIODESIGN	264
4.1 Sistematização da Estratégia.....	264
5 CONCLUSÃO	275
REFERÊNCIAS	277

1 INTRODUÇÃO

A capacidade de fazer Design está, de inúmeras maneiras, no cerne da essência do ser humano. Heskett (2005) explica que o Homem molda o ambiente natural segundo às suas necessidades, dando formas, estruturando ou configurando residências, ruas, escolas, escritórios, meios de transporte e objetos para as mais diversas finalidades, onde essa capacidade de modelar o seu habitat atingiu tal ponto que não é errado afirmar que a vida humana é bastante condicionada a aspectos que, de uma maneira ou de outra, passam pelo processo de Design.

Embora a influência do contexto e das circunstâncias sejam consideráveis, fatores tais como processos tecnológicos, estruturas sociais e sistemas econômicos, dentre outros; o fator humano está presente nas tomadas de decisão em todos os níveis da prática do Design. Tenham sido bem ou mal projetados, sujeitos a avaliação e discussão, seja qual for o critério de julgamento, os objetos de design resultam de decisões e escolhas feitas por pessoas, e com estas escolhas vem a responsabilidade. (HESKETT, 2005)

Em 1971, no livro *Design for the real world*, Papanek já conclamava os designers a saírem da sua zona de conforto e criarem soluções para um mundo real, visando atender de fato a sociedade com necessidades urgentes e abrangentes, que sofriam na época com a fome, a miséria, conflitos sociais, guerras civis, crise ambiental, etc.; criticando a ausência de valores humanos e de responsabilidade social e ambiental outrora perdida pelo foco demasiadamente em fatores estéticos.

A verdade é que o contexto e o apelo de Papanek continuam coerentes nos dias atuais, como retoma a discussão outro autor, Cardoso (2012) em seu livro *Design para um mundo complexo*, onde ressalta a importância do designer em buscar uma visão mais holística e abrangente para gerar soluções mais coerentes com as necessidades em tempos de crise em que as relações têm se tornado cada vez mais complexas através de uma rede que amplia a efemeridade dos artefatos e mutabilidade das ideias.

Então, diante de uma infinidade de opções e metodologias qual caminho seguir para fazer Design num mundo complexo? Uma resposta satisfatória está em “Fazer mais com menos” (*“More with Less”*), o mesmo princípio que é usado para as criações

na natureza, uma filosofia adotada e disseminada pelo visionário Buckminster Fuller, um dos precursores do design responsivo e do discurso sustentável, ainda no século passado. Tal filosofia guiou toda uma trajetória de pesquisa e projetos até os seus 87 anos, sendo o exemplo de maior sucesso nesse conceito os seus domos geodésicos, que representam as maiores estruturas possíveis de serem construídas com a menor quantidade de material.

O nosso planeta, a “Espaçonave Terra”, não tem uma fonte inesgotável de petróleo, madeira, água, ar limpo e outros recursos naturais... Na medida em que vai se povoando mais e mais, é muito importante pensar como as pessoas possam viver melhor com os mesmos recursos. Uma forma é reduzir a quantidade de materiais desperdiçados, para que outra pessoa possa aproveitar [...] você também pode melhorar a qualidade dos materiais e encontrar melhores maneiras de usar cada grama de material, unidade de energia e minuto de tempo. (FULLER, 1968)

Uma grande entusiasta e disseminadora destas estratégias nos dias atuais é a bióloga e pesquisadora americana Janine Benyus, que há quase 20 anos têm procurado difundir os princípios da Biomimética, definida por ela como uma nova ciência que estuda modelos, princípios e processos da Natureza e depois imita-os ou inspira-se neles para a resolução de problemas humanos. (BENYUS, 1997)

Embora utilizar a Natureza como referência para as criações não seja algo propriamente novo, basta lembrar das invenções de Leonardo da Vinci, o movimento do Art Nouveau, ou mesmo das inspirações arquitetônicas de Gaudí. Ao longo da história, muitos são os casos de inspiração na natureza, desde os primórdios, o homem sempre a observou e aprendeu com ela, mas durante esse processo de “*evolução*” de conhecimento, de desenvolvimento tecnológico e de sistemas financeiros, este aprendizado foi se tornando uma realidade cada vez mais distante e foi dando lugar a uma ação mais devastadora, a exploração, e isto tem desencadeado uma série de outros problemas que interferem não apenas no bem estar do homem, mas no de todo o ecossistema, o qual está incluído e dele é dependente.

Manzini e Vezzoli (2002) apontam a educação ambiental como sendo um pilar do desenvolvimento sustentável, pois contribui para integrar a humanidade no ambiente e desperta nos indivíduos e grupos sociais organizados o desejo de participar na construção da sua cidadania.

A boa notícia é que recentemente, muitas vozes têm se juntado à esta causa de resgatar este olhar consciente para a genialidade da vida, buscando parcimônia no uso dos recursos e se inspirando na natureza para suas inovações. Como diria Benyus (1997), é a redescoberta e a liberação de uma fonte esquecida que faz jorrar novas esperanças sobre problemas que antes eram até considerados insolúveis.

1.1 Problemática

“O mundo não vai evoluir para além do seu atual estado de crise, usando o mesmo pensamento que o criou.” Albert Einstein

Os biomimeticistas estão descobrindo o que funciona na natureza e, mais importante do que isso, o que dura. Depois de 3,8 bilhões de anos de evolução, os fracassos se tornaram fósseis, e o que permanece é fruto do segredo da sobrevivência. Quanto mais o mundo artificial se parecer com a natureza e funcionar como ela, maior a probabilidade de sucesso nesse planeta que é a morada do homem, mas não exclusivamente dele. Nesta altura da história, em que se vislumbra a possibilidade real de perda de um quarto de todas as espécies vivas nos próximos 30 anos, a Biomimética torna-se mais que uma simples maneira de ver a natureza, ela se torna uma corrida e um meio de salvação. (BENYUS, 1997)

Abordando o tema do design de maneira mais abrangente, acreditando que o designer é todo aquele que concebe, cria e implementa ideias que tenham efeito sobre o homem de maneira cultural, tecnológica, social, científica ou em sistemas financeiros em qualquer escala, se faz necessário então que mais pesquisadores abracem a biomimética para que haja incentivo em disseminar este assunto que é tão importante, não apenas nas universidades de Design, mas até mesmo no ensino primário fundamental, na formação dos cidadãos.

Dentre as muitas possibilidades de referências e inspirações para esse fazer Design, este trabalho acredita que a natureza se demonstra um caminho muito promissor e de grande relevância como resposta para este cenário de degradação ambiental, desperdícios, crescente produção de lixo e banalização de produtos com o lobby de *design*, destinados ao privilégio de poucos e que não atendem a questionamentos referentes à sustentabilidade, pois a forma como a nossa sociedade

está insustentavelmente organizada tem obrigado a reflexões profundas e à necessidade de mudanças.

A sustentabilidade no âmbito ambiental são as condições sistêmicas segundo as quais, em nível regional e planetário, as atividades humanas não devem interferir nos ciclos naturais em que se baseia tudo o que a resiliência do planeta permite e, ao mesmo tempo não devem empobrecer o seu capital natural, que será transmitido às gerações futuras. (MANZINI; VERZZOLI, 2002)

Tendo em vista que criar no cenário atual de complexidade envolve parâmetros mais amplos e urgentes, além dos assuntos referentes ao contexto da Biomimética, este trabalho também pretende investigar as cúpulas geodésicas patenteadas pelo multidisciplinar Buckminster Fuller, reconhecidas como as estruturas mais fortes, leves e eficientes concebidas pelo homem ainda na década de 50. Com seu pensamento holístico e sinérgico, Fuller é traduzido como um dos precursores do discurso sustentável antes mesmo da consolidação do termo Biomimética, e por isto é necessário entender como estas configurações contribuem para o fomento deste assunto.

1.2 Objetivo Geral

Entender as relações entre a Biomimética e as geodésicas de Buckminster Fuller e como estas podem contribuir para solucionar problemas humanos em um cenário de complexidade.

1.3 Objetivos Específicos

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre os fundamentos da Biomimética;
- Pesquisar e analisar sobre metodologias e projetos em Biomimética;
- Descrever e documentar o método em Biônica/Biomimética aplicada ao design e alguns dos trabalhos desenvolvidos pelas instituições de ensino CRIED (IED, Milão/IT), UFPE (Laboratório de Biodesign, Recife/BRA) e UCG (GO/BRA);
- Realizar uma revisão bibliográfica sobre as geodésicas de Buckminster Fuller;
- Pesquisar e analisar sobre a história, a geometria e as vantagens construtivas das geodésicas;
- Pesquisar e analisar projetos contemporâneos com geodésicas e o contexto destes projetos;

- Realizar experimento com novos modelos baseados na configuração geodésica utilizando uma estratégia de Biodesign.

1.4 Justificativa

A genialidade do homem faz várias invenções, abrangendo com vários instrumentos o único e mesmo fim, mas nunca descobrirá uma invenção mais bela, mais econômica ou mais direta que a da natureza, pois nela nada falta e nada é supérfluo. **Leonardo Da Vinci**

Não é difícil entender o porquê desta estratégia de usar a natureza como parâmetro para as soluções humanas, ao comparar o tempo do surgimento da própria vida na Terra com a existência do homem, se observa que existe muito mais história a ser contada e analisada antes dele, onde se moldaram todas as demais formas de vida, da menor a maior, da mais forte a mais frágil, da mais simples a mais complexa, cuja maior prova de sucesso adaptativo está no simples fato de existir.

Coletivamente, organismos conseguiram transformar rocha e mar num lar de vida aconchegante, com temperaturas estáveis e ciclos que transcorrem suavemente. Quando se olha atentamente para as estruturas da natureza, se percebe que todas as invenções do homem já existem sob uma forma mais elegante e a um preço bem menor para o planeta. Como bem observou Benyus (1997):

Nossas vigas e escoras podem ser encontradas nas folhas do nenúfar e nas hastes do bambu; nossos sistemas de aquecimento e ar-condicionado são superados pelos estáveis 30º centígrados do cupinzeiro; nosso radar mais sofisticado é surdo se comparado ao sistema de captação de frequências do morcego. E nossos “materiais inteligentes” não chegam aos pés da pele do golfinho ou da probólide da borboleta. Até a roda, que consideramos criação do homem, foi encontrada no minúsculo rotor que impele o flagelo da bactéria mais antiga do mundo.

Antes mesmo do homem criar soluções, a natureza já tinha dado origem, há tempos, a “alta tecnologia” capaz de feitos incríveis, como: otimização de espaços compactos, impermeabilização, mobilidade econômica, alta resistência, controle de temperatura, construção de habitats, estruturas e mecanismos que refletem até mesmo um sentido de ordem “social”. E estes são só alguns dos aspectos reveladores de uma natureza capaz de ensinar a resolver também as necessidades e problemas humanos, pois os seres vivos têm feito tudo o que a humanidade intenta fazer, sem

consumir vorazmente combustível fóssil, poluir o planeta ou pôr em risco o seu futuro. Que modelos melhores poderiam existir? (BENYUS, 1997)

Fuller (1975) também intuiu este potencial de aprendizado com a natureza, quando percebeu que os seres vivos agem de maneira sincronizada com o todo, sabendo como fazer o uso máximo de recursos mínimos. Em seu livro *Sinergetics*, ele aborda justamente esta concepção de planeta como um sistema regenerativo, onde cada organismo ao ser guiado pelos seus instintos de sobrevivência é responsável por equilibrar o planeta como um todo. Por exemplo, uma abelha ao buscar o néctar acaba ajudando na reprodução das plantas através da polinização.

Porém, ele também sabia que a migração para os grandes centros urbanos fez o homem se afastar da natureza e perder essa a noção de como ela funciona de maneira global, passando a consumir recursos de forma irracional e insustentável, mesmo havendo tecnologia e recursos suficientes para suprir às necessidades de toda a população, sendo apenas preciso distribuir, evitar desperdícios e pensar na coletividade.

Para ajudar a disseminar este pensamento, Fuller propôs uma teoria denominada ***Design Science***, na qual se caracterizava por pensar holisticamente, antever os problemas, para perseguir soluções que a humanidade enfrenta através do Design, por meio de produção de protótipos, testando-os cientificamente enquanto todo o processo é documentado.

E foi justamente o que ele fez com suas cúpulas geodésicas, ele estudou, testou, patenteou vários modelos dessas estruturas que hoje já contabilizam cerca de 300.000 replicações bem-sucedidas e espalhadas pelo mundo.

Precisamos integrar ainda mais projeto e pesquisa, prática profissional e atividades culturais, sem perder de vista a natureza essencial do design como atividade projetual, capaz de viabilizar soluções sistêmicas e criativas para os imensos desafios do mundo complexo. (CARDOSO, 2012)

1.5 Metodologia do Projeto de Pesquisa

“Um problema adequadamente diagnosticado está a caminho de ser solucionado.” **Buckminster Fuller**

O projeto de pesquisa em questão se trata de uma **dissertação** de mestrado que possui **método científico de abordagem indutiva**. Faz uma investigação mais minuciosa sobre os fundamentos da Biomimética, relacionando-os com as geodésicas de Buckminster Fuller.

Tendo como objeto de estudo, estas geodésicas, investiga também o contexto atual em que elas estão inseridas, projetos contemporâneos, suas características e vantagens construtivas, estudando seus materiais e processos produtivos com foco em sustentabilidade, estabelecendo seus requisitos e ilustrando o potencial de uso destas estruturas em Projetos de Design.

Através de sites, como o *Biomimicry Institute* e o *Buckminster Fuller Institute*, dentre outros; esta pesquisa compilou uma série de informações, imagens e artigos sobre metodologias e novas aplicações com ênfase nestes dois assuntos. Sobre Biomimética, esta pesquisa também contou com o acesso aos acervos do laboratório de Biodesign da UFPE e, desta forma, alguns registros dos trabalhos desenvolvidos também serão apresentados, assim como os métodos e trabalhos do CRIED e do UCG.

Para execução dos modelos, foi realizada uma parceria com o Departamento de Expressão Gráfica da UFPE para desenvolvimento em softwares CAD (*Rhinoceros* e *Grasshopper*) para a modelagem virtual. Demais ilustrações foram produzidos pela pesquisadora em softwares gráficos ou por fotografia.

Para facilitar o entendimento da Metodologia de Pesquisa, as **Tabelas 1 e 2** a seguir visam ilustrar as características e estratégias de planejamento adotados, baseadas nos critérios de Prodavov & Freitas (2013); já a **Figura 1** apresenta um Mapa Mental com os conteúdos relacionados na pesquisa e suas conexões.

Tabela 1 – Quadro com os tipos, classificações e características da Pesquisa.

CLASSIFICAÇÕES DA PESQUISA	TIPOS	CARACTERÍSTICAS
Projeto de Pesquisa	Dissertação	Obtenção do título de Mestre
Quanto à Abordagem do Método Científico	Pesquisa Indutiva	Valida estratégia de Biodesign em aplicações de novos modelos de geodésicas
Quanto à Natureza	Pesquisa Básica	Gera principalmente conhecimento para solução de problemas abrangentes
Quanto aos Objetivos	Pesquisa Exploratória/ Descritiva	Pretende descrever e gerar mais informações sobre os assuntos da Biomimética e das Geodésicas.
Quanto à Abordagem do Problema	Pesquisa Qualitativa	Análise das qualidades subjetivas dos resultados das observações do levantamento bibliográfico.
Quanto aos Procedimentos Técnicos	Pesquisa Bibliográfica	Levantamento de fontes bibliográficas (livros e publicações) e fontes secundárias (sites, etc.).
	Pesquisa Documental	Descrição e análise dos métodos de Biomimética utilizados pelo LAB. BIODESIGN (BRA); CRIED (IT) e UCG (BRA); Pesquisa sobre as Geodésicas no contexto contemporâneo.

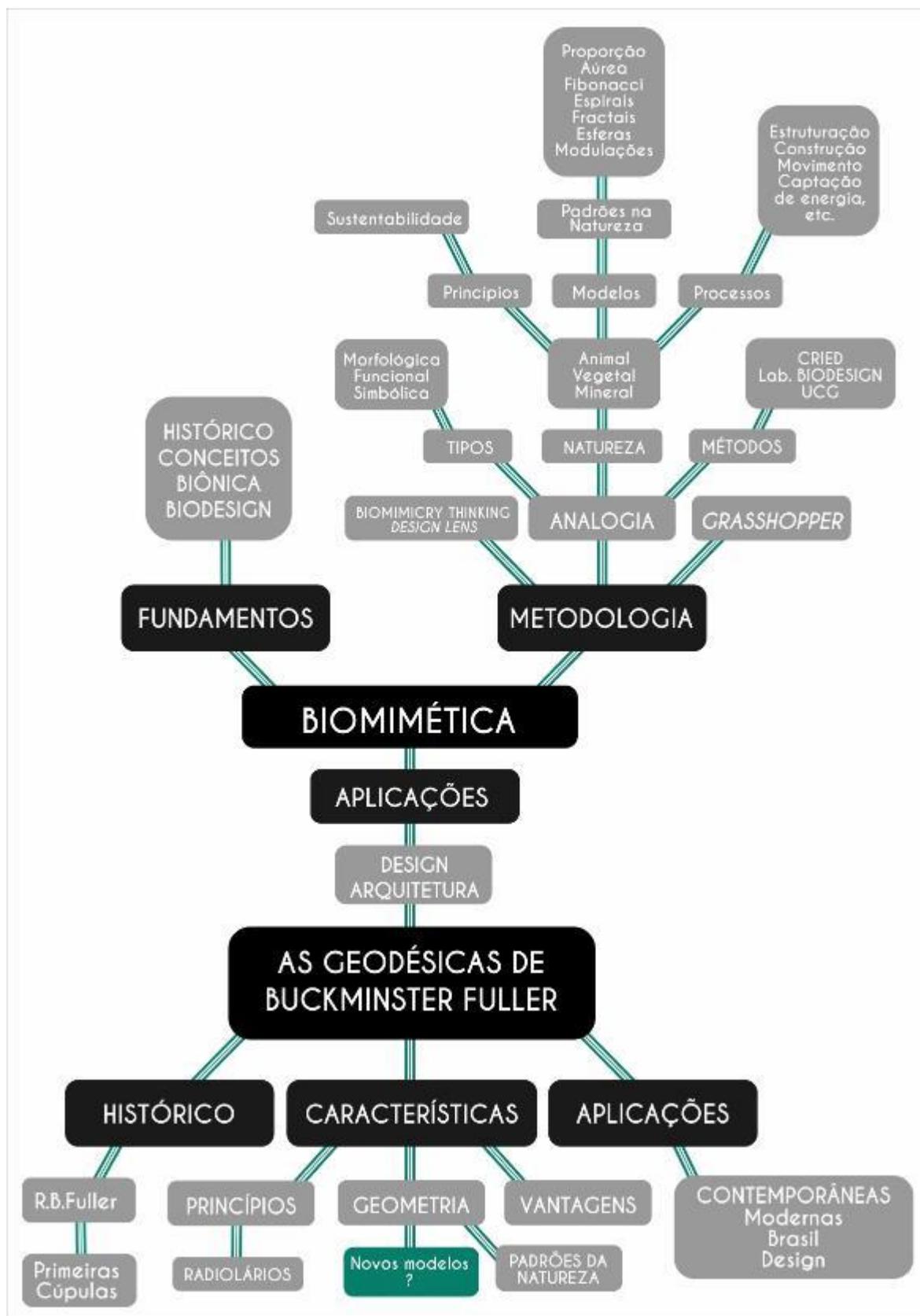
Fonte: Elaborado pela aurora.

Tabela 2 – Quadro com os métodos de procedimento da pesquisa e suas características.

Quanto aos Métodos de Procedimento	CARACTERÍSTICAS
1. MÉTODO HISTÓRICO	Investigar sobre os fundamentos da Biomimética (definições, aplicações, métodos, etc), num caráter evolutivo e também sobre o contexto de criação das primeiras geodésicas.
3. MÉTODO COMPARATIVO	Relacionar e comparar os conteúdos da Biomimética e das geodésicas de Buckminster Fuller , procurando similaridades em seus princípios, padrões e aplicações.
2. MÉTODO EXPERIMENTAL	Desenvolver novos modelos de geodésicas baseados em Estratégia de Biodesign a nível de investigação.

Fonte: Elaborado pela aurora.

Figura 1 – Mapa Mental dos assuntos relacionados à Pesquisa.



Fonte: Elaborado pela autora.

2 FUNDAMENTOS DA BIOMIMÉTICA E SUA INTERFACE COM O DESIGN

Ao longo da complexa história da Humanidade é possível constatar a aplicação de soluções biológicas em diferentes períodos, e em diversas áreas tais como na ciência, tecnologia, arquitetura, arte, design, engenharia, medicina, e outras mais têm surgido a cada dia. Essa inspiração na natureza tem gerado uma série de invenções que tem possibilitado um grande número de inovações e de recursos no decorrer do tempo.

Para se ter uma ideia do potencial de aprendizagem com essa multidão de organismos na natureza, Benyus (1997) relembra que basta observar os feitos incríveis de: algas bioluminescentes, que combinam substâncias para abastecer suas lanternas orgânicas; peixes e rãs das regiões árticas que se congelam e tornam a surgir para vida sem danos causados pelo gelo em seus órgãos; ursos pardos que hibernam em invernos inteiros sem se envenenarem com a própria ureia; ursos polares que se protegem do frio através de uma camada de pelos transparentes que funcionam como as vidraças de uma estufa; abelhas, tartarugas e pássaros que se locomovem sem mapas; baleias e pinguins que mergulham no fundo das águas sem equipamento de mergulho; libélulas que excedem a capacidade de manobra dos melhores helicópteros; formigas que conseguem carregar o equivalente a centenas de quilos; beija-flores que cruzam o golfo do México com o equivalente a 3ml de combustível, etc.

Embora todo este conhecimento tenha existido ao longo da evolução da vida na Terra, apenas uma pequena parcela disso tem sido aproveitada, existindo uma grande parte ainda desconhecida e negligenciada a ser desbravada. Através de um olhar atento às soluções da natureza, existem uma infinidade de bons exemplos de eco eficiência, através de organismos que constroem com o mínimo de desperdício de materiais e energia, e que ainda coexistem em harmonia com a biosfera. Evidenciar esta nova forma de perceber a natureza é bem diferente da ideia de exploração a que geralmente o homem a tem associado.

Portanto, observando como a natureza opera na criação das suas espécies, sejam vegetais, animais ou minerais, pode-se transpor este mesmo método no desenvolvimento de produtos, sistemas, construções e até mesmo serviços, pois os

“critérios” observados nos seres vivos mais adaptados, podem servir de base para o desenvolvimento de soluções mais eficientes. (BENYUS, 1997)

2.1 Conceitos e Definições

É importante esclarecer que existem outros termos que também relacionam a natureza com as criações humanas. Biônica, Biodesign e Biomimética são facilmente confundíveis pois suas origens, conceitos, métodos e bases de investigação são realmente muito semelhantes, embora existam algumas diferenças.

Fernandes (2012) comenta que ambas as terminologias derivaram da palavra europeia **Biotécnica** que apareceu como referência no livro datado de 1877 da autoria do Reverendo *John George Wood*, “*Nature’s teaching’s: Human Invention Anticipated by Nature*” e posteriormente em 1920 no livro de *Raul Francé*, “*Die Planze als Erfinder*” (As Plantas como Inventoras). Mais tarde a palavra sofreu uma derivação, surgindo o termo “**Bionics**” (**Biônica**) que se relaciona com a palavra “*Bio*” (vida) e “*onics*” de “*technologies*” (tecnologia). Segundo Arruda (1993), esse termo foi oficialmente apresentado em 1960 num Simpósio nos E.U.A, promovido pelas forças aéreas, onde foi utilizado pelo engenheiro e major **Jack. E. Stelle** que o definiu como: “**Ciência dos sistemas cujo funcionamento se baseia em sistemas naturais, ou que apresentam analogias com estes**”.

Arruda (1993) também apresenta em ordem cronológica as definições de outros autores para a palavra Biônica, são elas:

Maraldi (1963) diz que ela se propõe ao estudo e compreensão da estrutura, mecanismo e funções de plantas, de animais e do homem, a fim de desenvolver novas aplicações para mecanismos complexos e dispositivos variados; **Gerardin** (1968) fala que ela é a arte de aplicar em soluções de problemas técnicos o conhecimento que se possui dos seres vivos; **Mironov** (1970) explica que ela estuda o mecanismo da unidade vital para desenhar aplicações práticas; **Papanek** (1973) ratifica que se trata da ciência que estuda o emprego dos modelos biológicos para a produção de sistemas sintéticos criados pelo homem e também os princípios básicos da natureza para extrair destes aplicações e processos úteis ao ser humano e **Bonsiepe** (1975) expõe que ela estuda o sistema vivo para aplicação de seus princípios, técnicas e mecanismos na tecnologia, servindo principalmente para

estimular a capacidade de perceber seus detalhes tridimensionais e os princípios formais que o estruturam, como também para incrementar a capacidade de transformação quando se examina e analisa um objeto análogo.

Já **Broeck** (1989) explica sobre um novo termo, o **Biodesign**, cuja utilização é dita adequada por este autor, quando a Biônica é aplicada ao desenho industrial, sendo mais coerente com a atividade de projetos. Neste sentido define-se Biodesign pelo estudo de sistemas e organismos naturais com o propósito de analisar e perceber soluções do tipo funcional, estrutural e formal, para aplicação em resolução de problemas humanos, através de criações tecnológicas, objetos ou sistemas de objetos.

Este autor apresenta ainda um resumo com as **2 atividades fundamentais do Biodesign**, e é neste contexto que a *estratégia de Biodesign* referida nesta pesquisa se identifica:

1. Investigação e experimentação básica, que partem da observação de fenômenos naturais sem, necessariamente, ter presentes aplicações utilizáveis posteriormente em projetos específicos. A ideia fundamental desta opção é a de criar um banco de dados que alimente o projeto, não somente em soluções técnicas, mas também, em aspectos metodológicos.
2. Busca de soluções para um projeto específico, por analogias. Para isto, requer não somente de um banco de dados de investigação básica, mas de um conhecimento prévio da área, dos princípios que determinam as formas na natureza e de uma metodologia de aproximação do fenômeno natural.

Tanto a Biônica, quanto o Biodesign estudam os princípios básicos da natureza (construtivos, tecnológicos, formais, etc.) para aplicação em soluções tecnológicas, e por isto se tornaram um campo interdisciplinar que combina a biologia com outras áreas, dando origem, portanto, a diversas outras terminologias correlatas que também são utilizadas com referência nas *Bioinspirações* ou *Biotécnicas*, tais como a *Bioengenharia*, *Biomecânica*, *Bioelectrônica*, *Bioarquitetura*, *Bioenergética*, *Biomaterial*, etc.

Outra forma de utilização do termo Biônica é uma junção da palavra *Bios* com a *eletrônica* relacionado com a área da *cibernética*, na designação da tecnologia à serviço da recriação da natureza, como por exemplo, na criação de próteses artificiais para seres vivos, tais como: orelhas, olhos, mãos, pernas, órgãos, dentre outros, como observado no exemplo abaixo da mão biônica *i-limb Ultra Revolution* da empresa *Touch Bionics* com sua mais avançada e versátil prótese, que possui maior destreza e movimentos mais naturais, e que pode inclusive ser configurada pelo aplicativo no *smartphone*. **(Figura 2)**

Figura 2 – Imagem da mão biônica *i-limb Ultra Revolution* da empresa *Touch Bionics*.



Fonte: <http://innovationjournal.blogspot.com.br/2014/05/touch-bionics-updates-i-limb-ultra.html>. Acesso em: 26 jul 2014.

Em 1969 a palavra ***Biomimética*** dá origem ao título de um artigo de **Otto Schmitt** e finalmente, em 1974, foi publicada a seguinte definição no dicionário de Webster:

“Trata do estudo da formação, estrutura ou função de substâncias e materiais biologicamente produzidos (como as enzimas ou a seda), e mecanismos e processos biológicos (como a sintetização de proteínas ou de fotossíntese) especialmente para os propósitos de sintetização de produtos similares por mecanismos artificiais que mimetizam os naturais”.

Mais tarde a pesquisadora americana **Janine Benyus (1997)** teve a responsabilidade da melhor definição e difusão do termo da Biomimética. Segundo ela, esta nova ciência estuda os modelos da natureza e depois imita-os, inspira-se

neles ou em seus processos para resolver problemas humanos, porém as soluções devem ser embasadas na tríade: a natureza como modelo, medida e mentora, cujos princípios serão descritos a seguir:

- **A natureza como modelo.** Inspiração e mimese nas soluções da natureza para aplicações práticas;
- **A natureza como medida:** Usa o padrão ecológico como parâmetro para as inovações. Após 3,8 bilhões de anos de evolução, a natureza aprendeu aquilo que funciona, é mais apropriado, econômico e durável;
- **A natureza como mentora:** Representa uma nova forma de ver e valorizar a natureza, inaugura uma era cujas bases se sustentam não naquilo que se pode extrair dela, mas no que se pode aprender com ela.

Estas últimas abordagens da natureza como medida e mentora apresentam novos valores, que incluem aspectos de sustentabilidade e de respeito à natureza, o que para Janine significa a verdadeira revolução desse campo. Apesar de derivar da palavra grega "*Biomimesis*", onde "*bios*" significa vida e "*mimesis*", imitação, não se restringe a apenas uma imitação da forma biológica, mas considera também o conceito de replicação do comportamento dos organismos biológicos.

De acordo com Santos (2010), a Biomimética colabora com a filosofia do design ambiental, que também tem a visão multidisciplinar onde muitos setores industriais podem substituir o método tradicional de projeto e produção dos bens de consumo pelo "método" da natureza que é bem mais equilibrado e menos oneroso para o ambiente. É o que é evidenciado na fala de Benyus (1997):

Desta vez, viemos não para aprender algo sobre a natureza, para que possamos enganá-la e controlá-la, mas para aprender algo com ela, de modo que possamos nos adaptar, de uma vez por todas e para o nosso bem, à vida na Terra, da qual surgimos. Temos um milhão de perguntas. Como deveríamos produzir alimentos? Como deveríamos fabricar nossos materiais? Como deveríamos realizar negócios de uma forma que respeite a natureza? À medida que formos descobrindo aquilo que a natureza já sabe, reconheceremos a

sensação de fazer parte, e não de estarmos à parte, da genialidade que nos rodeia.

A Biomimética corresponde a uma emulação consciente do gênio da natureza, é uma abordagem interdisciplinar que reúne mundos muitas vezes desconectados: natureza e tecnologia, biologia e inovação, vida e design. Na prática, procura trazer a sabedoria da vida testada pelo tempo para trazer informações valiosas em soluções humanas que criam condições favoráveis à vida; soluções sustentáveis por empréstimo de *insights* e estratégias ambientais, ou ainda, procura ser uma conexão que ajuda a encaixar, alinhar e integrar a espécie humana nos processos naturais da Terra.

À título de curiosidade, outra forma de uso do termo Biomimética também se refere a característica de camuflagem que certos animais possuem, onde imitam outras espécies para se protegerem de predadores ou para disfarçarem sua presença como predadores, como pode ser observado na **Figura 3**.

Figura 3 – Imagem com animais que utilizam a biomimética como técnica de camuflagem.



Fonte: Elaborado pela autora, do banco de imagens do laboratório do BIODESIGN.

Por fim, enquanto a Biônica trata da previsão, manipulação e controle da natureza, a Biomimética inspira o sentimento de pertencimento e participação humana, o que constitui uma maior contribuição para os aspectos da sustentabilidade. Apesar das abordagens serem tão parecidas existem diferenças entre as suas concepções, pois esta última representa uma nova forma de observar e avaliar a natureza, introduzindo um novo pensamento baseado não só no que se pode extrair do mundo natural, mas no que se pode aprender com ele, e isto torna a sua abordagem mais abrangente.

2.2 Metodologias em Biomimética

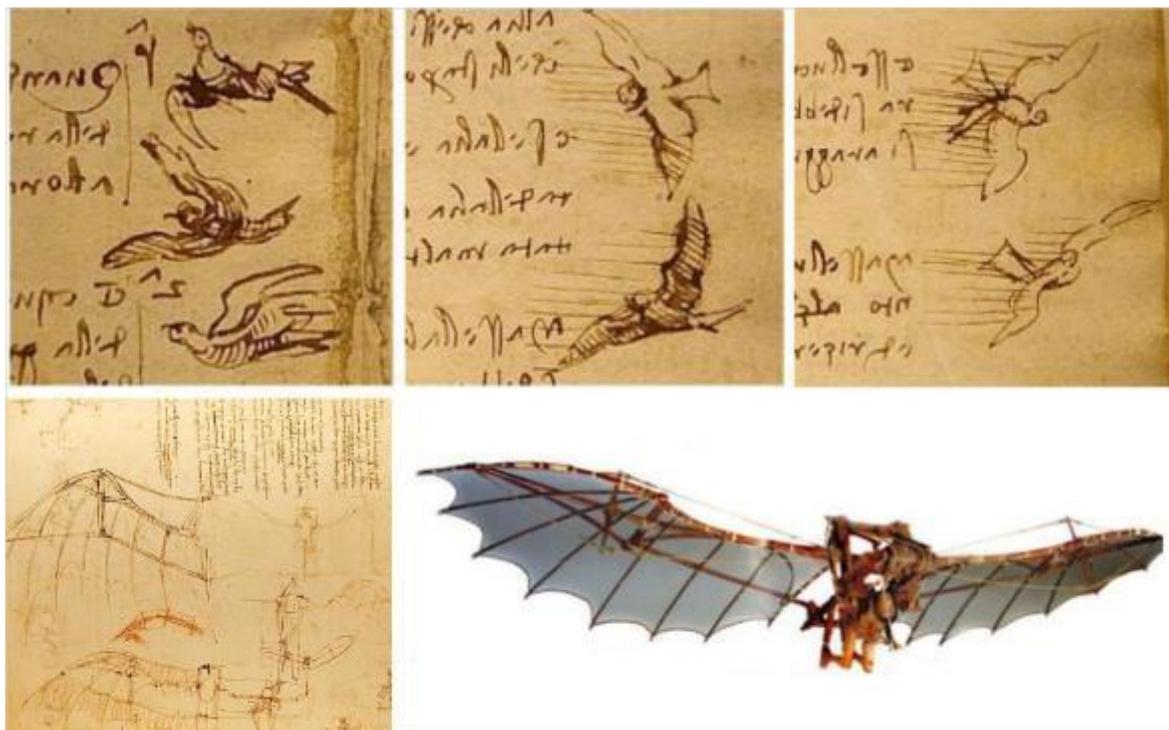
Apesar de todas estas definições do século XX, **Leonardo Da Vinci**, embora não utilizasse estes termos, já se apropriava dos conceitos da Biomimética na prática desde a época do Renascimento. Gênio reconhecido como um dos primeiros a estudar as formas e funções presentes na natureza, revelou claramente a sua busca por mecanismos biônicos através dos seus famosos desenhos na obra “*Sul volo degli uccelli*” (O voo das aves), possibilitando o título de pioneiro a aproximar-se da realidade de voar através da construção de máquinas voadoras.

Arruda (1993) relembra sobre estes estudos e diz que a ideia fundamental do engenheiro era que o voo humano fosse possível através da imitação mecânica da natureza, numa tentativa de reproduzir os movimentos das asas do morcego, entendendo também a base dos movimentos dos pássaros. **(Figura 4)**

Um aspecto interessante a ser observado nestes estudos de Leonardo diz respeito à dinâmica do método utilizado por ele, motivado pela curiosidade e procurando estabelecer relações, ele procurava observar o elemento natural a ser investigado em seu ambiente natural e registrava tudo em tempo real através de anotações textuais e desenhos esquemáticos.

“ O Falcão bate lentamente suas asas e procura sobretudo se fazer levar pelas correntes de ar. Com o voo equilibrado, estes podem repousar seus membros cansados”. (Vinci, 2004)

Figura 4 – Estudos do voo de pássaros e Máquina para bater asas “Ornitóptero” de Da Vinci.



Fonte: (CRUZ, 2012, p.19).

Arruda (2002) comenta que desde a Bauhaus e a escola de Ulm em seu curso fundamental, já se ofereciam disciplinas em que as análises dos fenômenos naturais, das estruturas, do funcionamento dos organismos vivos eram frequentemente objeto de estudo. Em Ulm, Gui Bonsiepe, professor da escola na época, costumava usar as análises morfológicas de organismos biológicos como escopo didático para melhorar a visão estrutural e a interpretação criativa. Vitor Papanek também foi um dos professores pioneiros (na época, no *California Institute of Arts*) a propor o estudo da biônica (elementos naturais) como instrumento de projeto. Também Bruno Munari, Attilio Marcolli e Aldo Montù na Itália, contribuíram em suas publicações com diversos estudos das estruturas naturais.

Mas apesar dos avanços dessa ciência, ainda existem poucos estudos formulados para o procedimento de interpretação ou tradução da biologia para esta fase de criação. Normalmente o que se utiliza, seja na *Biônica*, *Biomimética*, *Biodesign* ou qualquer *biotécnica* é o método empregado da **Analogia**.

Aqui é importante perceber a necessidade de contínuos estudos e oferecer novos avanços no uso da Analogia, pois esta transferência de um conceito ou

mecanismo vivo para sistemas inanimados não é trivial. Uma réplica simples e direta do modelo biológico raramente é bem-sucedida, mesmo com toda tecnologia disponível no cenário atual, pois se trata de uma atividade com certo grau de complexidade. Gruber (2011) afirma que para que ocorra o sucesso da solução Biomimética deve existir interdisciplinaridade ou ainda, deve-se aplicar os conceitos de forma estratégica.

Dessa forma, com o passar dos séculos, muitos nomes utilizaram a natureza para investigação e criação de artefatos, o que resultou em acúmulo de conhecimento e aprimoramento de técnicas e métodos. Algumas das quais serão descritas a seguir:

2.2.1 ANALOGIA

Na antiguidade clássica, a Analogia era abordada pelos filósofos Aristóteles e Platão como uma *abstração compartilhada*, em que os objetos análogos compartilhavam algo em comum, seja uma ideia, um padrão, uma regularidade, um atributo ou uma função.

Como método, a analogia ganha um carácter capaz de vencer problemas através de um raciocínio lógico, assim como ajuda na tomada de decisões, nos diferentes campos da criação, percepção e criatividade. Da sua aplicação resulta um amplo conjunto de soluções para diferentes áreas em conformidade com o interesse e conteúdo de cada ciência.

Sendo muito utilizada pela Biônica e a Biomimética, se revela muito útil em descobrir novos princípios, formas, processos, estruturas, etc.; contribuindo no processo de interpretação das estruturas naturais. Ao longo da história, este é o método mais comum para encontrar soluções de concepção com referência no mundo natural.

Para falar de analogia é interessante remeter também ao termo *Synectics* (*Sinergia*), que corresponde a uma das técnicas mais promissoras para fomentar a criatividade, sua característica mais importante está no uso repetido de analogias que levem a abordagem do problema, sob novos pontos de vista. Tornou-se parte do vocabulário dos especialistas, quando William Gordon, em 1961, publicou o livro

Synectics, que do grego significa a *união de elementos diferentes e aparentemente irrelevantes*.

Segundo Gordon (1961), a *Synectics* funciona num misto de teoria e técnica. Como teoria estuda o processo criativo e os mecanismos psicológicos da atividade criativa, com o objetivo de aumentar as chances de pessoas obterem sucesso na resolução de problemas. Como técnica, fornece uma repetição capaz de aumentar as chances de chegar a soluções criativas pelo procedimento de aproximação. A seguir, Pérez (1999) comenta os 4 tipos de Analogias definidas por Gordon (1961):

- **Analogia Direta:** Descreve a verdadeira comparação de fatos, conhecimentos, objetos, organismos, que possuam algum grau de semelhança;
- **Analogia Pessoal:** Descreve uma personificação imersiva no problema, de forma empática. Começando com a pergunta: Se eu fosse...? Assim ocorre uma fusão imaginária entre a pessoa e o objeto ou situação, permitindo uma visão interna sobre os sentimentos, pensamentos e formas de atuação específicas para cada caso. (Se eu fosse um...me sentiria como?);
- **Analogia Simbólica:** Seleciona uma palavra-chave e pergunta-se qual a sua essência, para então experimentar ou sentir os significados descobertos; usa imagens objetivas e impessoais para descrever o problema por uma resposta poética; Uma vez criada é uma torrente de associações;
- **Analogia Fantástica:** Deixa de lado o pensamento lógico e racional. Partindo de um problema específico se deixa a porta aberta à fantasia, conduzindo a soluções imaginárias que estão fora do universo possível.

A técnica fornece grande atenção aos elementos emocionais, irracionais e inconscientes na busca criativa; no entanto, é essencial não perder de vista também a reflexão racional. (PÉREZ, 1999)

A tentativa analógica consiste em afastamento do problema, o relacionando com conceitos, ideias e imagens que ele inspira num processo chamado de *cruzamento*, para daí se extrair soluções. Tanto a *Sinergia* como a *Biônica* se utilizam de analogias, porém, na primeira essa busca de soluções se dá em áreas variadas

como a literatura, a natureza ou até a arte. Já na Biônica, a busca de soluções acontece exclusivamente na natureza. (RAMOS, 1993)

A seguir, alguns tipos de analogias relacionadas ao assunto da Biomimética discutida por Arruda (2002):

- **Analogia Orgânica:** Busca encontrar o equilíbrio entre os organismos humanos, as obras de arte e os sistemas mecânicos. (STEADMAN, 1988)
- **Analogia Classificatória:** Observa os métodos estabelecidos da botânica e zoologia para aplicação na Arquitetura e no Design. (STEADMAN, 1988)
- **Analogia Anatômica:** Traz uma sistemática de trabalho que estuda a estrutura do esqueleto animal comparando-os com as construções da engenharia. (STEADMAN, 1988)
- **Analogia Darwiniana:** Busca explicar que os objetos e as construções são feitos através de cópias repetidas através dos tempos, como acontece com a evolução natural. (STEADMAN, 1988)
- **Analogia Sensorial:** Estudo dos sistemas de controle e transmissão de informação de organismos vivos para transpor em modelos eletrônicos e mecânicos, com objetivo de reduzir e otimizar ao máximo seus resultados. (ARRUDA, 2002)

Todas estas analogias de alguma forma se empenham em traduzir o mundo natural e contribuem na decodificação de geometrias, funcionamentos, e na busca, dentre outros aspectos, por um melhor aproveitamento energético e de material, conservando assim, os princípios da Biomimética.

Além destes, serão apresentados de maneira mais detalhada a seguir, três tipos básicos de analogia, **morfológica, funcional e simbólica**, que para a autora, sintetizam melhor o método de Analogia relacionado com a Biomimética.

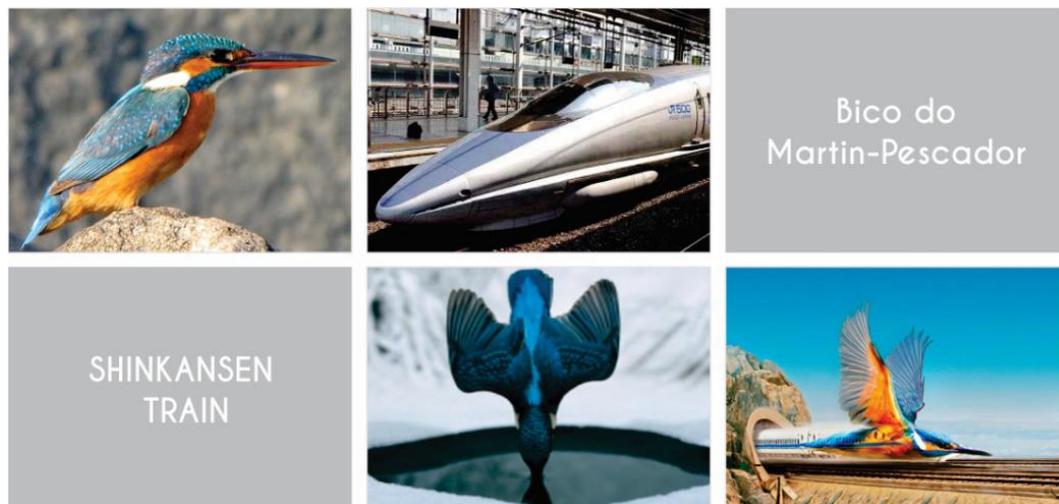
2.2.1.1 Analogia Morfológica

A forma, a saber, a figura ou determinação exterior de um corpo, destina-se como qualquer combinação definida de elementos geométricos que possamos realizar ou imaginar, é uma característica importante da matéria, já que todos os objetos reais, vivos ou não, possuem forma própria, particular, que muitas vezes se define em si mesmos, que os fazem similar a alguns ou diferentes de outros. Pelos objetos de forma complexa e irregular, como as encontradas na natureza, deve-se dar uma definição que seja essencialmente indireta e aproximativa. (ARRUDA, 1993)

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

Segundo Wilson *et al.* (2010), a análise de fenômenos morfológicos da natureza facilita e estimula a capacidade de percepção de detalhes e princípios presentes em sua estrutura. Ideias inovadoras vêm surgindo de pesquisas sobre sistemas e propriedades naturais que nem sempre se traduzem apenas na estética, mas que a forma natural favorece também o ganho em eficiência. Neste sentido Versos (2010) traz um bom exemplo de analogia morfológica com o *Trem-bala Shinkansen* desenvolvido pelo engenheiro *Eiji Nakatsu* (**Figura 5**). O projeto tem como referência a forma do bico alongado do pássaro *Martim-Pescador*, que facilita o mergulho sem espirrar água em busca de sua refeição. Visando solucionar um dos grandes problemas do trem bala que é a vibração e o barulho, o engenheiro buscou inspiração no formato do bico deste pássaro, o que resultou numa melhora significativa com um trem-bala 10% mais rápido, consumindo 15% menos energia, e ainda, reduzindo a pressão do ar em 30% em relação ao modelo anterior.

Figura 5 – SHINKANSEN (Japão), trem-bala de alta velocidade mais rápido do mundo, redesenhado tendo como base o bico de um Martin-Pescador.



Fonte: (VERSOS, 2010)

Outro exemplo interessante de analogia morfológica é o *BIONIC CAR* da marca Mercedes-Benz, cuja inspiração se deu através da forma e estrutura óssea hidrodinâmica do peixe-cofre (**Figura 6**) com o propósito de proporcionar alta resistência à estrutura do carro através do uso mínimo de material. Como resultado, o automóvel apresentou uma excelente aerodinâmica e peso reduzido com um consumo de 4,3 litros por 100km, o que significa 20% mais economia que os veículos da mesma classe, e ainda, redução das emissões de óxido de nitrogênio em cerca de 80%. (VERSOS, 2010)

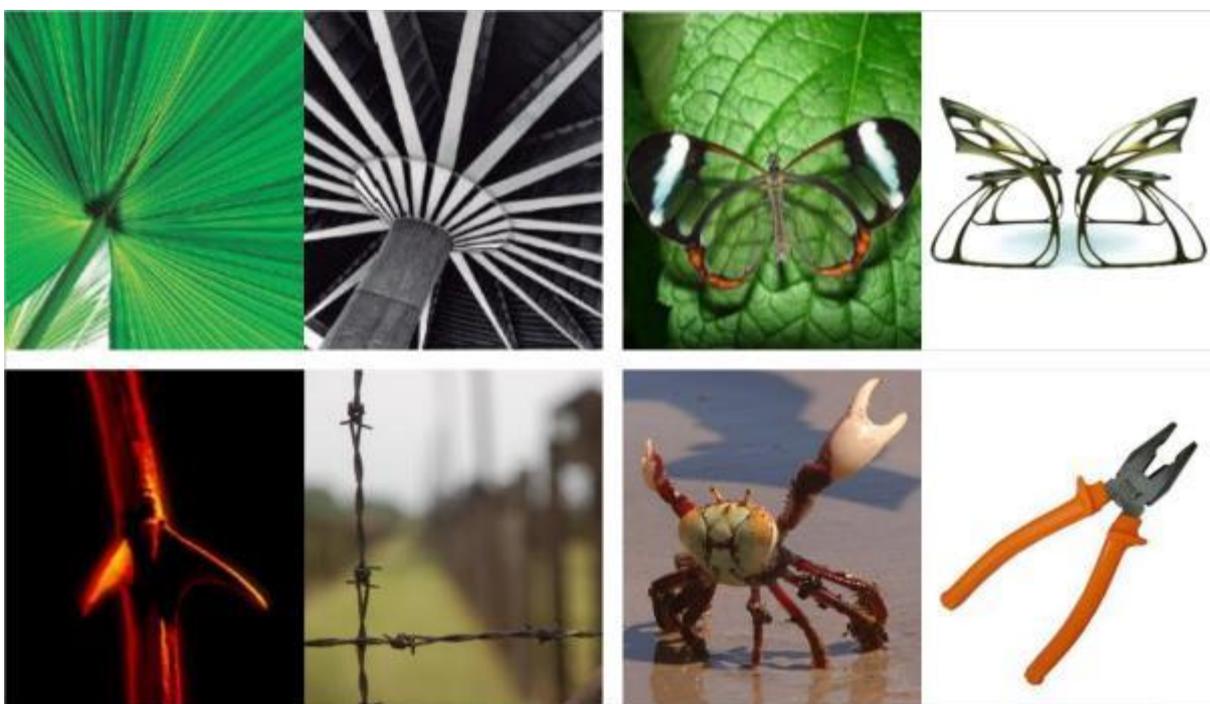
Figura 6 – BIONIC CAR da marca Mercedes-Benz (Alemanha), automóvel desenvolvido com base na forma e estrutura hidrodinâmica do peixe-cofre.



Fonte: (VERSOS, 2010).

Sendo assim, a analogia morfológica comprova a eficiência das formas naturais, pois muitas delas se traduzem em ganhos além da estética, ou seja, também em performance. A **Figura 7** apresenta mais alguns exemplos desse tipo de analogia.

Figura 7 – Exemplos de Analogia Morfológica – Coluna estrutural/Folha da palmeira leque; Cadeira/Forma estrutural da borboleta; Arame farpado/Espinhos e Alicate/Pinça do caranguejo.



Fonte: Elaborada pela autora, do banco de imagens do laboratório do BIODESIGN.

2.2.1.2 Analogia Funcional

Já este outro tipo de Analogia procura estudar sobre o funcionamento do sistema físico e mecânico natural; tenta compreender quais funções desempenham tanto no todo, quanto em suas partes e componentes. Em outras palavras são evidenciados os atributos funcionais, qualidades específicas (não morfológicas) que se podem mimetizar da estrutura natural analisada, uma vez que os organismos naturais desenvolveram habilidades complexas e altamente adaptáveis, se pode mimetizar essas aptidões funcionais e aplicá-las em artefatos artificiais. Enquanto morfológicamente as analogias são limitadas, funcionalmente podem ser múltiplas.

Muitos pesquisadores têm buscado parcerias com departamentos de biologia que se utilizam de informações específicas de características do mundo natural, um destes trabalhos é o de Liua & Jiang (2011) que apresentam na **Tabela 3** o resultado

de vários estudos onde descrevem as funções encontradas em alguns organismos vivos que podem orientar a geração de idéias para solução de problemas projetuais por analogia no design.

Tabela 3 – Tabela de organismos naturais e suas respectivas funções.

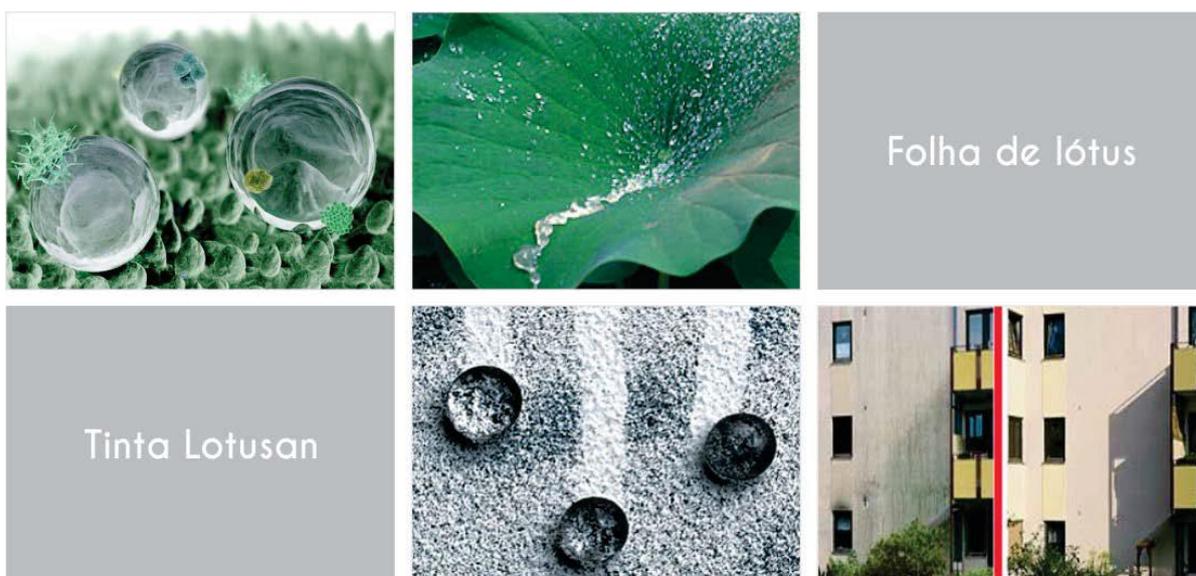
Material Biológico	Funções	Autores
Asa de Borboleta	Super hidrofobicidade, aderência direcional, estrutural cor, a auto-limpeza química.	Y.M. Zheng, X.F. Gao, L. Jiang (2007) O. Sato, S. Kubo, Z.Z. Gu, Acc. Chem. (2009)
Nácar	Propriedades mecânicas, cor estrutural,	X.F. Gao, X. Yan, X. Yao, L. Xu, K. Zhang, J.H. Zhang, B. Yang, L. Jiang (2007) G. Mayer (2005)
Asa de Cigarra	Anti-reflexão, Super hidrofobicidade,	T.L. Sun, L. Feng, X.F. Gao, L. Jiang. (2005)
A seda de captura da aranha	propriedades mecânicas de encolhimento, adesividade e elasticidade	Y.M. Zheng, H. Bai, Z.B. Huang, X.L. Tian, F.Q. Nie, Y. Zhao, J. Zhai, L. Jiang (2010) N. Becker, E. Croudjev, S. Mutz, J.P. Cleveland, P.K. Hansma, C.Y. Hayashi, D.E. Makarov, H.G. Hansma, (2003) B.O. Swanson, T.A. Blackledge, C.Y. Hayash, (2007)
Perna do Passolargo na água	Durável e robusto super hidrofobicidade,	X.F. Gao, L. Jiang, (2004)
Pétala de rosa	super hidrofobicidade, cor estrutural, alta adesão	L. Feng, Y.A. Zhang, J.M. Xi, Y. Zhu, N. Wang, F. Xia, L. Jiang (2008) L. Feng, Y.A. Zhang, M.Z. Li, Y.M. Zheng, W.Z. Shen, L. Jiang (2010) B. Bhushan, E.K. Her, (2010)

Fonte: (LIUA & JIANG, 2011).

A vantagem desta analogia é que se identificando estas estratégias e funções, se podem aplicar em mais de um tipo de artefato, servindo para uma ou mais soluções como o caso do estudo das folhas de lótus, na qual o pesquisador *Barthlott*, identificou as funções de repelir a água e de autolimpeza das suas superfícies. Isto acontece devido ao ângulo formado pelas suas micro e nanoestruturas cerosas, que impedem o contato com a água, fazendo-a rolar e formar gotas que vão recolhendo a sujeira pelo caminho. Com isto, se identificou que superfícies ásperas em nano escala são mais hidrofóbicas que superfícies mais lisas. Na folha de lótus, a área de contato real é de apenas 2-3% da superfície das gotas.

Essa analogia funcional foi aplicada comercialmente em produtos como a tinta Lotusan (**Figura 8**) e também em outros materiais e produtos, tais como os têxteis, a madeira ou o vidro, através de sprays (*BASF Lotus Spray*) que simulam o mesmo efeito da planta. Na tinta, ao criar micro saliências, ela repele a água, se auto limpando e resistindo a manchas durante décadas. Apesar de se replicar estas microestruturas, os artefatos gerados não se referem a forma das folhas em si e sim a função identificada de hidrofobia e autolimpeza. (VERSOS, 2010)

Figura 8 – LOTUSAN (Alemanha), tinta que repele a água e resiste a manchas durante décadas, inspirada nas microestruturas das folhas de lótus.



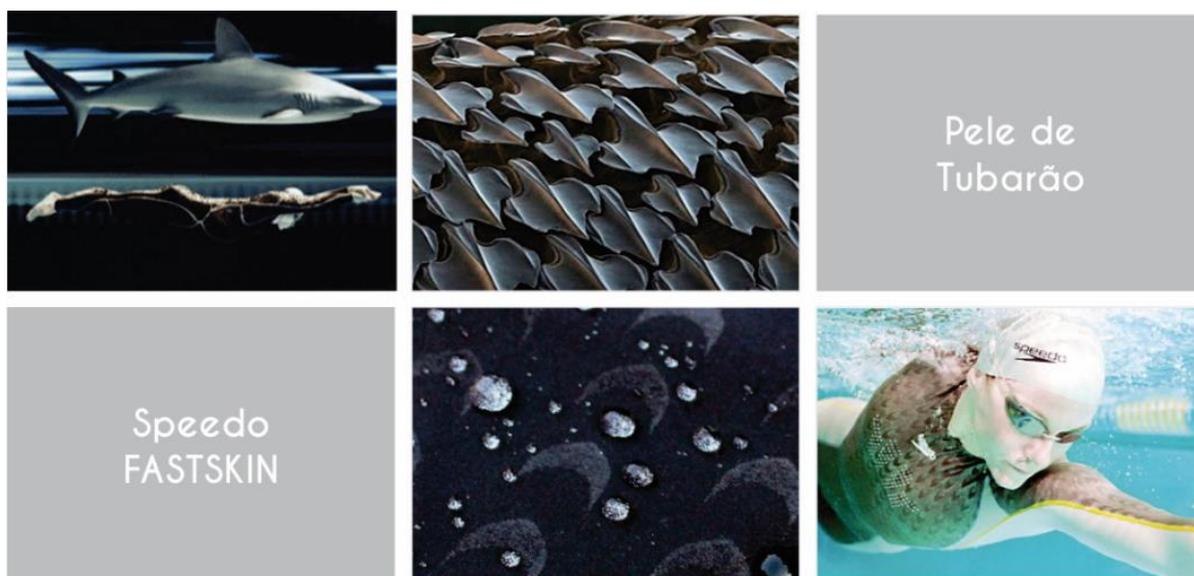
Fonte: (VERSOS, 2010).

Versos (2010) cita ainda outro exemplo de analogia funcional com a pesquisa das escamas da pele do tubarão, onde reside o segredo da sua alta performance em velocidade. Segundo especialistas, a água desliza através das micro ranhuras da pele do animal reduzindo a fricção. A aplicação deste estudo em roupas de natação da marca *Speedo Fastskin* é utilizada por campeões olímpicos. A textura destas vestimentas baseada nos “dentículos” da pele de tubarão tem como vantagens: a redução da resistência passiva de cerca de 4% e também da vibração muscular, aumentando a velocidade e o desempenho dos atletas. (**Figura 9**)

Nos tubarões estas micro escamas também impedem a fixação de pequenos crustáceos e de algas, uma inspiração para revestimentos sintéticos que poderão ser aplicados nos cascos de navios a fim de reduzir o atrito, poupando energia e também

esse inconveniente biológico que provoca manutenções, o que comprova mais uma vez que a analogia funcional pode gerar aplicações em diversos artefatos e não se limita apenas na forma do animal investigado, mas na função que foi identificada e que se deseja replicar.

Figura 9 – FASTSKIN da marca Speedo (Austrália), roupa de banho para competição de natação que imita a função de eficiência hidrodinâmica da pele de tubarão, resultando na redução do atrito e consequente aumento de velocidade.



Fonte: (VERSOS, 2010).

A **Figura 10** abaixo retrata mais 4 exemplos desse tipo de analogia. O primeiro é inspirado na função de aderência das patas da lagartixa, causada pela força intermolecular encontrada nos seus micro e nanopêlos que ligam as moléculas da pata do animal às moléculas da superfície, permitindo que se grudem até mesmo em superfícies lisas como o vidro. A partir deste estudo a empresa *Interface* criou o *TacTiles*, um sistema de instalação do carpete que usa conectores adesivos sem cola para unir as placas do carpete ao invés de colar no piso. Outras aplicações são usadas como adesivos para *smartphones* para adesão em vidros e painéis de carro.

Também há o exemplo do *Regen Energy*, sistema de gerenciamento automatizado de eficiência energética baseado na rede de comunicação de formigas e abelhas; Outro é o sistema de resfriamento passivo no shopping *Eastgate Center* de *Mick Pearce* no Zimbábue, que imita a função de autoregulação de temperatura dos cupinzeiros africanos, onde o centro utiliza o ar frio da noite para resfriar, e

durante o dia este ar sobe do térreo em direção aos pavimentos superiores através de chaminés; e por fim, o tradicional exemplo das placas solares que imitam a função das folhas de captação de energia solar.

Figura 10 – Exemplos de Analogia Funcional. TacTiles (*aderência das lagartixas*), Regen energy (*gerenciamento de energia do sistema de comunicação de abelhas*), Eastgate Center (*autoregulação de temperatura do cupinzeiro*) e placas solares (*Captação de energia das folhas*).



Fonte: http://www.interface.com/EU/en-GB/about/modular-carpet-tile/TacTiles-en_GB. Acesso em: 15 jul 2014.

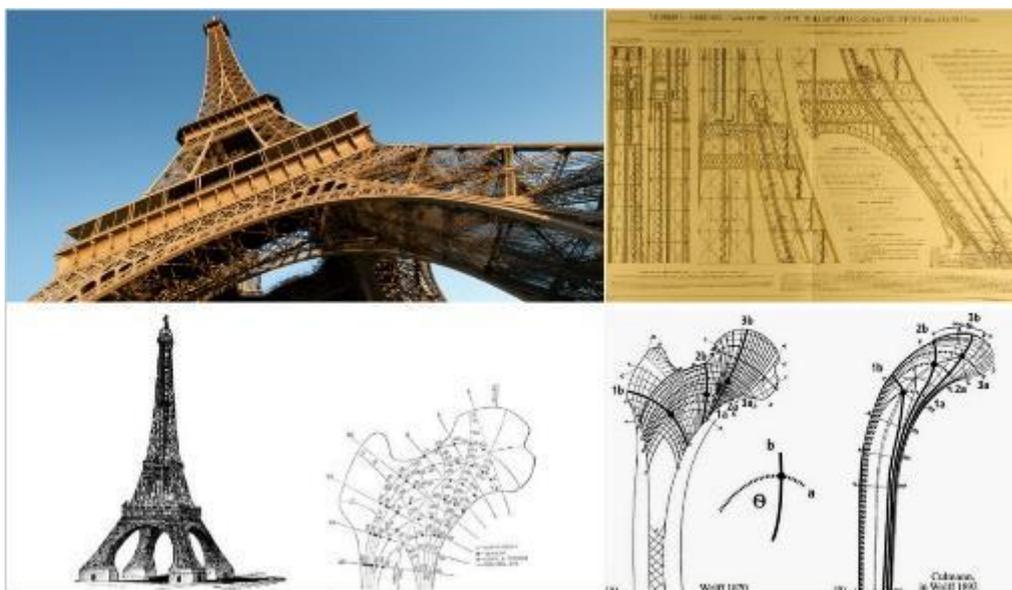
2.2.1.3 Analogia Simbólica (Semântica)

Na analogia simbólica estão os casos de imitação mais abstratos que não correspondem a fidelidade das formas nem necessariamente das funções. Desta forma os artefatos produzidos possuem correspondência com aspectos da estrutura natural analisada com certo grau de abstração inerente das interpretações autorais.

Um exemplo clássico é referido por Thompson (1961), a mais famosa Torre da Europa, a torre de *Gustave Eiffel* (1889), símbolo universal de Paris, construída em homenagem aos 100 anos da Revolução Francesa, cujos elementos estruturais foram baseados nos estudos do anatomista *Hermann von Meyer* sobre a cabeça do fêmur

humano, (**Figura 11**) que fornece uma ampla gama de movimentos e que é composta por um minúsculo conjunto de ossos chamados trabeculares. Mais tarde, *Meyer* demonstrou este trabalho para o engenheiro *Karl Cullman* que trabalhava projetando grandes guindastes, e este viu que as trabéculas estavam mais concentradas nas zonas de maior tensão, concluindo que o fêmur foi perfeitamente moldado para suportar grandes cargas. *Maurice Koechlin*, arquiteto assistente de Eiffel, 20 anos depois enquanto fazia a concepção da famosa torre, teria traduzido nesta sua impressão desse estudo de Cullman.

Figura 11 – Exemplo de analogia simbólica da Torre Eiffel inspirada no fêmur.



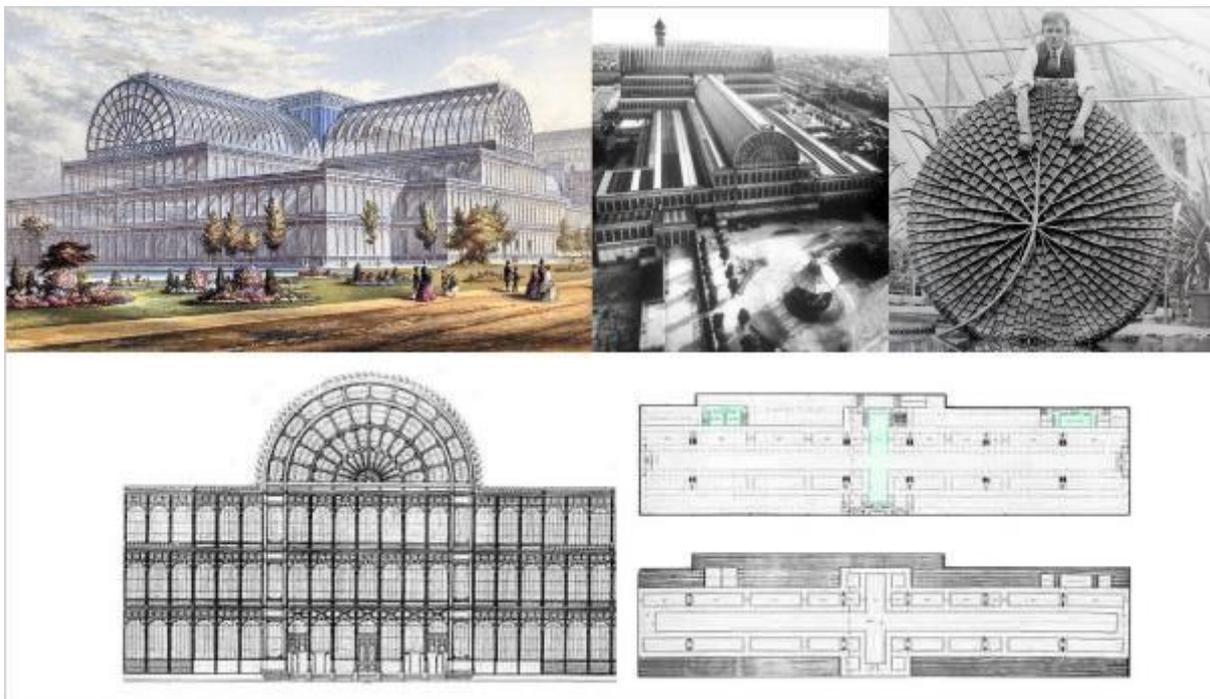
Fonte: (PEREIRA, 2013) e <http://elzo-meridianos.blogspot.com.br/2007/07/el-diseo-de-la-torre-eiffel-se-inspiro.html>) Acesso em: 24 jul 2014.

O Palácio de Cristal (Londres/Inglaterra, 1951) construído por Joseph Paxton para Exposição Universal é outro exemplo de analogia simbólica que teve sua inspiração na estrutura da planta amazônica Vitória-régia (**Figura 12**). Ele usou uma ilustração de uma das folhas durante uma palestra na *Royal Society of Arts*, em Londres, mostrando como apoiar uma estrutura de telhado curvo usando-a como uma referência para o projeto. (PEREIRA, 2013)

Não há tanta semelhança com o desenho da folha em si, que apresenta nervuras com estruturação radial, apenas na parte superior curva do edifício se demonstra essa analogia mais direta no arco central. O grande e inovador avanço

aqui foi a sua interpretação das nervuras no uso de vigas para a construção de edifícios leves, incorporando materiais como o ferro e o vidro.

Figura 12 – Exemplo de analogia simbólica da Torre de Cristal inspirada na Vitória-régia.



Fonte: (PEREIRA, 2013) e <https://arquitectandoideias.wordpress.com/2014/05/31/arquitectura-del-hierro-john-paxton/>. Acesso em 25 jul 2014.

Não se poderia deixar de fora as excêntricas e orgânicas construções do espanhol Antoni Gaudí, expressivos exemplos de analogia simbólica com predominância pela arquitetura *biomórfica*, cheia de curvas e contracurvas, cujos elementos da natureza são desenhados em vários detalhes. Experimentando formas e materiais novos, o arquiteto se dedicava à cada esquina e a cada pormenor numa organicidade que acabou por caracterizá-lo.

Sua atitude naturalista, foi previamente abordada por D'Arcy Thompson (1961) relembrando sobre a emblemática obra da igreja da *Sagrada Família* em Barcelona. Segundo Pereira (2013), Gaudí confere torsões parabólicas à fachada, fazendo uso de hipérbolas e espirais em várias partes da construção, preenchendo a obra de motivos vegetais destacando a sua atitude naturalista e orgânica, num contra-senso da arquitetura gótica da época, em que para ele, as linhas retas não refletiam as leis da natureza com suas formas curvas. Cruz (2012) também reforça o “espírito natural” de Gaudí traduzido num ar romântico e orgânico através da disposição das folhas,

caules, raízes das plantas, e também nas pétalas das flores nesta obra, onde as particularidades remetem para uma floresta ou mundo subaquático, apresentando no interior, um aspecto panorâmico de bosque encantado, onde os jogos de luzes e os estreitos pilares densificam essa atmosfera. As torres principais visíveis na fachada são inspiradas pela planta *Sedum Sediforme*, sendo pontuadas por pináculos ou flores.

As formas naturais, como as espirais ou helicoides presentes nos caracóis ou búzios são abundantes em suas obras. Esse crescimento exponencial presente em tantos exemplos naturais revela-se uma variante obsessiva no seu trabalho, através das torres, colunas, pináculos ou escadarias em caracol, dentre outros. Como ele próprio afirmou, “*Tudo sai do grande livro da Natureza, onde elementos como esta árvore junto ao meu atelier é o meu mestre*”. (CRUZ, 2012)

Além da Sagrada Família, Cruz (2012) também cita outros exemplos de analogia simbólicas que podem ser identificados nas varandas do *La Pedrera Casa Milá*, com delicadas folhas ornamentadas; no *Parque Güell*, com elementos biomorfos, tais como os répteis e/ou dragões; na *Casa Batlló*, coberta de “escamas”, etc. Estas obras artísticas com espaços cavernosos, cores, texturas e uma luminosidade tão peculiar são reflexos do olhar cheio de simbolismo de Gaudí, configurando bem como exemplo deste tipo de analogia. Na **Figura 13** alguns dos exemplos citados dessa arquitetura.

Figura 13 – Exemplo de analogia simbólica nas obras de Antoni Gaudí.



Fonte: (PEREIRA, 2013); (CRUZ, 2013); <http://justfunfacts.com/interesting-facts-about-casa-batllo/> e <http://www.dicasbarcelona.com.br/2015/05/parque-guell-em-barcelona-gaudi-espanha.html> Acesso em: 30 jul 2014.

2.2.2 PADRÕES DA NATUREZA

Tão importante quanto entender sobre as analogias com a Natureza é reconhecer e compreender alguns padrões existentes nela, formas e princípios recorrentes. Neste sentido, primeiro é bom observar que as construções da natureza viva se baseiam num sistema de construção único, relativamente simples: a célula. Os organismos unicelulares, plantas, animais mais complexos e os homens, são todos feitos de acordo com o mesmo sistema de construção, ou seja, por **modulação**.

Outro aspecto importante a ser observado é que as formas que predominam na Natureza são as *orgânicas*, ou seja, são as formas recorrentes dos organismos vivos caracterizadas por serem fluidas e curvas, na grande maioria, sem a rigidez geométrica das formas retas, e que por isto, apresentam maior grau de complexidade que a geometria tradicional.

Mas mesmo em menor quantidade e não exatamente com um rigor hermético, também são se verificam geometrias tradicionais como elipses, polígonos regulares e irregulares (retângulos, triângulos, hexágonos, pentágonos, losangos, etc) e geometrias espaciais como esferas, elipsoides, cones, cilindros e poliedros. Visto que os gregos desenvolveram a própria geometria (que do grego quer dizer “*medir a terra*”) a partir da observação de fenômenos naturais.

Círculos, elipses, elipsoides e esferas, podem ser encontrados na configuração e no movimento dos planetas, estrelas, nos olhos, em sementes; atc.; **pentágonos**, podem ser facilmente identificados em animais marinhos, no interior de frutos, em flores e plantas; **hexágonos e poliedros**, em colmeias de abelhas e nos olhos das moscas, na pele de insetos e répteis, etc.

Além disso, há ainda os muitos exemplos de **espirais e fractais**, presentes no nascimento de plantas, de fetos, de folhas, de galáxias, sendo por isto considerada a geometria da natureza, pois relaciona as formas complexas naturais com a teoria dos fractais desenvolvida por *Mandelbrot*.

Outros padrões recorrentes em relação as formas na natureza referem-se aos conceitos de **escala, equilíbrio e simetria**. É possível perceber que as formas naturais se manifestam em diferentes *escalas*. Em comparação com as dimensões

humanas, o sol (macroescala) ou a célula (microescala), podem representar a ideia de grande ou pequeno se os parâmetros forem relativos. Se o parâmetro para a célula for o DNA, a célula seria uma macroescala, assim como se o parâmetro do sol for a galáxia, o sol seria uma microescala. Até mesmo o átomo, pode configurar um macroescala em comparação com os seus componentes.

A *simetria* pode ser encontrada em diversos exemplos na natureza. A maioria das folhas podem ser divididas por um eixo central e, portanto, possuem simetria refletiva, outro exemplo somos nós humanos, embora não sejam partes iguais de fato, pode-se considerar desta forma. Já em muitas flores, frutos e animais marinhos é possível observar a simetria radial onde se observa partes iguais ao redor de um eixo central. O processo cognitivo, acostumado à regularidade e percepção lógica, absorve a simetria como um elemento tranquilizante, capaz de poupar o Homem do esforço cognitivo durante a contemplação de algo assimétrico, e por isso está fortemente associado ao conceito de harmonia nos parâmetros cognitivos da mente humana, pois reforça a percepção de *equilíbrio*.

Sobre as relações da geometria com a natureza orgânica e inorgânica, Ghya (1977) afirma que em um estado final de equilíbrio, os elementos de formações cristalinas e reino inorgânico são encontradas de forma recorrente formas geométricas como tetraedros, cubos, octaedros e derivados arquimedianos, com simetrias ortogonais e oblíquas. Já nos seres vivos da botânica e da zoologia são mais associados os corpos platônicos pentagonais, dodecaedro, icosaedro e derivados, onde existe preferência pelas formas pentagonais relacionadas com a ***Proporção Áurea e os Números de Fibonacci***.

Embora exista essa tendência, isto não deve ser tratado com rigidez hermética, pois se observa que as formas orgânicas são regidas pela estratégia da natureza no que se refere a economia de matéria e substâncias em um sistema físico-químico em que muitas espécies são geradas a partir de uma luta contra a gravidade terrestre, tendo portanto que buscar o equilíbrio com todas as forças de perturbações naturais as quais estão expostas, adaptando-se a fenômenos naturais como: vento, sol, chuva, etc. (GHYCA, 1977)

Thompson (1961) descreve que a forma de um objeto na natureza é um diagrama de forças em que se pode avaliar ou deduzir as forças que estão agindo ou tiver agido sobre ele; e que através da ação dessas forças internas e externas, se cria uma ampla diversidade de formas de um inventário de princípios básicos. Sobre esta influência das forças externas faz ainda a observação de que se “a magnitude das forças gravitacionais, fosse lavada até o dobro do valor real, a maior parte dos animais terrestres tenderiam a ter uma forma semelhante à dos répteis, com extremidades curtas. Ao contrário, se reduzisse à metade, seriam leves e delgados, muito ativos e requereriam menos energia”.

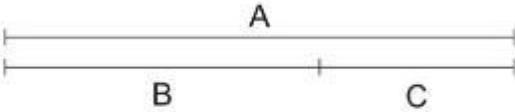
O equilíbrio dessas forças determina as formas naturais e pode ser observado em relação à gravidade, se fazendo presente na sincronia dos movimentos dos planetas, dos animais, do homem, na estabilidade das árvores, etc.; E também em relação a estética e a composição, como no caso dos padrões cromáticos da pele da cobra, nas escamas dos peixes, na gradação de luminosidade entre o dia e a noite, etc.

2.2.2.1 Proporção Áurea

A *Proporção Áurea (de Ouro, Dourada, Divina)* também chamada de *Razão Áurea (de Ouro, Dourada, Divina, Sublime)* ou *Média, Secção Áurea (de Ouro, Dourada, Divina)*, é uma constante real algébrica irracional que foi explicada matematicamente pela primeira vez por Euclides de Alexandria em seu livro *Elementos*, por volta de 325 a.C., mas foi o escultor grego Fídias que a disseminou em suas obras, por isto ela é representada em sua homenagem pela letra grega Phi: Φ (maiúscula) ou ϕ (minúscula). Calculada matematicamente, ela representa uma razão de aprox. 1,618 para 1. Desta forma, $\phi = 1,618$ e corresponde ao *Número Áureo (de Ouro, Dourado, Divino)*. Dele derivam o *Retângulo Áureo (Dourado, de Ouro)*, o *Triângulo Áureo (Dourado, de Ouro)*, a *Espiral Áurea (Dourada, de Ouro)* e o *Ângulo Áureo (Dourado, de Ouro)* que é igual a 137,5°. **(Figura 14)**

Euclides dividiu a linha em duas secções de modo que a razão de toda a linha para a parte maior é a mesma que a da parte maior para a menor, na figura x está a demonstração do cálculo algébrico para esta razão que resulta no número irracional (Phi) $\phi = 1,6180339887\dots$ (HEMENWAY, 2010)

Figura 14 – Ilustração do cálculo algébrico da Razão Áurea.



$\frac{A}{B} = \frac{B}{C}$

Se $A=B+C$ e $B=C\phi$ então,

$$\frac{A}{B} = \frac{B}{C} = \phi \rightarrow \frac{B+C}{B} = \frac{B}{C} \rightarrow \frac{\cancel{C}\phi + \cancel{C}}{\cancel{C}\phi} = \frac{\cancel{C}\phi}{\cancel{C}} \rightarrow \frac{\phi+1}{\phi} = \phi \rightarrow$$

Equação quadrática

$$\rightarrow \phi^2 - \phi - 1 = 0 \rightarrow \text{então, } a=1, b=-1 \text{ e } c=-1.$$

Por Bháskara,

$$\rightarrow \phi = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \rightarrow \phi = \frac{-(-1) \pm \sqrt{(-1)^2 - 4 \cdot 1 \cdot (-1)}}{2 \cdot 1} \rightarrow$$

$$\rightarrow \phi = \frac{1 \pm \sqrt{1 + 4}}{2} \rightarrow \phi = \frac{1 \pm \sqrt{5}}{2} \rightarrow$$

$$\rightarrow \phi = 1,61803398875\dots$$

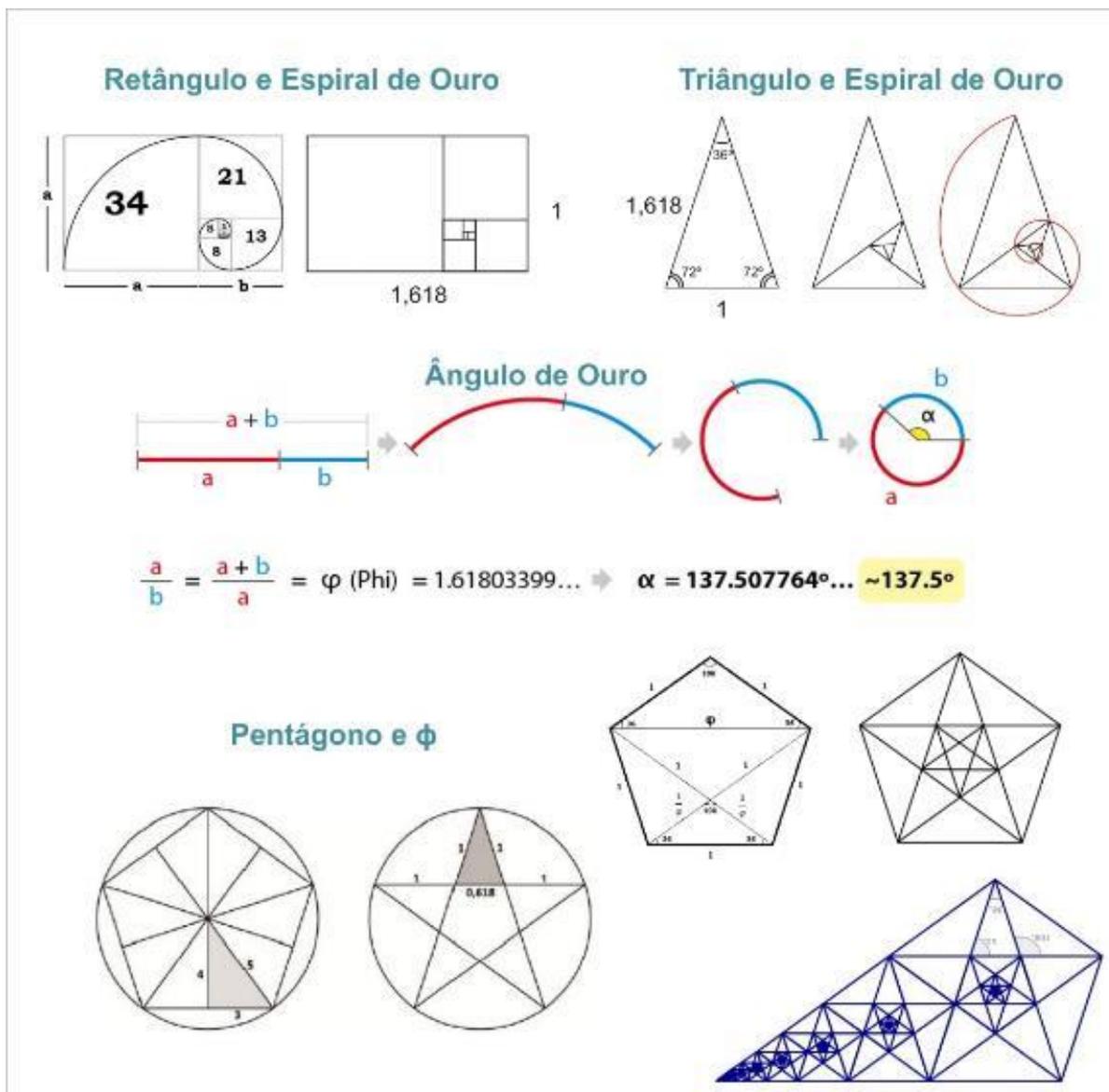
Fonte: Elaborado pela autora, adaptado de (HEMENWAY, 2010).

Hemenway (2010) apresenta algumas definições correlatas à Proporção Áurea que serão ilustradas na **Figura 15**, são elas:

- **Retângulo Áureo:** É um retângulo cujas dimensões são de Proporção Áurea. Quando a medida de um lado é uma unidade, o outro lado medirá ϕ .
- **Triângulo Áureo:** É um triângulo isósceles com uma razão de ϕ entre o seu lado e a sua base. Os dois ângulos na base são 72° e o do vértice é 36° . Ele ainda tem uma propriedade em que pode ser dividido em dois triângulos menores que também são Triângulos Áureos.

- **Espiral Áurea:** Uma espiral logarítmica ou equiangular é um tipo de especial de curva em espiral que aparece frequentemente na natureza. É uma versão particular que se baseia na Proporção Divina.

Figura 15 – Ilustração com outras geometrias relacionadas com a Proporção Áurea.



Fonte: Elaborado pela autora, adaptado de (HEMENWAY, 2010).

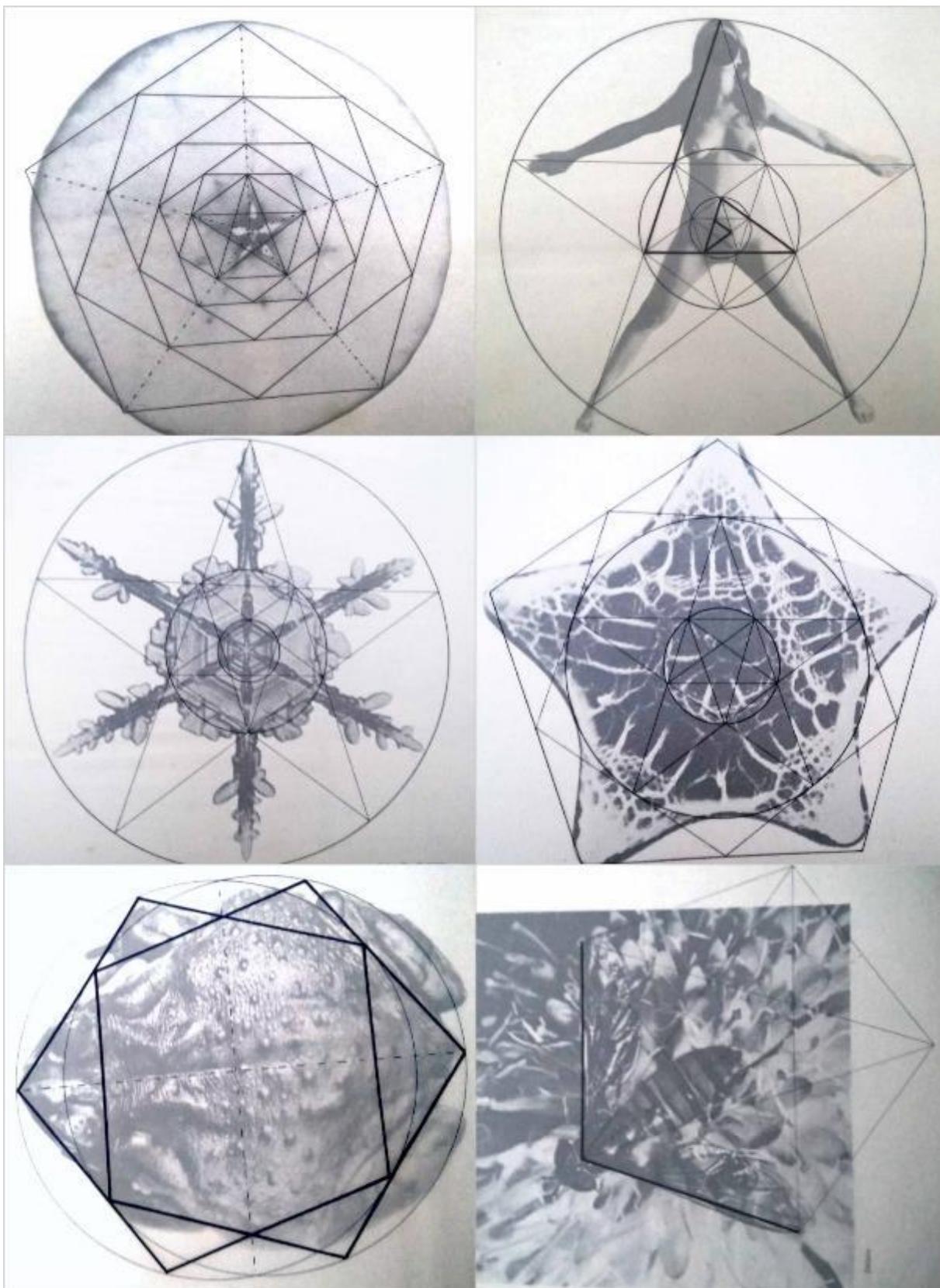
O fascínio do homem pela Proporção Áurea ao longo dos séculos é em grande parte, devido às suas notáveis propriedades de harmonia, regeneração e equilíbrio, dentre outras. A harmonia se faz presente nos princípios de design que a natureza usa e que são evidentes nos padrões encontrados em plantas, conchas, ventos e nas estrelas. O princípio regenerativo revela-se em formas e sólidos que formam a base de tudo desde o DNA ao contorno do universo. O equilíbrio encontra-se na espiral do ouvido interno humano e reflete-se na forma

desenvolvida do embrião humano que o lança para a existência.
(HEMENWAY, 2010, p.5)

Traduzido em formas geométricas a Proporção Áurea, descreve muitos dos padrões relacionados aos princípios de crescimento e dinamismo observados na natureza. Como visto na **Figura 16**, o Pentágono, figura geométrica do qual também deriva o pentagrama, também possui relação com essa razão e são vários os estudos que têm encontrado relações dos segmentos humanos, de animais e de plantas com o número ϕ . Na **Figura 17**, algumas imagens compiladas da publicação *Sezione Aurea e Forme Naturale* de Aldo Montù (1980), em que constata essas muitas relações com o pentagrama e o pentágono; e na figura y outros estudos de Doczi (1990) em que relaciona esta razão em animais e no próprio homem demonstrada pela análise do Homem de Vitruvius de Leonardo Da Vinci.

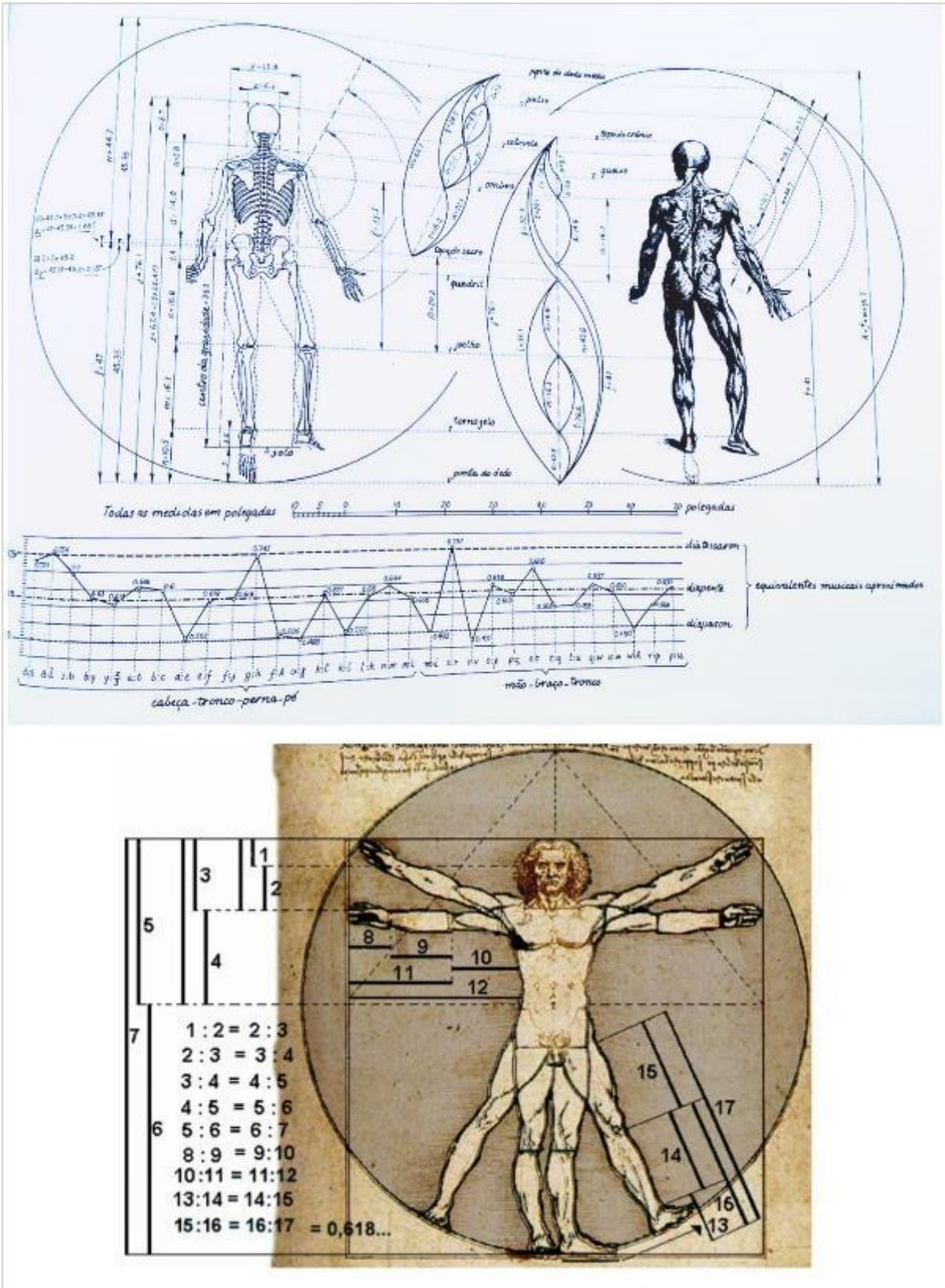
Desde a Antiguidade, a proporção áurea é usada na arte, em pinturas renascentistas, na música, na literatura, na arquitetura, onde existem exemplos de edificações com simetria admirável, como as pirâmides do Egito, nas catedrais góticas europeias, etc. Leonardo Da Vinci, assim como diversos artistas, artesãos, escultores, matemáticos, arquitetos e filósofos gregos usaram exaustivamente a proporção divina em suas obras. Por ser tão recorrente e apoiado pela matemática, o número de ouro ganhou fama de ideal, sendo ainda hoje utilizada por diversos pesquisadores, artistas, designers, engenheiros e demais projetistas. Na **Figura 18** Doczi (1990) mostra essas razões encontradas no Parthenon de Atenas, no Coliseu de Roma.

Figura 16 – Estudos das relações entre o pentágono, o pentagrama e a proporção áurea e a natureza. Em frutos, nos segmentos humanos, nos segmentos de animais.



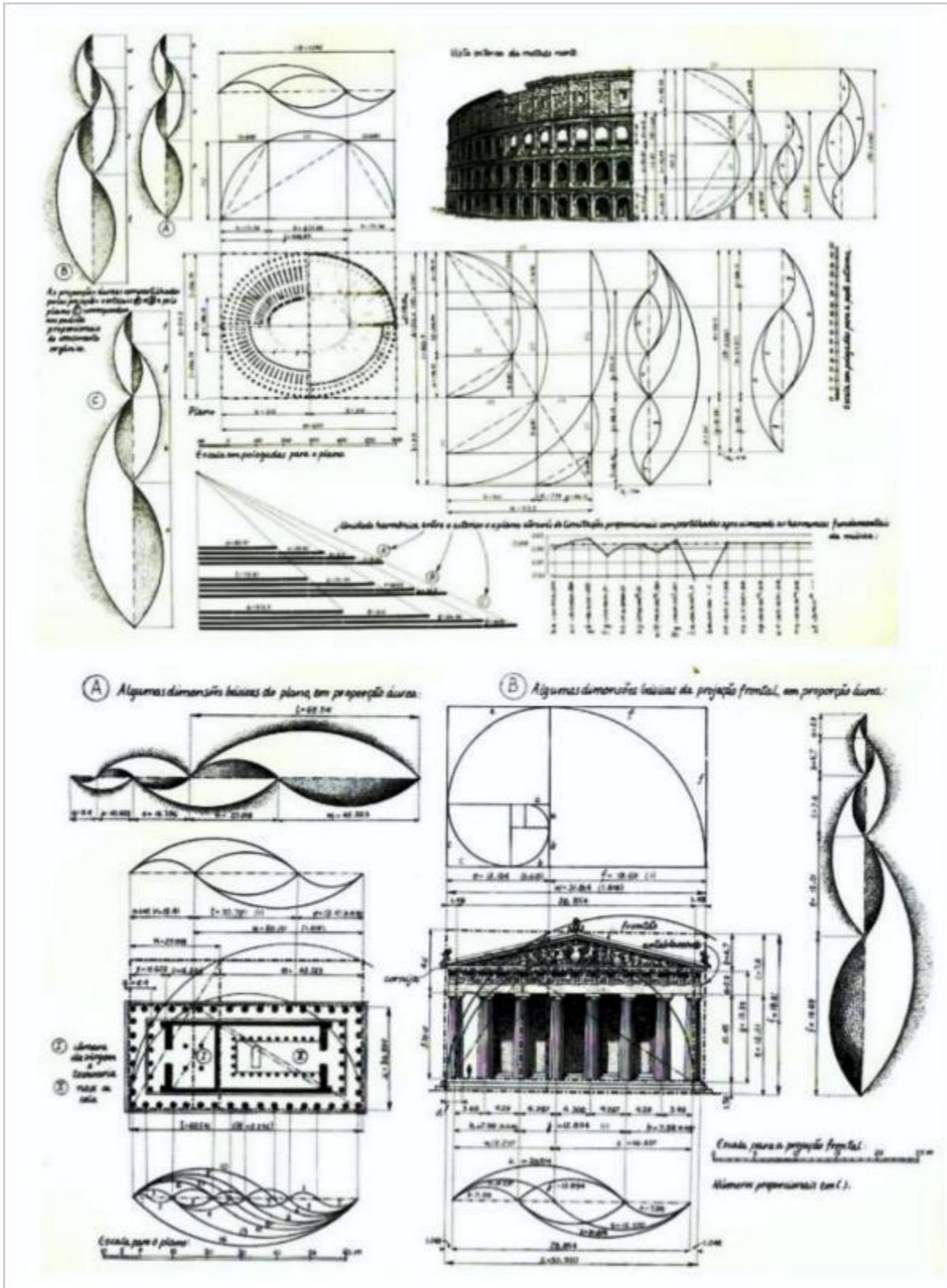
Fonte: (MONTÙ, 1980).

Figura 17 – Exemplos da proporção áurea no Homem, detalhe para o Homem de Vitruvius de Da Vinci.



Fonte: (DOCZI, 1990).

Figura 18 – Razão Áurea no Parthenon de Atenas e no Coliseu.



Fonte: (DOCZI, 1990).

2.2.2.2 Números de Fibonacci

Esta ordem matemática foi referida pela primeira vez, no início do séc. XIII, pelo matemático italiano **Leonardo de Pisa (Fibonacci)**. A sua famosa sequência é resultado da investigação de reprodução em coelhos e consiste numa infinidade de números, em que, a partir do terceiro número dessa sequência, a soma dos dois números anteriores é o resultado do número seguinte. (HEMENWAY, 2010)

No livro de *Líber Abacci* de Fibonacci é apresentado o seu famoso problema da reprodução de coelhos, que está relacionado a uma das mais importantes descobertas da matemática:

" Um homem pôs um par de coelhos num lugar cercado por todos os lados por um muro. Quantos pares de coelhos podem ser gerados a partir desse par em um ano se, supostamente, todos os meses cada par dá à luz um novo par, que é fértil a partir do segundo mês?"

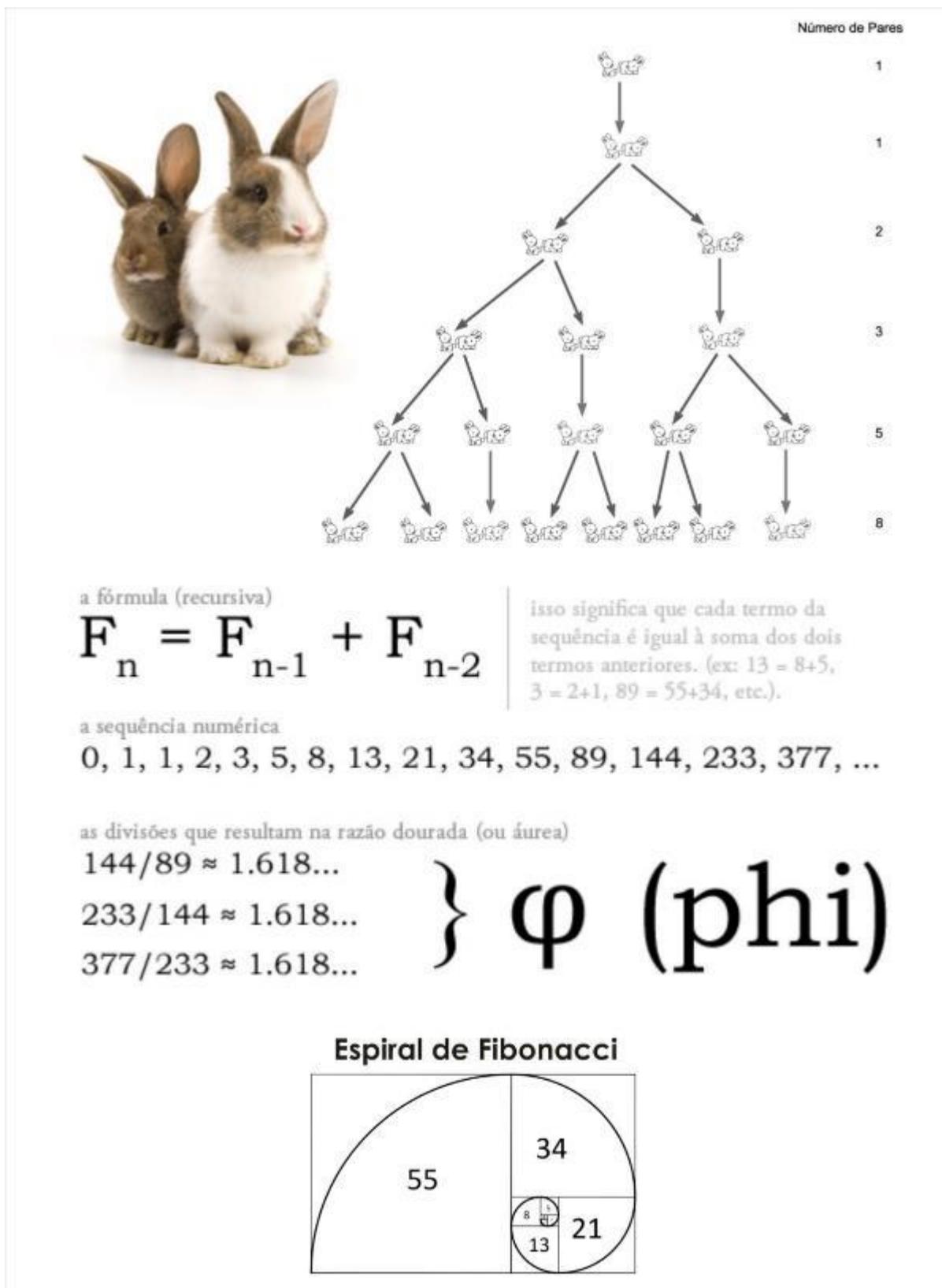
1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144, ...

A resposta é que o número de pares de coelhos em determinado mês, é a soma dos pares de coelhos existentes nos dois meses anteriores a este. Matematicamente, tem-se:

$F_n = F_{n-1} + F_{n-2}$, onde n é um número natural.

Uma característica importante encontrada na sequência de Fibonacci é que a divisão (razão) de um número da sequência com o seu anterior, a partir do terceiro número da sequência, tende a se aproximar da Proporção Áurea. Outra característica peculiar se refere ao fato de que se pode formar também uma espiral a partir destes números, a **Espiral de Fibonacci**. Basta dispor de quadrados com lados sendo os números da sequência lado a lado e depois traçar um quarto de circunferência inscrito em cada quadrado obtendo uma espiral formada pela concordância de arcos cujos raios são os números da sequência de Fibonacci. (HEMENWAY, 2010) (**Figura 19**)

Figura 19 – Sequência de números de Fibonacci a partir do problema formulado da reprodução de coelhos; a fórmula recursiva, as divisões que resultam na Proporção Áurea e a espiral de Fibonacci.



Fonte: Elaborado pela autora, do banco de imagens do laboratório do BIODESIGN.

Estudos comprovam que estes números são recorrentes na natureza em diversos aspectos, como por exemplo, nos padrões de folhas e de sementes de plantas na árvore genealógica do zangão das abelhas, no crescimento “modular” da Natureza, onde se inserem as espirais, dentre outros.

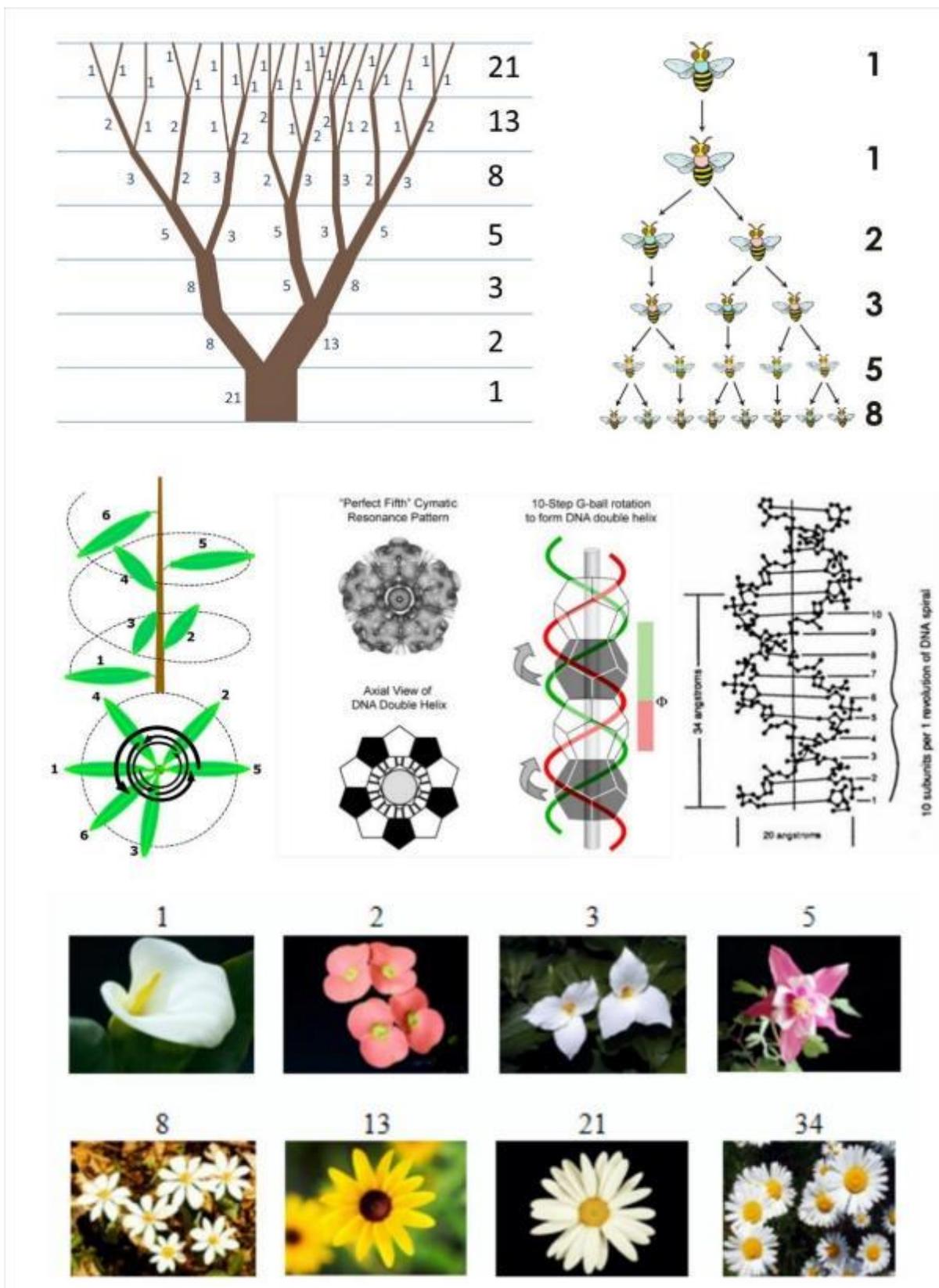
Hemenway (2010) cita que se encontram estes números nas medidas do DNA (base de toda a vida), que mede 34 Ångströms de comprimento por 21 Ångströms de largura para cada ciclo completo da sua dupla hélice em espiral, ambos números de Fibonacci, onde sua razão é aproximadamente 1,6190..., que é próximo do número ϕ (1,618...). Um corte transversal no topo da dupla hélice forma um decágono, no qual cada espiral tem a forma de um pentágono, geometria em que também já foi mostrada sua relação com o ϕ .

A mesma autora também cita que no caso das abelhas, como o macho, zangão, nasce por meio de ovos não fertilizados, esse padrão, que mantém o equilíbrio da colmeia também garante com que a árvore das gerações sucessivas das abelhas seja de acordo com os números da sequência de Fibonacci, pois possui 1 só progenitor (a abelha rainha), 2 avós (os pais da abelha rainha), 3 bisavós, 5 trisavós, 8 tetravós, e assim por diante. (HEMENWAY, 2010)

Nas flores estes números se evidenciam de maneira bem visível através dos números das pétalas, por exemplo: os copos de leite, antúrios (1 pétala); coroa de cristo (2 pétalas); lírio, íris, orquídeas (3 pétalas); rosa silvestre (5 pétalas); margaridas (13, 21, 34, 55 ou 89 pétalas); crisântemos (34 pétalas), etc. Embora não seja uma regra fixa e que possam ocorrer variações, o que é notável é a regularidade com que estes números persistem de maneira mais comum. Também na filoxia, ou seja, no estudo da disposição das folhas, sementes, espinhos e pétalas em plantas estes números são encontrados em suas espirais; tais como nos girassóis que têm suas sementes distribuídas em 34 espirais no sentido horário e 55 no sentido anti-horário. Mas não apenas neste caso, ananases, milho, trigo, amoras, framboesas, morangos, espinhos de cactos e de rosas, também são exemplos de pesquisas em que foram detectados relação com estes números. (HEMENWAY, 2010)

A **Figura 20** apresenta alguns desses exemplos comentados dos números de Fibonacci na natureza:

Figura 20 – Exemplos de identificação dos números de Fibonacci nas ramificações dos galhos de uma árvore; na genealogia do zangão das abelhas; na fitolaxia; no DNA; nas pétalas das flores.

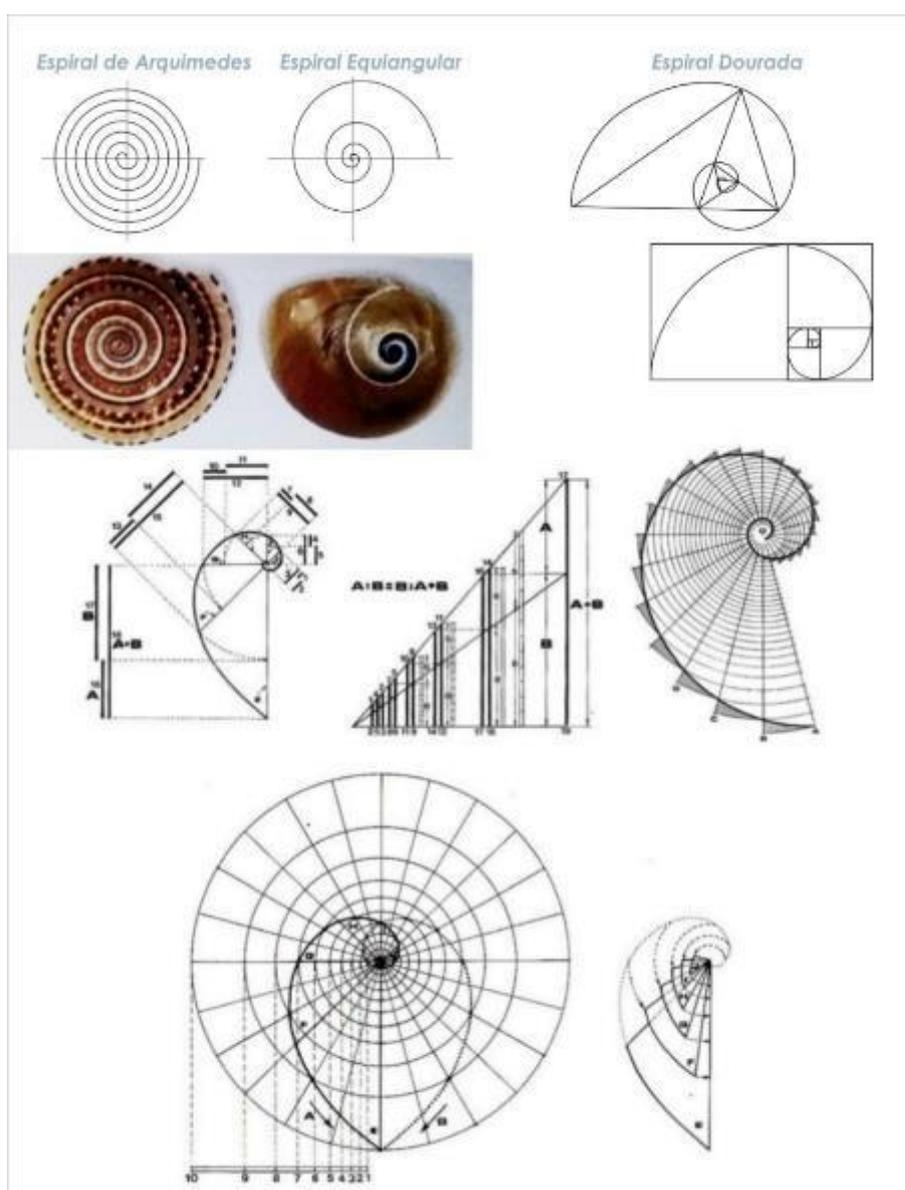


Fonte: Elaborado pela autora, do banco de imagens do laboratório do BIODESIGN.

2.2.2.3 Espirais

Estas formas foram estudadas pelos gregos, a espiral de Arquimedes, a de distâncias constantes e a espiral logarítmica de Descartes (também chamada de equiangular), com crescimento em progressão geométrica (**Figura 21**). Todas as espirais têm em comum o fato de se desenrolarem em torno de um ponto fixo a uma distância variável. A espiral dourada, também chamada de espiral do crescimento é logarítmica, e pode ser construída geometricamente através do retângulo ou triângulo áureo como mostra a figura abaixo. (HEMENWAY, 2010)

Figura 21 – Espirais de Arquimedes, Equiangular e Áurea.



Fonte: (HEMENWAY, 2010) e (DOCZI, 1990).

A espiral logarítmica foi estudada por *Jacob Bernoulli* (1654-1705), que chamou esta curva de *spira mirabilis* (em latim quer dizer espiral maravilhosa), e pode ser escrita na forma de:

$$\log(r/R) = \Theta \cot \alpha$$

Que resulta de sua expressão analítica nas coordenadas polares r e θ :

$$r(\Theta) = R e^{\Theta \cot \alpha}$$

Onde R é o raio associado a $\Theta = 0$. Esta expressão apresenta a distância à origem, O , de um ponto da curva em função de Θ .

Se a amplitude α for 90° , a espiral equiangular é uma circunferência, mas se o ângulo não for reto, isto permite que a espiral cresça, este fenômeno ocorre, por exemplo, no crescimento gnomônico das conchas em moluscos (**Figura 22**), onde o animal cresce, mas mantêm sempre a mesma forma. (PICADO, 2006)

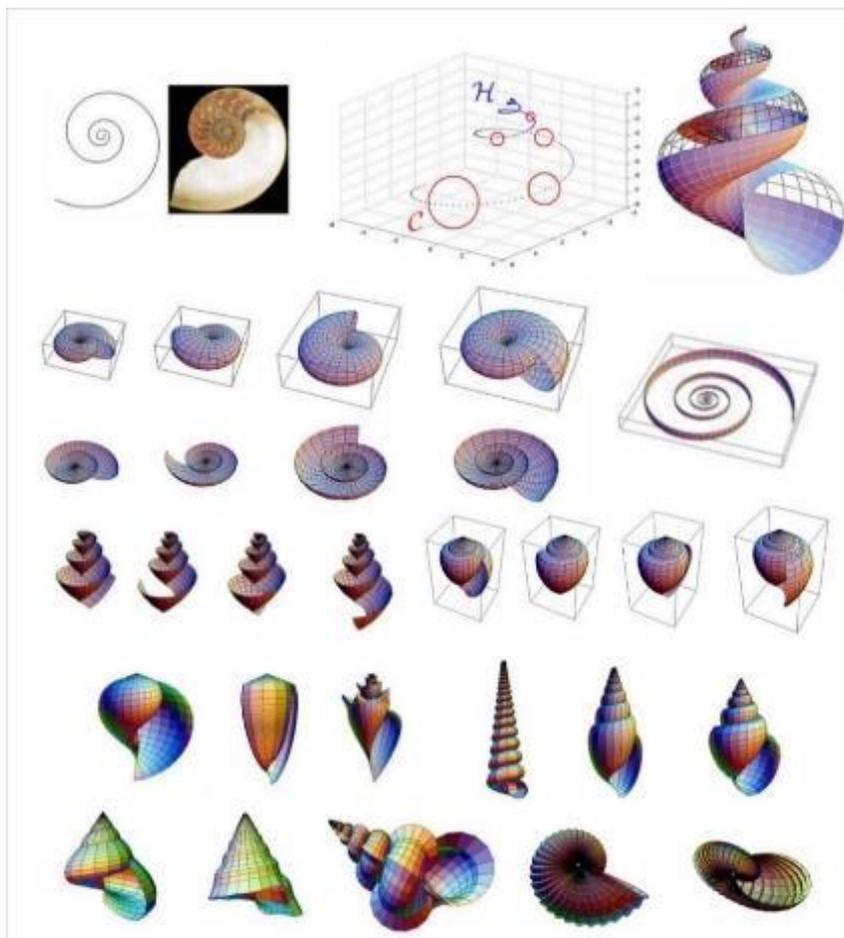
Em resumo, o molusco não alarga a sua concha de modo uniforme: adiciona somente material numa das extremidades da concha (a extremidade aberta ou “de crescimento”); e o faz de maneira que a nova concha seja sempre um modelo exato, à escala, da concha menor. A figura x seguinte mostra o caso típico do crescimento da concha dos náutilos, também do tipo cone, assim como ilustra alguns dos vários tipos de conchas. Em cada caso o material novo é progressivamente acrescentado na abertura da concha. (PICADO, 2006)

Este padrão de crescimento é tão recorrente que por muitos também é chamado de "lei da natureza", pois são frequentemente encontrados desde o exemplo mais clássico do náutilo e nas demais conchas de moluscos como na disposição de algumas plantas suculentas, na formação de ventos, no quebrar das ondas, no enrolar do corpo, calda, tromba, língua, tentáculos, antenas de animais, no crescimento maioria dos seus cornos, garras, cabelos, nas teias de aranha, na disposição das sementes do girassol, crescimento das plantas e de frutos, no nascimento das plantas e dos embriões, etc. (**Figura 23**)

As espirais na natureza representam o princípio dinâmico da regeneração e de crescimento simétrico e equilibrado. A vida está a expandir-se, a desenvolver-se a ser prolongada; ou está a diminuir, a dissolver-se, a ruir. Ao ver uma folha a se desenrolar ou um padrão de pétalas numa rosa, se reconhece a espiral perfeita e delicada. Na água e nas nuvens, se formam e desaparecem; e também no corpo humano, no mesmo desabrochar que se vê nas plantas, no movimento do embrião. (HEMENWAY, 2010)

Os braços das galáxias também são considerados espirais logarítmicas. Na Via Láctea, os astrônomos dizem que existem quatro braços espirais maiores, cada um deles de aproximadamente 12 graus; A formação dos ventos, dos ciclones tropicais, como os furacões, também são; e Hemenway (2010) também comenta sobre as espirais no corpo humano: no redemoinho do topo da cabeça, nos folículos dos cabelos, nas digitais, na disposição das fibras do coração, no embrião, no ouvido interno, no DNA, etc. (**Figura 24**)

Figura 22 – Espirais logarítmicas no crescimento em diversos tipos de conchas.



Fonte: (PICADO, 2006).

Figura 23 – Exemplos de espirais na natureza. Nos cornos da ovelha, na língua da mariposa, no enrolar-se do embuá, na disposição das folhas na succulenta, no náutilo, no nascimento das plantas, na disposição das sementes do girassol, no enrolar da cauda do camaleão e da tromba do elefante, na formação dos ventos, na disposição das folhas nas plantas e a formação das ondas.



Fonte: Elaborado pela autora, do banco de imagens do laboratório do BIODESIGN.

Figura 24 – Espirais nos braços das galáxias (nesta imagem a Via Láctea), em digitais dos dedos, no desenvolver de embriões (nesta imagem, um embrião humano), na cóclea do ouvido interno humano, no DNA, no redemoinho do topo da cabeça e na imagem ampliada dos folículos do cabelo.



Fonte: Elaborado pela autora, do banco de imagens do laboratório do BIODESIGN e (HEMENWAY, 2010).

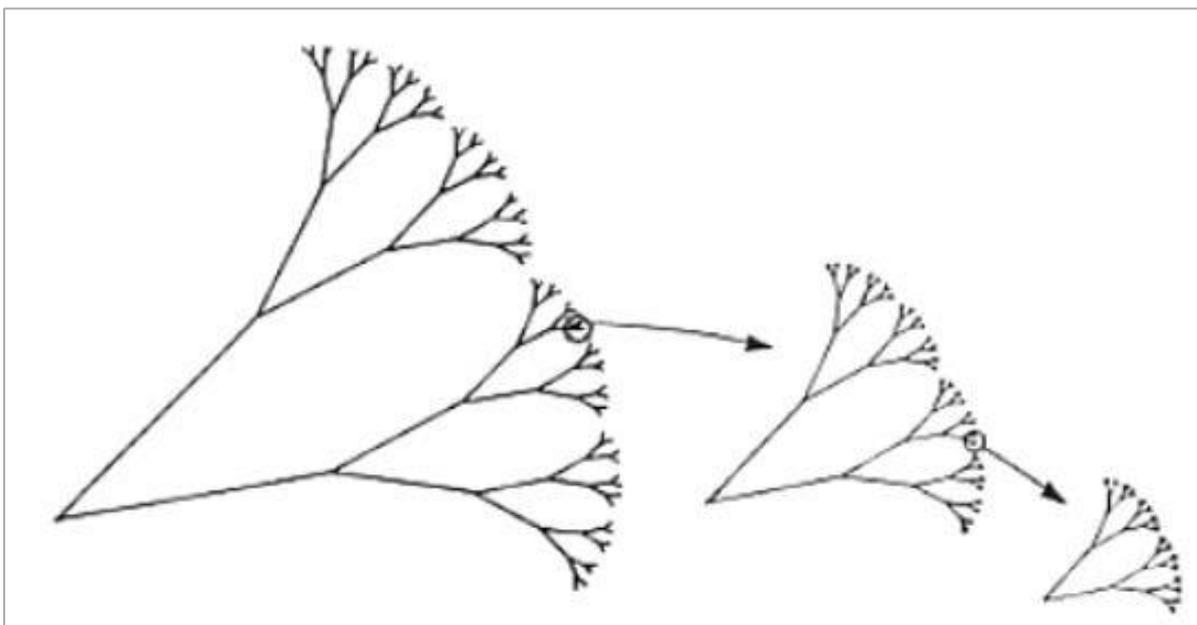
2.2.2.4 Fractais

O termo foi criado em 1975 na publicação *Les Objets Fractals: Forme, Hasard et Dimension* de Benoît Mandelbrot, matemático francês nascido na Polónia, que descobriu na década de 70 do século XX a geometria fractal, também chamada de

geometria da natureza, com suas dimensões *fracionais*, cujo termo é derivado a partir do adjetivo latino *fractus* e do verbo *frangere*, que significa “quebrar” ou “criar fragmentos”, e é usado para descrever um grupo particular de formas irregulares que não estão de acordo com a geometria euclidiana. (HEMENWAY, 2010)

As principais propriedades que caracterizam os fractais são a *auto semelhança*, a *complexidade infinita* e as *dimensões fracionadas*. A **auto semelhança** significa que eles parecem ter cópias de si próprias escondidas no interior do original, assim, um fractal pode ser definido como a repetição de uma forma específica, repetida exponencialmente de forma infinita (**Figura 25**). Pode ser entendida também como uma simetria através das escalas, assim, infinitamente uma pequena porção do fractal pode ser vista como uma cópia do todo em uma escala menor. (MIRANDA *et al.*, 2008)

Figura 25 – Exemplo de uma estrutura fractal construída iterativamente retratando a característica de auto semelhança. A construção desta estrutura inicia-se com um “galho” em formato de V onde a metade superior de cada segmento desse V é substituída por outro V com metade do comprimento e largura mantendo-se sempre o mesmo ângulo. Este processo continua infinitamente e um fractal com formato de árvore é gerado. Para infinitas iterações, verifica-se a complexidade infinita da estrutura.

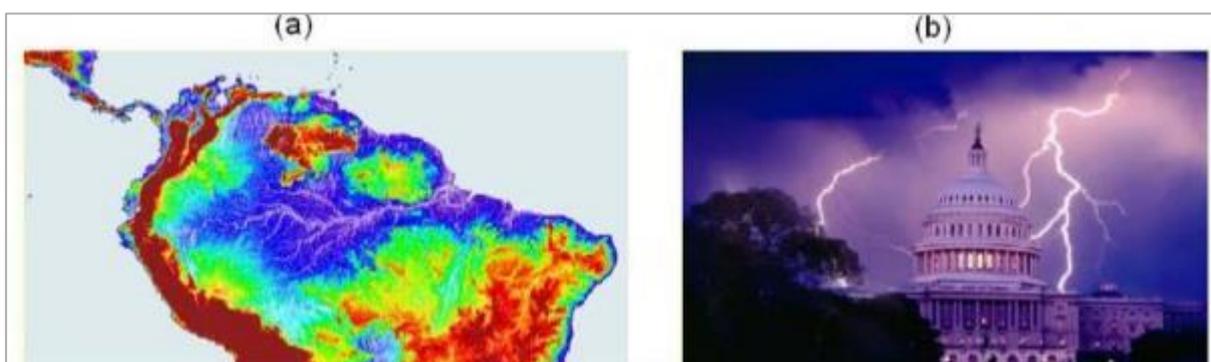


Fonte: (MIRANDA *et al.*, 2008).

A **complexidade infinita** refere-se ao fato de que o processo de geração de um fractal é recursivo, ou seja, quando se executa um determinado procedimento, no decorrer da mesma encontra-se como sub-procedimento o próprio procedimento anteriormente executado. Vale salientar que, no caso da construção iterativa de um fractal matematicamente definido, dispõe-se de um número infinito de procedimentos a serem executados, gerando-se assim uma estrutura infinitamente complexa. (MIRANDA *et al.*, 2008)

Já a **dimensão fracionada** refere-se a uma fração, ou seja, a um valor não inteiro de dimensão, que representa o grau de ocupação da estrutura no espaço que a contém, diferente do que ocorre na Geometria Euclidiana, onde um ponto possui dimensão zero, uma linha possui dimensão um, uma superfície possui dimensão dois e um volume possui dimensão três. Enquanto os sólidos possuem um número inteiro e limitado de dimensões, a geometria fractal poderá oferecer infinitas dimensões fracionárias, repetidas a diferentes escalas. Miranda *et al.* (2008) cita como exemplos, a dimensão fractal da bacia fluvial do rio Amazonas que é 1.85 e dos relâmpagos no espaço tridimensional que é 1.51. **(Figura 26)**

Figura 26 – (a) Bacia do rio Amazonas obtida pelo radar de altimetria ERS-1, com dimensão fractal 1.85 (www.esa.int). (b) Tempestade no Capitólio, com raios cuja dimensão fractal é 1.51.



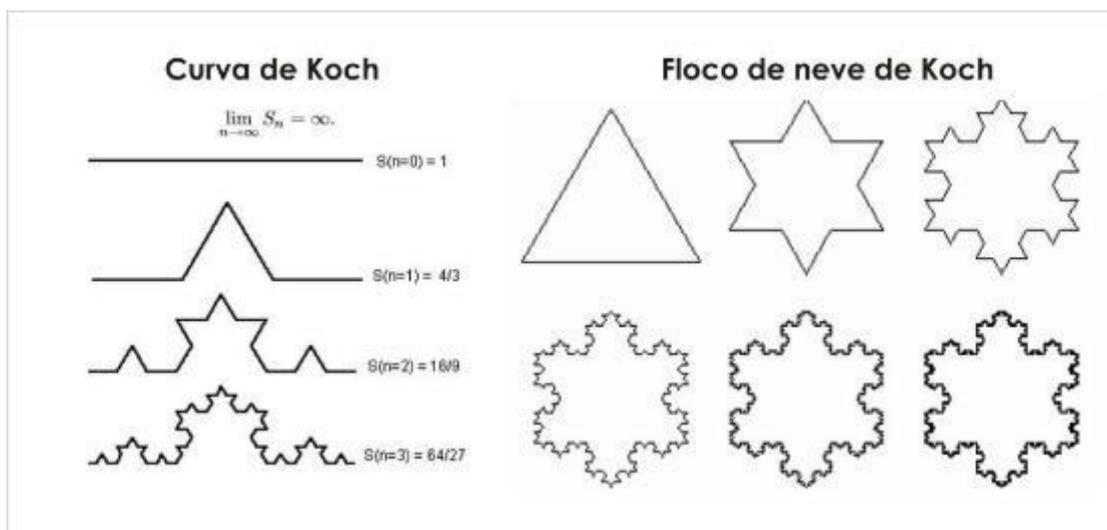
Fonte: (MIRANDA *et al.*, 2008).

Ao estudar a variação dos preços de algodão, Mandelbrot detectou um fenômeno: a *invariância de escala*, que já era conhecido de outros matemáticos, tais como: *George Cantor, Giuseppe Peano, David Hilbert, Helge Von Koch, Pierre Fatou, Waclaw Sierpinski e Gaton Julia*. Antes mesmo do termo fractal, estes pesquisadores já estudavam geometrias com estas características auto similares. Na época, eram consideradas “monstros matemáticos” uma vez que desafiavam as noções comuns

de infinito e para as quais não havia explicação objetiva, já que possuíam a propriedade de infinita complexidade onde as medidas clássicas de comprimento, área ou volume perdiam o sentido intuitivo. Estudando estes padrões irregulares com o auxílio do cálculo computacional, Mandelbrot finalmente chegou ao conceito de auto semelhança em escalas e elucidou a teoria do fractal.

A **Curva de Koch** de autoria do matemático sueco *Helge von Koch*, é um desses exemplos de trabalhos pioneiros de fractais que facilita o entendimento do assunto. Ela aparece pela primeira vez num artigo de 1906, intitulado "*Une méthode géométrique élémentaire pour l'étude de certaines questions de la théorie des courbes planes*". Miranda *et al.* (2008) comenta que sua construção se dá a partir de um segmento de reta que é dividido em três segmentos iguais, e em seguida se substitui o terço médio por um triângulo retirando-se a base. O processo iterativo consiste em aplicar a mesma regra a cada um dos segmentos de reta resultantes da iteração imediatamente anterior. Considerando-se cada passo, nota-se que, de um nível para o seguinte, substituem-se três segmentos por quatro de igual comprimento, ou seja, o comprimento total é multiplicado por $4/3$ correlacionando-se com níveis sucessivos, como limite de razão geométrica infinito, isto significa que a figura final tende a um comprimento infinito, denominado por Mandelbrot como "infinito inteiro". Da mesma forma o **Floco de neve de Koch** (*ilha ou estrela de Koch*) corresponde à mesma curva, só que a sua construção se inicia a partir de um triângulo equilátero (em vez de um segmento de reta). *Eric Haines* desenvolveu o mesmo conceito, a três dimensões, o que resultou num fractal com volume de um floco de neve. (**Figura 27**)

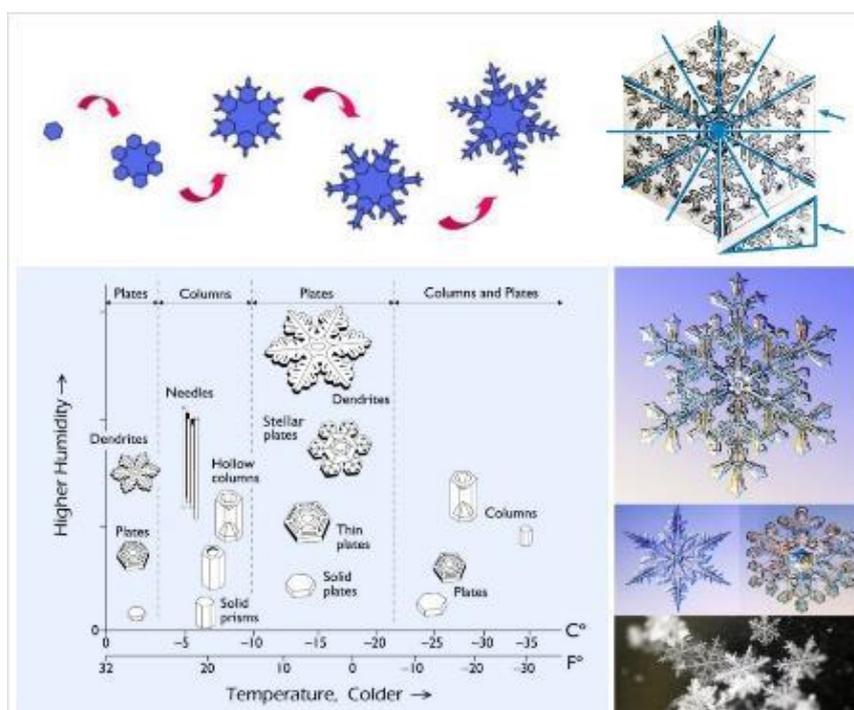
Figura 27 – Curva e Floco de neve de Koch.



Fonte: (MIRANDA *et al*, 2008).

Doczi (1990) mostra um dos mais belos exemplos de padrão da natureza, o floco de neve, onde todos diferem entre si, mas mantêm a unidade no padrão hexagonal básico, comum a todos. Cada um deles tem um só padrão, que é repetido e refletido 6/12 vezes (**Figura 28**), característicos em todos os padrões cristalinos, inorgânicos, que apresentam mais ordem e uniformidade que os padrões orgânicos.

Figura 28 – Formação do floco de neve com padrão hexagonal.



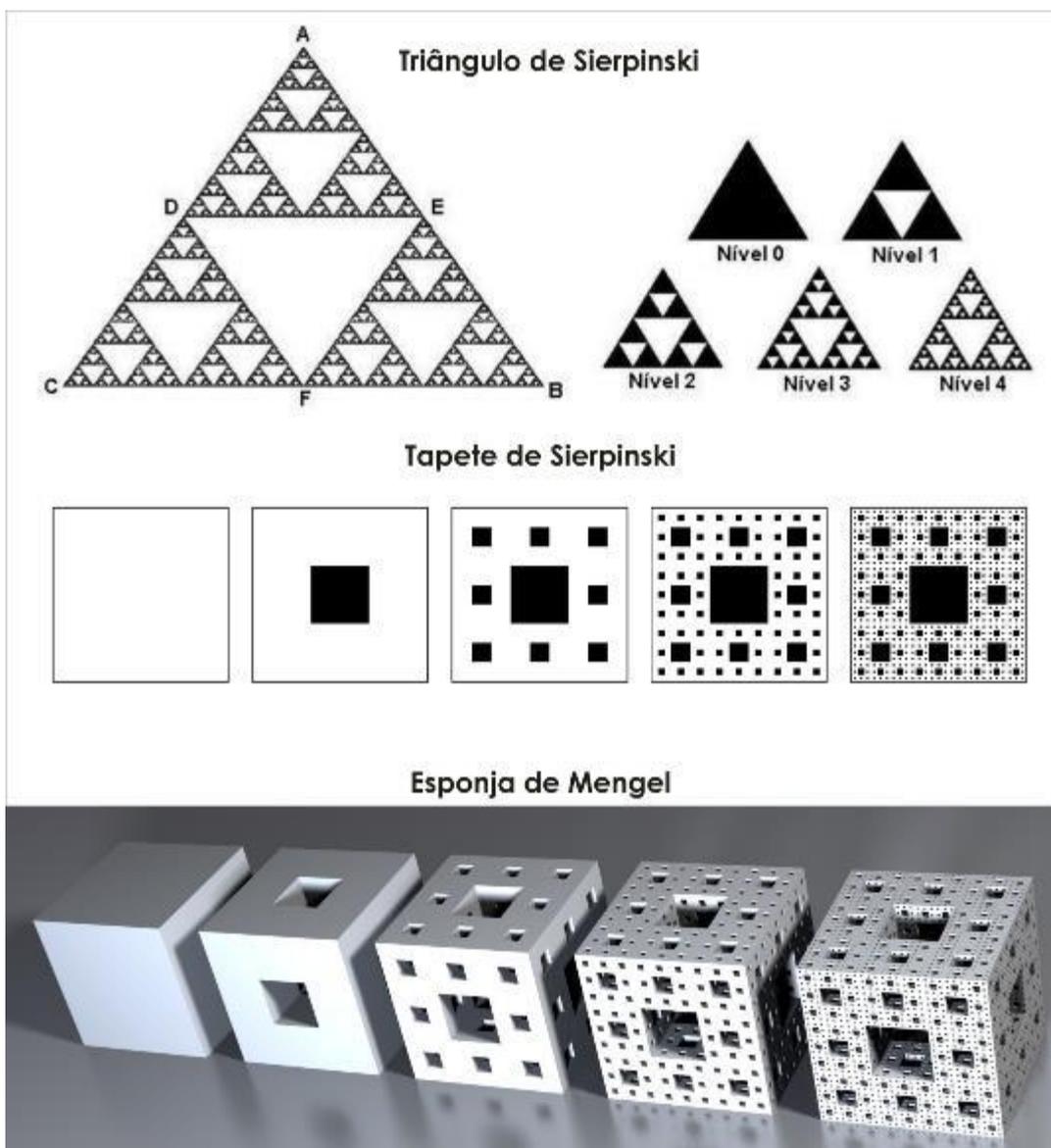
Fonte: a autora, adaptado de (DOCZI, 1990) e <http://www.snowcrystals.com/science/science.html>

Acesso em 06 ago 2014.

Outro trabalho pioneiro que envolve fractais são os **Triângulos de Sierpinski**, cuja construção básica começa com um triângulo equilátero, totalmente preenchido, em que se tomam os pontos médios dos três lados que, juntamente com os vértices do triângulo original, formam quatro triângulos congruentes. Em seguida retira-se o triângulo central, restando 3 triângulos, cujos lados medem metade do lado do triângulo original. Repete-se o procedimento com estes três triângulos resultantes, sucessivamente, de maneira que se começando com um único triângulo, geram sequencialmente, 3,9,27,81, ...triângulos, correspondentes aos níveis 1,2,3 e 4 respectivamente. Esta mesma lei de formação é sucessivamente aplicada, de modo que sua estrutura é constituída por triângulos sequencialmente menores que são cópias perfeitas da forma inicial da figura. Assim, ao ampliar-se (“zoom” uma parte qualquer, ter-se-á algo idêntico a figura como um todo. No limite de infinitas aplicações deste procedimento obtêm-se uma *figura fractal auto-similar exata* que pode ser identificada na **Figura 29** com a ilustração do triângulo e do tapete de Sierpinski, construídos pelo mesmo princípio. (MIRANDA *et al.*, 2008)

Outro exemplo de fractal, dessa vez tridimensional, é a **Esponja de Menger**, que foi descrita pela primeira vez pelo matemático austríaco Karl Menger, em 1926, enquanto explorava o conceito de dimensão topológica. Ela se baseia no mesmo princípio de construção do triângulo ou tapete de Sierpinski, contudo o processo iterativo é feito com um cubo.

Figura 29 – Triângulo e Tapete de Sierpinski e Esponja de Menger, exemplos de fractal.

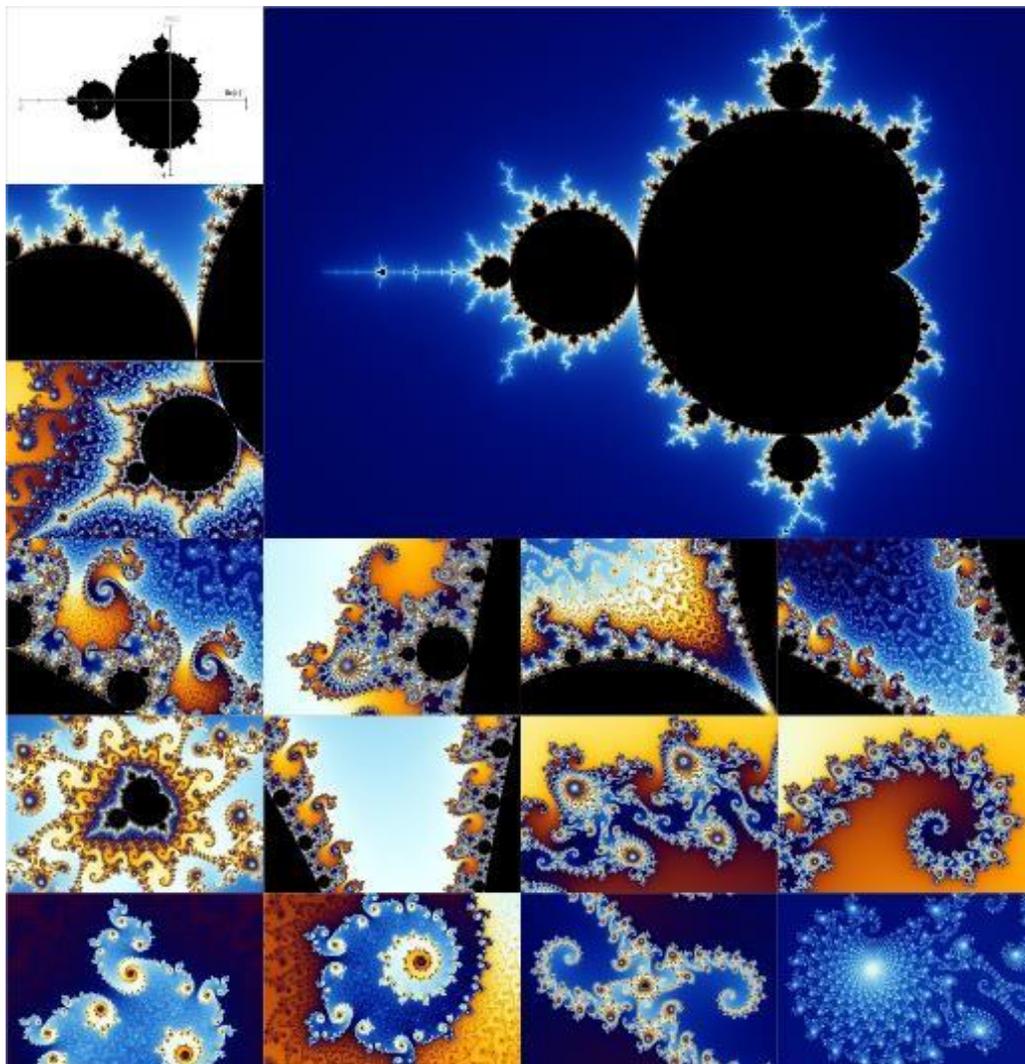


Fonte: Elaborado pela autora, adaptado de (MIRANDA *et al.*, 2008).

Não se pode deixar de citar também o **Conjunto de Mandelbrot**, cujas imagens são feitas por amostragem de números complexos e determinando para cada um resultado que tende para o infinito quando uma operação matemática em particular é iterada sobre ele. Trata as partes real e imaginária de cada número de coordenadas da imagem, os pixels são coloridos de acordo com a rapidez com que a sequência diverge. Essas imagens exibem um limite elaborado que revela detalhes recursivos progressivamente em ampliações maiores, onde o "estilo" deste detalhe de repetição depende da região do conjunto que está sendo examinado. O limite do conjunto também incorpora versões menores da forma principal, portanto, a

propriedade fractal de auto-similaridade aplica-se a todo o conjunto, e não apenas às suas partes. (Figura 30)

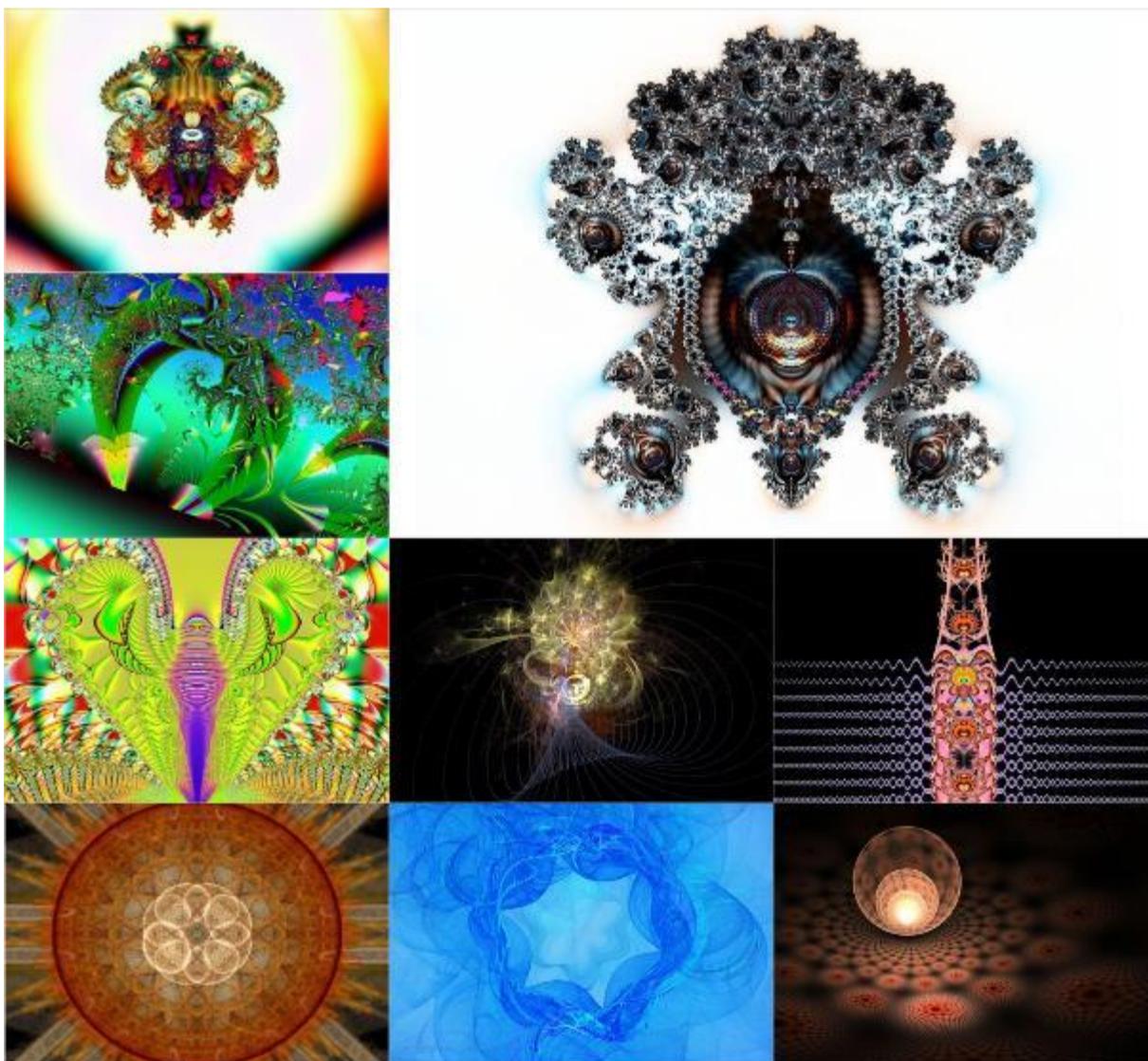
Figura 30 – Conjunto de Mandelbrot.



Fonte: Elaborado pela autora, adaptado de https://en.wikipedia.org/wiki/Mandelbrot_set) Acesso EM 16 ago 2014.

O conjunto de Mandelbrot tornou-se popular fora da matemática, tanto como um exemplo de uma estrutura complexa decorrente da aplicação de regras simples quanto por seu apelo estético. É um dos exemplos mais conhecidos de visualização matemática e têm sido usados na ciência, tecnologia e arte. Na arte, vários softwares como o *fractal flames*, *Apophysis*, *Chaotica*, *Sterling*, dentre outros, são usados para gerarem figuras, inclusive, apresentando as respectivas coordenadas de geração. Na **Figura 31** têm-se alguns exemplos de imagens fractais gerados por estes softwares.

Figura 31 – Imagens fractais geradas por softwares.



.Fonte: Elaborado pela autora, adaptado de [http://en.wikipedia.org/wiki/Sterling_\(program\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Sterling_(program)) Acesso em 25 ago 2014.

Através desses estudos pode-se descrever muitos objetos extremamente irregulares do mundo real. Na medicina, por exemplo, está associado como método diagnóstico quantitativo de patologias como no caso do câncer, através de análise de imagens de células tumorais onde evidências experimentais sugerem que estas apresentem fronteira com a dimensão fractal superior às que ocorrem em agregados de tecidos normais, na linha de investigação de núcleos atípicos. (MIRANDA *et al.*, 2008)

Além disso, meteorologistas utilizam o cálculo fractal para verificar as turbulências da atmosfera incluindo dados como nuvens, montanhas, a própria

turbulência, os litorais e árvores. As técnicas fractais também estão sendo empregadas para a compactação de imagens através da compressão fractal, além das mais diversas disciplinas científicas que utilizam o processo. (MIRANDA *et al.*, 2008)

A superfície de uma montanha, por exemplo, também pode ser modelada num computador usando uma fractal onde começa-se com um triângulo no espaço 3D, acham-se os pontos centrais das 3 linhas que formam o triângulo e criam-se 4 novos triângulos a partir desse triângulo, deslocam-se depois aleatoriamente esses pontos centrais para cima ou para baixo dentro de uma gama de valores estabelecidos e segue-se repetindo o mesmo procedimento, fazendo os deslocamentos dos pontos centrais em que cada iteração é igual a metade da anterior. (**Figura 32**)

Figura 32 – Superfície de uma montanha gerada pela geometria fractal no computador.



Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Fractal#/media/File:Animated_fractal_mountain.gif. Acesso em: 27 ago 2014.

Para Mandelbrot (1989) as complicações só existem na geometria euclidiana, pois nos fractais, as estruturas ramificadas podem ser descritas com grande simplicidade, utilizando-se apenas alguns bits de informação. Com isso, é possível que as transformações simples que deram origem às formas de Koch e Sierpinski sejam análogas às instruções codificadas nos genes de um organismo, pois sabe-se que o DNA não pode especificar o número de galhos numa árvore, mas pode especificar um processo repetitivo de bifurcação e desenvolvimento.

A natureza se serve de padrões (relativamente) simples e semelhantes para repeti-los e formar tudo o que existe. Graças ao desenvolvimento da teoria fractal, agora é possível desenhar mapas, florestas, relâmpagos, samambaias, galáxias, rios, cadeias de montanhas, raios, galhos, vasos sanguíneos, nuvens, etc.; que não podiam ser descritos pela geometria euclidiana. É bem verdade que a auto

semelhança exata só existe na matemática, mas no mundo natural vê-se grande aproximação.

A **Figura 33** apresenta alguns desses exemplos em que parece que a natureza dispõe de um computador ultra potente com um programa fractal excelente instalado capaz de criar toda a complexidade que há no universo com relativa facilidade.

“As nuvens não são esferas, as montanhas não são cones, as linhas dos leitos de rios não são círculos, a cortiça não é uniforme, nem o relâmpago viaja em linha reta”. (Mandelbrot, 1989)

Figura 33 – Exemplos de fractais na natureza.



Fonte: Elaborado pela autora, do banco de imagens do laboratório do BIODESIGN.

2.2.2.5 Esferas

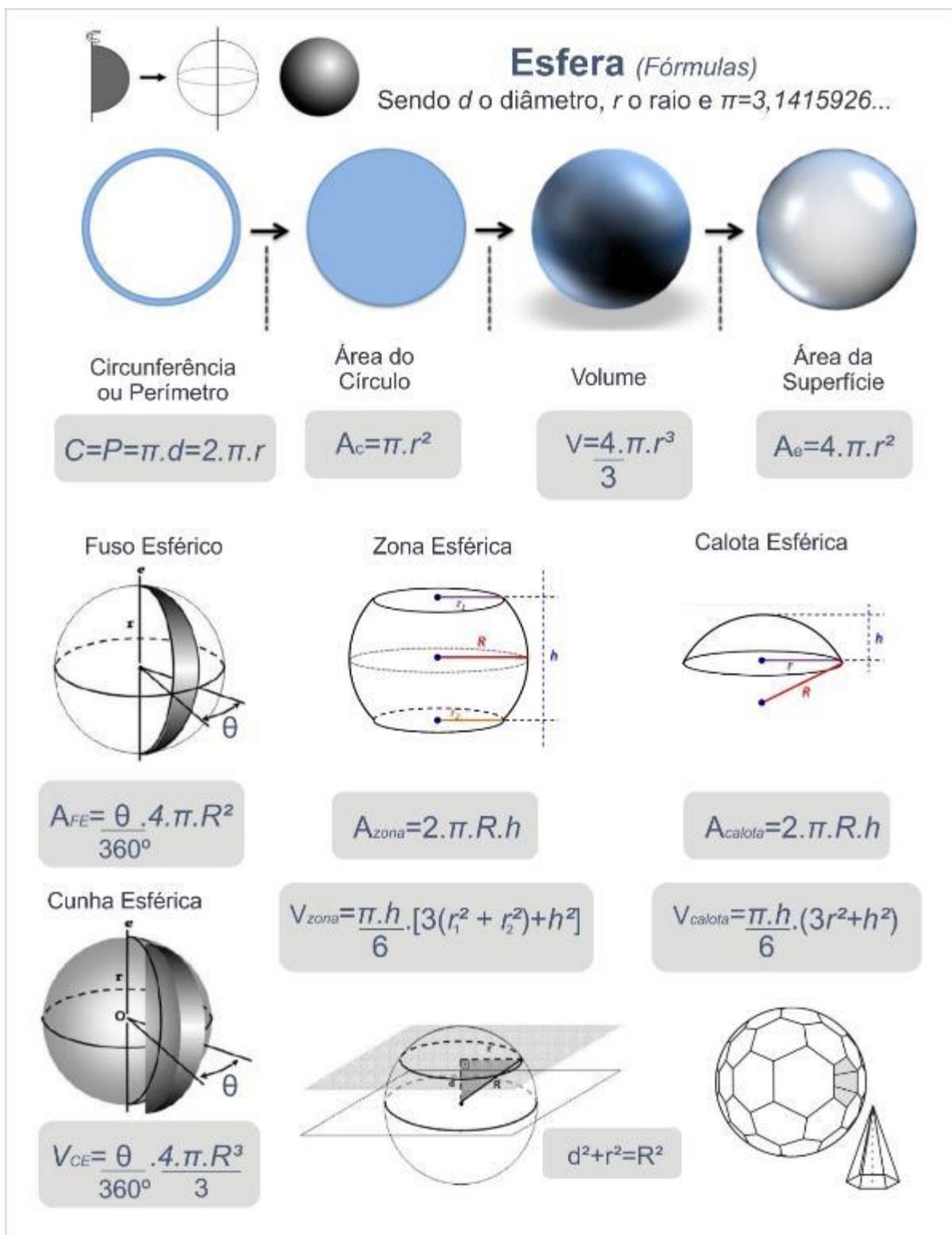
A esfera pode ser definida como "uma sequência de pontos alinhados em uma superfície curva contínua à mesma distância de um centro comum"; também pode ser obtida através da revolução de uma semicircunferência em torno de um eixo coincidente com seu diâmetro. É um objeto tridimensional de forma circular perfeitamente simétrico. Quanto à geometria analítica, uma esfera é representada (em coordenadas retangulares) pela equação:

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 + (z - c)^2 = r^2$$

Em que a , b , c são as coordenadas do centro da esfera nos eixos x , y , z respectivamente, e r é o raio da esfera.

Apesar de ser uma forma tão comum, só se pode determinar suas medidas em valores aproximados, tendendo a um número infinito independente do seu tamanho, visto que seu raio depende de uma variável irracional, o $\pi=3,141592653\dots$. Esta constante universal relaciona o perímetro de uma circunferência com o seu diâmetro. Na **figura 34**, são demonstradas as principais fórmulas envolvendo as esferas.

Figura 34 – Fórmulas envolvendo esferas.



Fonte: Elaborado pela autora, adaptado do site <http://guiadoestudante.abril.com.br/estudo/esferas-geometria-espacial/> Acesso em 30 ago 2014.

Um exemplo interessante para mostrar a eficiência da configuração esférica pode ser encontrado na explicação da formação das bolhas de sabão. Elas são possíveis graças à força existente entre as moléculas de água: as pontes de hidrogênio que ocorrem pela atração do polo positivo de uma molécula (hidrogênio) com o polo negativo da outra (oxigênio). Essas interações ocorrem em todas as direções, no entanto, elas se tornam ainda mais intensas na superfície da água, pois, como não existem moléculas na parte de cima, somente dos lados e abaixo, a desigualdade de atrações provoca a contração do líquido, dando a impressão de existir uma fina película na sua superfície, a chamada tensão superficial.

As bolhas se formam graças à intensidade dessa tensão superficial. As moléculas de água que estão na superfície da bolha realizam ligações de hidrogênio somente com moléculas ao seu lado, aumentando ainda mais a força dessa ligação, quando a água evapora, a bolha estoura, mas para diminuir essa superfície ao mínimo, essa bolha adquire um formato com a menor relação entre área superficial e volume, chegando na forma esférica.

Observando estas bolas de sabão percebe-se que fatores externos podem alterar a situação de equilíbrio da configuração original, como a ação do vento ou mesmo quando pousa em determinada superfície plana, recebendo a ação da gravidade e se tornando achatadas, deformadas ou mesmo poliédricas quando compactadas, este mesmo efeito também pode ser observado com muitas das células animais que quando compactas assumem outros formatos. **(Figura 35)**

Di Bartolo (1981) relembra que a forma esférica numa gota d'água também é determinada pela tensão superficial em que a força interna das partículas modeladas pela força externa, cria um equilíbrio. Ramos (1993) também ratifica que a forma esférica é ótima, pois guarda dentro de si a relação de volume máximo com superfície mínima, ou seja, são capazes de armazenar a maior quantidade de material internamente utilizando a menor quantidade de material possível para construir a superfície externa, o que torna esta configuração extremamente eficiente.

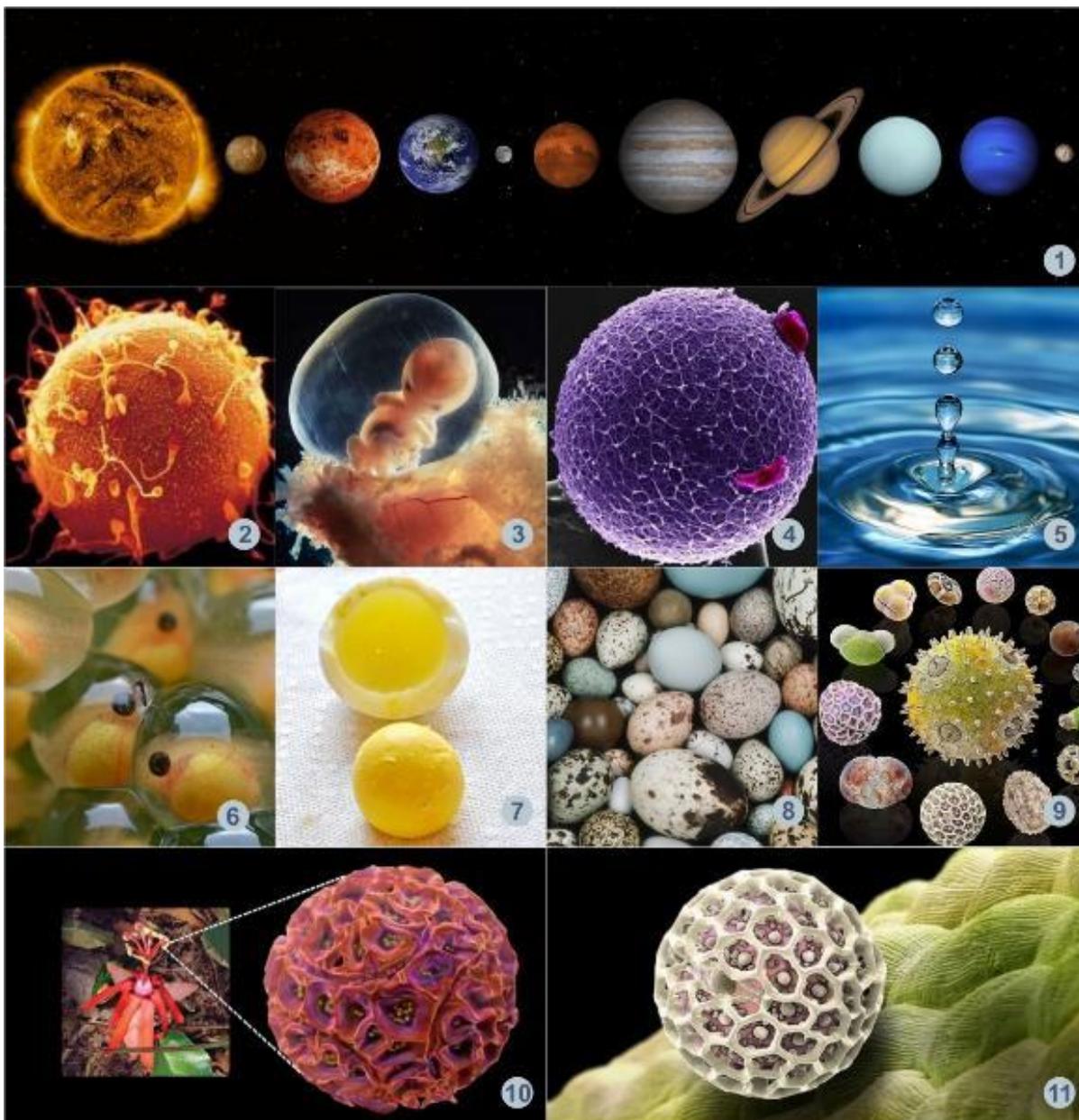
Figura 35 – Imagens de bolhas de sabão.

Fonte: Elaborado pela autora, adaptado do site <http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/quimica/como-se-formam-as-bolhas-sabao.htm> Acesso em: 03 ago 2014.

As formas esferoidais são muito utilizadas na natureza como embalagem contenedora (*closest packing*), por exemplo, nos mamíferos e em vários outros animais, a gestação acontece em um protetor térmico que geralmente assumem a forma esférica, ocorrendo também na situação de invólucro de muitas frutas e sementes, pois esta forma é traduzida em eficiência, pois como já foi dito, possui uma menor superfície com máximo volume.

Apesar de toda diversidade plástica existente, a esfera é bem mais recorrente na natureza do que se pensa, se encontram muitos exemplos, alguns na situação de macroescalas, como a Terra, o sol, a lua e os demais astros celestes; outros em microescalas, delimitando o material genético relacionado a vida, como o óvulo, os pólenes, parte genética dos ovos de animais, e até mesmo a configuração isolada de células, átomos e algumas bactérias, como pode ser observado na **Figura 36**.

Figura 36 – Exemplos de esferas na natureza: astros celestes, óvulo, invólucro do embrião, bactéria *staphylococcus*, nos pólen, na gota d'água, nos ovos dos peixes, girinos e vários outros animais.



- | | | |
|----------------------------|--------------------|-----------|
| 1- Terra e astros celestes | 5- Gota d'água | 9- Pólen |
| 2- Óvulo | 6- ovo de girinho | 10- Pólen |
| 3- Embrião | 7- gema | 11- Pólen |
| 4- Bactéria | 8- ovos de animais | |

Fonte: Elaborado pela autora, do banco de imagens do laboratório do BIODESIGN.

Outras formas esféricas também são encontradas em muitas das frutas, sementes, arranjos florais, no globo ocular dos animais, no coral cérebro, no enrolar-se do tatu bola e do tatuzinho de jardim, na formação de pérolas, etc. (**Figura 37**)

Figura 37 – Exemplos de esferas na natureza.



Fonte: Elaborado pela autora, do banco de imagens do laboratório do BIODESIGN.

2.2.2.6 Modulação

Em seu livro *Structure in nature is a strategy for design*, Peter Pearce (1990) apresenta a pesquisa sobre sua teoria das inter-relações dos sistemas espaciais tridimensionais, onde defende que a natureza tende a produzir estruturas padronizadas, mas com diversidade, gerando um conceito de modularidade, que reflete a propriedade de algo que tenha uma organização modular.

Em arquitetura, o termo *modular* refere-se a levantar uma construção com a utilização de módulos, e por sua vez tem grande correspondência com o termo *Padrão*, que no dicionário Michaelis, quer dizer: “*aquilo que tem forma, tamanho, dimensões mais comuns em sua categoria ou em seu gênero.*” Qualquer um dos cinco sentidos (visão, tato, audição, olfato, paladar) pode ser usado para perceber um padrão. Padrões abstratos na ciência, matemática ou linguagem podem ser observáveis também através de análises. Aqui, **padrão ou modulação** serão entendidas como uma discernível regularidade em um design onde os elementos repetem-se de maneira previsível.

É o que costuma ocorrer com frequência na natureza, que se baseia num sistema de construção modular através da organização celular, produzindo uma vasta variedade de organismos com estruturas fantásticas. Além disso, é fácil observar também o princípio de *auto semelhança* encontrada na repetição de componentes ou partes de organismos naturais, como visto na modulação de pétalas nas flores, de folhas nas plantas, nas reticulações das peles e frutos, nas penas, nas sementes, na simetria de uma estrela do mar, nos gomos do bambu e diversos outros exemplos em que há repetição de uma unidade componente.

Neste sentido, pode-se dizer que os fractais também possuem modulações, pois demonstram similaridade com variação de escala entre elementos, onde cada parte guarda semelhança com a forma original. Andrade (2003) comenta que as indústrias também utilizam este princípio, pois a modularidade permite otimização de processos de produção e redução de custos. As **Figuras 38 e 39**, apresentam alguns exemplos de modulação com repetição de componentes.

Andrade (2003) reforça ainda que a modularidade é um meio eficiente de conseguir inúmeras vantagens, tais como organização, economia de material e

simplificação de estruturas, como ocorre na colmeia das abelhas, por exemplo, em que suas repetidas formas hexagonais, permite a otimização do espaço, baixo peso e otimização mecânica, pois módulos semelhantes produzem ângulos repetitivos que correspondem a maneira mais eficiente de aliviar as pressões.

“Os segmentos do corpo do tatu-bola, do embuá, da minhoca, permitem maior flexibilidade; os módulos da carapaça da tartaruga, uma distribuição de esforços que lhe confere resistência; as escamas da cobra, dos peixes e as placas do corpo do crocodilo resultam em facilidade de locomoção e rigidez.” (ANDRADE, 2003)

Figura 38 – Exemplos de módulos na natureza por repetição de componentes.



Fonte: Elaborado pela autora, do banco de imagens do laboratório do BIODESIGN.

Figura 39 – Outros exemplos de modulações na natureza.



1- Homem
2- Cobra
3- Cobra
4- Pavão

5- Peixe
6- Tartaruga
7- Jacaré
8- Borboleta

9- Coral
10- Olho de inseto
11- Colméia
12- Coral

13- Mostera
14- Buriti
15- Abacaxi
16- Jaca

Fonte: Elaborado pela autora, do banco de imagens do laboratório do BIODESIGN.

2.2.3 MÉTODOS DE PESQUISA BIOMIMÉTICA

Segundo Santos (2010), a Biomimética trata de uma ciência empírica que não possui ainda uma metodologia concretizada devido à dificuldade de tradução dos sistemas biológicos para o âmbito tecnológico. Mesmo assim, são muitos os pesquisadores ao redor do mundo que praticam exercícios experimentais utilizando a analogia de estruturas naturais em instituições de ensino. Para ilustrar melhor esta situação, serão detalhados a seguir alguns métodos desenvolvidos em 3 instituições, apresentando alguns trabalhos com desenhos e modelos resultantes de seus estudos morfológicos. Entende-se nesta parte que os termos Biônica e Biomimética são equivalentes, visto que antigos laboratórios de biônica estão migrando para o novo termo.

2.2.3.1 CRIED (Centro Ricerche/ Istituto Europeo di Design-Milano/IT)

O laboratório de Biônica do CRIED nasceu em 1985, com o Centro de Pesquisas de Estruturas Naturais de Milão e o curso de especialização de Design e Biônica. Tendo como responsáveis, os professores Carmelo Di Bartolo, na época diretor do Instituto, e Carlo Bombardelli, coordenador do departamento de Desenho Industrial. O curso reuniu grandes nomes do design, tais como Gui Bonsiepe, Aldo Montú e Tomás Maldonado, como professores. O laboratório desenvolveu parceria com diversas empresas, dentre elas, Sony, FIAT, Dupont, General Electric Plastic, etc. Hoje, apesar de não ter mais um curso como outrora, totalmente voltado para pesquisa biônica, as metodologias desenvolvidas se transformaram em métodos que são abordados dentro dos diversos cursos ofertados pelo IED, visto que estas pesquisas tiveram grande importância para disseminar as técnicas de estudo das estruturais naturais vinculadas à projetos de Design, tornando seus estudos e métodos precursores do discurso biônico voltado para o design.

A seguir, se verificam os 5 métodos mais significativos que encontraram um melhor equilíbrio no relacionamento entre a biônica, o design e a produção, proposto por Bombardelli e discutidos por Songel (1991), Arruda (1993), Ramos (1993), Lozano (1994) e Forniés (2012).

- **Método 1:** A partir da análise do objeto natural são extraídos os princípios naturais promissores do ponto de vista da técnica, para serem

aplicados na resolução de problemas de projeto. Porém, ao analisar este objeto, não se sabe com antecedência, quais os problemas de projeto que podem ser resolvidos a partir dessa análise. Em consequência, este procedimento não é indicado para resolver um problema projetual específico, já que não se tem controle dos resultados.

Por outro lado, também não existem garantias que os princípios de solução contidos no objeto natural sob análise, são aplicáveis na resolução de problemas em um objeto qualquer, dessa forma esse procedimento pode ser útil para a formação de um banco de dados de princípios de solução naturais, aplicáveis na técnica. (**Figura 40**) (BOMBARDELLI, 1985)

Figura 40 – Esquema do processo correspondente ao Método 1 – CRIED.



Fonte: Elaborado pela autora, adaptado de (BOMBARDELLI, 1985).

- **Método 2:** O ponto de partida são os problemas gerados por um projeto, e através do estudo do objeto natural, busca-se a compreensão de como a natureza resolve problemas semelhantes. Entretanto, a condição aleatória na investigação do elemento natural torna este método muito seletivo na fase inicial, e isto gera a perda de informações valiosas de outros seres vivos que não estão sendo investigados. Uma análise completa precisa de uma grande dispêndio de energia e tempo, o que torna o processo caro e raramente aplicável em um contexto de produção. (BOMBARDELLI, 1985) (**Figura 41**)

Figura 41 – Esquema do processo correspondente ao Método 2 – CRIED.



Fonte: Elaborado pela autora, adaptado de (BOMBARDELLI, 1985).

- Método 3:** Analisando sistemas naturais, ou até mesmo artificiais, se pode intuir os princípios do problema de projeto, mas os resultados desse processo mental não são controláveis. Entretanto, a intuição pode ser estimulada por informações, já que é baseada em fatos e informações registradas e aprendidas anteriormente. Assim, o processo pode ser incentivado pela aquisição de conhecimentos sobre um assunto, que irão alimentar o sistema cognitivo do projetista com a matéria prima necessária para a produção de inferências que permitem a geração de novas idéias. Se tiver disponível dados biônicos já selecionados e organizados, certamente isto será mais produtivo, por isto é interessante obter informações de outros especialistas como biólogos, botânicos, etc. (**Figura 42**) (BOMBARDELLI, 1985)

- Figura 42** – Esquema do processo correspondente ao Método 3 – CRIED.



Fonte: Elaborado pela autora, adaptado de (BOMBARDELLI, 1985).

- Método 4:** A definição de um argumento projetual, por exemplo, "carcaças funcionais para produtos" pode levar à realização de uma pesquisa biônica de grandes proporções, por exemplo: "exoesqueletos

de invertebrados". A grande quantidade de informações coletadas garante a definição de múltiplos problemas de projeto. No entanto, existem dificuldades operacionais neste método, não é possível ter informação suficiente para lidar com cada tipo de problema projetual. Se o objetivo é a formação de material documental biônico para uso posterior, este método pode ser interessante, um argumento biônico é o foco da coleta de dados, por exemplo, o estudo de bivalves marinhos, por causa da sua função de proteção, estrutura, resistência mecânica, uso eficiente de materiais e espaço, sistemas e mecanismos de abertura, fechamento e segurança; pode ser base documental para futuros trabalhos relacionados com carcaças. **(Figura 43)** (BOMBARDELLI, 1985)

Figura 43 – Esquema do processo correspondente ao Método 4 – CRIED.

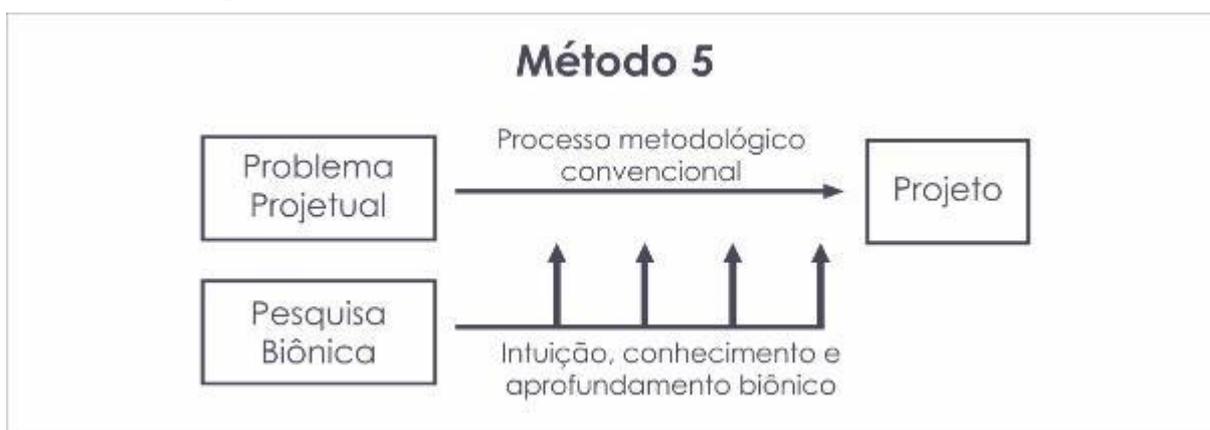


Fonte: Elaborado pela autora, adaptado de (BOMBARDELLI, 1985).

- Método 5:** Este método apresenta um processo de design convencional em que se vão integrando os resultados da pesquisa biônica nos diferentes estágios de desenvolvimento, estes resultados podem ser conhecidos de pesquisas anteriores ou ser parte específica do projeto em questão. Na parte da pesquisa biônica, observa-se que a melhor condição de trabalho está na união entre os tipos de pesquisadores: os biônicos analistas com os designers biônicos; e os pesquisadores da biônica analítica com os da biônica aplicada. O objetivo é recolher os resultados da pesquisa analítica de temas naturais e comunicar sistematicamente através de elaborados textos, gráficos, modelos e fotografias. No momento da apresentação de um problema de

planejamento de qualquer tipo, o designer terá, assim, o material biônico necessário para posteriormente individualizar, acessando-o diretamente na literatura biônica. Pode-se dizer que esta metodologia combina a conceituação e aplicabilidade da biônica na metodologia do design, como um suporte em um processo convencional criativo. (BOMBARDELLI, 1985) (**Figura 44**)

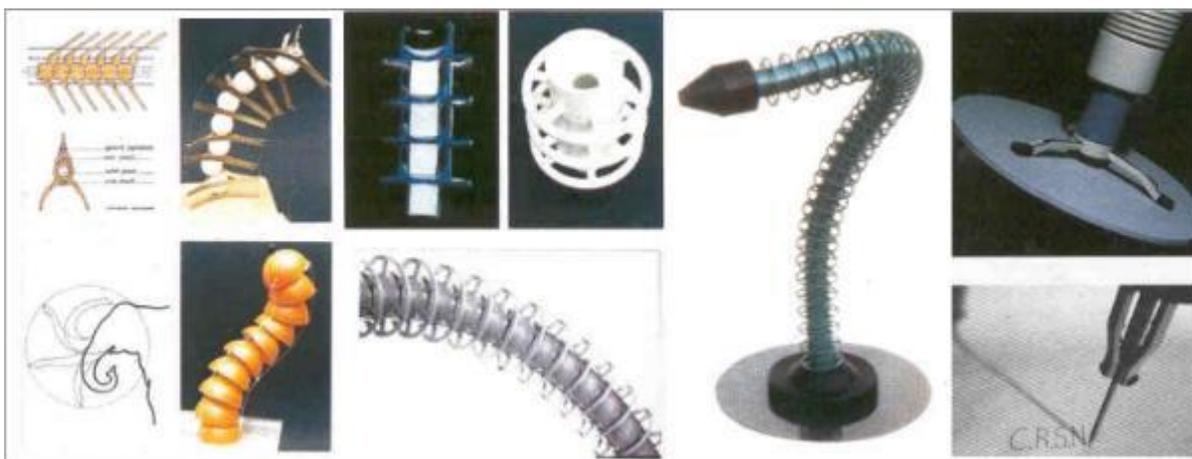
Figura 44 – Esquema do processo correspondente ao Método 5 – CRIED.



Fonte: Elaborado pela autora, adaptado de (BOMBARDELLI, 1985).

Lozano (1994) fala que as pesquisas das estruturas naturais no laboratório de Biônica do CRIED tiveram 3 objetivos distintos: o primeiro, era o de gerar hipóteses para possíveis projetos; o segundo, era o de estudar as aplicações e testar as metodologias desenvolvidas, e o terceiro, era o de encontrar respostas na realidade produtiva para as hipóteses projetuais levantadas. Neste último, comenta do estudo da musculatura da tromba do elefante e da espinha dorsal de peixes, que utilizou a quinta metodologia de Bombardelli para incorporar flexibilidade e agilidade a um braço biônico robotizado. Foi construído um protótipo em que o sistema de movimento era composto por 2 séries de ligas conectadas em dois níveis diferentes do braço, acionados por um propulsor pneumático. (**Figura 45**)

Figura 45 – Trabalhos do Centro de Pesquisa de Estruturas Naturais – CRIED.



Fonte: Elaborado pela autora, com imagens compiladas de (ARRUDA, 2002).

O trabalho de investigação sobre as características funcionais e morfológicas do ouriço do mar de Amilton Arruda, que na época era pesquisador do centro e aluno de pós-graduação no CRIED, também é citado por Lozano (1994). Na **Figura 46** é possível observar a utilização de imagens tridimensionais renderizadas para este estudo, um recurso de difícil acesso para os demais centros de pesquisa da época.

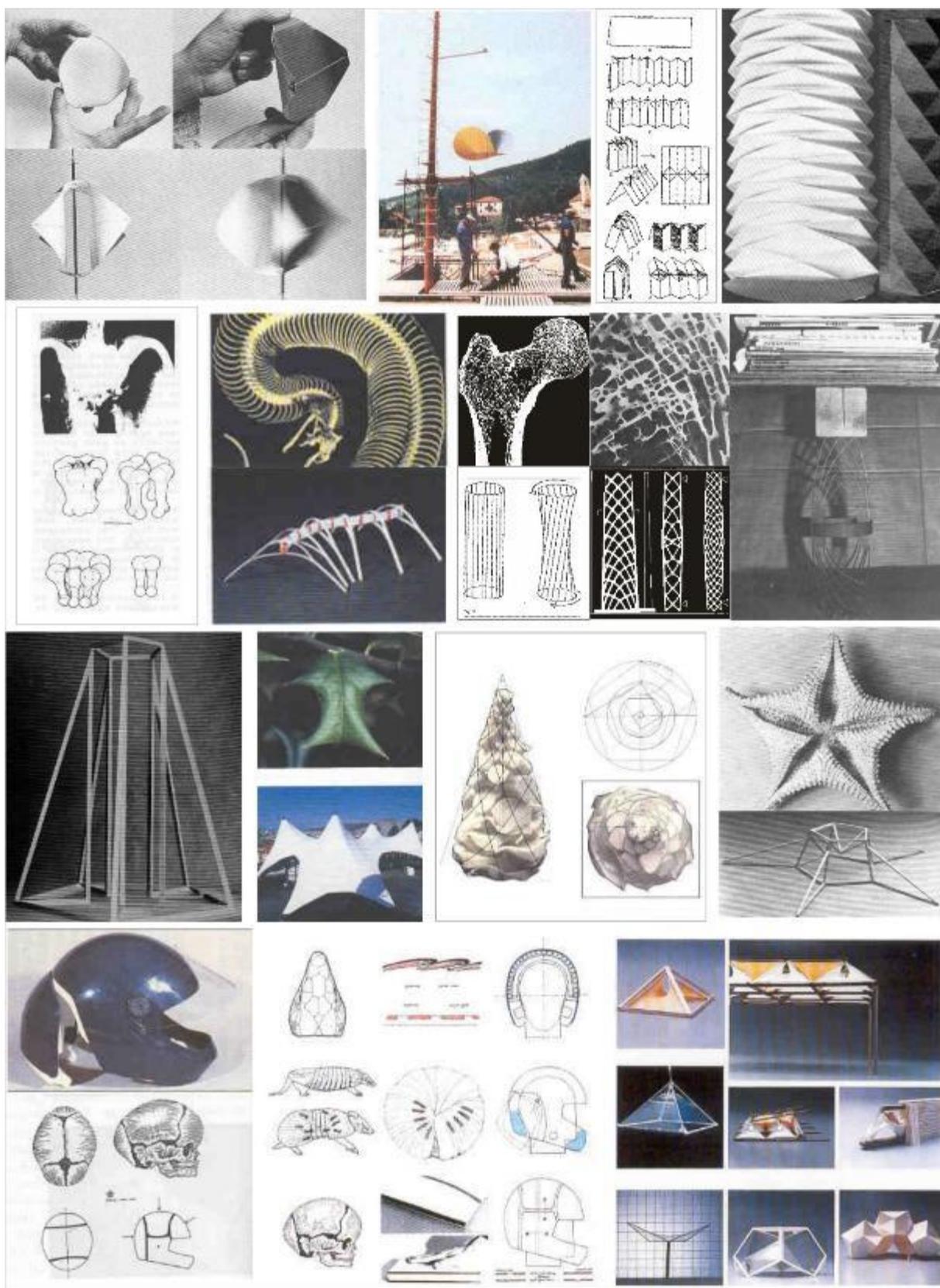
Figura 46 – Imagens do estudo do Ouriço do Mar de Amilton – CRIED.



Fonte: Elaborado pela autora, com imagens compiladas de (LOZANO, 1994).

Na **Figura 47** a seguir, serão apresentados outros resultados de trabalhos do Centro de Pesquisa de Estruturas Naturais no CRIED sob orientação dos professores Di Bartolo e Bombardelli.

Figura 47 – Trabalhos do Centro de Pesquisa de Estruturas Naturais – CRIED.



Fonte: Elaborado pela autora, com imagens compiladas de (ARRUDA, 2002).

2.2.3.2 Laboratório de Biodesign (UFPE/BRA)

O laboratório do Biodesign nasceu em 1998 através do fomento de órgãos como o CNPq e o FACEPE. É resultado das pesquisas em Biônica do PhD. Amilton Arruda no CRIED e no Politécnico de Milão na Itália. Localizado no Centro de Artes e Comunicação da UFPE, ao longo dos anos este laboratório tem aplicado a metodologia de biônica que resultou em diversos trabalhos dentro das disciplinas ministradas para a graduação do departamento de Design da mesma instituição, colaborando para disseminar as técnicas de estudo das estruturais naturais referências para projetos de Design.

Amilton (2002) propõe o estudo da Biônica através de 3 Campos: **Formação, Pesquisa e Projetual (Figura 48)**. No **Campo da Formação**, modalidade do processo de ensino, a didática de pesquisa deve respeitar o caráter natural de como a natureza se comporta em toda a sua evolução e dinâmica. Este senso de experimentação se dá de 2 modos:

- a) **Básico:** Disciplina que tem objetivo de estimular a experimentação; introduzir conceitos básicos da natureza: (evolução, adaptação, comportamento, composição, dinâmica, energia, máximo e mínimo, espirais, ramificações, fluxo, estruturas, seção áurea, etc.) e ainda, criar uma filosofia, delineando uma linguagem de base que permita e fomenta o discurso do “projeto biônico”.
- b) **Analógico:** Experimentação com abstração geométrica da estrutura natural investigada; análise funcional e geométrica da natureza e seus elementos; representação de modelos tridimensionais de determinado comportamento da natureza e interpretação e tradução da forma nos modelos analógicos que se identificou na estrutura analisada.

Já no **Campo da Pesquisa**, leva em consideração um grupo interdisciplinar, fazendo parte da indagação biônica o componente biológico e a engenharia, trazendo uma característica mais de inovação. Compreende o desenvolvimento da pesquisa no sentido que parte de um argumento ou temática de caráter geral ou específico para chegar num **modelo interpretativo** em vários aspectos, como por exemplo, estrutural, material, funcional, dentre outros.

Este modelo não necessariamente resultará num produto aplicado ou projeto acabado, pois tem maior caráter de estudo, cujo resultado pode não corresponder à expectativa do setor produtivo. O campo de pesquisa pode ser dividido em 2 partes:

a) **Pesquisa de Base:**

- Pesquisa teórica preocupada com aspectos, tais como: adaptação, forma, função, locomoção, dinâmica, geometria, ciclos da natureza, etc.;
- Pesquisas com caráter bibliográfico de projetos ou pesquisa, artigos, monografias, dissertações ou teses com referência na natureza;
- Pesquisas para construção de banco de dados com diversos temas tais como sistema de locomoção, sistema de articulações, membranas, embalagens, componentes estruturais na natureza, etc.;
- Pesquisas com caráter geométrico-morfológico com a finalidade de entender a resistência da sua estrutura ou forma;
- Pesquisas para utilização de metodologias adaptáveis ao estudo das estruturas naturais.

b) **Pesquisa Aplicada:**

- Desenvolvimento de pesquisa completa delineada para aplicação no campo projetual;
- Elaboração, verificação e experimentação de modelos ou protótipos biônicos;
- Identificação de hipóteses de projeto com base no resultado das pesquisas e das abstrações geométricas dos modelos biônicos;
- Pesquisas específicas do design dos materiais naturais;
- Análise e compreensão dos elementos naturais, seus aspectos e derivados (mecanismos, estrutura funcional, materiais, etc.).

E por fim, o **Campo Projetual**, a gestão do discurso biônico aqui é mais complexa, pois existem outras informações para atender a estratégias projetuais já definidas através dessa tradução das informações adquiridas na pesquisa biônica. E levando em consideração esta complexidade, este Campo é dividido em 3 hipóteses de intervenção:

- **Como Linguagem:** O projeto se desenvolve considerando a experiência do projetista que traz uma temática centrada em referências da natureza, que é diferente dos métodos tradicionais, criando-se uma modalidade própria de projeto, onde o projetista possa intuir uma aplicação prática para os modelos naturais estudados.
- **Como Instrumento:** O Projetista usa o banco de dados das pesquisas em biônica para se motivar e se inspirar em suas criações, buscando orientação, considerações e referências nas informações de caráter estrutural, configuracional, simbólico, estético, filosófico, semântico dessas interpretações da natureza;
- **Como hipótese de Projeto:** Através da pesquisa das estruturas naturais, se desenvolve um conceito, dele, um modelo biônico, e deste, o projeto biônico, através dos métodos tradicionais de design, como o de Bruno Munari, por exemplo. É importante observar que desse modelo biônico, podem ser gerados diversas hipóteses de projeto.

Figura 48 – Os 3 Campos de atuação da Análise da estrutura natural proposta pelo professor



Amilton.

Fonte: (ARRUDA, 2002).

Para Arruda (2002) a pesquisa biônica possui caráter sistemático que utiliza a analogia para traduzir os princípios encontrados na natureza, os quais poderão ser aplicados posteriormente na solução de um problema projetual.

Sobre o método de Pesquisa das estruturas naturais aplicado pelo professor Arruda sob uma ótica mais acadêmica, ele cita que a configuração de um objeto, vivo ou não, pode ser de alguma forma *descrita*, e apresenta algumas técnicas para essa descrição e compreensão da forma através dos seguintes passos: **Representação Fotográfica, Descrição Verbal, Esquematização (desenhos) e Modelos.**

- **Representação Fotográfica:** Esta técnica revela uma riqueza de detalhes, que torna incontestável o alto nível de fidelidade de descrição de qualquer estrutura. Hoje existem diversos meios de utilização desta técnica, seja por fotografias digitais com câmeras de altas resoluções ou até, numa análise mais acadêmica e menos criteriosa, através de câmeras de celular. Existem ainda as que se utilizam de uma série de fontes de luz, tais como: raio-X, ultravioleta ou infravermelhos. Há ainda métodos mais avançados de microscopia eletrônica e de varredura, que cada vez mais proporcionam descobertas de características morfológicas que revelam detalhes de estruturas internas dos elementos naturais à níveis cada vez menores, como o recente microscópio que usa feixe de elétrons no Japão, capaz de obter imagens a nível atômico. Através da capacidade de ampliações de imagens e das fotografias digitais com seus softwares de computadores mais velozes, se têm revelado e facilitado o entendimento e a descrição pormenorizada de estruturas. Para o estudo, deve-se tirar as fotografias, ou conseguí-las através de outros meios (internet), servindo para revelar o todo, secções, detalhes, partes, componentes, e demais aspectos do elemento analisado, que sejam do interesse do pesquisador.
- **Descrição Verbal:** Em seguida, se procura investigar informações referentes ao elemento analisado, sejam detalhes técnicos, científicos (taxonomia, etc.), históricos, curiosos, assim como descrever os detalhes observados nas fotografias, até que se possa resumir e extrair as características essenciais da forma estudada. O que se pressupõe que

pesquisar sobre o contexto da estrutura natural deve colaborar para um entendimento com mais níveis de referências sobre o mesmo, resultando em maiores possibilidades criativas de representações, e ainda, representações mais coerentes. Descrever o contexto desta estrutura natural e o que se observa dele em seu ambiente real dinâmico, amplia a qualidade dos dados, pois se pode verificar aspectos como ciclo de vida, movimentos, materiais, crescimento, variação de cores e tamanhos, funções, interações com outros elementos, organismos ou componentes, etc. Nem sempre é possível colher estes dados por imersão, mas a experiência traz mais e melhores resultados.

- **Esquematisação:** Através de desenhos que podem apresentar-se como descrições mais fidedignas dos elementos reais estudados (desenhos de observação) e posteriormente, como sínteses ou abstrações geométricas destes. Tais esquemas também podem se ater a destacar características ou princípios específicos destes elementos, enfatizando detalhes ou outro aspecto qualquer de interesse do pesquisador que se tenha coerência com a origem do elemento analisado.
- **Modelo**, por fim, encerra com a execução de um modelo tridimensional que sintetiza o esquema realizado. Pode ser feito de qualquer material, dependendo da função e intenção desejada, e para tanto, há necessidade de conhecimento prévio de técnicas de modelagem. Como a utilização de softwares ampliam e facilitam a visualização do modelo, este também pode ser feito de maneira virtual, além do modelo físico.

De maneira geral o método trabalhado pelo professor Amilton nas disciplinas de Biônica e de Biomimética pode ser sintetizado na **Figura 49** a seguir:

Figura 49 – Esquema do método utilizado pelo professor Amilton.

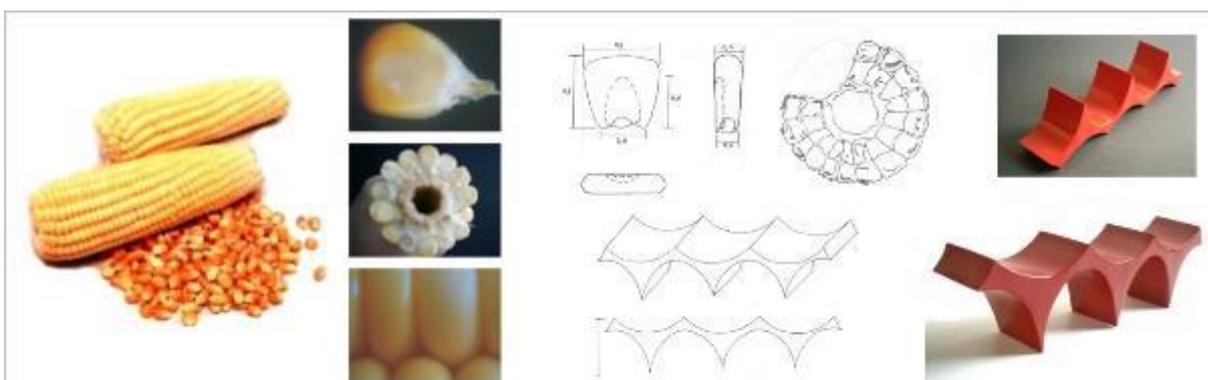


Fonte: (ARRUDA, 2002).

As próximas figuras apresentarão de forma resumida alguns dos trabalhos desenvolvidos por alunos de graduação para disciplinas vinculadas ao laboratório do Biodesign. Nas versões originais eram apresentados em forma de slides com pranchas da pesquisa, sintetizados através de banners, e por fim, era configurado um modelo físico como síntese da pesquisa. São eles:

- **Estudo do milho:** Neste exemplo o encaixe formado pelas junções dos grãos de milho facilita a acomodação entre eles e proporciona uma melhor fixação. A partir desta forma foi feita uma síntese para criação do modelo. (**Figura 50**)

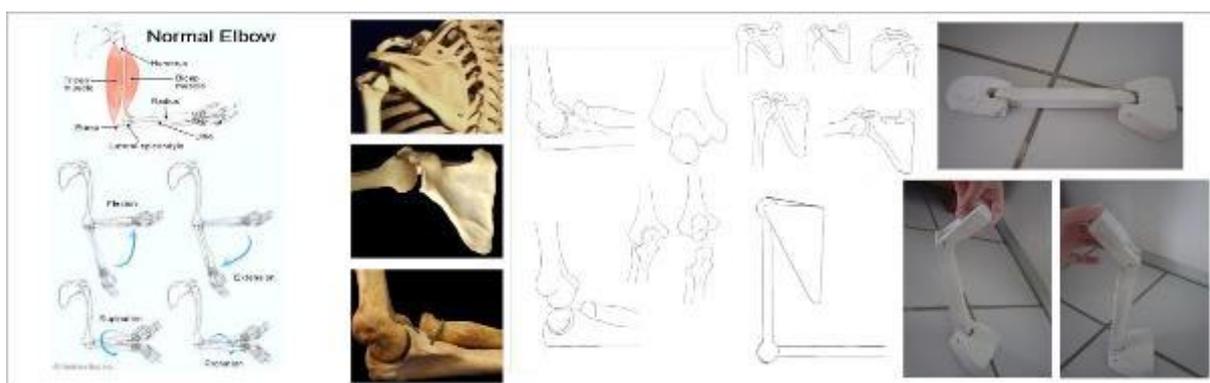
Figura 50 – Estudo da interpretação do milho por Lucas Andrade em 2006.2.



Fonte: Banco de imagens do Laboratório de BIODESIGN.

- **Estudo da articulação do ombro e do cotovelo:** O modelo foi construído representando a interpretação da amplitude do movimento das articulações do ombro e do cotovelo, a de baixo, possui uma rotação de menor amplitude, similar à do cotovelo, se movendo até 180°; e a de cima, com maior amplitude de rotação, similar à do ombro, pode girar quase 360°. (**Figura 51**)

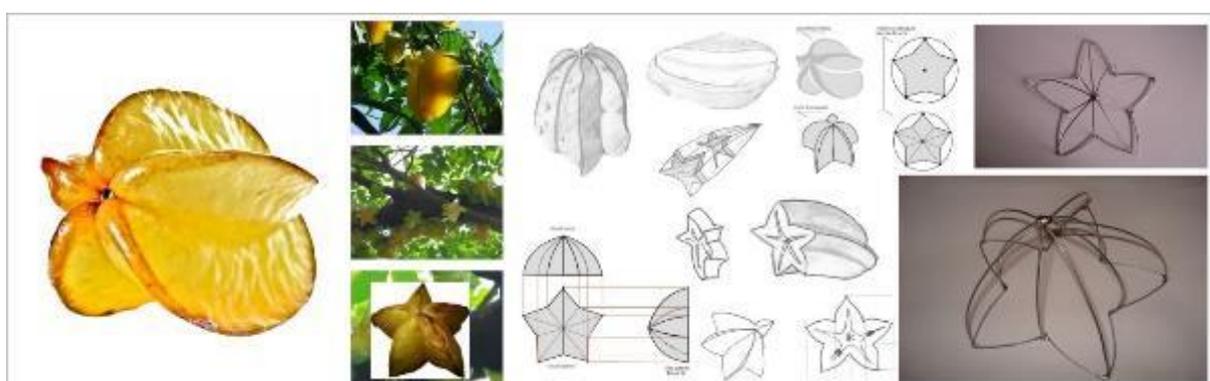
Figura 51 – Estudo da articulação do ombro e do cotovelo por Juliana Chalegre em 2006.1.



Fonte: Banco de imagens do Laboratório de BIODESIGN.

- **Estudo da Carambola:** Ao efetuar um corte transversal na fruta, a forma de estrela pode ser percebida na base. Os cinco vértices dessa estrela, por sua vez, convergem em um único ponto, base para interpretação do modelo estrutural executado. (**Figura 52**)

Figura 52 – Estudo da interpretação da Carambola por Marília Gondim em 2006.2.

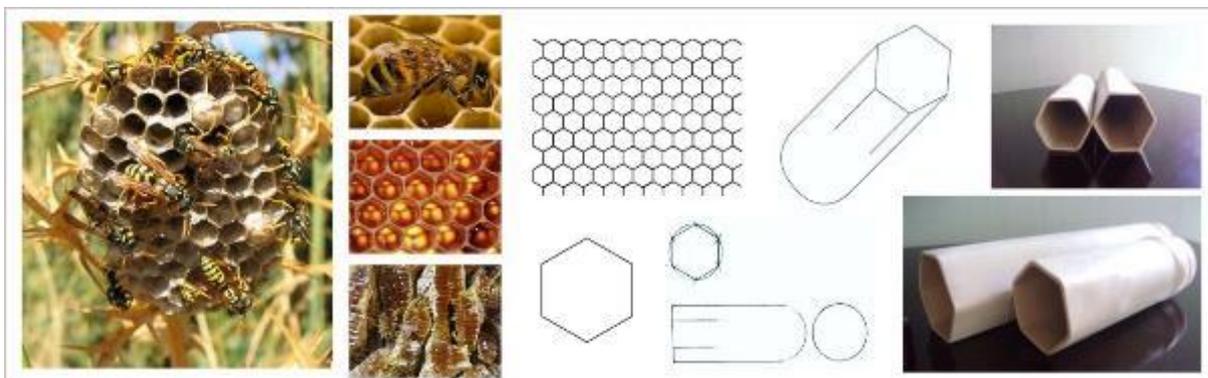


Fonte: Banco de imagens do Laboratório de BIODESIGN.

- **Estudo da Colmeia:** O aluno observa a malha externa hexagonal, atentando para a característica de cada cavidade em que na sua base

começa cilíndrica e termina na tradicional forma hexagonal, sintetizando seu modelo através de um módulo construído em PVC com as mesmas características. **(Figura 53)**

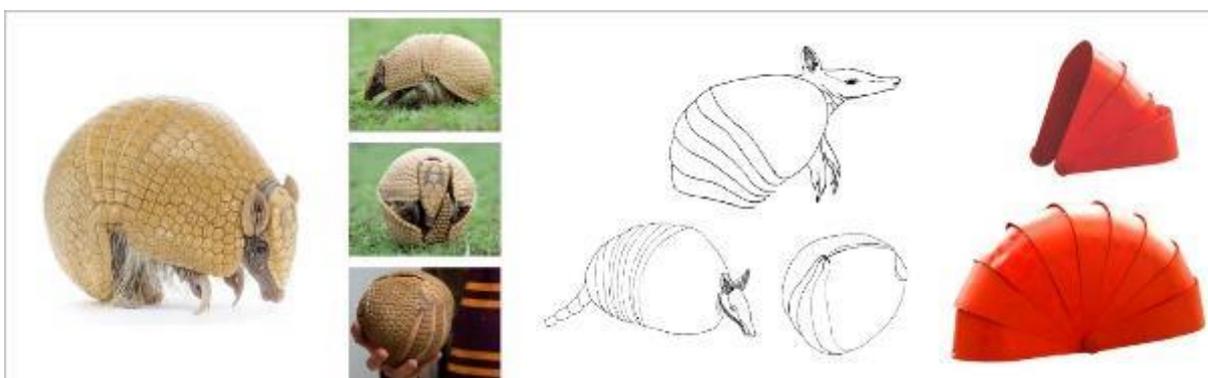
Figura 53 – Estudo da interpretação da Colmeia por Bruno Martins em 2007.



Fonte: Banco de imagens do Laboratório de BIODESIGN.

- **Estudo do Tatu Bola:** A característica mais marcante do Tatu bola é a capacidade de se enrolar em torno de si mesmo neste aspecto esférico, por isto foi feita a geometrização da forma e criado um modelo síntese deste mecanismo do movimento. **(Figura 54)**

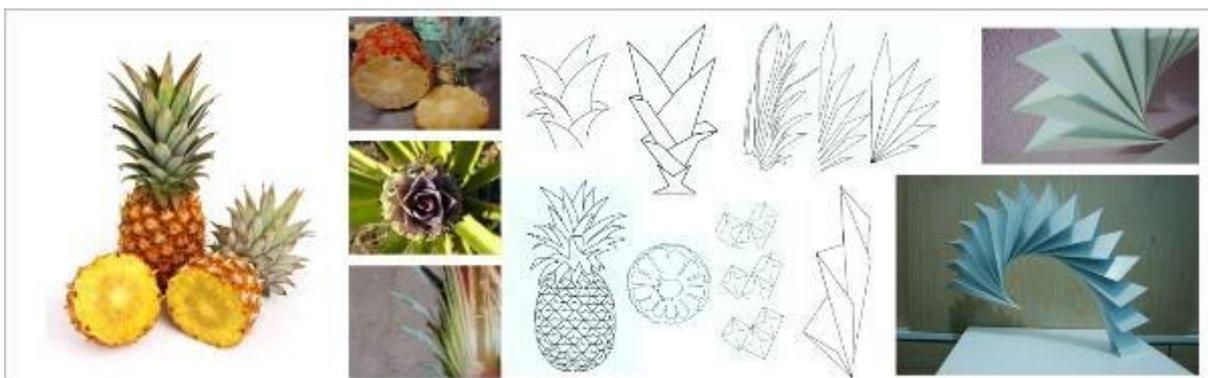
Figura 54 – Estudo da interpretação do Tatu Bola por Pedro Santana em 2010.



Fonte: Banco de imagens do Laboratório de BIODESIGN.

- **Estudo do abacaxi:** o foco foi na estrutura da coroa representada pelas camadas sobrepostas das folhas. Para a construção do modelo foram destacadas estas camadas através de uma síntese geométrica, o que torna possível a criação de várias estruturas baseadas no mesmo princípio. **(Figura 55)**

Figura 55 – Estudo do Abacaxi por Natália Barbosa e Tamyres Siqueira em 2010.



Fonte: Banco de imagens do Laboratório de BIODESIGN.

- **Estudo do alho:** Uma das características observadas no alho é a disposição dos dentes no bulbo. A forma como eles se encaixam e se destacam do talo central representou a síntese do modelo proposto. **(Figura 56)**

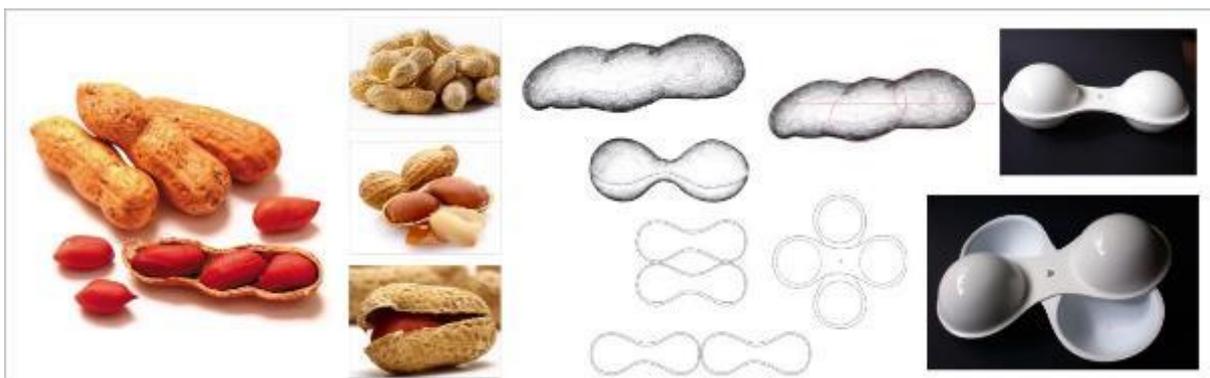
Figura 56 – Estudo da interpretação do Alho por Aline Moraes e Lucas Ayres em 2007.



Fonte: Banco de imagens do Laboratório de BIODESIGN.

- **Estudo do amendoim:** A característica analisada destacou a parte bipartida da casca onde o modelo evidenciou o seu potencial natural de embalagem, aqui representada por uma síntese geométrica de 2 hemisférios com eixo giratório. **(Figura 57)**

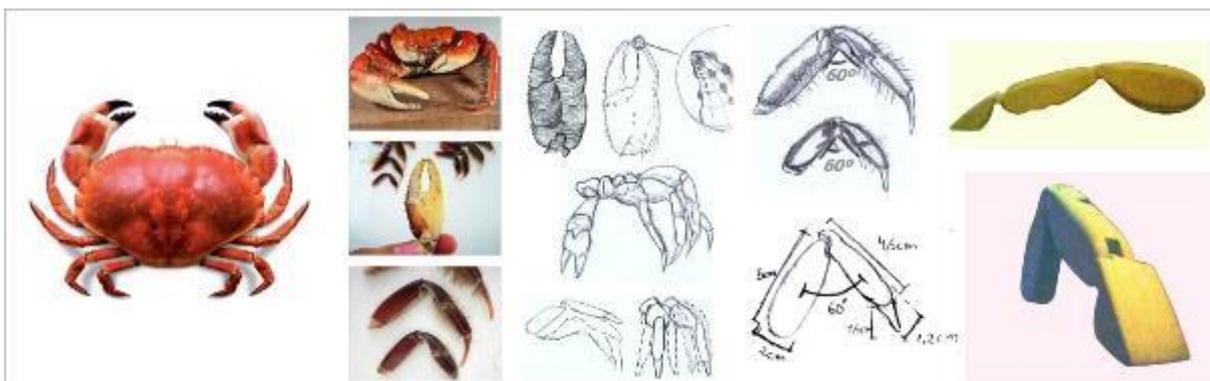
Figura 57 – Estudo da interpretação do amendoim por Alinne Torres e Soraya Holder em 2010.



Fonte: Banco de imagens do Laboratório de BIODESIGN.

- **Estudo do carangueijo:** Este modelo levou em consideração a pata do carangueijo em relação ao ângulo de amplitude que a mesma pode atingir sem oferecer dano ao animal, foi adotada também a relação de tamanhos entre a primeira e a segunda parte, modificando o formato da terceira peça com uma base plana, própria para o apoio. (**Figura 58**)

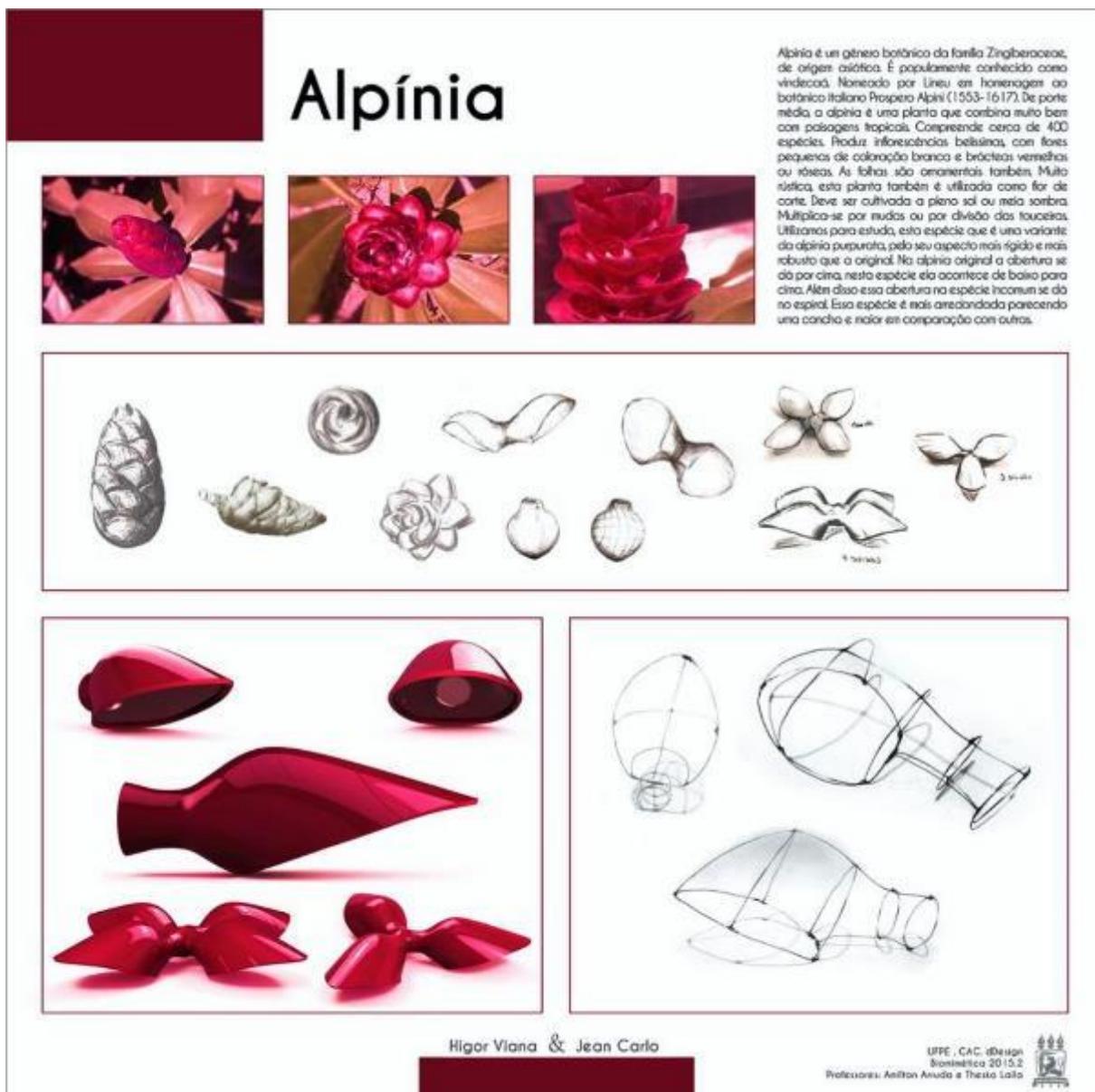
Figura 58 – Estudo da interpretação do Carangueijo por Emmanuel Gomes em 2007.



Fonte: Banco de imagens do Laboratório de BIODESIGN.

- **Estudo da Alpínia:** O modelo em questão levou em consideração o formato côncavo das pétalas da flor da planta e sugere aplicação como peça modular para iluminação pública. (**Figura 59**)

Figura 59 – Estudo da Alpínia por Higor Viana e Jean Carlo em formato de banner apresentado em exposição no Centro de Artes de Comunicação da UFPE em 2015.



Fonte: Banco de imagens do Laboratório de BIODESIGN.

Na **Figura 60** a seguir, serão apresentados outros banners com os trabalhos dos alunos para a Disciplina ministrada pela autora e o orientador no período de 2015.2.

Figura 60 – Banners apresentados em exposição no Centro de Artes de Comunicação da UFPE em 2015, com os trabalhos dos alunos para o encerramento da disciplina de Biomimética.



Fonte: Banco de imagens do Laboratório de BIODESIGN.

2.2.3.3 Universidade Católica de Goiás (UCG/BRA)

Outra metodologia que a pesquisa quis evidenciar é proposta pelo professor Tai Hsuan-An, desde 1978 docente das Artes Visuais, Arquitetura e Design da Universidade Católica de Goiás (UCG), na cidade de Goiânia. Ele se dedica ao estudo e ao ensino do processo criativo, desenho, morfologia tridimensional, ergonomia e biônica. Com caráter didático, em seu livro **Sementes do Cerrado e do Design Contemporâneo**, aborda a metodologia com 6 etapas para análise biônica explicada em suas disciplinas e aplicada no Design e na Arquitetura, demonstrando as técnicas de estudo de estruturais naturais típicas da região, através de frutos e sementes do cerrado. São elas:

1. Escolha do modelo biológico

Operação: Escolher um modelo biológico que se destaca com características formais, estruturais e funcionais.

Métodos: Observação e análise prévias do modelo num processo de leitura e reconhecimento; Aplicação dos critérios que são características significativas e peculiares, fenômenos notáveis. Observação minuciosa dos detalhes, inclusive dos milimétricos.

Técnicas Específicas: Observação do modelo biológico no habitat; Coleta do modelo; uso de lentes de aumento, microscópio ou outros tipos de visualização de detalhes minúsculos; reconhecimento pelo toque manual para detecção da resistência, consistência e da estrutura do material; consulta do inventário de características. *(Ver inventário após os exemplos)*

2. Observação e análises iniciais

Operação: Fazer atentamente a leitura e o reconhecimento do modelo Biológico com o objetivo de melhor entendê-lo, registrando através de textos e/ou desenhos, suas características visuais, formais, estruturais e funcionais mais significativas.

Métodos: Observação, análise, registro gráfico, anotação escrita num procedimento de reconhecimento tátil e visual; Consulta do catálogo da tipologia (inventário) das características das formas; pesquisa bibliográfica

e de campo sobre o modelo; desmembramento ou dissecação do modelo biológico para visualizar detalhes.

Técnicas Específicas: Registro fotográfico (normal, macro ou microscópico); desenho detalhado com luz e sombra; croquis com captura rápida de imagens; desenho esquemático; anotação sucinta junto aos desenhos; uso do inventário das características.

3. Observação e análise em maior profundidade

Operação: Fazer o reconhecimento dos detalhes e dos elementos de maior destaque e desenhá-los de maneira enfática, criando condições para a etapa de interpretação de síntese e abstração.

Métodos: Seleção prévia dos desenhos de detalhes e das características de grande potencial; Elaboração de novos desenhos com realce gráfico e interpretativo a partir dos selecionados;

Técnicas Específicas: As mesmas da etapa anterior.

4. Interpretação objetiva da exterioridade e da essência do modelo

Operação: Fazer a síntese e abstração formal e geométrica do modelo biológico e dos seus detalhes, interpretando graficamente as formas mais notáveis analisadas anteriormente, e preservando ou enfatizando as suas características externas e internas.

Métodos: Síntese e abstração formal e geométrica com dimensões proporcionais às do modelo; com variação dimensional diferente do modelo; com transformação segundo o critério da similaridade e através de vistas, cortes e perspectivas.

Técnicas Específicas: Desenho à mão livre e interpretativo das ideias sugeridas (formais, estruturais e funcionais) pelo modelo e dos seus detalhes mais significativos; Desenhos de síntese e abstração com eliminação de detalhes, elementos secundários ou insignificantes; Desenho geométrico com instrumento; Esquemas, diagramas e desenhos de renderização e modelagem eletrônica por meio do computador; Morfogramas; Uso do inventário das características.

5. Criação experimental de novas formas

Operação: Criar novas formas experimentais e analógicas em modelos, a partir dos estudos da interpretação por síntese e abstração.

Métodos: Experimentação em modelagem das formas obtidas anteriormente; Registro fotográfico dos modelos experimentais.

Técnicas Específicas: Modelagem em papel, argila, ou outros materiais de fácil manipulação; Fotografia (normal e macro); Representação bidimensional (vários tipos de desenhos); Morfograma; Uso do inventário das características.

6. Elaboração da proposta definitiva de uma ideia

Operação: Confeccionar o objeto ou um sistema de objetos e elaborar as pranchas de apresentação de todo o processo de análise, do desenvolvimento, da configuração final do objeto, da aplicação ou das possibilidades de aplicação, com um memorial descritivo/justificativo do trabalho.

Métodos: Confeção do modelo usando técnicas apropriadas; Ilustração simulativa da aplicação; planejamento gráfico das pranchas de apresentação; Elaboração do memorial sucinto, claro, objetivo, ilustrativo e completo.

Técnicas Específicas: Todas as técnicas de representação bi e tridimensional adequadas.

Para facilitar o entendimento desta metodologia, a figura abaixo sintetiza o método de análise da estrutura natural proposta pelo professor Tai, e em seguida, serão mostrados sua aplicabilidade através de alguns dos trabalhos de seus alunos. **(Figura 61)**

Figura 61 – Esquema do método utilizado pelo professor Tai na UCG.



Fonte: Esquematizado de (HSUAN-AN, 2002).

Na **Figura 62**, o modelo proposto enfatizou a estrutura central estrelada do fruto de *Cedro seco*, mas observa-se que foram feitos vários desenhos (estudos) da

estrutura inteira, das partes, evidenciando a característica estrelar e pentagonal, até chegar no desenho em que se fez a abstração geométrica das ranhuras que foi base para a construção do modelo físico.

Figura 62 – Análise Morfológica do fruto de Cedro.

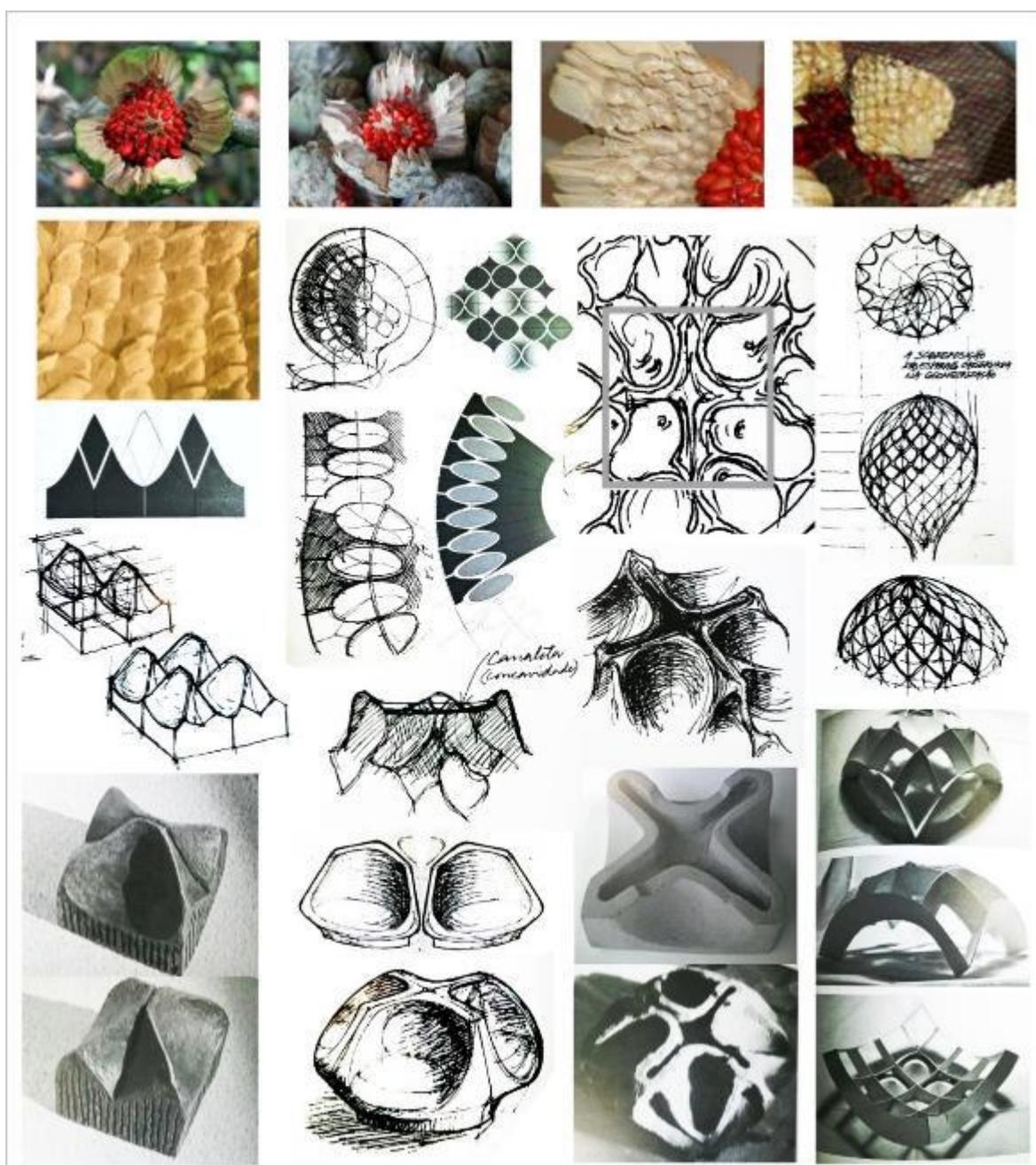


Fonte: (HSUAN-AN, 2002).

Já na **Figura 63** têm-se o exemplo da *Pinha-do-Brejo*, sua estrutura aberta e seca resultou na configuração de 3 modelos, o que é interessante observar é que se

pode obter vários resultados dependendo do ponto de interesse ou do foco da análise. Um modelo foi resultante da modulação encontrada na textura da parede interna que acomoda as sementes, outro, no espaço vazio entre eles em forma de cruz, e um terceiro, na malha estrutural côncava no topo da estrutura interna.

Figura 63 – Análise Morfológica do fruto de Pinha-do-Brejo.

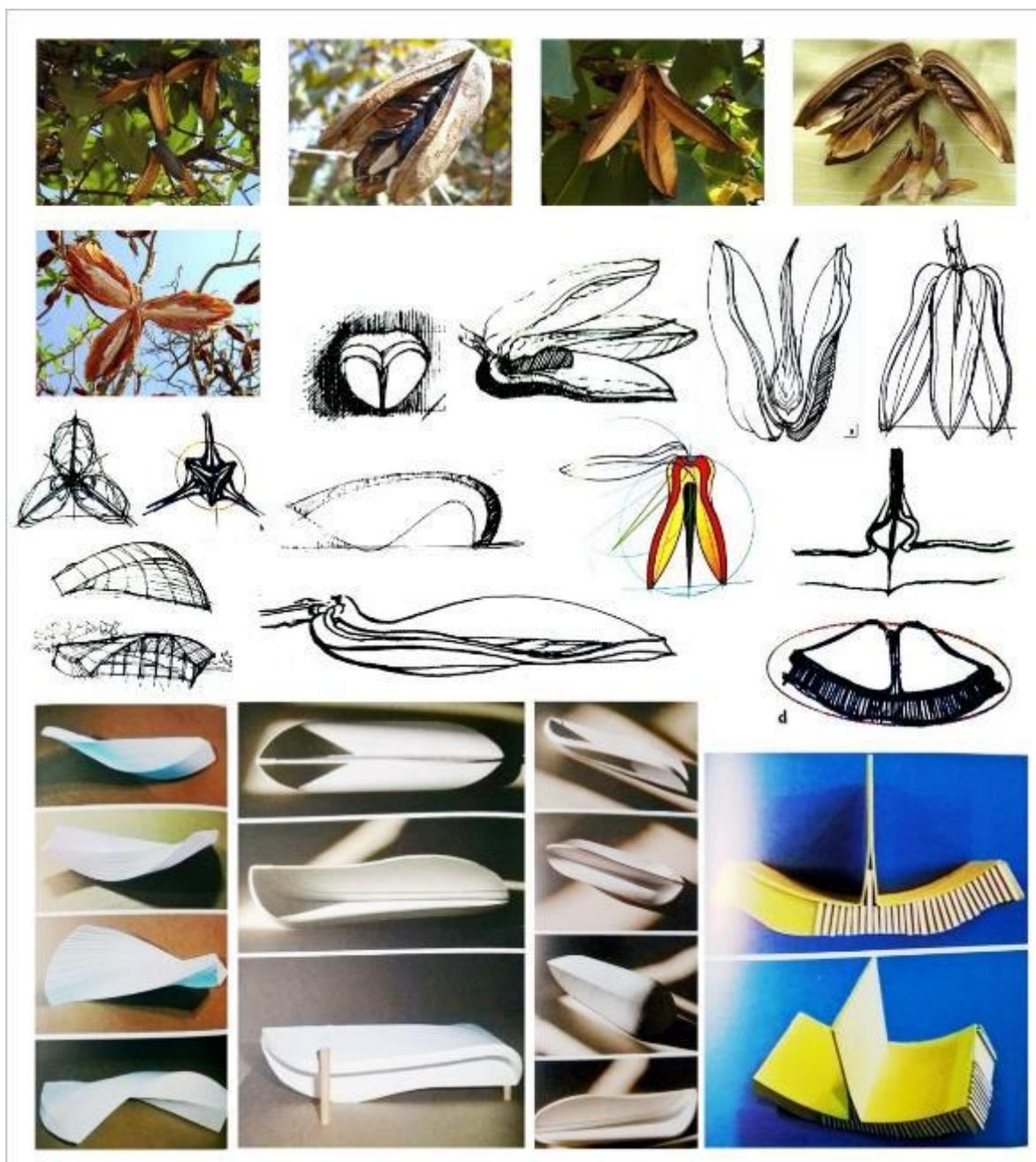


Fonte: (HSUAN-AN, 2002).

No último exemplo, a **Figura 64** apresenta a análise do *Pau-Terra* que também resultou em 3 modelos. O primeiro, evidenciando as torções das 3 partes abertas; o

segundo, evidenciando uma simplificação geométrica de uma das 3 partes, observando sua terminação pontuda e sugerindo inclusive a aplicação como banco longo; e por fim, o último foca na junção entre 2 cascas e no detalhe da ranhura da espessura destas.

Figura 64 – Análise Morfológica do fruto do Pau-Terra.



Fonte: (HSUAN-AN, 2002)

Hsuan-An (2002) argumenta que em virtude da grande variedade, e algumas vezes, da complexidade das formas naturais, se faz necessário classificar as suas

características em diversas categorias com o intuito de facilitar o seu entendimento. Ele atenta para a importância de se identificar e descrever estas características, pois podem servir de critérios, parâmetros ou fatores a serem utilizados tanto na análise do modelo natural, quanto na abstração geométrica que resultará no modelo biomimético. Os diagramas a seguir esclarecem sobre as 6 categorias do que ele chamou de **“Inventário das características”**. Podem ser observadas tanto em formas naturais quanto em artificiais, e aqui servem de parâmetros para o olhar atento, detalhista e criterioso durante a descrição e análise do modelo natural investigado.

1ª Categoria – Características formais configurais:

Forma Orgânica Forma Geométrica Forma Curva Forma Topológica Linear Linha Reta Linha Curva Arco Senoidal	Zigzag Espiral Radial Circular Oval Elipse Plano/Polígono Superfície Plana Superfície Curva	Superfície Variante Tubular Laminar/Planiforme Volume Sólido Geométrico Gradação Modular Abertura Fechamento
--	---	---

2ª Categoria – Características estruturais e prático-funcionais:

Autoportante Sustentação Envoltura em camadas Dobras Compartimentos Encaixe Invólucro Base Eixo de fixação Articulação fixa Articulação dinâmica	Ramificação Triangulação Engavetamento Entrelaçamento Pino Acumulação Enfileiramento Núcleo Modulação Tampa cobertura Transição	Concavidade Convexidade Empilhamento Encadeamento Ligação Linear Pêndulo Entrada Saída Canal Aerodinâmica
--	---	--

3ª Categoria – Características cinéticas e comportamentais:

Flexibilidade Elasticidade Rotatoriedade Giratoriedade Dobrabilidade	Mobilidade Oscilatoriedade Permutabilidade Expansibilidade Impulsividade	Vibratoriedade Explosividade Repelência Aderência
--	--	--

4ª Categoria – Características texturais, estéticas e qualitativas:

Transparência Opacidade Porosidade Lisura Nervurada Reticulada Trançada Puro Consistência	Compacto Fragilidade Peso Leveza Limpo Natural Tecnológico Lúdico Agressividade Suavidade	Elegância Musicalidade Vivacidade Tensão Repouso Surpresa Impacto Exagero Ênfase
---	--	--

5ª Categoria – Características compositivas:

Movimento Ritmo Harmonia Contraste Proporção Equilíbrio Ordem Axialidade Semelhança Diferença Simetria Assimetria Concordância	Espaço Vazio Cheio Intervalo Atração Repulsão Proporcionalidade Gradualidade Desigualdade Disposição Linear Verticalidade Horizontalidade Inclinação	Alternância Repetição Multiplicidade Sobreposição Justaposição Densidade Dispersividade Aleatoriedade Direção Posição
--	--	--

6ª Categoria – Características dimensionais e quantitativas:

Espessura Altura Comprimento Profundidade Diâmetro/ raio Angulação	Quantidade Redução Aumento Grande Pequeno Grosso Fino	Longo Curto Alto Baixo Fundo Raso
---	---	--

Dondis (2003) fala que os conceitos fundamentais da sintaxe visual, tais como os elementos visuais (ponto, linha, forma, direção, tom, cor, textura, dimensão, escala e movimento) e suas noções de percepção (harmonia, equilíbrio, simetria, proporção, contraste, etc.), correspondem aos elementos básicos da configuração e são a fonte compositiva de qualquer tipo de material, objeto, mensagem e experiência visual. Eles

representam o cerne da atividade projetiva pois podem ser manipulados para serem percebidos numa resposta direta ao que está sendo concebido.

“O ponto, a unidade visual, o indicador e marcador de espaço; a linha, o articulador fluido e incansável da forma, seja na soltura vacilável de um esboço, seja na rigidez de um projeto técnico; a forma, as formas básicas, o círculo, o quadrado, o triângulo e todas as suas infinitas variações, combinações, permutações de planos e dimensões; a direção, o impulso de movimento que incorpora e reflete o caráter das formas básicas, circulares, diagonais, perpendiculares; o tom, a presença ou a ausência de luz; através da qual enxergamos; a cor, a contraparte do tom com o acréscimo do componente cromático, o elemento mais expressivo e emocional; a textura, óptica ou tátil, o caráter de superfície dos materiais visuais; a escala ou proporção, a medida e o tamanho relativos; a dimensão e o movimento, ambos implícitos e expressos na mesma frequência.” (DONDIS, 2003)

Uma fonte inesgotável para perceber estes conceitos fundamentais pode ser facilmente encontrada de maneira abundante na Natureza. Tanto no reino animal, vegetal ou mineral existem uma infinidade de formas, cores e texturas que podem ser observadas, analisadas, representadas e interpretadas em projetos de design.

Hsuan-An (2002) revela que as características compositivas descritas na 5ª categoria, relativas aos fundamentos da sintaxe visual possuem enfoque numa série de fatores que determinam o grau da **qualidade compositiva** em obras de arte, objetos, edificações, sendo também encontrados nas formas naturais. Por isto, esta abordagem baseada na sintaxe da linguagem visual para a compreensão e a qualidade estético-formal de modelos biológicos é bastante interessante e promissora, o que justifica sua coerência em utilizá-las nos exercícios criativos como parâmetros nas análises das estruturas naturais, pois pode-se claramente observar estas características categorizadas pelo professor Tai no âmbito de todas as estruturas naturais em diversos níveis. E isto pressupõe um grande potencial para futuras pesquisas neste sentido, que certamente ampliaria o estudo de técnicas referentes a analogias da natureza.

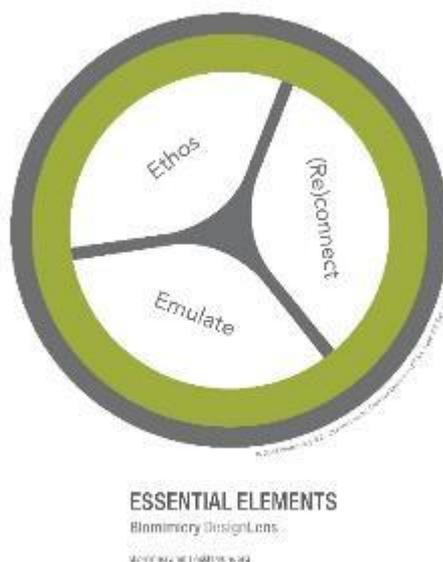
2.2.4 BIOMIMICRY THINKING – DESIGN LENS (*Biomimicry Institute 3.8*)

Há quase 20 anos, Benyus (1997) documentou e integrou suas descobertas, transmitindo ensinamentos, testificados na obra *Biomimética, Inovação inspirada na Natureza* e também através do canal online do ***Biomimicry Institute 3.8*** fundado junto com outros pesquisadores. Este site disponibiliza conteúdos, reúne pessoas envolvidas com o tema, divulga concursos, diversos workshops, palestras, cursos de especialização e parcerias com Universidades. Também está disponível o projeto idealizado junto com a pesquisadora *Dayna Baumeister* e sua equipe, onde sistematizou a metodologia chamada ***Biomimicry DesignLens***, descrita na obra *Biomimicry Resource Handbook, a seed bank of knowledge and best practices*, a qual será abordada com mais detalhes a seguir.

Esta ferramenta possui um background de desenvolvimento e aperfeiçoamento desde 1998 e está em constante evolução através de novas descobertas na ciência. Ela foi criada com o intuito de ajudar a observar profundamente a forma como a vida funciona, e estabelecer parâmetros para a utilização da genialidade da natureza, orientando os projetos humanos. A ideia é fornecer um contexto nas tomadas de decisão, procurando identificar onde, como e por quê a biomimética se encaixa no processo de qualquer disciplina ou em qualquer escala do projeto de design.

Com vários anos de pesquisas científicas e análises de suas aplicações, os conteúdos do *Biomimicry DesignLens* foram sintetizados em diagramas, neles são explorados os principais componentes da sua abordagem: ***Essencial Elements, Life's Principle e Biomimicry Thinking*** que ajudam a entender melhor as características e atores principais, servindo de referência nesta contínua evolução do cenário Biomimético. A seguir, na **Figura 65** o diagrama *Essencial Elements*, com os três elementos essenciais e interconectados para a prática do biomimetismo.

Figura 65 – Diagrama dos Elementos Essenciais para prática da Biomimética.

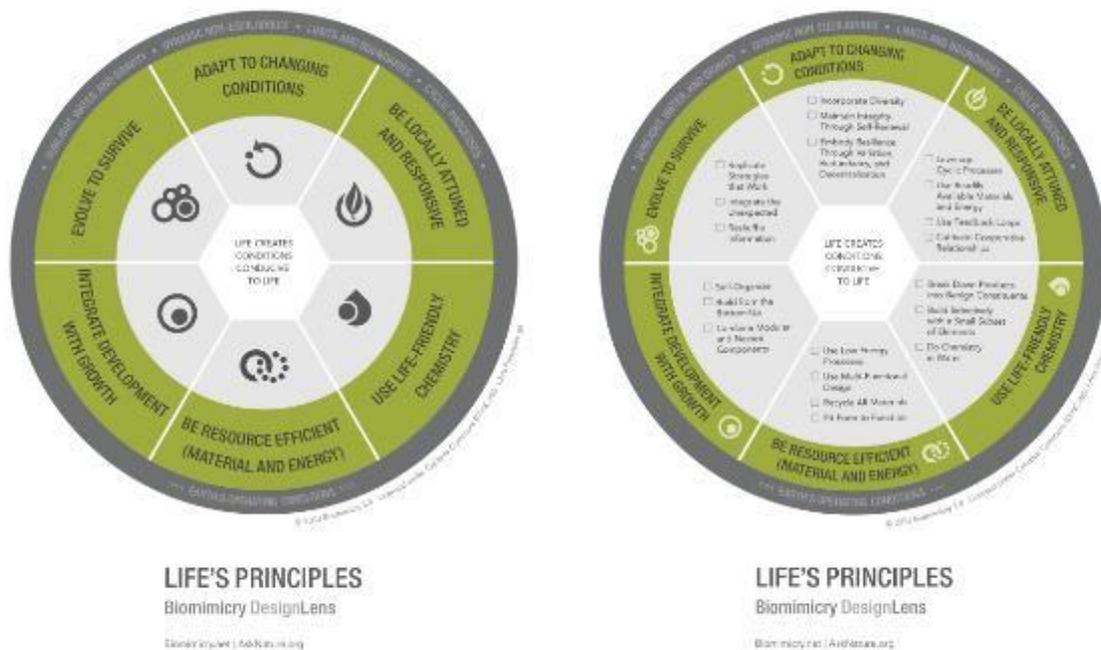


Fonte: (BAUMEISTER *et al.*, 2012).

Ethos, constitui a essência da ética, das intenções e da filosofia subjacente para praticar biomimética, representa o respeito, responsabilidade e gratidão da espécie humana pelas demais espécies e pelo planeta; ***(Re)Connect***, reforça o entendimento de que, apesar de separadas, as pessoas e a natureza na verdade estão profundamente interligadas, o homem faz parte da natureza, uma prática e uma mentalidade de reconexão do humano com o meio natural; e ***Emulation*** representa os princípios, padrões, estratégias e funções encontradas na natureza que podem inspirar o design, é sobre ser pró-ativo na realização da visão dos seres humanos se encaixando de forma sustentável na Terra. (BAUMEISTER *et al.*, 2012)

A **Figura 66** apresenta outros dois importantes diagramas apresentando os ***Life's Principles*** (Princípios da vida) que correspondem as lições de design da natureza, estratégias que têm garantido a sobrevivência da vida na terra. Tais podem ser usadas como parâmetros sustentáveis que permitem utilizar a genialidade da natureza como ideais a serem conquistados nas inovações. Numa fase de avaliação, estes princípios podem ser usados para medir a sustentabilidade das novas criações.

Figura 66 – Diagramas dos Princípios da vida.



Fonte: (BAUMEISTER *et al.*, 2012).

Rattes (2015), em seu trabalho de pesquisa apresenta uma tradução para o português mais assertiva destes 6 Princípios, são eles:

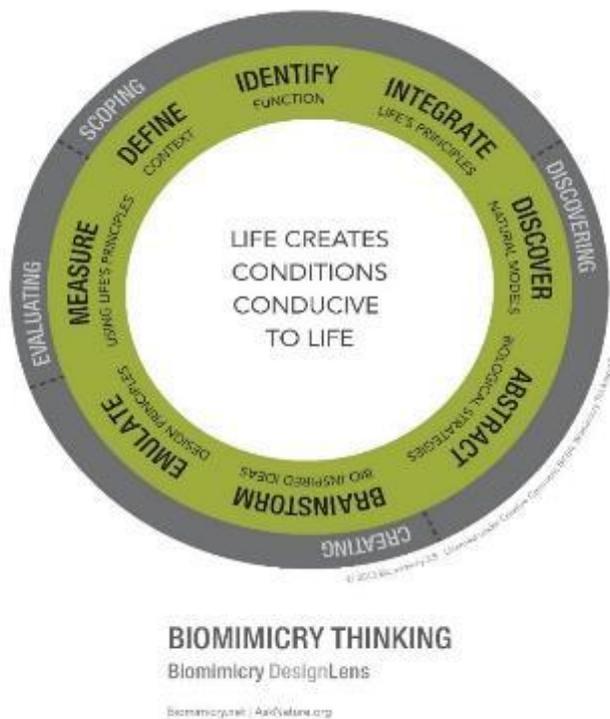
- 1- **Evoluir para sobreviver:** envolve estratégias de gerenciamento de informações. Listando: datar estratégias; identificar abordagens de sucesso anteriores; identificar erros; integrar soluções alternativas a um mesmo problema; e evoluir as abordagens criando novas opções de soluções;
- 2- **Adaptar-se às condições de mudanças:** inclui soluções que permitam resiliência, redundância e descentralização do sistema. Permite a adição de energia e matéria, desde que voltado para reparar/sanar e melhorar o desempenho do sistema. Incorpora a diversidade que o rodeia (estudar processos, funções e formas para prover um melhor funcionamento);
- 3- **Ser atento e responsivo a questões locais:** usa materiais de fácil acesso (local e energético); cultiva processos de cooperação mútua, onde todos ganham; tira proveito de fenômenos locais que se repetem (clima, ciclos, etc); inclui o fluxo de informações em processos cíclicos, nunca lineares;

- 4- **Usar química amigável à vida:** usa poucos elementos de uma forma elegante; usa química favorável a vida, ou seja, evita produtos tóxicos; usa água como solvente;
- 5- **Ser eficiente em recursos (materiais e energia):** integra múltiplas necessidades em soluções elegantes (evita desperdício); minimiza o consumo energético; busca fontes renováveis; gerencia o uso de materiais em ciclo, ou seja, planeja o ciclo de vida. Segundo este preceito, a forma deve seguir o desempenho pretendido;
- 6- **Integrar conhecimento e crescimento:** combina elementos modulares e sistemas que evoluem do simples para o complexo; compreende o funcionamento do todo e também dos pequenos componentes e sistemas que o compõe; cria condições para que os componentes interajam de uma forma que o todo consiga ter propriedade de auto-organização.

Os últimos diagramas se referem a abordagem do ***Biomimicry Thinking***, considerado como método ou ferramenta para ajudar as pessoas a praticar biomimética ao projetar qualquer coisa. Há quatro fases em que esta lente biomimética fornece valor para o processo de design (independente da disciplina em que se integra): ***escopo, descobrir, criar e avaliar***. Seguindo os passos específicos dentro de cada fase, isto vai ajudar a integrar com sucesso as estratégias da vida com o que for criado no projeto de Design. (**Figura 67**)

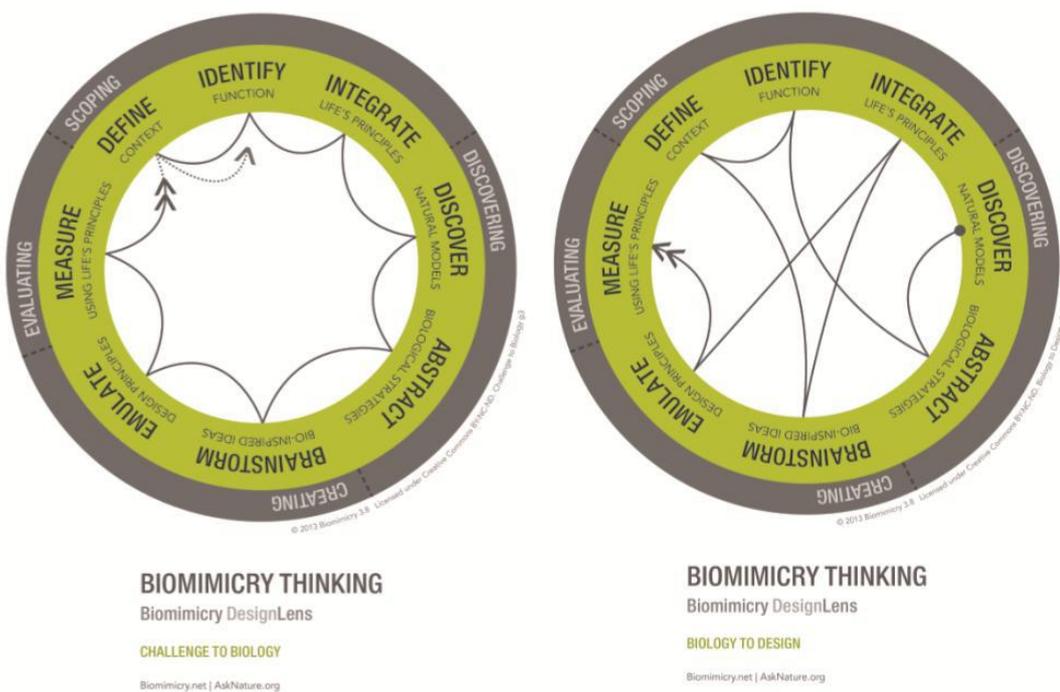
Existem 2 diagramas com os caminhos para o uso do *Biomimicry Thinking* (**Figura 68**), um chamado “**Desafio para a Biologia**”, quando já tiver um problema específico a ser resolvido, como por exemplo: locomoção, e se busca na natureza referências para solucionar esse problema. É útil para uma configuração "controlada", como uma sala de aula, ou para criação num processo colaborativo. Outro, é chamado “**Biologia para o Design**”, quando a partir de uma investigação na natureza se identifica uma oportunidade para aplicação. Este é mais adequado quando o processo inicia com uma visão biológica inspiradora, como por exemplo: quando ao pesquisar uma cobra se identifica o potencial de uso do seu sistema de locomoção em um sistema artificial.

Figura 67 – Biomimicry Thinking



Fonte: (BAUMEISTER *et al*, 2012).

Figura 68 – Diagramas Biomimicry Thinking, “Desafio para a Biologia”, à esquerda e “Biologia para o Design”, à direita.



Fonte: (BAUMEISTER *et al*, 2012).

No “**Desafio para a Biologia**” têm-se as seguintes etapas numa ordem de sentido horário como descrito a seguir:

- 1- **Definir Contexto** - Especificar o desafio e as condições de funcionamento;
- 2- **Identificar a Função**- Determinar qual a função-chave o projeto deve executar. O que é preciso fazer?
- 3- **Integrar os Princípios da Vida** – Comprometer-se a incorporar os princípios da vida às exigências do projeto.
- 4- **Descobrir Modelos Naturais** - Encontrar organismos ou ecossistemas que evoluíram estratégias para resolver as funções necessárias;
- 5- **Abstrair Estratégias Biológicas** – Determinar o mecanismo por trás das estratégias dos organismos e traduzir isto num princípio de design;
- 6- **Debater ideias Bio-inspiradas** – Pensar em várias ideias de como aplicar os princípios de design para resolver o desafio;
- 7- **Emular Princípios de Design** – Aprimorar as melhores idéias do debate e desenvolver um conceito de design. Considerando aspectos de escala, indo além, emulando formas para também melhorar processos e ecossistemas;
- 8- **Medir usando Princípios da Vida** – Avaliar o projeto usando os princípios da vida como um *checklist*.

Já na “**Biologia para o Design**” considera-se uma ordem diferente das etapas, como observa-se a seguir:

- 1- **Descobrir Modelos Naturais** - Encontrar organismos ou ecossistemas inspiradores e aprender suas estratégias únicas para a sobrevivência.
- 2- **Abstrair Estratégias Biológicas** – Determinar o mecanismo por trás das estratégias dos organismos e traduzir isto num princípio de design;
- 3- **Identificar a Função** – Usando a estratégia e o seu princípio de design como um guia, definir qual função está sendo atendida. Dica: a função deve ser a mesma para ambos;
- 4- **Definir Contexto** - Especificar as circunstâncias em que é necessária essa função. Quem precisa fazer o que este organismo ou ecossistema está fazendo?

- 5- **Debater ideias Bio-inspiradas** – Pensar em ideias de como combinar o contexto, função e o princípio de design para solucionar o desafio;
- 6- **Integrar os Princípios da Vida** – Considerar as ideias que incorporem os princípios da vida na solução;
- 7- **Emular Princípios de Design** – Aprimorar as melhores idéias do debate e desenvolver um conceito de design. Considerando aspectos de escala, indo além, emulando formas para também melhorar processos e ecossistemas;
- 9- **Medir usando Princípios da Vida** – Avaliar o projeto usando os princípios da vida como um *checklist*.

Além da metodologia, outra plataforma criada pelo Instituto, o **AskNature** (Pergunte à Natureza), funciona como uma comunidade online colaborativa que reúne pesquisadores que alimentam um grande banco de dados para os interessados em trocar informações sobre o assunto. Nesta incrível fonte de informação estão compartilhados os trabalhos de biólogos de diferentes partes do mundo sobre as mais variadas espécies e que podem ser acessados por qualquer pessoa, inspirando criações inovadoras e sendo utilizado por profissionais de diversas áreas.

2.2.5 O GRASSHOPPER E A IMPRESSÃO 3D À SERVIÇO DA BIOMIMÉTICA

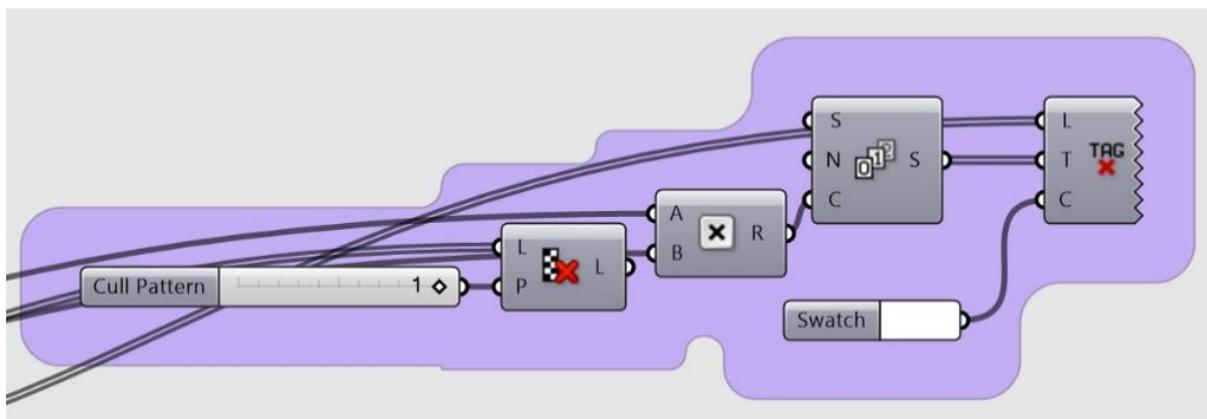
O design vem passando por mudanças de paradigma desde a popularização do acesso a computação gráfica. A evolução dos sistemas CAD (*Computer Aided Desing - Projeto Assistido por Computador*) e CAM (*Computer Aided Manufacturing - Fabricação Assistida por Computador*) permitem propor novas possibilidades no que se refere à criação e fabricação digital. Esta tecnologia tem trazido novas técnicas para traduzir a analogia de estruturas naturais através de softwares como o *Grasshopper* que permite uma modelagem orgânica intuitiva e conexão com impressoras 3D para confecção de protótipos e modelos biomiméticos.

O termo *design paramétrico* refere-se à utilização de software que permite ligar parâmetros numéricos e geométricos para fazer ajustes incrementais de uma peça que, em seguida, afeta todo modelo em cadeia. Neste, as partes do projeto são inter-relacionadas e mudam juntas de forma coordenada. Esta conexão facilita mudanças, relações, adições e reparos no projeto, reduzindo retrabalho e facilitando possibilidades. (QUEIROZ, 2015)

Atualmente, existem muitos softwares paramétricos a serem utilizados por projetistas, tais como o *Solidworks*, o *Solidedge*, o *Inventor*, o *Catia*, dentre outros, porém, o *Grasshopper*, *plug-in do Rhinoceros*, desenvolvido pela *Robert McNeel & Associates*, permitem em conjunto, a execução da modelagem 3D com uso de parâmetros matemáticos (algoritmos generativos), que possui uma linguagem mais fácil, rápida e intuitiva para geração de alternativas de formas mais orgânicas.

Rattes (2015) comenta que no *Grasshopper* há encapsulamentos nas entidades comumente conhecidas por *Componentes*, também chamados de *módulos* que carregam uma programação com resultado específico. Sua apresentação é dada como uma cápsula que apresenta sua configuração resumida em *inputs* e *outputs*, sendo estes, qualquer entidade que relacione dois módulos entre si. O fato de conter inúmeros parâmetros de programação, primordiais para o seu funcionamento, faz com que cada componente do sistema tenha seu funcionamento previsto e controlado pelo comando a ser executado, como por exemplo: *Fillet*, *Explode*, *Point*, dentre outros. (Figura 69)

Figura 69 – Exemplo da interface dos componentes no *Grasshopper*.



Fonte: (RATTES, 2015).

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

Para a *Fabricação Digital* usa-se ferramentas numericamente controladas por computador (CNC) para fabricar ou prototipar objetos, peças e sistemas. Em documentos acadêmicos, quando ferramentas digitais são utilizadas durante a fase de prototipagem, recebe o termo de *prototipagem rápida* (*rapid prototyping*) e quando utilizadas para fabricação, o termo de *manufatura rápida* (*rapid manufacturing*) (QUEIROZ, 2015).

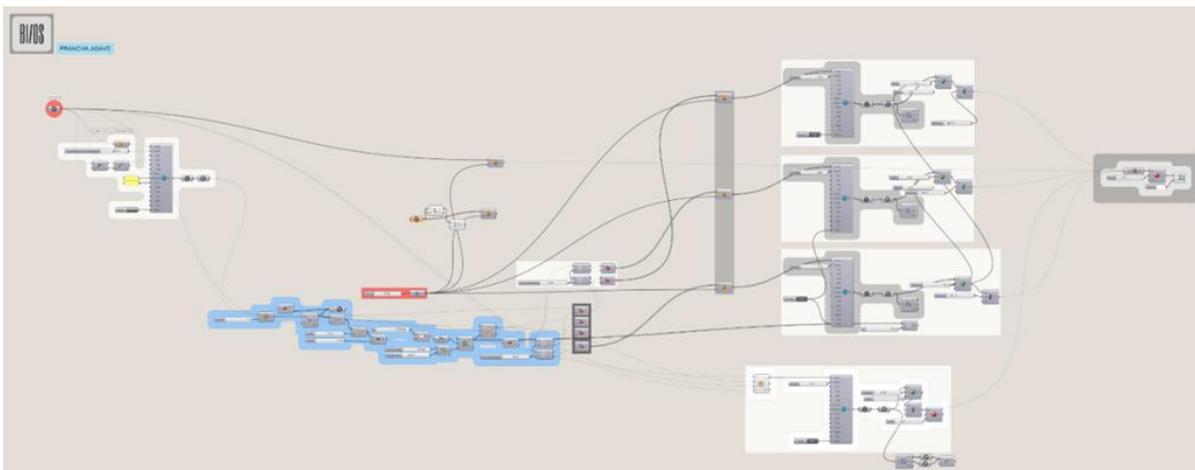
A técnica permite cortar e construir peças mais complexas do que as feitas à mão. Com o tempo, as máquinas CNC foram se diversificando e hoje é possível cortar peças com jato de água, fresas, laser e ainda imprimir objetos em 3 dimensões (*impressoras 3D*). Com a popularização, estas máquinas estão atingindo um público cada vez maior, sob formatos domésticos de "fabricação pessoal", o que tem favorecido também na prototipagem de estudos de artefatos biomiméticos. (QUEIROZ, 2015).

Para ilustrar a união entre o Design paramétrico (*Grasshopper*), o orgânico (Biomimética) e a fabricação digital (impressão 3D), três pesquisas recentes que utilizaram a metodologia *Biomimicry DesignLens* serão discutidas a seguir, a de Araújo (2015) que será melhor detalhada para facilitar o entendimento destas técnicas e também a de Queiroz (2015) e a de Rattes (2015). Estas pesquisas foram desenvolvidas em parceria com o PPGDesign da UFPE sob a tutela dos doutores Leonardo Castilho e Ney Dantas do laboratório *Nexus* (UFPE/BRA), que trabalham na interface entre a sustentabilidade e o design em suas diversas frentes, e também com o grupo *BI/OS*, que ajudou na manipulação do *Grasshopper*.

No projeto de Rodrigo Araújo (2015), o software possibilitou utilizar as estratégias da **planta Agave**, aplicando sua lógica estrutural em escala ampliada de modo a adequá-la no design de estruturas e processos de produção de pranchas de surf. A modelagem paramétrica permitiu que estas estratégias da planta, convertidas em parâmetros, pudessem ser aplicadas em incontáveis artefatos que fazem uso de estruturas leves e resistentes, objetivando atingir economia de material e peso, mantendo a leveza.

Primeiramente, se definiu o *input*, que foi o *shape (outline)* da prancha. Para o preenchimento interior, foram definidas células com maior diâmetro possuindo paredes finas, para pontos de reforço, foram definidos tubos longitudinais com paredes espessadas e para a superfície, células mais densas. A solução pensada foi um parâmetro do programa chamado **Voronoi**, se trata de um tipo de decomposição de um dado espaço que contém elementos distribuídos entre si com determinadas distâncias entre objetos e família de objetos através de pontos, são amplamente encontrados na natureza em diversos campos da ciência e tecnologia, tendo inúmeras aplicações práticas e teóricas. Com ele, as células foram escalonadas com furos nas paredes, depois receberam suavização da forma com união final dos elementos. Na **Figura 70** abaixo, a imagem ilustra o resultado final com toda a programação das funções necessárias na forma de um *script* contendo todas as diretrizes geradas pelo programa. (ARAÚJO, 2015)

Figura 70 – Script gerado pelo Grasshopper da estratégia do Agave aplicado em prancha de surf.



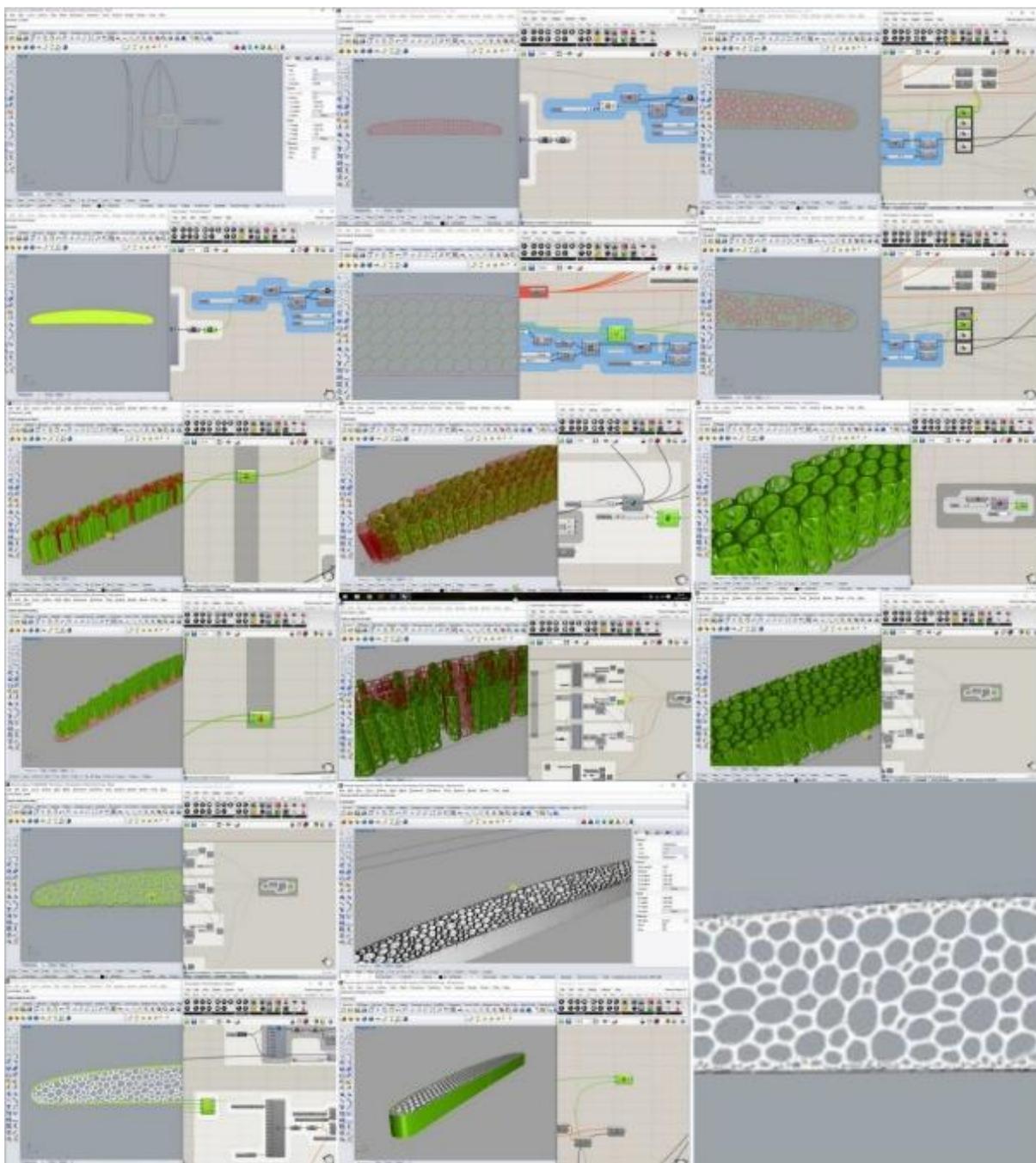
Fonte: (ARAÚJO, 2015).

A diferenciação das células maiores e menores foi feita com a lógica das paredes finas para economia de peso e paredes espessadas em pontos de reforço. Com a lógica da diferenciação das células bem definidas, cada uma é um elemento individual, porém reconhecíveis e agrupadas por padrões. Em cima desta malha bidimensional, se aplicou a função de extrusão, configurando “tubos” iniciais. (ARAÚJO, 2015)

O próximo passo foi a configuração de uma malha determinando os campos através da ferramenta de **pontoação**, neste parâmetro, essas regiões tornam-se vazadas de uma forma que não compromete a resistência, distribuindo os pontos de tensões ao longo de cada elemento isolado, e depois, em toda estrutura. Com células mais densas foram preenchidos os espaços vazios próximos à superfície e bordas da secção da prancha de surf, esta camada funciona como se fosse a laminação de uma prancha de surf, que é composta por fibra de vidro e resinas poliméricas, é o reforço necessário para evitar trincas e infiltrações, inspirada na resistência que a casca do escapo floral do Agave apresenta. (ARAÚJO, 2015)

A **Figura 71** representa as telas com o passo-a-passo do desenvolvimento da estratégia no programa.

Figura 71 – Imagens das telas do modelo desenvolvido por Rodrigo Araújo no *Grasshopper*.



Fonte: (ARAÚJO, 2015).

A aplicação da estrutura bioinspirada final foi feita apenas numa secção de uma prancha de surf para validação da aplicação da analogia do agave na tecnologia e no design de artefatos como pode ser visto de maneira resumida na **Figura 72**.

Figura 72 – Estudo e aplicação das estratégias do Agave proposta por Rodrigo Araújo com modelo impresso em 3D.



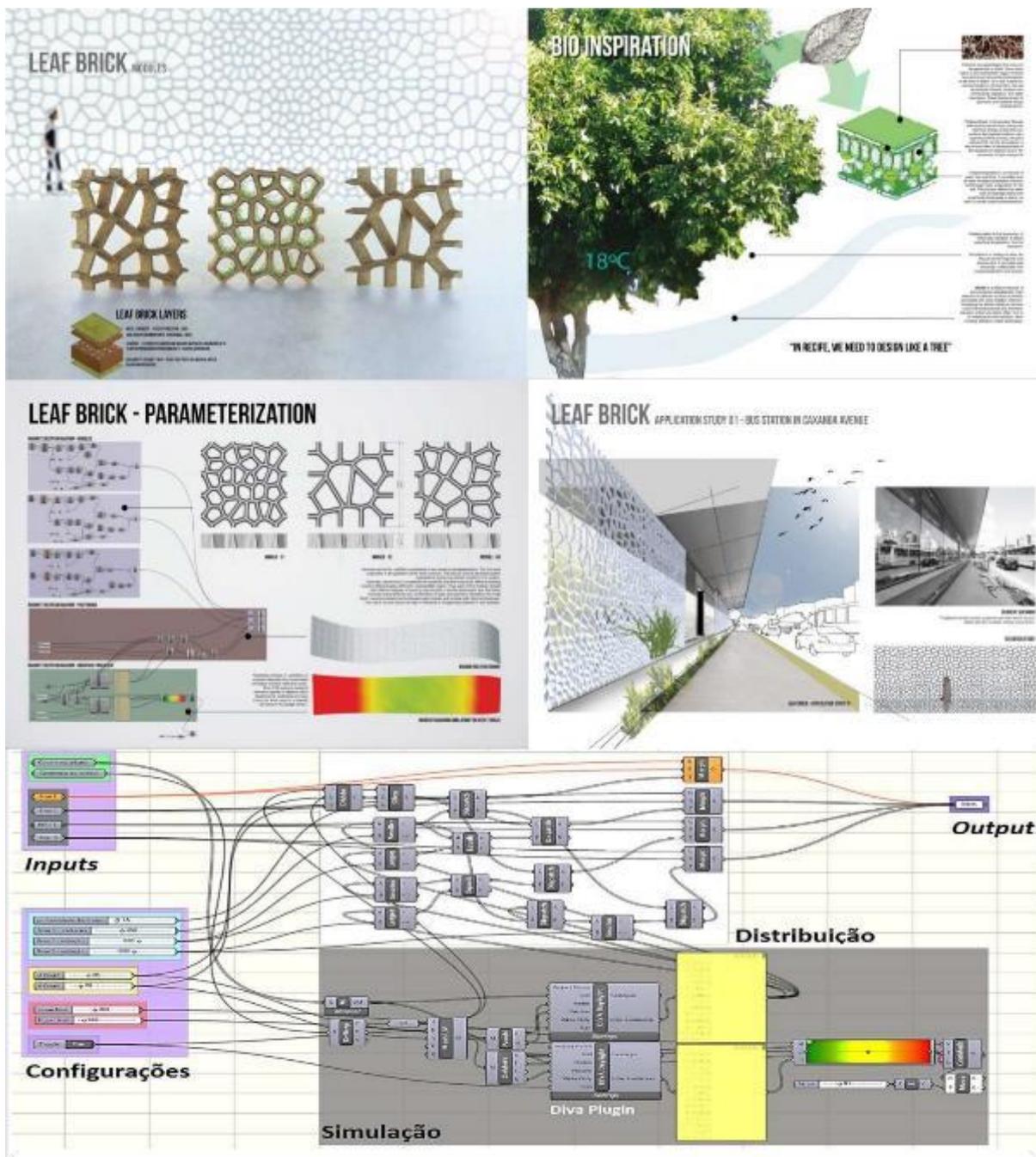
Fonte: (ARAÚJO, 2015).

A segunda pesquisa é a da Natália Queiroz (2015), que tinha por objetivo a criação de artefatos que amenizem a situação das ilhas de calor em cidades quentes e úmidas como o Recife, buscando inspiração para isto nas **folhas do Oitizeiro**, árvore muito utilizada em áreas urbanas conhecida pela sua propriedade de resfriar o ambiente, cujo estudo da morfologia destas folhas revelaram filamentos de alta

densidade, intensamente enrolados, com aspecto de lã, uma espécie de fibra que absorve umidade, sombreia e ainda ajuda a refletir a luz.

Desta forma, a proposta gerada por Queiroz (2015) também utilizou o *Grasshopper* para configurar seus modelos que depois foram impressos em 3D, servindo de moldes para fabricação dos três blocos modulares (**Leaf Brick**) que são distribuídos de forma paramétrica de acordo com a necessidade de sombra, possibilitando a aplicação desse conjunto orgânico e complexo em situações diversas, como parede divisória, cobertura ou fachada. Os materiais sugeridos para aplicação foram: fibra de coco e o hidrogel, que usam naturalmente a água como termorregulador e possibilitam o plantio de vegetais simples como musgos e trepadeiras, colaborando ainda mais com a situação de diminuição de calor como pode ser visto, de maneira sintetizada nas **Figuras 73 e 74**.

Figura 73 – *Leaf Bricks Modules*, artefatos desenvolvidos no *Grasshopper* que amenizam a situação das ilhas de calor em cidades quentes e úmidas por Natália Queiroz.



Fonte: (QUEIROZ, 2015).

Figura 74 – Estudo e aplicação da analogia da folha do Oiticeiro em modelos impressos em 3D que geraram o molde em silicone para fabricação das peças modulares em fibra de coco, resina de óleo de mamona e hidrogel.



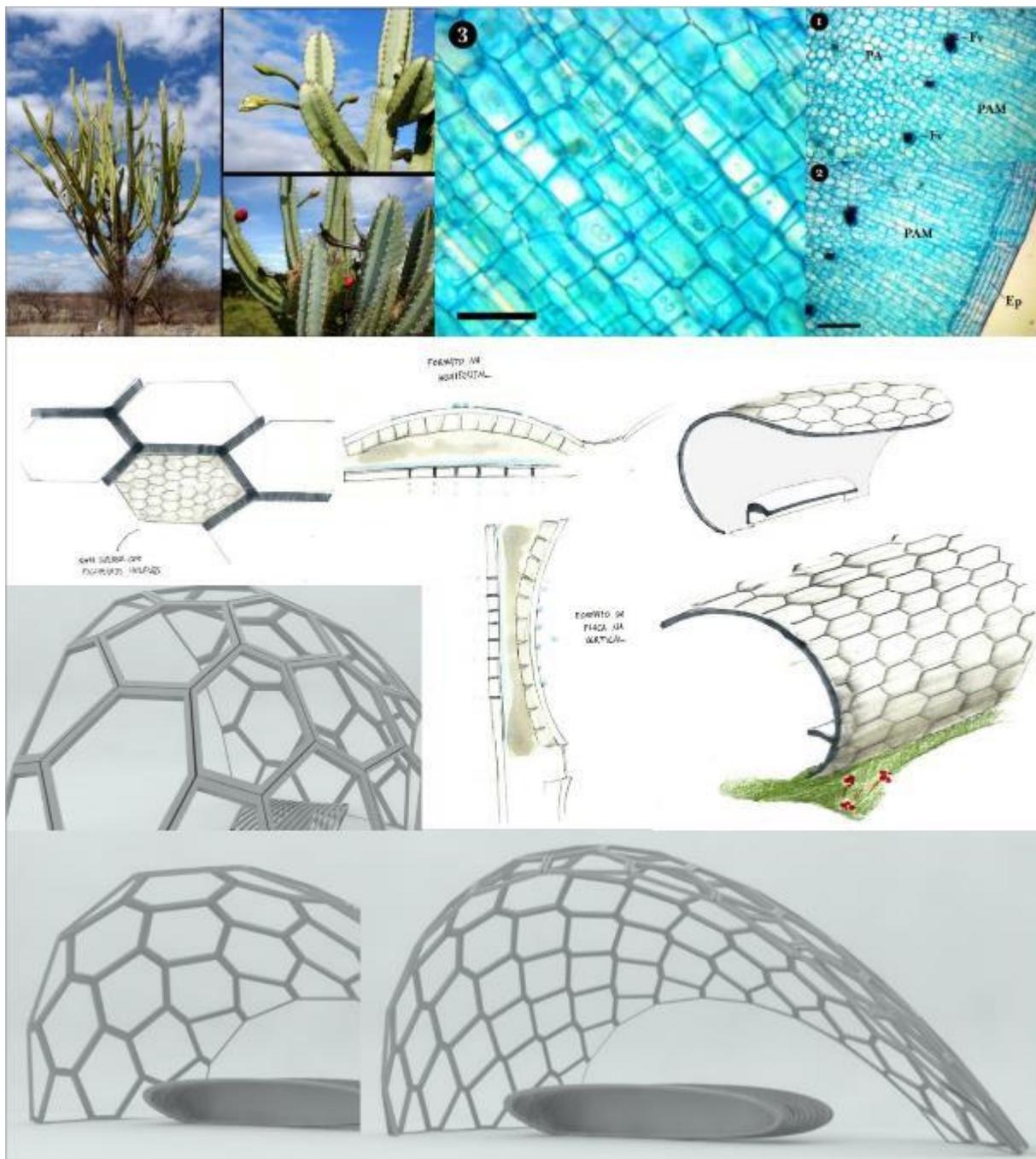
Fonte: (QUEIROZ, 2015).

A última pesquisa apresentada é a de Rafael Rattes (2015), que tinha por objetivo gerar máquinas abstratas com foco em estratégias de meta-artefatos hidrofílicos a partir da investigação do tecido parênquima do mandacaru. Através da análise das suas características funcionais e morfológicas, ele ofereceu um workshop

aos alunos da UFPE em Caruaru para gerar alternativas nesta transposição da analogia da planta e, dentre outras estratégias geradas, a escolhida para ilustração foi a de uma superfície que retém e armazena água da umidade do ar e das chuvas, com aplicação sugerida pelos alunos numa parada de ônibus. Lembra-se aqui que esta escolha não exclui a possibilidade desta superfície ser aplicada em outros artefatos.

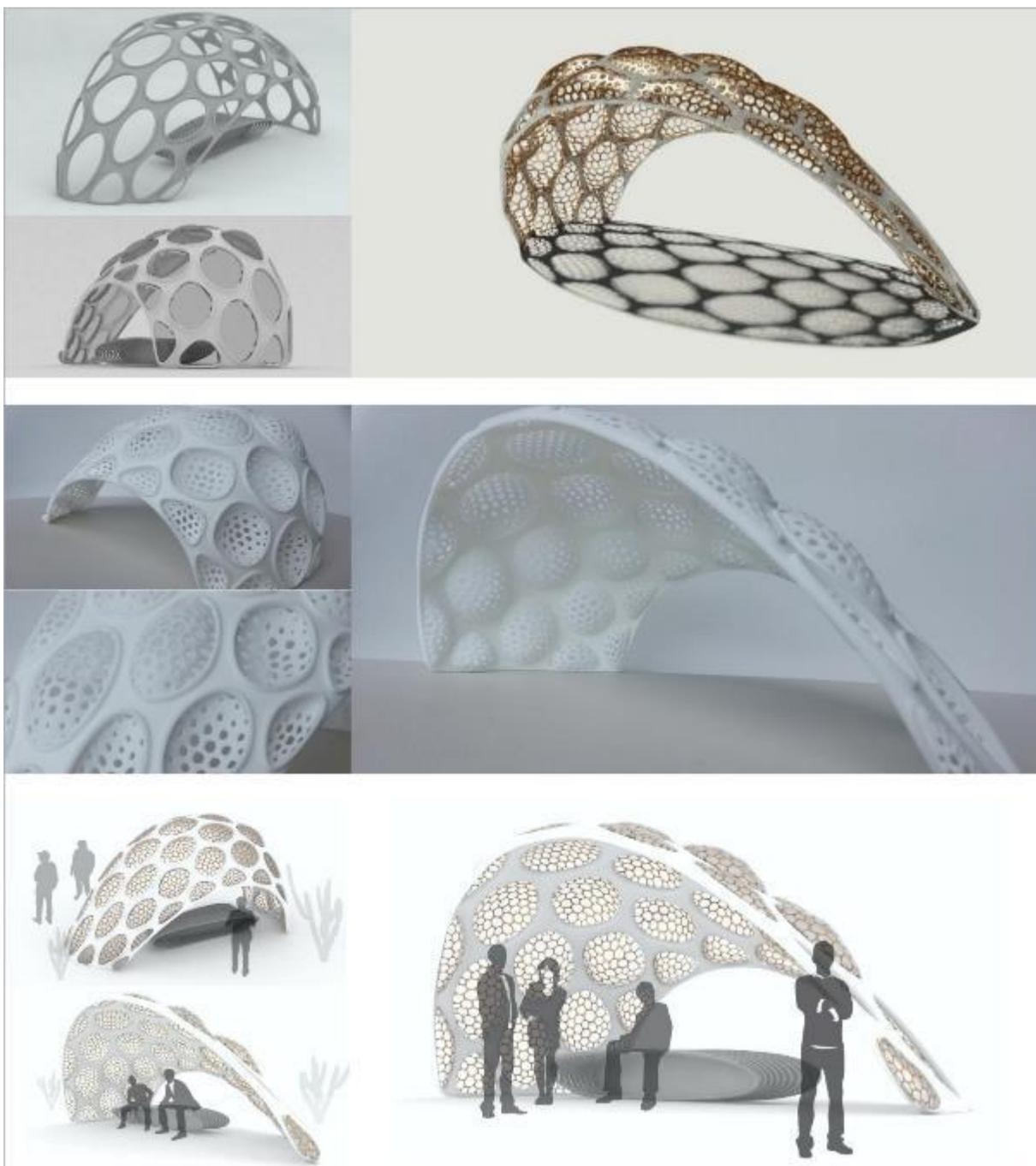
A proposta trazida por Rattes (2015) também utilizou o *Grasshopper* para estudar e gerar as alternativas de configuração da proposta. Para isto, realizou uma modelagem orgânica da superfície da parada de ônibus através de um padrão hexagonal conforme a ilustração obtida no workshop, que, no entanto, foi mudada, através de um script com componentes do software que permite uma adequação estética ao que é encontrado na natureza, alterando esta malha para uma forma mais elíptica (célular) que Rattes melhor associou ao estudo feito do tecido parênquima. Em seguida, cada vazado destas células foi preenchido com uma película semi-elipsóide, preenchida por sua vez, por uma malha interna com vazados similares aos desenhos de células. As **Figuras 75 e 76** apresentam a síntese do processo da pesquisa de Rattes, inclusive de seus modelos impressos em 3D, e também da sugestão de Aplicação como parada de ônibus

Figura 75 – Superfície desenvolvida no *Grasshopper* por Rafael Rattes, baseada na analogia do Mandacaru.



Fonte: (RATTES, 2015).

Figura 76 – Modelo impresso em 3D e aplicação em parada de ônibus da estratégia desenvolvida.



Fonte: (RATTES, 2015).

É importante salientar ainda a existência de softwares que a tecnologia hoje permite, capazes de gerar simulações realistas não apenas de gráficos, mas também de materiais, intempéries naturais, verificação estrutural, e que são bastante úteis quando se intenciona levar o estudo a uma dimensão real.

2.3 Projetos de Design e Arquitetura em Biomimética

A Biomimética se apresenta como uma ferramenta estratégica de inovação capaz de solucionar problemas técnicos e de potencializar o desenvolvimento de produtos humanos, contando com o know-how e a expertise de ensinamentos sem precedentes armazenados há milhões de anos nas espécies sobreviventes mais bem adaptadas graças ao processo de evolução. O resultado disto é que o design biomimético pode efetivamente contribuir nas abordagens mecânicas-funcionais e estéticas-formais de artefatos, traduzindo nestes um maior apuro estético e ganho em eficiência.

Na Arquitetura, área correlata ao Design, existe muito empenho na busca por referências na natureza. Além dos exemplos já citados no item Analogia, Frei Otto e Santiago Calatrava merecem destaque pelo empenho em suas pesquisas e transposição de analogias biológicas com alto nível de qualidade, trabalhos que influenciaram e influenciam projetistas de várias gerações em todo o mundo.

Frei Otto (1925), arquiteto, engenheiro, pesquisador e professor na Universidade de Stuttgart (Alemanha), buscava constantemente referenciar o mundo natural com o foco nas analogias funcionais. Em 1961 ele criou o “*Grupo de Pesquisa em Biologia e Construção*”, composto por uma equipe multidisciplinar de arquitetos, engenheiros civis, biólogos, filósofos, historiadores e físicos, e em 1964 fundou o *Institut für Leichte Flächentragwerke (Instituto para estruturas Leves)* onde desenvolveu intensivas pesquisas no campo de membranas e estruturas bidimensionais flexíveis tensionáveis com o intuito obter harmonia com o entorno através de “construções naturais” baseadas em estruturas leves. (DIAS, 2014)

Esses experimentos em laboratório são uma parte bem importante das pesquisas de Frei Otto, entre eles, os modelos com películas de bolhas de sabão, aparelhos de rotação e torção usados para estudar a estabilidade de maquetes de tijolos, teias, superfícies pneumáticas, estruturas suspensas tensionadas e estruturas transformáveis, que depois refletiriam em muitas das suas obras.

“O permanecer estático é antinatural. A natureza viva e morta se modifica. [...] No campo da natureza viva, das células, dos sistemas celulares, das plantas, dos animais há evolução, nascimento de

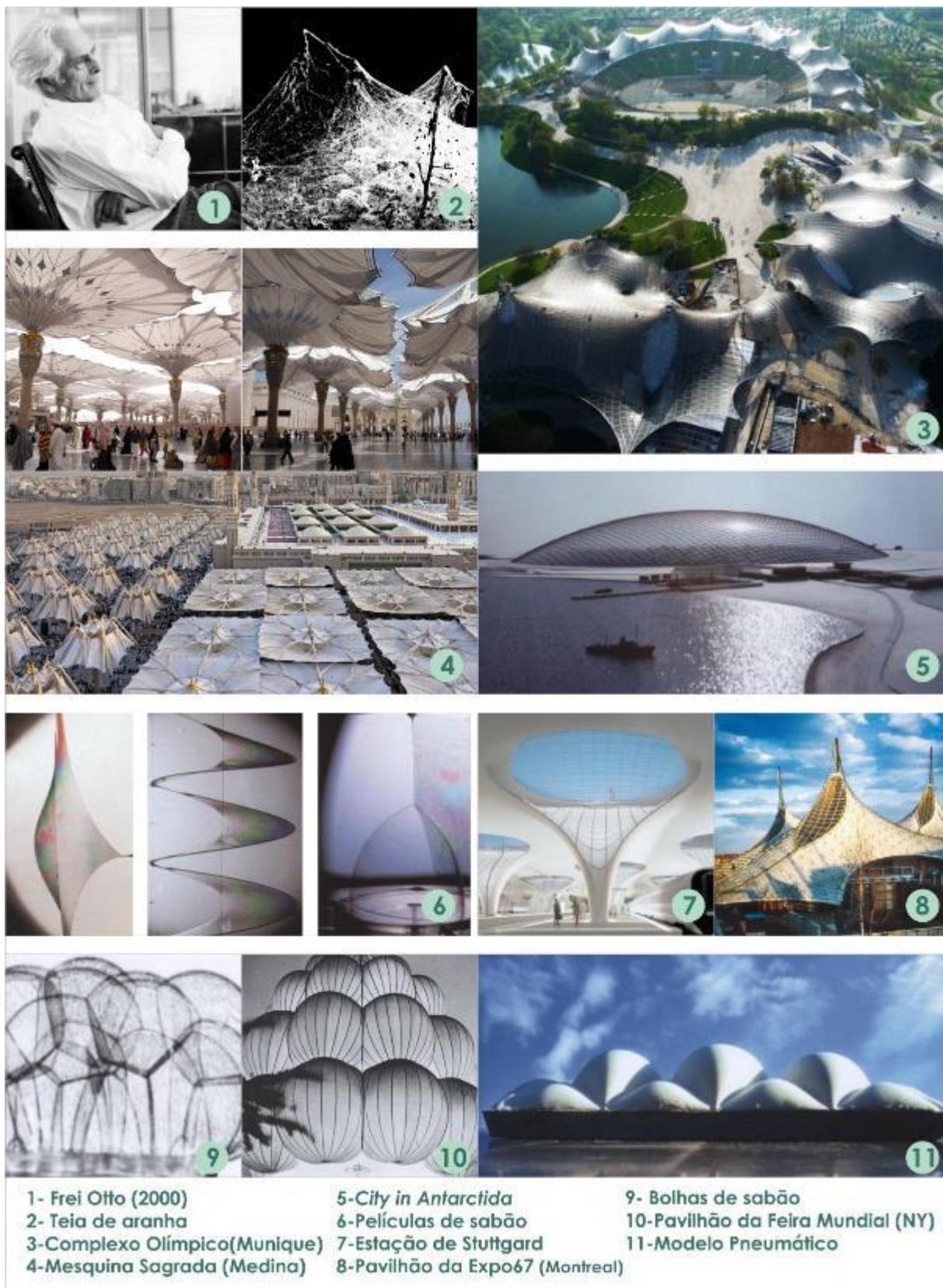
formas e espécies ao largo de milhões de anos. Não há volta para trás. Não há retrocesso. Os indivíduos crescem e morrem em pouco tempo. São móveis”. (OTTO, 1979, p.129)

Seu trabalho mais conhecido é a cobertura do Complexo Olímpico de Munique para os jogos olímpicos de 1972, em que criou para o escritório *Günther Bernish & Partners*, uma cobertura de painéis de acrílico transparente com juntas de neoprene suportadas por mastros e cabos de aço, que trouxe a beleza plástica e a resistência das teias de aranha, para solucionar o problema da cobertura do complexo. (DIAS, 2014)

Outro trabalho primoroso são as coberturas conversíveis dos dois grandes pátios internos da Mesquita Sagrada do Profeta em Medina, na Arábia Saudita, com formato de 12 grandes “guarda-chuvas”, com 17m x 18m de área e 14m de altura. O projeto foi executado em 1991 e compõe um panorama com aspecto de “bosque” ou “jardim com flores brancas gigantes”, provavelmente inspirado em certas flores fotossensíveis como a “azedinha” que se abrem com a iluminação solar e se fecham com a sua ausência. A vantagem é que estas estruturas de “sombrinhas” proporcionam em apenas dois minutos, a formação de dois grandes salões que garantem sombra refrescante aos peregrinos, além da visão relaxante das grandes flores formadas pelas estruturas, quando vistas abertas de baixo. (DIAS, 2014)

O que se percebe é que as observações e estudos reunidos por Frei Otto influenciaram decisivamente o seu pensamento e a prática da Arquitetura direcionada à princípios ecológicos, pois a eficiência energética formal, estrutural e material presente nos modelos naturais investigados por ele foram fatores cruciais que não foram ignorados, forçando uma reconsideração das finalidades da Arquitetura em diferentes níveis. Devido a isto, defendeu o lema do “*Less is more*” de *Mies Van der Rohe*, buscando sempre um projeto adaptável, reciclável e eficiente, em que só há espaço apenas para o essencial. Na **Figura 77**, alguns dos exemplos citados dos trabalhos analógicos de Frei Otto.

Figura 77 – Exemplos biomiméticos das obras de Frei Otto.



Fonte: Elaborado pela autora, adaptado de (CRUZ, 2012).

Outro expoente das analogias biológicas é **Santiago Calatrava** (1951), artista, arquiteto e engenheiro espanhol que tem como característica marcante em sua obra a referência à dinâmica dos organismos vivos, principalmente nos esqueletos e na impressão de movimento que estes conferem às suas edificações, inclusive em suas obras estruturais é possível perceber essa rica imaginação da natureza, em particular de esqueletos animais através do uso de elementos metálicos e do cimento armado, intensificando o porte dessas estruturas.

Talvez justamente por ter uma formação também artística, essas analogias tenham um caráter simbólico tão característico em que se percebe uma identidade nas suas obras. Dias (2014) confirma esse pensamento afirmando que por ter cursado a *Academia de Arte de Valência*, na Espanha, antes de se formar em arquitetura e posteriormente em engenharia, Calatrava, certamente incorporou ao seu estilo um viés muito mais artístico e notadamente calcado na poética.

E isto não é uma simples coincidência, como é encontrada no trabalho de outros projetistas. Declaradamente Calatrava afirmava ser adepto do estudo natural: “Em determinado período dediquei-me ao estudo das formas orgânicas com as quais o meu trabalho tem algumas analogias. É o resultado de uma escolha clara e não tanto do processo de solução de certo problema estrutural.” (LEFAIVRE, 2011, p.78)

Característica recorrente, e por muitos considerada sua marca registrada é esse desejo de buscar sempre unir estrutura e movimento. Elementos articulados que, apesar da aparência sólida, são ao mesmo tempo leves e dinâmicos podem ser encontradas diversas vezes em suas coberturas e pontes. Para tal, procura sempre referenciar estruturas naturais que possuem em sua constituição esqueletos e demais situação de articulações.

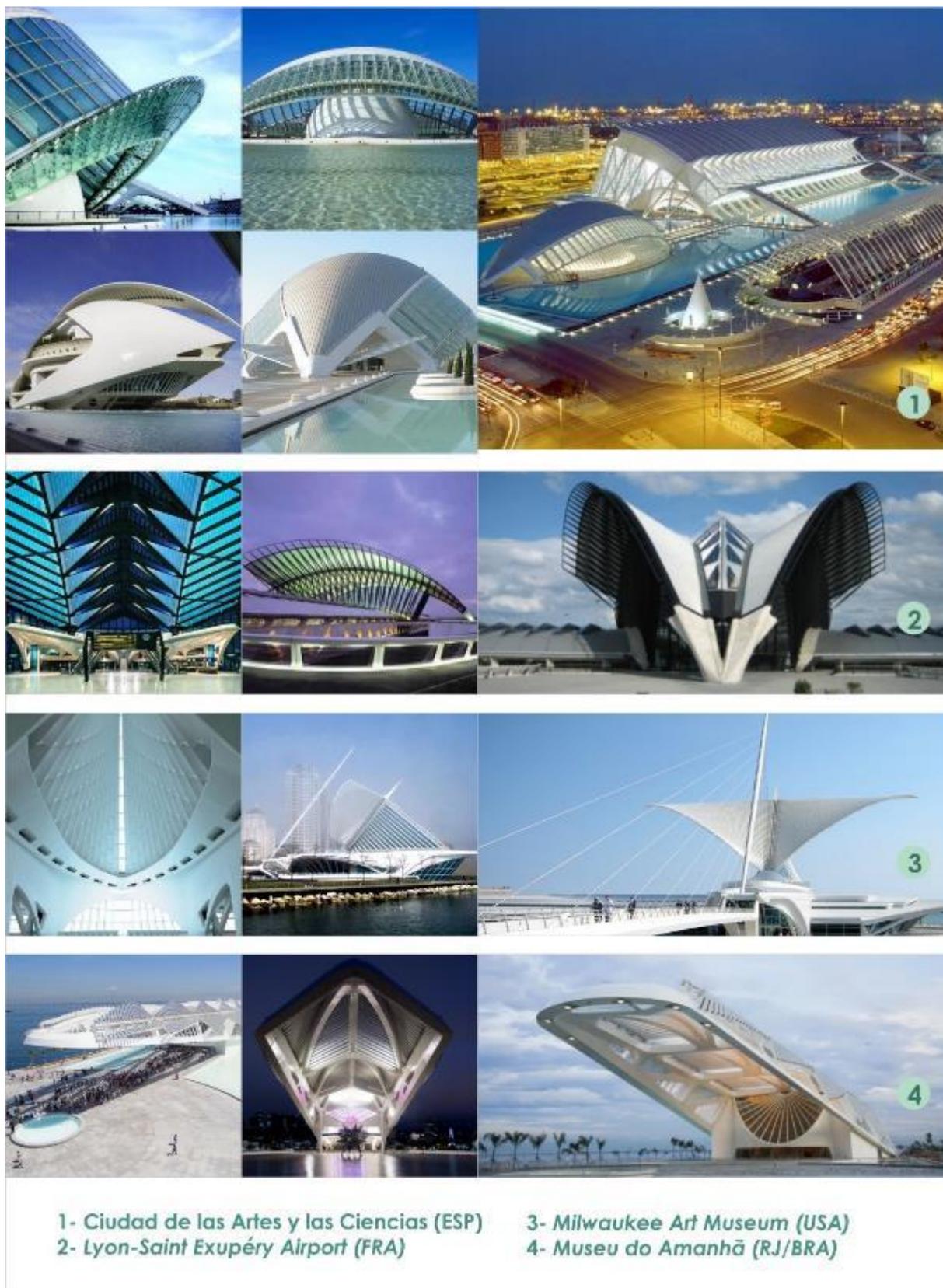
Pereira (2013) sugere que o pássaro é uma referência clássica do elemento ar, tornando coerente o uso deste animal como inspiração na construção, por exemplo, de aeroportos. O pavilhão de Calatrava em *Milwaukee* (USA) oferece um cenário simbólico tão expressivo que chega a ser dramático visto de qualquer ponto da cidade ou do lago próximo à obra. Simetricamente balanceado com duas asas modeladas por setenta e duas cordas metálicas finas, presas a uma espécie de espinha dorsal; o edifício forma o que parece ser uma gigante estrutura cinética.

O aeroporto de *Lyon*, na França, também exemplifica a atitude que Calatrava tem por grandes e ousadas estruturas. As suas referências formais ao projeto do escritório de *Saarinen* são ainda mais explícitas que em *Milwaukee*. A metáfora do voo contida no projeto também é evidente, assim como o seu perfil também remete a um porco-espinho ou papa-formigas (até mesmo o olho humano), efeito acentuado pela coloração do edifício. A estrutura é rica em alusões biomórficas, apesar de Calatrava se basear mais na exploração da física e do equilíbrio de massas e forças do que propriamente no shape de animais. (PEREIRA,2013)

Não se poderia deixar de fora o maravilhoso projeto de 35 hectares da *Ciudad de las artes y las Ciencias* em Valência (ESP), em especial, o famoso teatro *Planetarium/IMAX* que referencia o olho humano, onde a "pupila" é uma cúpula hemisférica do teatro IMAX, que se transforma em um globo através do seu reflexo na piscina. A "pálpebra" de tiras verticais articuladas de metal é móvel e pode ser levantada para permitir a visualização da paisagem do entorno e da piscina.

Em 2015 foi inaugurado o *Museu do Amanhã*, obra primorosa de Calatrava no Rio de Janeiro (BRA), o projeto possui um telhado em alavanca com suas grandes "asas" móveis com uma estrutura da fachada que se expande em quase todo o comprimento do cais, enfatizando a extensão para a Baía de Guanabara e minimizando a largura do edifício. Um espelho d'água rodeia o museu por fora e é usado para filtrar a água que está sendo bombeada da baía e liberada de volta no final do píer, o que dá aos visitantes a impressão de que o museu está flutuando, numa analogia a um animal marinho. Antenado com as abordagens sustentáveis da arquitetura vigente, o edifício funciona fazendo uso dos recursos naturais do entorno, como a água que vem da baía, bem como a energia solar coletada através de painéis fotovoltaicos, integrados às "asas" móveis do telhado, que podem se ajustar dinamicamente para o ângulo ideal do sol, alguns recursos que, segundo Calatrava, fornecem importantes valores educacionais. (**Figura 78**)

Figura 78 – Exemplos biomiméticos das obras de Santiago Calatrava.



Fonte: <http://www.calatrava.com/>. Acesso em: 20 set 2016.

Para ilustrar a pesquisa das analogias naturais com tecnologia de ponta num contexto mais recente tem-se os Pavilhões conceituais desenvolvidos pelo *Instituto de Design Computacional (ICD)* e o *Instituto de Estruturas de Construção e Design Estrutural (ITKE)* da **Universidade de Stuttgart (ALE)** sob a tutela do professor **Achim Menges**. O projeto representa uma série de pesquisas bem-sucedidas que demonstram o potencial do uso de novos métodos computacionais de projeto e simulação, juntamente com métodos de fabricação controlados por computador. Através da construção de modelos projetados e realizados por estudantes e pesquisadores dentro de uma equipe multidisciplinar de arquitetos, engenheiros, biólogos e paleontólogos, com o objetivo de demonstrar a integração da capacidade performativa das estruturas biológicas na concepção arquitetônica com o uso de técnicas avançadas de fabricação através do uso, por exemplo, da robótica.

Para exemplificar melhor, serão apresentados de maneira resumida e bem ilustrativa 5 Pavilhões do projeto. O primeiro deles é o **ICD/ITKE Research Pavilion 2011** em que durante a análise de diferentes estruturas biológicas, selecionou a morfologia do esqueleto da bolacha-do-mar (*Echinoidea*) como referência para a estrutura realizada (**Figura 79**). A concha esquelética do animal é um sistema modular de placas poligonais, que são ligadas entre si nas bordas por protuberâncias de calcita em *zig zag*. A alta capacidade de carga é conseguida pela disposição geométrica particular das placas e seu sistema de junção. Sendo assim, foi identificado que serve como um modelo mais adequado para conchas feitas de elementos modulares pré-fabricados. O material escolhido foi a lâmina de madeira e da mesma forma as juntas em *zig zag* tipicamente usadas em marcenaria como elementos de conexão também podem ser vistas como o equivalente técnico das protruções encontradas na referência. O projeto também intencionava testar os sistemas espaciais e estruturais resultantes em grande escala, por isto focou no desenvolvimento de um sistema modular que permite um alto grau de adaptabilidade e desempenho devido à diferenciação geométrica de seus componentes através do uso de braços robóticos articulados na fabricação das peças.

Uma inovação particular consiste na possibilidade de estender efetivamente os princípios reconhecidos, simular, avaliar e aplicar em diferentes configurações através de processos computacionais, o que pode ser comprovado aqui pelo fato de que a

morfologia complexa do pavilhão pôde ser construída com folhas extremamente finas de madeira compensada de 6,5 mm de espessura.

Um esquema de troca de dados otimizado tornou possível ler repetidamente a geometria complexa em um programa de elementos finitos para analisar e modificar os pontos críticos do modelo. Em paralelo, as juntas coladas e aparafusadas foram testadas experimentalmente e os resultados incluídos nos cálculos estruturais. As peças foram produzidas por um robô de 7 eixos e isso permitiu a produção econômica de mais de 850 componentes geométricamente diferentes, bem como mais de 100.000 articulações zig zag.

Figura 79 – ICD/ITKE Reserch Pavilion 2011 do professor Menges (Stuttgart/ALE) baseado na bolacha-do mar.



Fonte: <http://icd.uni-stuttgart.de/?p=6553>. Acesso em: 20 abr 2016.

O **ICD/ITKE Research Pavilion 2012** é outro exemplo em que a pesquisa focou nos princípios materiais e morfológicos do exoesqueleto (casca) da lagosta que possui 2 tipos de camadas, as individuais, que são laminadas em conjunto numa disposição em espiral (helicoidal) e as unidirecionais, que foram incorporados na estrutura de invólucro fabricada roboticamente a partir de fibras de vidro e carbono saturadas com resina e colocadas de maneira contínua resultando numa estrutura de orientação personalizada. Seis sequências de enrolamento de filamentos diferentes controlam a variação da camada e a orientação das fibras em cada ponto da casca para minimizar o consumo de material enquanto maximiza a rigidez da estrutura, resultando em significativa eficiência de material e leveza. O Pavilhão possui 8m de diâmetro e apenas 4mm de espessura de fibras de carbono e vidro. (**Figura 80**)

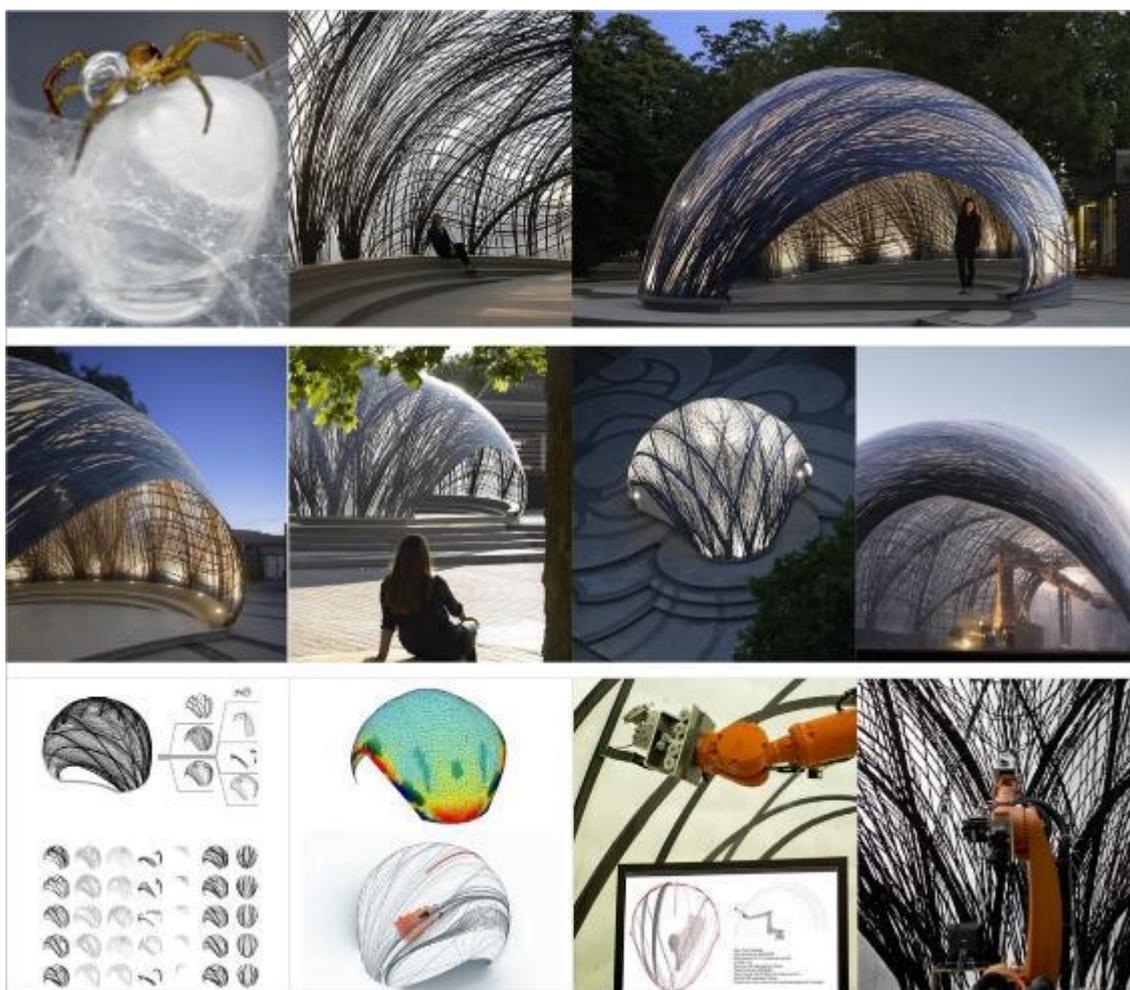
Figura 80 – ICD/ITKE Reserch Pavilion 2012 do professor Menges (Stuttgard/ALE) baseado na disposição das filhas da pata da lagosta.



Fonte: <http://icd.uni-stuttgart.de/?p=8807>. Acesso em: 20 abr 2016.

O **ICD/ITKE Research Pavilion 2014-2015** é o terceiro exemplo, ele foi baseado no ninho subaquático da aranha d'água, que constrói uma bolha de ar dentro da água, reforçada sequencialmente por um arranjo hierárquico de fibras das teias dentro da estrutura, fazendo uma construção estável que pode suportar tensões mecânicas, como a mudança de correntes de água, garantindo um habitat seguro e estável para ela. Este processo de produção natural mostra como as estratégias de fabricação adaptativas podem ser utilizadas para criar estruturas reforçadas com fibras eficientes. Através de um novo processo de fabricação robótica, uma cofragem pneumática inicialmente flexível é gradualmente reforçada com fibras de carbono a partir do interior. A concha compósita de fibra leve resultante forma um pavilhão com qualidades arquitetônicas singular, sendo ao mesmo tempo uma estrutura altamente eficiente em termos de material. **(Figura 81)**

Figura 81 – ICD/ITKE Reserch Pavilion 2014-2015 do professor Menges (Stuttgard/ALE) baseado no ninho subaquático da aranha d'água.



Fonte: <http://icd.uni-stuttgart.de/?p=12965>. Acesso em: 20 abr 2016.

O **ICD/ITKE Research Pavilion 2015-2016** é outro ótimo exemplar, pois é o primeiro a empregar costura industrial em lâminas finas de compensado de madeira através da robótica em uma escala arquitetônica. A referência para isto foi o ouriço-do-mar em que se concluiu que a leveza do seu esqueleto depende também da geometria do sistema de dupla camada e da diferenciação dentro do material, além disso, as placas de algumas espécies são conectadas através de elementos fibrosos, com articulações de *zig zag*, e isto desempenha um papel importante na manutenção da sua integridade durante exposição a forças externas e no seu crescimento. A introdução de métodos de conexão têxtil na construção de madeira permite cascos de madeira segmentados extremamente leves e com boa performance. (**Figura 82**)

Figura 82 – ICD/ITKE Reserch Pavilion 2015-2016 do professor Menges (Stuttgart/ALE) baseado no esqueleto do ouriço-do-mar.



Fonte: <http://icd.uni-stuttgart.de/?p=16220>. Acesso em: 20 abr 2016.

Por fim, o projeto *HygroSkin - Meteorosensitive Pavilion* (2013) explora um novo modo de arquitetura sensível ao clima, usando apenas a capacidade responsiva do próprio material, inspirado pelo movimento das pinhas. Ao contrário de outros movimentos de plantas que são produzidos por mudanças de pressão de célula ativa, este movimento ocorre através de uma resposta passiva às mudanças de umidade, portanto, não requer qualquer sistema sensorial ou função motora e é independente de qualquer função metabólica, portanto, não consome energia. Aqui, a capacidade responsiva é intrínseca ao comportamento higroscópico do material e às suas próprias características anisotrópicas. A anisotropia denota a dependência direcional das características de um material. A higroscopicidade refere-se à capacidade de uma substância absorver a umidade da atmosfera quando seca e produzir umidade para a atmosfera quando molhada, mantendo assim um teor de umidade em equilíbrio com a umidade relativa circundante.

Dessa forma, a instabilidade dimensional da madeira em relação ao teor de umidade é empregada para construir uma pele arquitetônica sensível às condições climáticas que abre e fecha autonomamente em resposta às mudanças de tempo, sem desperdício de energia operacional nem qualquer tipo de controle mecânico ou eletrônico. Aqui, a própria estrutura material é a máquina, assim como observado nas estruturas das pinhas investigadas. Dentro da superfície côncava profunda de cada módulo fabricado roboticamente foi colocada uma abertura sensível ao tempo. A programação material do comportamento de resposta à umidade dessas aberturas abre a possibilidade de uma arquitetura de impressionante simplicidade, mas ecologicamente integrada, em feedback constante e interação com seu ambiente circundante. A pele responsiva composta de madeira ajusta a porosidade do pavilhão em resposta direta às mudanças na umidade relativa do ambiente. Desta forma, o movimento das finas lâminas de madeira disposta nesta abertura está enraizado na capacidade intrínseca do material de interagir com o ambiente externo e mostra como um tecido estruturado pode responder passivamente a estímulos ambientais: abrindo (quando seca) e fechando (quando molhado). A camada externa do pavilhão é composta por células de paredes espessas paralelas, longas e densamente compactadas, reage higroscopicamente a um aumento ou diminuição da umidade relativa por expansão ou contração, enquanto a camada interna permanece relativamente estável. A mudança dimensional diferencial resultante das camadas se

traduz em uma mudança de forma da escala, fazendo com que as lâminas finas se abram ou fechem, ampliando as formas de uso desta pesquisa inovadora num grande leque de oportunidades. (Figura 83)

Pelo histórico das pesquisas de *Frei Otto* em Stuttgart já era de se esperar que esta universidade estivesse no “topo da cadeia” em se tratando de analogias naturais. Mas é importante perceber nestes exemplos dos Pavilhões como essas parcerias multidisciplinares e a tecnologia facilitam e favorecem os insights dos alunos e o quanto hoje é importante a aprendizagem do uso dessas ferramentas no meio acadêmico para tornar o profissional mais apto e preparado para oferecer um trabalho mais condizente com as necessidades do mundo moderno.

Figura 83 – *HYGROSKIN, Meteorosensitive Pavilion* do professor Menges (Stuttgart/ALE) baseado na respiração natural das pinhas



. Fonte: <http://icd.uni-stuttgart.de/?p=9869>. Acesso em: 20 abr 2016.

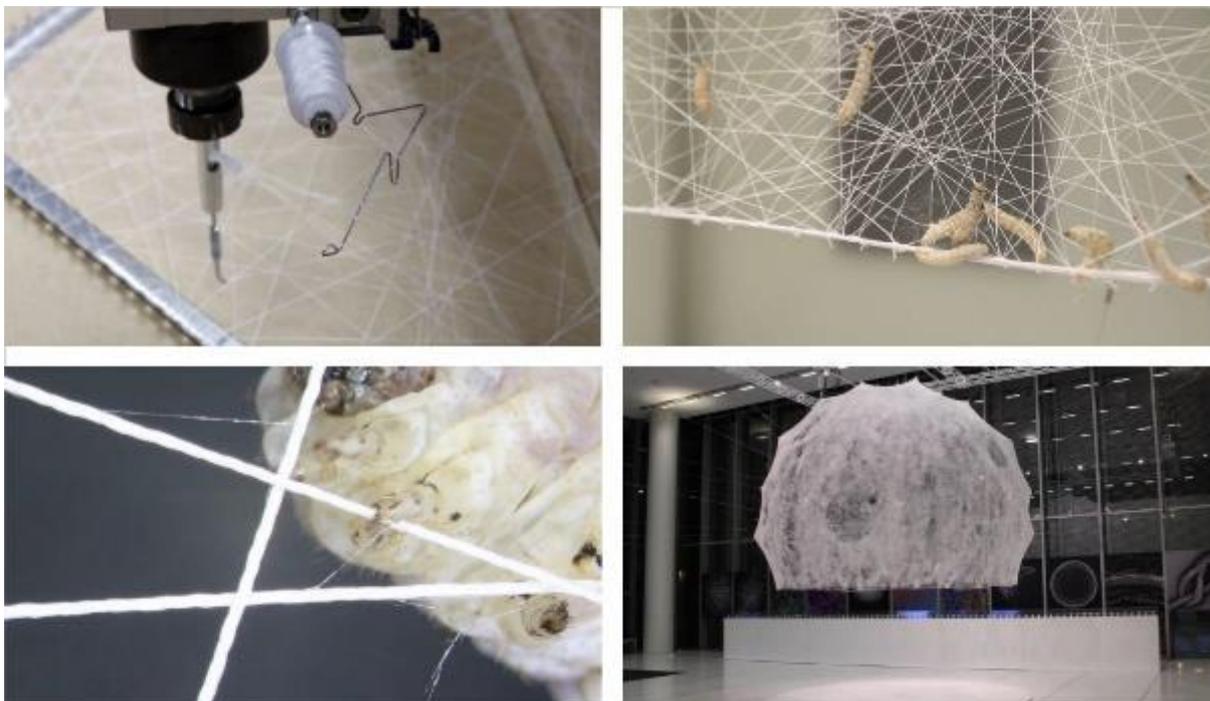
Um outro exemplo similar e também recente de projeto biomimético é tratado por Pereira (2013) sobre o **SILK PAVILLION** (Mediated Matter Research Group/ MIT LAB), que assim como visto na Universidade de Stuttgart, também explora a relação entre a fabricação digital e a fabricação biológica no Design e Arquitetura. Inspirados pela habilidade dos bichos-da-seda de criar um casulo 3D feito de um único fio de seda, a geometria global deste pavilhão foi criada usando um algoritmo que dispõe de um único e contínuo fio através de padrões que fornece vários graus de densidade. A variação da densidade global final foi conseguida adicionando no Pavilhão o próprio bicho-da-seda (**Figura 84**), implantado como uma “impressora” biológica na remodelagem da estrutura. Um conjunto de bichos-da-seda (aproximadamente 6.500) foi posicionado no aro inferior da cúpula giratória constituído de 26 painéis. Assim, estes bichos reforçaram localmente os espaços entre as fibras de seda que foram dispostas pela máquina CNC.

O projeto do Pavilhão recolhe não apenas conhecimento biológico teórico, mas também prático. A inovação do projeto está justamente no uso da máquina CNC que simula o padrão de construção da seda como base. Por si só, esta base já demonstra uma analogia biológica (simbólica) ao simular o processo construtivo dos bichos-da-seda, traduzido no Pavilhão antes dos bichos, no entanto, o projeto é também prático ao se densificar as áreas desse mesmo Pavilhão através dos próprios bichos-da-seda, remodelando o modelo inicial. (PEREIRA, 2013)

A pesquisa foi dirigida por *Neri Oxman*, em colaboração com *Fiorenzo Omenetto (TUFTS University)* e *James Weaver (Harvard)*. Apesar de se relacionar com uma arquitetura biológica, empregar avanços tecnológicos surpreendentes, estudar as capacidades únicas de um animal e seu processo construtivo (neste caso o bicho-da-seda que produz o próprio material para satisfazer as suas necessidades construtivas), Pereira (2013) sublinha a qualidade utópica e conceitual do projeto afirmando que essa segunda fase com a construção com os próprios bichos-da-seda é pouco prático e viável, pois requer um uso excessivo de tempo, energia e dinheiro para se coletar e transportar os animais. O projeto está nas mídias com título de biomimético, mas de fato há de se questionar as intenções dessa segunda fase, pois ao que parece, criar organismos para “construírem” para homem é o mesmo sentido

de criar abelhas para produzir favos de mel, ou seja, se perde o foco biomimético e entra em cena a velha e tradicional visão de exploração.

Figura 84 – *Silk Pavillion* (Mediated Matter Research Group/ MIT Lab, 2012)



Fonte: (PEREIRA, 2013).

Uma característica importante de ser enfatizada sobre a estrutura baseada em células que está presente na maioria dos seres vivos é a capacidade de **auto reparação** garantida por processos próprios dos sistemas biológicos. Imitar ou transpor este princípio em artefatos, resultaria numa evolução científica em que a realidade ficaria cada vez mais próxima da ficção, e talvez a intenção do *Silk Pavilion* tivesse um viés parecido, mas enquanto isto ainda não é possível, dá para manter o ritmo com um outro projeto que une a forma orgânica com materiais de alta tecnologia, o sistema modular arquitetônico para fachadas **Prosolve370e**, que pode efetivamente reduzir a poluição do ar nas cidades. O sistema é composto por módulos que são revestidos com uma camada superfina de dióxido de titânio (TiO_2), uma tecnologia de combate à poluição que é ativada pela luz solar, material já conhecido como pigmento por suas qualidades auto-limpantes e germicidas que requer apenas pequenas quantidades de luz UV e umidade natural para efetivamente reduzir os poluentes do ar em quantidades inofensivas de dióxido de carbono e água, quebrando

e neutralizando os óxidos de nitrogênio e os compostos orgânicos voláteis do entorno. Ele pode ser utilizado para finalidades diversas, inclusive no vestuário.

Na arquitetura, o escritório alemão *Elegant Embellishments* utilizou o *Prossolve370e* na fachada de um novo hospital, o *Manuel Gea Gonzales Torre de Especialidades*, na Cidade do México em 2013. Ela possui uma área de 2500m² com 100m de comprimento e está ajudando a reduzir uma poluição estimada de 1000 carros por dia. (**Figura 85**)

Sobre a sua configuração é clara a referência no padrão celular, embora a empresa informe que as suas formas remetam ao padrão de crescimento orgânico inspirado nos fractais na natureza. O fato é que estas formas orgânicas não são apenas esteticamente atrativas, elas são traduzidas num ganho de eficiência, pois suas ondulações maximizam a área de superfície do revestimento ativo à luz difusa, à turbulência do ar e à poluição, ou seja, elas maximizam a tecnologia de revestimento já que a complexidade da superfície ajuda na captação da luz omnidirecional onde é densa ou escassa.

O sistema é composto com apenas dois módulos de repetição e suas peças podem ser adequadas conforme a necessidade do projeto (tamanhos e formatos). Para o hospital, essas peças foram produzidas numa fábrica de termoformagem em Ulm/ALE, onde um protótipo de escala 1:1 forneceu uma estimativa de tempo de instalação antes da montagem. O material utilizado foi o plástico ABS termoformado, unidos com fixações padrão de aço. A engenharia estrutural foi feita por *Buro Happold New York* e o consultor técnico do projeto é o professor do departamento de Física da *Duke University*, *Joshua Socolar*.

A modularidade do sistema permite que formas arquitetônicas complexas sejam mais acessíveis, já que facilita a fabricação e montagem. Como decoração, possuem potencial para uso no interior ou exterior; regeneração de fachadas envelhecidas ou de caráter modernista; sendo bem indicados para estacionamentos, hospitais, prédios em geral, e principalmente, lugares onde haja grande fluxo de carro e poluição. Fora este hospital, o projeto já expandiu para vários outros países como Austrália, Emirados Árabes e Estados Unidos, devido ao seu grande potencial de uso e inovação.

Figura 85 – Sistema modular *Prosolve370e* aplicado na fachada do Hospital *Manuel Gea Gonzales* pela empresa alemã *Elegant Embellishments*.



Fonte: <http://www.prosolve370e.com/>. Acesso em: 25 jun 2016.

Outro exemplo na mesma linha de fachada inteligente é mostrado no site do Biomimicry.org, é o projeto **Solar Ivy** de captação de energia solar e eólica utilizado como revestimento de edificações (**Figura 86**). Foi desenvolvido pelos irmãos designers *Samuel e Teresita Cochran* durante um projeto acadêmico que mais tarde foi produzido pela Startup *SMIT (Sustainably Minded Interactive Technology)* montada pelos irmãos, no Brooklyn/NY. Trata-se de um sistema modular de geração de energia a partir da captação da luz solar (fotovoltaica) e energia eólica (gerador piezoelétrico flexível). Cada módulo tem 5 “folhas” solares que têm um *gerador piezo* muito flexível em sua haste que se parecem e se comportam como a *planta Hera* nas paredes, adornando qualquer superfície e sendo muito adaptáveis a todo tipo de edificação, além de facilmente substituíveis, facilitando a sua manutenção. Cada “folha” pode ser removida individualmente para reparos ou troca sem que se interrompa o funcionamento do sistema como um todo.

Na natureza, a Hera é uma planta trepadeira que desenvolveu um processo adaptativo interessante, ao crescer verticalmente usando outra estrutura para suporte, ela recebe luz solar direta sem ter que competir com outras plantas. Este projeto soube tirar proveito desta característica de uso da verticalidade para se diferenciar dos painéis solares convencionais que geralmente ocupam muito espaço. O uso criativo de tecnologias de energia alternativa existentes e a incorporação intencional da ética do design sustentável, fazem com que esta analogia biológica simples se torne uma das tecnologias mais sustentáveis de energia solar e eólica do mercado.

O seu design modular permite muitos tipos de personalização, incluindo a cor da folha, espaçamento, orientação e tipo fotovoltaico. Também é adaptável a diferentes tipos de edifícios e climas. Um sistema de monitoramento de energia é incorporado no produto, permitindo o ajuste fino e o controle da tecnologia pelos usuários. Cada faixa de 2,5m² gera 85 Watts, produzindo energia renovável enquanto ajuda a fornecer sombra para edifícios reduzindo a incidência solar, e, por conseguinte, gastos com climatização, tal como a Hera natural.

A fabricação pode acontecer em um processo de impressão em que são estampados e formados para criar folhas customizáveis e pontos de conexão. No fim do seu ciclo de vida, os componentes podem ser novamente separados e reutilizados e o material plástico pode ser reciclado e reinserido ao fluxo de produção. Isto resolve os atuais problemas com painéis solares convencionais que não são tão práticos, razão pela qual não se vêem árvores na natureza com folhas no mesmo aspecto.

Este projeto também prova que boas ideias surgem desse olhar para a natureza mesmo a partir de analogias simples e que bons projetos-conceito dentro da academia também podem virar realidade.

Figura 86 – Projeto *Solar Ivy* sistema de captação de energia solar e eólica com referência na Hera.



Fonte: <https://asknature.org/idea/smit-solar-ivy/#.WBzFMoWcE2w>. Acesso em: 27 jun 2016.

Não se pode deixar de fora dos exemplos biomiméticos uma das grandes referências no mundo do design, o designer galês **Ross Lovegrove**, expoente que utiliza o processo criativo com inspirações no mundo natural para suas criações. Em seu estúdio localizado em Londres, estão vários modelos de estudo da forma e também muitos dos seus produtos geniais, dentre eles, a escada DNA, suas luminárias, cadeiras orgânicas e a garrafa d'água Ty Nant desenhada para a empresa francesa Volvic.

“Sou um biólogo evolucionista, mais do que um designer. Eu não sei mais o que é design, eu crio formas, eu compreendo formas e eu estou gostando da era digital para criá-las. Eu espero levar isso ainda mais longe. Meu trabalho também se relaciona com a natureza, em um sentido evolucionário na medida em que me preocupo com redução. Eu exercito o que é chamado de “essencialismo orgânico” o que significa usar nada mais, nada menos do que o necessário. Eu me sinto confortável nessa era orgânica, isomórfica, antropomórfica, líquida de fazer coisas, mas eu tento não forçar isso em coisas que não precisem disso.” **(Ross Lovegrove)**

Apelidado de “*Captain Organic*”, ele define seu conceito de criação como DNA (Design, Natureza e Arte), que representam as três coisas que condicionam o seu mundo. Como possui profunda admiração pela genialidade das soluções naturais, seus projetos imprimem a sua visão primorosa dessa organicidade de formas mais com o enfoque estético do que funcional. Ele acredita que na beleza da forma reside a sua ligação pessoal com a natureza cujas configurações são a fonte original do belo, o que justifica a sua obsessão em poetizar formas orgânicas. Seus projetos traduzem muito bem este conceito, como a escada “*hélice de DNA*”, cujo corrimão é feito em uma peça única de fibra de carbono.

Lovegrove se considera um tradutor das tecnologias do séc XXI. Em seus projetos, muitas vezes utiliza softwares que manipulam as formas de maneira livre sem parâmetros dimensionais, o que gera resultados casuais selecionados pelas suas propriedades estéticas. Ele direciona a utilização de biopolímeros em seus novos projetos, pois acredita que este é o material do futuro. Preocupado com questões sustentáveis, não costuma pintar os produtos que desenha e utiliza sempre a textura original do material. Apesar de ter muita afinidade com o ambiente fabril, ele se preocupa em criar mais produtos num mundo, segundo ele, já “*overdoseado*”.

O projeto da garrafa d’água *Ty Nant*, representa a sua impressão pessoal da água, ele queria um tributo ao elemento (**Figura 87**). Para este desenvolvimento, primeiro tentou simular na oficina as formas orgânicas e fluidas da água, mas as tentativas foram frustradas parecendo mais um “carro amassado”. Depois de muito tentar, deixou a forma ser desenhada pela própria água através de software especializado, e o resultado foi uma série de linhas delicadas e espontâneas que pareciam ter a mesma fluidez da água, transmitindo a impressão de ter em mãos não a garrafa, mas a própria água envolta em sua pele natural. (LOVEGROVE, 2004)

Figura 87 – Garrafa de água *Ty Nant* para a Bethania Wales/2000.



Fonte: http://www.rosslovegrove.com/index.php/custom_type/ty-nant/?category=product. Acesso em: 29 jun 2016.

Outro projeto do designer é a Luminária *Andromeda* para a empresa japonesa *Yamagiwa* (**Figura 88**). Com o formato que lembra algum tipo de ser marinho, seus reflexos criam uma ambiência parecida com os reflexos da água.

Figura 88 – Pendente *Andromeda* para a Yamagiwa/ Japão, 2008.



Fonte: http://www.rosslovegrove.com/index.php/custom_type/andromeda/?category=lighting). Acesso em: 29 jun 2016.

O propósito de utilizá-lo como exemplo foi o de evidenciar que existem outros métodos, além da analogia funcional de interpretar as formas naturais e ainda assim, fazer a Biomimética através de uma inspiração mais criativa e o emprego de impressões pessoais sobre o elemento, o que enfatiza que não apenas as funções práticas do produto são responsáveis pela tradução da referência natural, mas também as funções estéticas e simbólicas. A prova de tais argumentos está em se constatar a presença dos princípios biomiméticos nos projetos de Lovegrove. No

exemplo da garrafa d'água, a essência formal e semântica produzida, utilizou claramente o princípio da natureza como modelo; o material translúcido, fino, leve, sem rótulo, reciclável, traduz a essencialidade e o sem desperdício da natureza como medida; por fim, a própria inspiração em buscar num elemento natural a sua solução para o problema de embalagem para a água, evidencia que também a utilizou como mentora. A **Figura 89** apresenta alguns dos projetos de Lovegrove.

Figura 89 – Produtos de Lovegrove: Cadeira Biophilia, Cadeira Go, Caixa de som Kef Muon, escada DNA e Poste-assento Solar Tree.



Fonte: <http://www.rosslovegrove.com>. Acesso em: 29 jun 2016.

Um último exemplo, para se fechar com chave de ouro, é o projeto **Warka Water** inspirado no *besouro do deserto* ou *besouro da Namíbia*. Este inseto foi investigado por *Andrew Parker* (2001), da Universidade de Oxford, Reino Unido. O animal capta a água do ar através dos poros da sua carapaça, quando o ar úmido passa por suas saliências e sulcos microscópicos, condensam e são canalizados em direção à sua boca, uma característica adaptativa que permite a sobrevivência do mesmo no deserto. Esta analogia funcional está sendo implementada em várias soluções de artefatos, uma delas é produzida pela *QinetiQ*, no Reino Unido, onde desenvolveu uma película de plástico para recolher a água, imitando a carapaça do besouro, útil para capturar água em áreas ricas em névoa. (FORNIÉS, 2012)

Uma aplicação similar deste mesmo estudo foi desenvolvido pelos arquitetos italianos *Arturo Vittori e Andreas Vogler* do estúdio *Architecture and Vision*, o seu *Warka Water* trata-se de uma incrível torre feita com materiais naturais projetada para recolher a umidade do ar por condensação, e depositar a água num recipiente, sendo capaz de captar cerca de 100 litros de água/dia (**Figura 90**). Como o ar sempre contém certa quantidade de água, independente da temperatura do ambiente e da condição de umidade, o projeto possibilita sua produção em praticamente qualquer lugar.

Tudo começou quando ambos foram visitar a Etiópia e ficaram preocupados com a escassez de água. Sobre isto, vale lembrar que o montante de habitantes do planeta cresce a cada ano junto com a demanda por recursos naturais e a ONU apontou que cerca de 2,4 bilhões de pessoas (um terço da população mundial) não têm acesso a saneamento básico e água potável. Uma resposta para esta situação alarmante foi buscar inspiração no meio biológico. No site do projeto, fazem alusão a várias inspirações biomiméticas, tais como o besouro da Namíbia já comentado, as folhas da flor de lótus, os fios da teia de aranha e o sistema integrado de coleta de névoa em cactos, tudo isto é traduzido em materiais específicos e revestimentos que podem melhorar a condensação do orvalho e o fluxo de água, assim como melhorar também a capacidade de armazenamento da malha. Outra referência biológica citada que influenciou no design da casca externa do *Warka*, melhorando o fluxo de ar foram as colmeias de cupins.

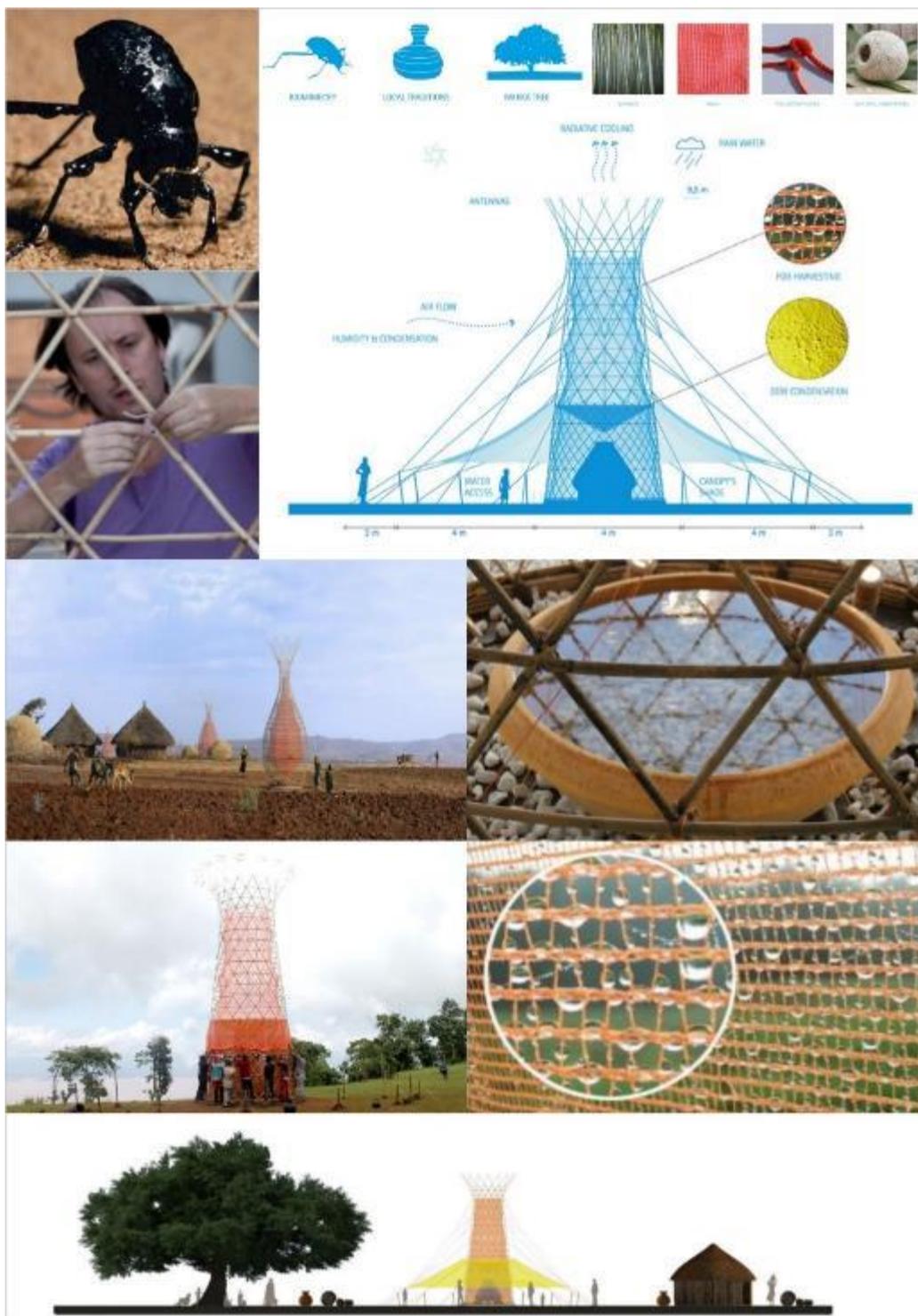
Sua estrutura é baseada principalmente em bambu, cordas de fibras naturais e um revestimento interno que é uma malha feita com plástico reciclado com a tecnologia do besouro para captar as gotículas de orvalho que escorrem para uma bacia no interior da torre. O trançado do bambu proporciona luminosidade, força e estabilidade e são unidos com pinos de metal e cânhamo. Nas extremidades superiores ficam pequenos espelhos que fazem com que os pássaros se mantenham longe e não contaminem a água. A estrutura é toda modular, composta por 5 partes, mede cerca de 10 metros e pesa 60 quilos. Pode ser construída do zero por 10 pessoas em 10 dias ou, se for só a montagem com as peças prontas, em até 2h por 10 pessoas, sem a necessidade de andaimes e com as próprias mãos. Custa em média US\$ 1000.

Além dos benefícios mais evidentes, o projeto incorpora a cultura local e uma arquitetura vernacular incorporando técnicas de tecelagem etíope tradicionais no produto. Inclusive, além de melhorar a condição de vida dessas pessoas, foi projetado também para criar sombra, um espaço social que gera reuniões públicas de educação e o convívio social entre os moradores da comunidade, uma analogia também para a árvore nativa da região, simbolicamente muito especial (a figueira) que na língua local africana é chamada de *Warka*.

O projeto foi apresentado pela primeira vez na *Bienal de Arquitetura de Veneza*, em 2012, e é voltado para populações rurais de países em desenvolvimento, onde a infra-estrutura para disponibilizar o acesso a água potável é quase impossível. Portanto, este é um belíssimo exemplo biomimético com uma solução relativamente simples, de baixo custo de implementação, provando que observar a natureza permite chegar a soluções em que o Design pode de fato contribuir na resolução dos problemas do mundo.

Consideradas um caso especial, no próximo capítulo serão apresentadas **as geodésicas de Buckminster Fuller** que serão pormenorizadas visando esclarecer as diversas relações com o tema da Biomimética, assim como contribuir com a bibliografia escassa em língua portuguesa sobre o assunto, trazendo em questão um exemplo tão bem elaborado mas de pouco uso no Brasil.

Figura 90 – Projeto *Warka Water* de captação de água baseado no besouro da Namíbia.



Fonte: <http://www.warkawater.org/design>. Acesso em: 30 jun 2016.

3 AS GEODÉSICAS DE BUCKMINSTER FULLER

Segundo Forlani (1953), em 1922, Bauersfeld, cientista alemão chefe de design da indústria ótica Carls Zeiss, desenvolveu a primeira cúpula geodésica revestida de cimento para abrigar um planetário, mas foi Buckminster Fuller quem descobriu suas leis formadoras, construindo e divulgando suas propriedades em inúmeros estudos de otimização e que por ela recebeu a patente de nº 2.682.235 em 1954, tornando-a um ícone da arquitetura moderna na década 50. Mas antes de detalhar sobre o caso das geodésicas, também é importante conhecer um pouco mais sobre o seu mais ilustre pesquisador.

3.1 Buckminster Fuller: Um Breve Histórico

Richard Buckminster Fuller, ou “*Bucky*”, como era chamado, nasceu em *Milton, Massachusetts (USA)* em 01 de janeiro de 1895. Arquiteto, engenheiro, designer, matemático, inventor, filósofo, visionário, professor, orador, autor, poeta e também chamado de “Leonardo Da Vinci do século XX, justamente por toda esta multidisciplinaridade; frequentou *Harvard* 2 vezes (1913/1915), mas foi expulso em ambas por falta de concentração e motivação. Somente após passar dificuldades financeiras e perder a filha Alexandra, ainda com 3 anos, fatalidade que quase o levou ao suicídio, foi que decidiu dar um outro rumo à vida.

O seu reconhecimento vem da sua perspectiva abrangente sobre os problemas do mundo. Por mais de cinco décadas, ele desenvolveu soluções pioneiras que refletiam seu compromisso com o potencial de design inovador para criar tecnologias com o intuito de “**fazer mais com menos**” como ocorre na natureza, e assim, melhorar a vida humana. Pertencia a uma família reconhecida por produzir personalidades inclinadas ao ativismo e ao serviço público, e desenvolveu uma compreensão inicial da natureza durante as excursões familiares para *Bear Island, Maine*, onde também se familiarizou com os princípios de manutenção e construção de barcos.

Por volta de 1913, trabalhou em uma usina no Canadá, onde teve um forte interesse em máquinas, aprendendo a modificar e melhorar o equipamento de fabricação. De 1917 até 1919, serviu na Marinha dos EUA, onde desenvolveu mais ainda sua aptidão para a engenharia inventando um guincho para barcos de resgate

que poderia remover aviões caídos da água com tempo de salvar a vida dos pilotos, como recompensa desse feito, foi indicado para receber treinamento de oficiais na Academia Naval dos Estados Unidos. Em 1926, quando trabalhou na construtora do seu sogro, *James Monroe Hewlett*, desenvolveu um novo método de produção de edifícios de apartamentos modulares de fácil construção de concreto armado, que resultou na primeira das suas 25 patentes.

Depois da morte da filha primogênita, do declínio da construtora e do desemprego, chegou a contemplar o suicídio, mas decidiu que não tinha o direito de tirar a própria vida, e que a partir de então iria usar suas experiências e intelecto à serviço dos outros. Como consequência, passou quase dois anos em recluso, profundamente em contemplação sobre o universo e como poderia melhor contribuir para a humanidade, principalmente, usando a tecnologia para revolucionar a construção e melhorar a habitação humana.

Neste tempo, conheceu *Isamu Noguchi*, arquiteto nipo-americano com quem começou a colaborar em vários projetos, criando a marca-conceito chamada ***Dymaxion*** derivada dos termos ***Dynamic, Maximum, Ion***; representando sua filosofia de design de "*fazer mais com menos*" e refletindo seu crescente reconhecimento da tendência global para o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes.

Seu primeiro "artefato", como chamava suas criações, foi o projeto da *Casa 4D* que depois seria nomeada de ***Dymaxion House***, uma casa de baixo custo, idealizada para ser produzida em massa, que poderia ser aero-transportada para qualquer lugar do mundo. Sobre ela, Fuller escreve em 1928: "É estruturada segundo o sistema natural de seres humanos e árvores, com um tronco central ou espinha dorsal, a partir do qual, todo o resto é independentemente pendurado, utilizando a gravidade em vez de se opor a ela. O projeto representava uma inovação radical, uma casca de alumínio pendurada em um pilar central em que no topo do mastro existiam lentes destinadas a dirigir o calor e a luz solar para onde desejado; o banheiro era composto por sistema modular onde era todo montado na fábrica, o que incluía as tubulações, e posteriormente montado no local dentro da casa, o que deu origem ao ***Dymaxion Bathroom***, um banheiro modular compacto, pré-fabricado, fácil de ser instalado. O

piso era composto por duas camadas de cabos tensionados tendo, entre eles, um colchão pneumático e, sobre eles, placas sólidas que compunham o assoalho.

Outra invenção, o ***Dymaxion Car***, era um automóvel aerodinâmico de 3 rodas que podia fazer manobras com impressionante facilidade. Nas suas observações da natureza, Fuller apreciava a perfeita aerodinâmica e hidrodinâmica dos pássaros e peixes, bem como o design de qualquer outra criatura cuja forma resultasse em um máximo de eficiência e um mínimo de resistência. Na sua idealização, queria que o seu veículo fosse capaz de voar como um pássaro, nadar como um peixe e andar sobre terreno acidentado como um cavalo. O modelo mais aperfeiçoado foi um triciclo com rodas de borracha para viagens terrestres, dois motores a jato para viagens aéreas e a configuração geral de uma mistura de cabeça de ganso com corpo de golfinho para diminuir a força de arrasto, tanto no ar quanto na água. A idéia era fornecer os dois juntos para dar total autonomia ao seu usuário e tanto a casa quanto o carro deveriam ser totalmente autônomos, uma vez fornecidos e instalados não necessitariam mais de estradas, aeroportos, eletricidade, esgotos, nem outros serviços que ficam no controle do governo ou das grandes corporações.

Foram construídos alguns protótipos, tanto da casa quanto do carro, este último inclusive se demonstrou mais aerodinâmico e eficiente que os carros Ford da época, mas estes projetos não foram adiante, não só por causa dos empecilhos tecnológicos, relativos a materiais e processos de produção vigentes, mas também devido a fatores políticos. Eventualmente ele chegou à conclusão que, se tais inovações autônomas estivessem disponíveis, as pessoas livre-pensantes concluiriam rapidamente que a burocracia dominante seria dispensável e que, pela ordem natural das coisas, o Sistema entraria em colapso. Situação essa que para ele repercutiu como grande fator de entrave, principalmente de financiamentos necessários para implementação. (SIEDEN, 2000).

Já as ***Dymaxion Deployment Units*** (*Unidades de Implantação Dymaxion*), casas para produção em massa, chegaram a serem usadas durante a Segunda Guerra Mundial para abrigar tripulações de radar em locais remotos com climas severos, mesmo não se tornando populares para habitação civil como ele pretendia.

Paralelamente a estes desenvolvimentos, Fuller aperfeiçoava a sua visão utópica de integrar as atividades socioeconômicas do homem numa **Ciência de Design Antecipatório Abrangente** que se ocupasse em, efetivamente, distribuir, com eficiência e justiça, os recursos do planeta. Para tanto, passou a se interessar por cartografia, pois estava insatisfeito com as projeções do mapa-mundi existentes, principalmente a tão divulgada projeção de Mercator, que distorcia o tamanho e a dimensão dos continentes, além de achatar as massas de terra firme nos pólos. Em 1934, ele argumentava que qualquer um que fizesse um levantamento dos recursos da Terra necessitaria de uma projeção precisa do mundo, que mostrasse, com um mínimo de distorção, as formas e dimensões relativas das massas dos territórios, e isto o levou a patente do **Dymaxion Map** em 1946, que retrata todo o planeta em um único mapa plano, sem distorção visível das formas e tamanhos relativos dos continentes, a primeira patente em cartografia dos últimos 150 anos.

Ele descreve o método de projetar os dados numa superfície plana a partir de uma superfície esférica (a Terra), com base na geometria do icosaedro esférico. Os triângulos esféricos são subdivididos por uma malha de Grandes Círculos, em três sentidos, que, quando planificada, resultava em uma malha triangular equilátera inclinada a 60° em relação ao horizonte. Isto resulta num mapa que não apresenta deformações perceptíveis, sendo o primeiro e único a dar uma visão completa da geografia da Terra sem distorções aparentes das formas e dimensões das massas continentais. Segundo Fuller: "Uma única ilha num único oceano". Isto também remete aos seus conceitos de **Sinergia** existente na natureza e foi concebido para ajudar a humanidade a enfrentar melhor os problemas do mundo, levando as pessoas a pensar de forma abrangente, vendo que todos estão numa só ilha em que todos precisam cooperar em benefício do todo. Desta forma, no início dos anos 1950 cunhou o termo, "**Spaceship Earth**" (Nave espacial Terra) para descrever a natureza integral do sistema vivo da Terra. (SIEDEN, 2000)

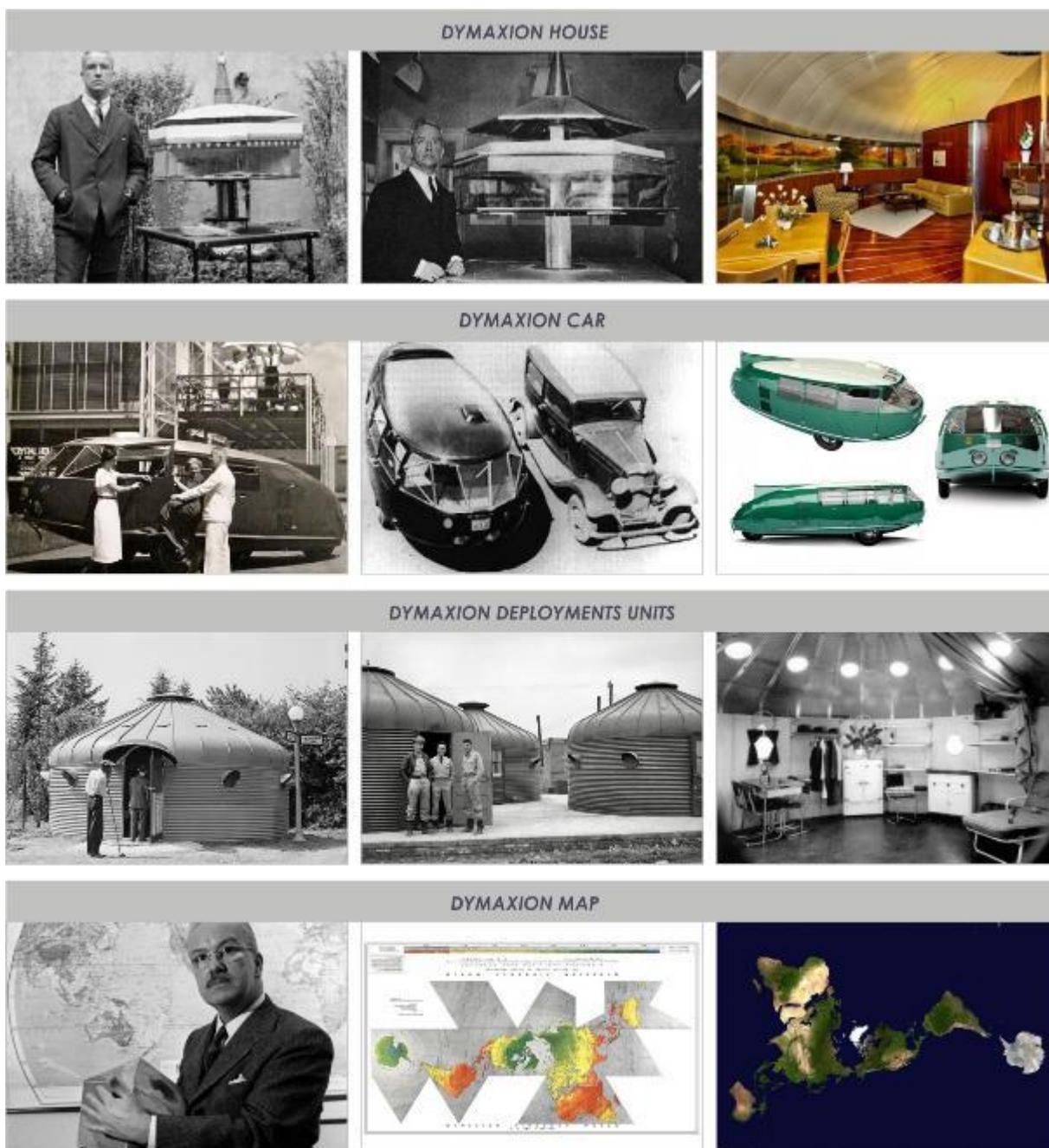
Por volta de 1947, com o fim da guerra, passou a se dedicar, até o fim da vida, ao estudo da sua mais famosa estrutura, a **cúpula geodésica**. Leves, econômicas e fáceis de montar, elas envolvem mais espaço sem colunas do que qualquer outra estrutura, distribuem eficientemente o estresse e podem suportar condições extremas. São baseadas na sua "**geometria sinérgica**", sua exploração ao longo da

vida do design dos princípios da natureza, sendo resultado de suas descobertas revolucionárias sobre o equilíbrio das forças de compressão e de tensão na construção.

A partir da década de 1940 ele começou a ensinar e dar palestra em diversas universidades, incluindo *Harvard*, *MIT*, *Southern Illinois University* (SIU), etc. Em 1950 ele e a esposa Anne passaram a morar na *Dome House* (uma cúpula geodésica). Em 1961, recebeu o prêmio *Charles Eliot Norton Professorship of Poetry* em Harvard. Mesmo tendo sido desprezado no início de sua carreira pelos estabelecimentos de arquitetura e construção, mais tarde foi reconhecido com grandes prêmios científicos, industriais, de arquitetura e de design, tanto nos Estados Unidos, quanto no exterior. Já no final dos anos 60, esteve especialmente envolvido na criação do *World Game*, uma simulação em grande escala e uma série de workshops utilizando um grande Mapa Dymaxion para ajudar a humanidade a entender melhor, aproveitar e utilizar de forma mais eficiente os recursos no mundo.

Recebeu 47 doutorados *honoris causa* e foi autor de 26 livros, dentre eles, *Synergetics* (com quase 2000 páginas), passando grande parte da vida viajando pelo mundo dando palestras e discutindo suas idéias com grandes audiências. Foi também diretor de diversas empresas, dentre elas a: *Dymaxion Corporation, Inc.*; *Geodesics, Inc.*; *Synergetics, Inc.* e *Plydomes, Inc.* Em 1983, pouco antes de sua morte, ele recebeu a *Medalha Presidencial da Liberdade*, a mais alta honra civil da nação, com uma citação reconhecendo que suas contribuições como um geômetra, educador e arquiteto-designer são *benchmarks* de realização em seus campos. Em 1 de julho do mesmo ano, Fuller faleceu de ataque cardíaco em Los Angeles (USA). Em 1999, a biblioteca da Universidade de Stanford adquiriu do *Buckminster Fuller Institute* os arquivos originais de Fuller que corresponde ao maior acervo de um único indivíduo já processado, e levaria anos ou décadas, para passar por toda a coleção, com 450m lineares de documentos do arquivo pessoal, com correspondências, manuscritos, planos arquitetônicos, modelos, notas, desenhos, publicações, milhares de artefatos, documentários e materiais audiovisuais (cerca de 2000 horas de vídeo e gravações de áudio). Na **Figura 91**, alguns exemplos da marca Dymaxion.

Figura 91 – Casa, Carro, Unidade Implemental e Mapa DYMAXION.



Fonte: Elaborado pela autora, do banco de imagens do Laboratório do BIODESIGN.

3.1.1 AS PRIMEIRAS CÚPULAS GEODÉSICAS DE FULLER

Fuller se dedicou a estudar a geometria esférica, porque havia percebido que a natureza favorecia esta forma em várias situações em suas observações, seja nos grandes corpos celestes, ou nos microorganismos do plâncton marinho. Ele intuiu que tal configuração correspondia ao próprio sistema estrutural da natureza e se dedicou a compreender ainda mais a matemática da engenharia que resultaria nesse meio

tão eficiente de construção. Além disso, o processo que o levou para criação das cúpulas também foi muito influenciado pela sua experiência de ter trabalhado com construções, percebendo que os domos já haviam sido empregados desde que os humanos começaram a construir abrigos. Desta forma, observando os problemas inerentes a técnicas construtivas convencionais (em oposição à facilidade com que as estruturas da natureza são erguidas), teve certeza de que podia aperfeiçoar a técnica de construção esférica encontrada em construções primitivas indígenas, que utilizavam galhos e dobras de árvores cortadas em forma de domo, cobertos com peles de animais, folhagens, palha ou outros materiais. (SIEDEN, 2000)

Quando estas ideias começaram a tomar forma, seus modelos iniciais de cúpulas foram esferas ou seções de esferas construídos a partir do cruzamento de peças curvadas de material (cada um dos quais representando um arco do grande círculo) que formavam triângulos. Por isto nomeou a invenção de "**Cúpula geodésica**", porque as seções ou arcos de grandes círculos também são chamados geodésicas. O termo geodésica deriva do latim e significa "*dividindo a Terra*." Uma linha geodésica é a menor distância entre dois pontos em uma esfera. Mais tarde, Bucky expandiu o conceito e transformou as peças curvas em estruturas mais complexas, inicialmente a partir de poliedros regulares de faces triangulares que eram unidos para criar uma estrutura de forma esférica. Desta forma, a triangulação permaneceu, assim como o nome inicial da invenção. (SIEDEN, 2000)

Verificando que as construções de edifícios tradicionais eram focadas em ângulos retos com configuração ortogonal, ele percebeu que este modelo não era tão eficiente em grandes construções, pois ao contrário do que ocorre nas cúpulas, gera sempre a necessidade de que as paredes da base sejam muito mais espessas para suportar o peso das seções superiores, pois descobriu que as forças de tensão (força que empurra para fora) e a compressão (força que empurra para baixo) precisam estar perfeitamente equilibradas em uma estrutura para que esta não entre em colapso. (SIEDEN, 2000)

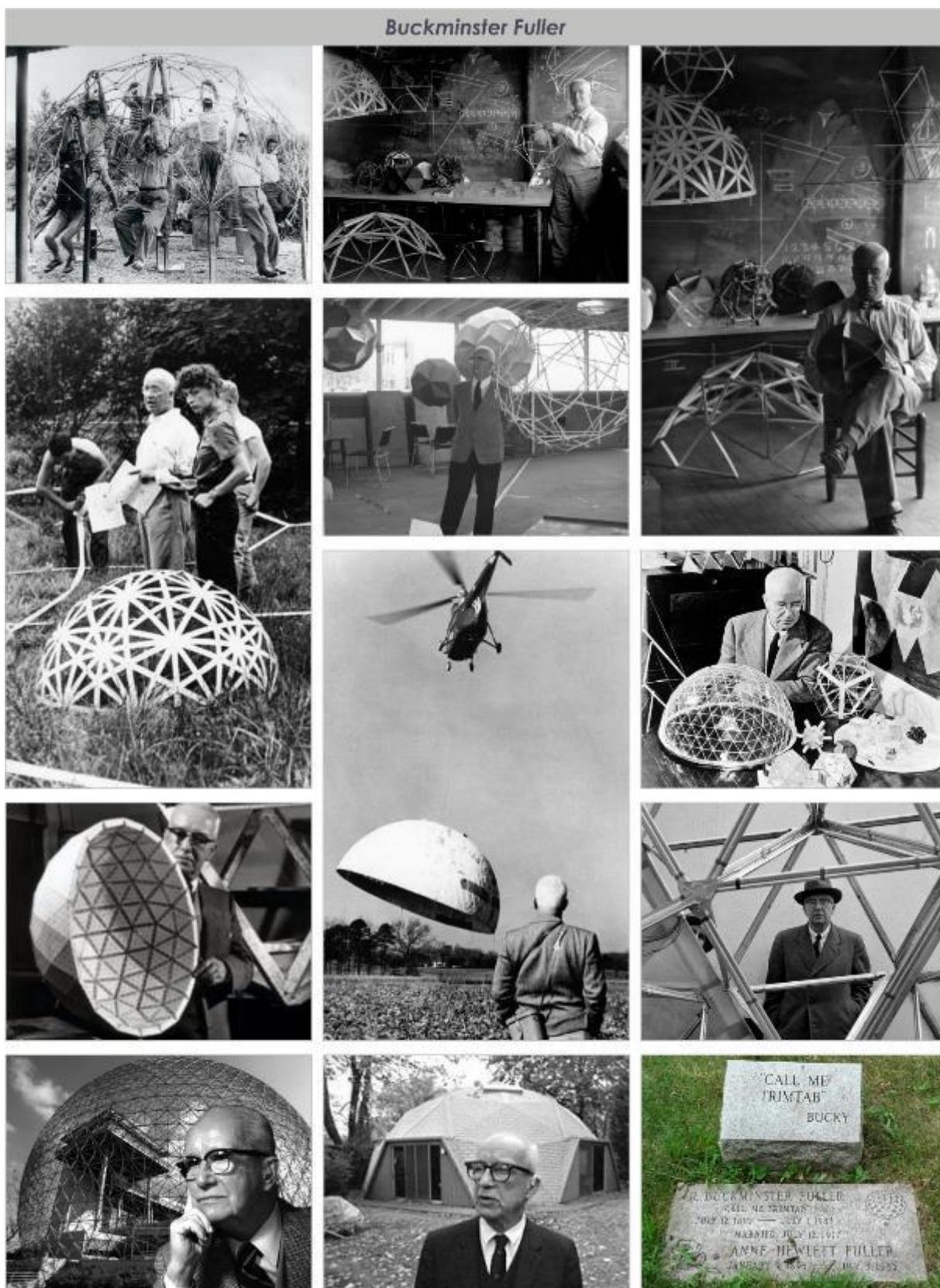
Depois de vários estudos e dois anos de cálculos, sua primeira grande cúpula, com cerca de 15m de diâmetro foi então construída com a ajuda do jovem assistente *Donald Richter*. Com orçamento apertado, ela foi levantada no verão de 1948, onde

Fuller era professor, no *Black Mountain College*, na Carolina do Norte/USA, uma das universidades mais revolucionárias do período, onde também lecionou o arquiteto *Walter Gropius*, ex-diretor da Bauhaus. Com uma carga de perfis leves de alumínio comprada pelo próprio Fuller no grande dia da montagem, quando os parafusos finais foram fixados e a tensão foi aplicada à estrutura, a frágil estrutura caiu quase que imediatamente sobre si mesma. Em sua pressa para testar seus cálculos, tinha procedido sem o financiamento necessário para adquirir bons materiais, e por isto, a cúpula ruiu. (SIEDEN, 2000)

Mas não desistiu e certamente aprendeu com a experiência. Depois desse episódio foi ensinar no Instituto *Chicago of Design*, onde ele e seus alunos passaram a dedicar grande parte do tempo para desenvolver e testar novos conceitos e modelos melhores, para então, no verão seguinte, demonstrar o verdadeiro potencial das suas cúpulas geodésicas. Dessa vez havia juntado dinheiro suficiente com o pagamentos das aulas para comprar melhores materiais para a nova cúpula, com cerca de 4,2m de diâmetro, construída com a melhor tubulação de alumínio para aeronaves e coberta com um laminado de vinil plástico, esta permaneceu fixa e estável no campus durante todo o verão. Para demonstrar a eficiência do design para instrutores e alunos céticos, Bucky e oito assistentes ficaram pendurados no quadro da estrutura, como as crianças em um playground, imediatamente após a sua conclusão. (SIEDEN, 2000)

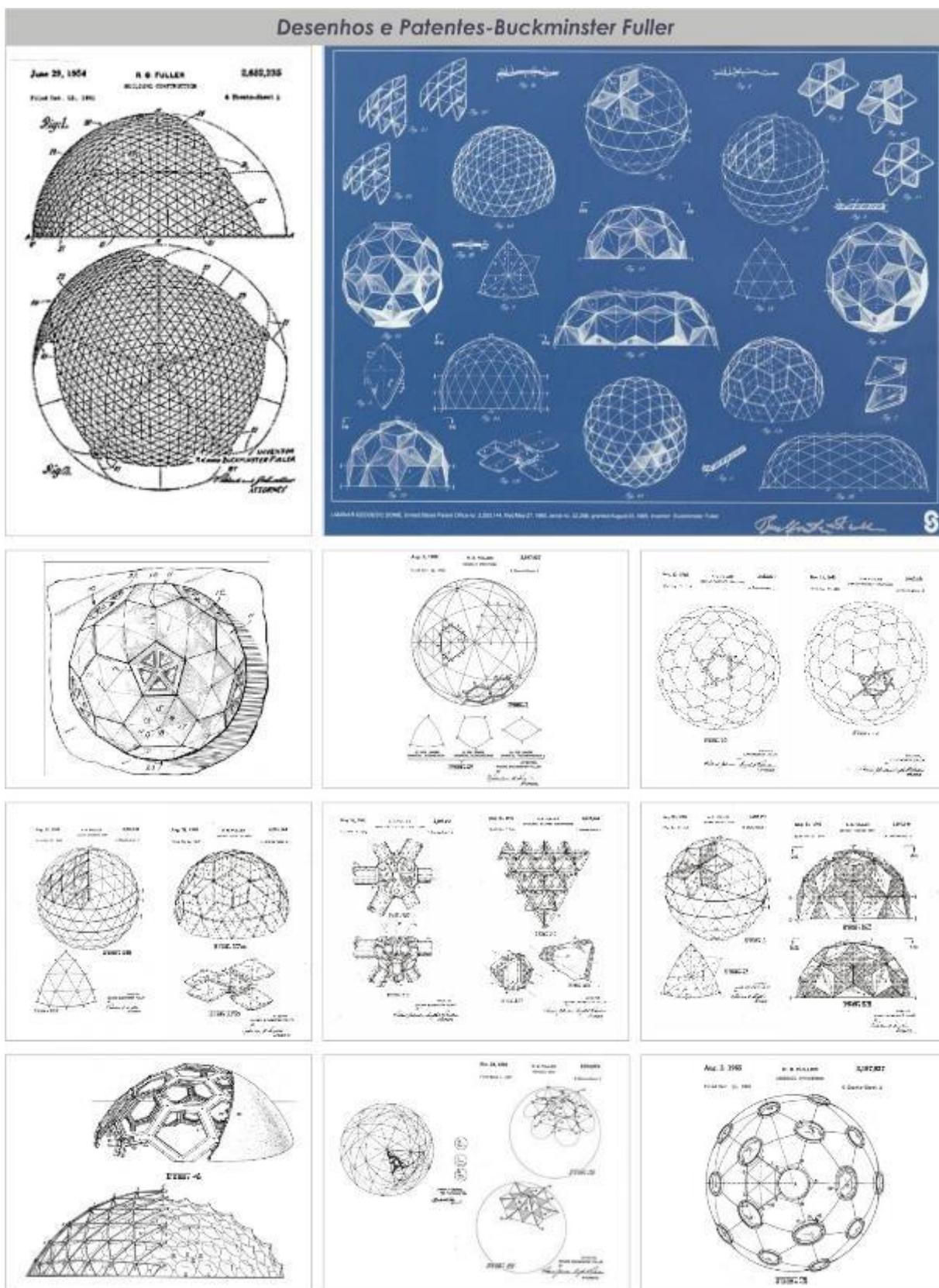
A **Figura 92** mostra algumas imagens de Fuller com seus alunos, modelos e cúpulas geodésicas, e a **Figura 93**, contém alguns desenhos de patentes das geodésicas.

Figura 92 – Imagens de Fuller com seus alunos, modelos e cúpulas geodésicas.



Fonte: Elaborado pela autora, do banco de imagens do Laboratório do BIODESIGN.

Figura 93 – Imagens de desenhos das Patentes de Cúpulas Geodésicas de Fuller.



Em 1953, Fuller foi chamado por Henri Ford II (neto de Henri Ford) para cobrir o pátio do edifício da sede corporativa em *Dearborn* (USA) em detrimento a comemoração do quinquagésimo aniversário da empresa. O prédio era de valor inestimável para o avô, que sempre amou o edifício redondo conhecido como Rotunda, mas queria que o pátio interior fosse coberto para que o espaço pudesse ser protegido e utilizado durante o mal tempo. (SIEDEN, 2000)

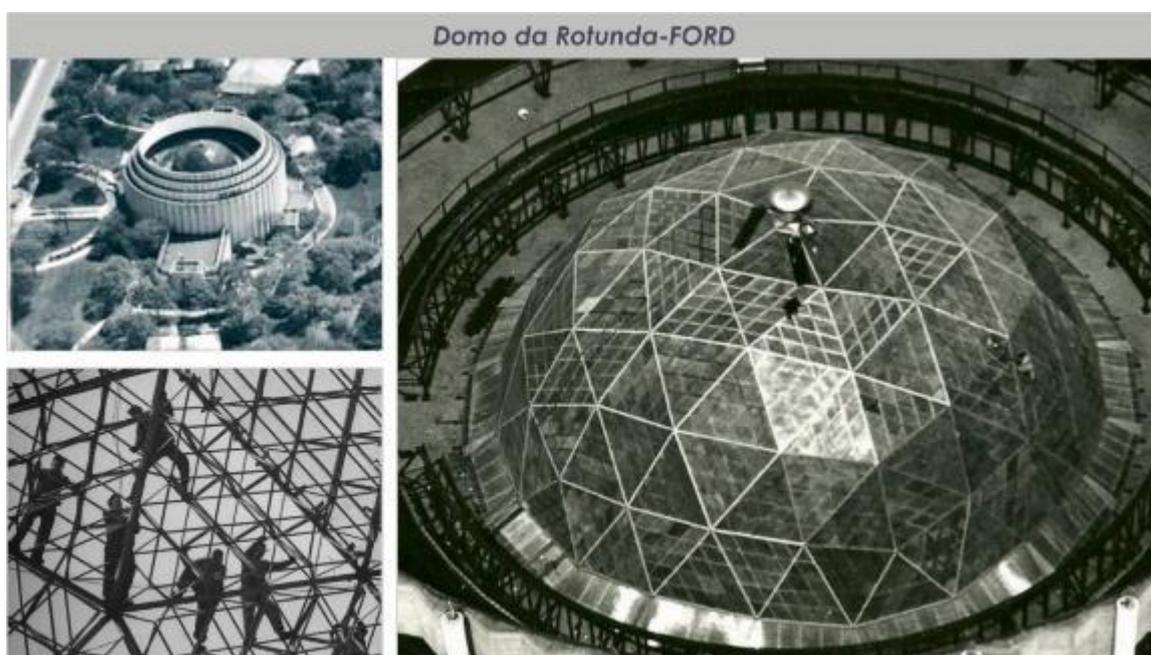
Tendo sido concebido como uma estrutura temporária, o edifício Rotunda era frágil e não poderia suportar o peso de 160 toneladas que os engenheiros da Ford haviam calculado para um domo de aço com estrutura convencional para a época. Sob esta pressão, as paredes finas do edifício entrariam em colapso, mas ainda assim, Henry Ford II era uma pessoa determinada, e queria o pátio coberto. Para resolver a situação, se sugeriu chamar Bucky, pois embora sua cúpula geodésica ainda não tinha sido executada em nenhum projeto industrial, decidiram que deviam ao menos solicitar sua opinião. Quando ele examinou a situação, respondeu que certamente poderia fazer, e que a sua cúpula com cerca de 27m de envergadura pesaria apenas 8,5 toneladas, cerca de 20x mais leve que a estimativa dos engenheiros da Ford, ficando também abaixo da expectativa o orçamento para o projeto, mesmo com tempo apertado para conclusão da obra, que se tende a ser mais oneroso. O acordo foi assinado em janeiro de 1953, para se cumprir o prazo até abril. Os engenheiros da Ford ficaram incrédulos, não se convencendo que as afirmações do inventor eram válidas, por isto, começaram a trabalhar em um plano de contingência, que não chegou a ser colocado em ação porque a cúpula foi concluída com êxito, dois dias antes do previsto. (**Figura 94**) (SIEDEN, 2000)

As seções da cúpula foram pré-fabricadas e, em seguida, suspensas a partir de um mastro central, por isto, não foi necessário um andaime perigoso. A equipe de construção trabalhou a partir de uma ponte erguida na parte superior do pátio. A cúpula foi montada com cerca de 12.000 suportes de alumínio, cada um com cerca de 1m de comprimento e pesando apenas 0,14kg. Uma vez que cada seção pesava apenas cerca de 1,8kg, era levantada por uma única pessoa, sem necessidade de guindaste ou maquinaria pesada para içar até a área de montagem. Para completar e fechar a estrutura, lâminas de fibra de vidro transparente foram instalados nos pequenos painéis triangulares do quadro. Neste tempo, Fuller ainda não tinha

desenvolvido uma forma melhor de fixar os painéis. A cúpula do edifício Rotunda obteve êxito durante vários anos antes dos elementos começaram a ter problema de vazamento, que com a manutenção regular, o problema não era grave, e os eventos corporativos sob a cúpula se tornaram tradição. Porém, num desses eventos, o encontro anual da Ford no Natal de 1962, próximo da ocasião, uma manutenção para conter os vazamentos, usando um maçarico para reparos com uma mistura de gasolina para diluir o piche (prática comum na época), causou um grande incêndio. Uma vez que não tinha sido planejada para ser uma estrutura permanente, a Rotunda foi envolvida em chamas que destruíram o edifício e a primeira cúpula geodésica comercial.

Mas isto não impediu a notoriedade fornecida pelo projeto Ford, que resultou num enorme interesse público quase que instantâneo em Fuller e suas ideias, chamando a atenção de um grupo de cientistas que estavam lutando com outro problema aparentemente insolúvel: a proteção das instalações de radar em todo o Ártico. Mais uma vez, sua incrível cúpula geodésica de fibra de vidro surpreendeu todos os especialistas, provando que a estrutura era mais do que capaz de lidar com essa difícil tarefa. (SIEDEN, 2000)

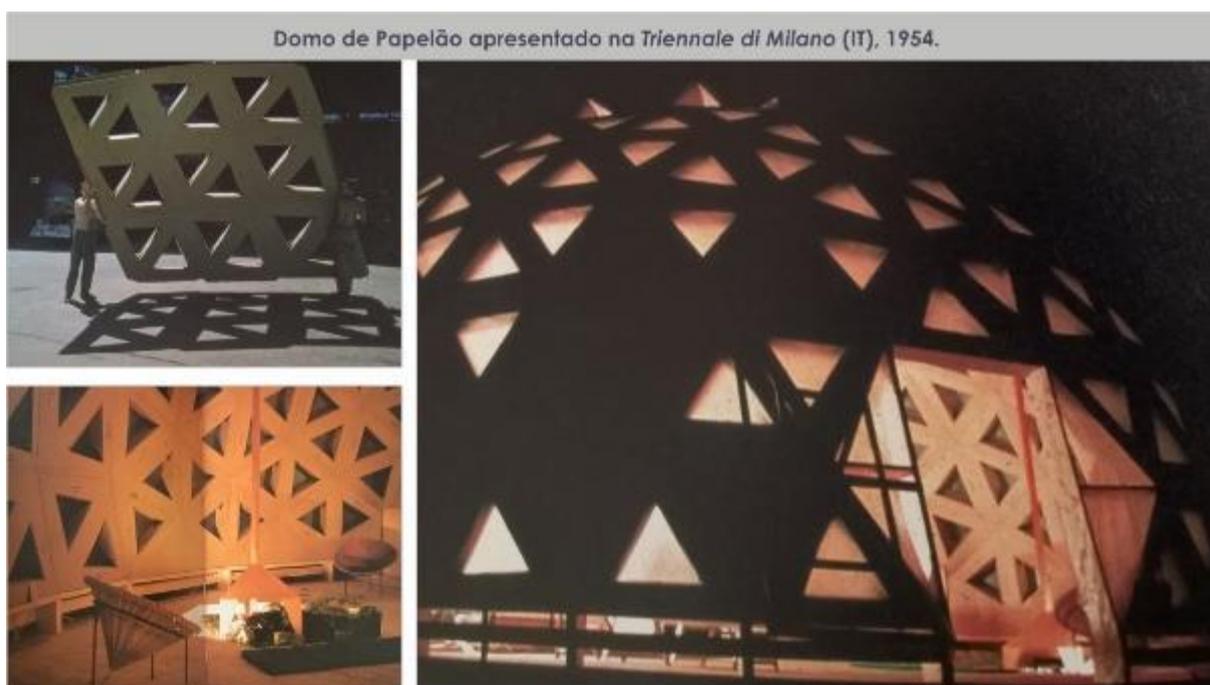
Figura 94 – Imagens da cúpula geodésica da Rotunda, FORD.



Fonte: Elaborado pela autora, do banco de imagens do Laboratório do BIODESIGN.

A primeira aceitação mundial pela comunidade arquitetônica ocorreu com a *Triennale* de 1954 em Milão (IT), estabelecida para a realização de exposições internacionais com o objetivo de apresentar as realizações mais inovadoras nas áreas de design, artesanato, arquitetura e urbanismo. O tema do ano foi: *A vida entre o artefato e a natureza*, estando perfeitamente de acordo com o trabalho que tinha iniciado para ajudar a fazer com que os recursos finitos da Terra atendessem as necessidades de toda a humanidade sem interromper os processos ecológicos do planeta. Mas não estava inscrito para competir no evento e sim para expor um design de interior. Foram enviados então, 2 domos de papelão de 13m de diâmetro, que faziam parte da exposição da *Geodesics, Inc.* e poderiam ser facilmente enviados e montados com as direções impressas para facilitar o processo (**Figura 95**). Dessa forma, foram instalados no jardim do castelo de Sforzesco em Milão e causou tamanha repercussão que ganhou o maior prêmio do evento, mesmo sem ter sido inscrito para competir, o que demonstrava o seu grau de vanguardismo e inovação.

Figura 95 – Imagens da cúpula geodésica de papelão apresentada na *Triennale* de 1954 (Milão/IT).

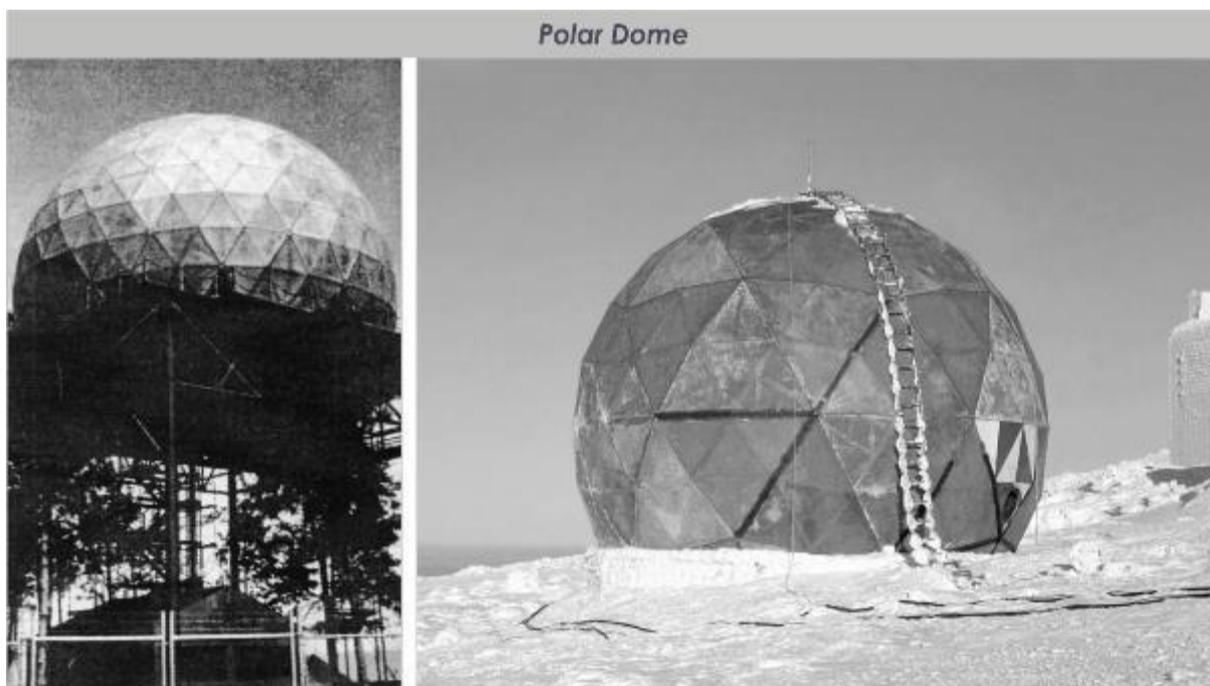


Fonte: Elaborado pela autora, do banco de imagens do Laboratório do BIODESIGN.

Depois disso, os desenhos esféricos que podem sustentar seu próprio peso, foram logo notados pelo governo dos EUA, que contratou a empresa do arquiteto, a *Geodesics Inc.*, para fazer pequenas cúpulas para o exército, dessa forma, os militares norte-americanos se tornaram um de seus maiores clientes, usando as

cúpulas leves para cobrir estações de radar em instalações ao redor do Círculo Polar Ártico e da Antártida, além de moradias rápidas e fortes para suportar a alta velocidade dos ventos frios para os soldados no exterior. Assim, serviram para várias finalidades na época das expedições americanas: como casa, abrigos, laboratórios de equipamentos científicos, bases marítimas, espaciais, etc. (**Figura 96**)

Figura 96 – Imagens dos Domos Polares.



Fonte: Elaborado pela autora, do banco de imagens do Laboratório do BIODESIGN.

Em abril de 1960 ele montou a primeira casa cúpula em Carbondale, a **Fuller Dome Home** e nela viveu com sua esposa Anne até 1971 (**Figura 97**). Desde de 2002, uma organização sem fins lucrativos decidiu transformar o local num museu a honrar o legado de Bucky, promovendo o trabalho, os princípios e o seu compromisso de lidar com as necessidades mais básicas do mundo, preservando seus artefatos e fornecendo programação no espírito da esperança Fuller para promover *educação omni-bem-sucedida e um sustento de toda a humanidade*. O museu preserva a casa cúpula original localizada na Ave. South Forest, 407 (Carbondale, Illinois/USA) e é liderado por um Conselho de administração formado por educadores, arquitetos, designers, artistas, eméritos aposentados, organizadores comunitários e líderes que representam uma confluência diversificada de indivíduos que se dedicam a manifestar os ideais de Bucky hoje.

Figura 97 – Imagens do *Dome Home* de Fuller em Carbondale (USA).



Fonte: Elaborado pela autora, do banco de imagens do Laboratório do BIODESIGN.

Mais tarde, a cúpula geodésica mais famosa de Fuller foi construída para ser o pavilhão dos Estados Unidos na feira internacional EXPO 1967 na ilha de *Sainte-Hélène em Montreal (Canadá)*, a ***Biosphère***, como chamou Fuller, com 76,25m de diâmetro e 61m de altura (equivalente a um prédio de 20 andares). Ele empregou um módulo estrutural composto apresentando um triângulo na face externa e um hexágono no lado interno para se ajustar ao arco. Estes elementos estavam distanciados um metro na base e se aproximavam à medida que a edificação ganhava altura. Para fechar toda a estrutura, foram utilizados 1900 painéis moldados em acrílico, estes elementos conectados distribuem o peso da estrutura por toda a superfície externa até tocar o solo. Para evitar a forma usual da meia esfera que provocaria uma aparência achatada, o pavilhão foi projetado na forma de 3/4 da esfera. (DINIZ, 2006)

Esta foi a mais complicadas de suas cúpulas, pois usava um elaborado sistema de telas de sombreamento retráteis, a fim de controlar a insolação e temperatura interna, e eram operadas por computador de acordo com o giro solar, permitindo a respiração do edifício. O sistema não funcionou perfeitamente na ocasião, talvez por estar avançado demais para a época, como usualmente era a mente do idealizador. Mas o Pavilhão obteve grande sucesso, recebendo cerca de 11 milhões de pessoas em seis meses. A construção é famosa até hoje não só por sua forma, mas também pelo conteúdo apresentado na exposição. Além de sua forma marcante, era o único transpassado pelos trilhos do mini-trem que circulava toda a exposição. (DINIZ, 2006)

Sobre a exposição, os curadores decidiram focar na Cultura Americana e na conquista do espaço exterior sob o tema de *América Criativa*. Baseados na premissa que não faria sentido provar a superioridade da tecnologia americana, já evidente, organizaram o conteúdo em quatro setores temáticos. O primeiro era o *Espírito Americano*, apresentava centenas de artefatos da arte popular. O segundo era o *Destino Lua*, a parte mais popular do pavilhão, o setor era alcançado através da maior escada rolante até então construída com 40 metros na plataforma, que ilustrava o ambicioso programa Apollo que levou o homem à lua em julho de 1969. Mostrava cápsulas espaciais reais como a *Freedom Seven Mercury* usada por Alan B. Shepard em 1961 e a *Gemini VII*. Também foram mostrados foguetes, grandes maquetes de satélites e paraquedas pendurados no teto do pavilhão, assim como uma convincente reprodução da paisagem lunar onde a vida no espaço era apresentada através de vestimentas, equipamentos e alimentos usados pelos astronautas. (DINIZ, 2006)

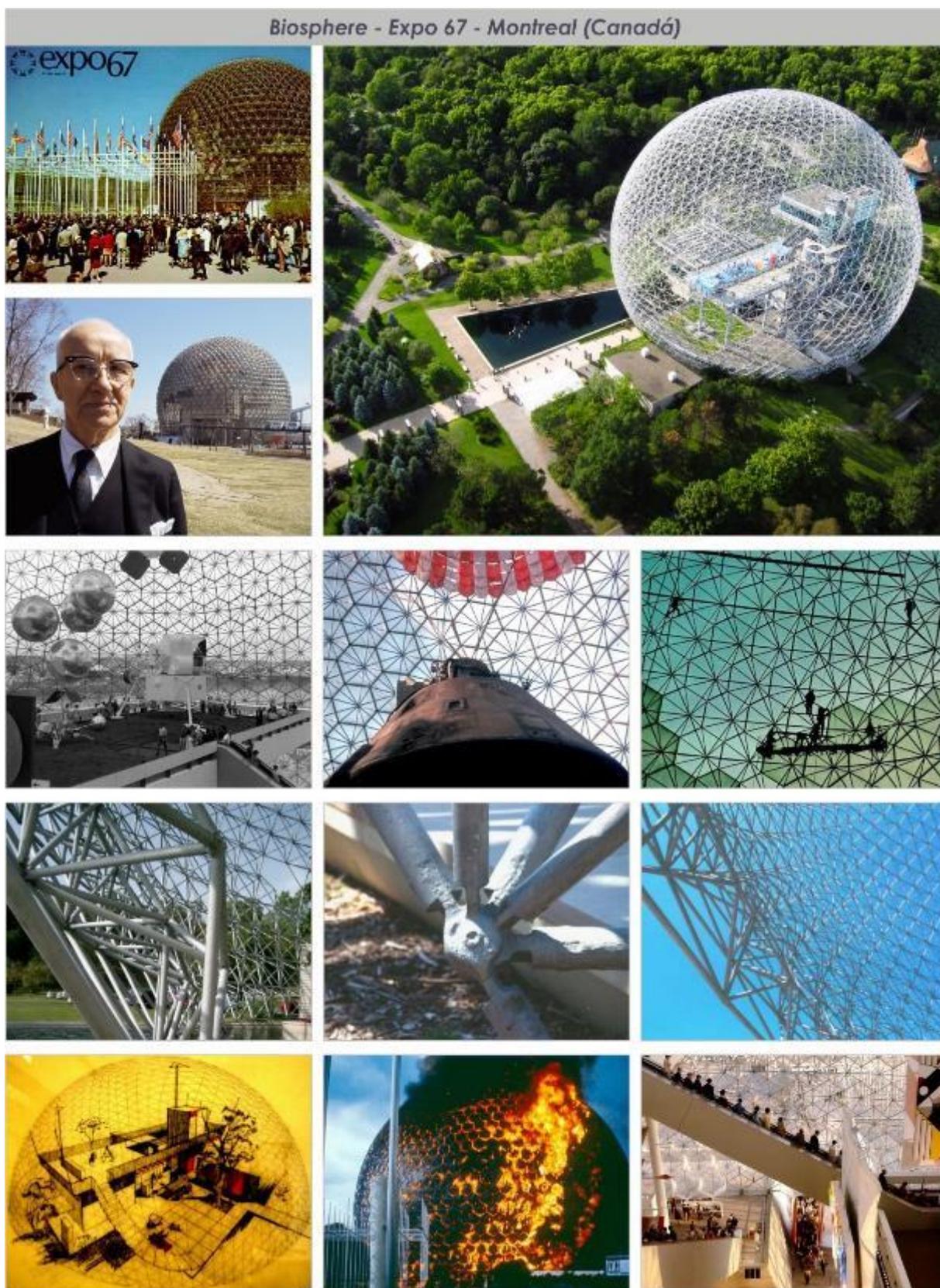
Outro setor intitulado de *Pintura Americana*, continha 23 grandes telas de artistas reconhecidos nos anos 60, dentre eles, *James Rosenquist, Claes Oldenburg, Andy Warhol, Jasper Johns, Jim Dine, Ellsworth Kelly, Barnett Newman, Robert Rauschenberg e Roy Lichtenstein*. O último setor, chamado: *Máquina dos Sonhos*, era devotado ao cinema de Hollywood, num misto de informação e entretenimento. Fotos gigantes mostravam atores e atrizes como *Mary Pickford e Marlon Brando* e três telas passavam trechos de musicais e cenas de amor de filmes famosos como *O Vento Levou*. Os organizadores da EXPO 67 conceberam o evento no sentido de celebrar a colaboração e entendimento entre os povos em vez de exibir conquistas industriais e tecnológicas. (DINIZ, 2006)

Quase 40 anos depois, a *Biosphère* de Buckminster Fuller sobreviveu ao teste do tempo e se transformou através de seu poder evocativo, numa ilustração eloqüente da intenção de unir tecnologia e natureza. Mesmo sofrendo um incêndio em seus painéis de acrílico e restando apenas a estrutura, ela ainda é um símbolo vivo do Homem e seu Mundo, que capturou a imaginação de milhões de visitantes e ainda está lá, restaurada por *Eric Gauthier*, confirmando o status de Montreal como uma cidade internacional. (DINIZ, 2006)

Atualmente a Biosfera de Montreal é um museu interativo que trabalha no sentido de despertar a consciência a respeito do ecossistema dos *Grandes Lagos* e do rio *Saint-Lawrence*. Em função de sua arquitetura específica, o consumo de energia nesta construção é substancialmente reduzido, a combinação de sistemas geotérmicos e tecnologias de ponta produz uma impressionante eficiência energética. Comparados com as opções elétricas convencionais, o sistema geotérmico promove uma redução no consumo de energia de 459MWh ou 21% anuais, o que é significativo considerando o uso extensivo de janelas na construção e o clima nórdico do Canadá. (DINIZ, 2006)

A **Figura 98** mostra algumas imagens da época e de hoje da *Biosphère*, Pavilhão dos Estados Unidos na EXPO 67 de Montreal.

Figura 98 – Imagens da cúpula geodésica de Montreal/Canadá (*Biosphère*).

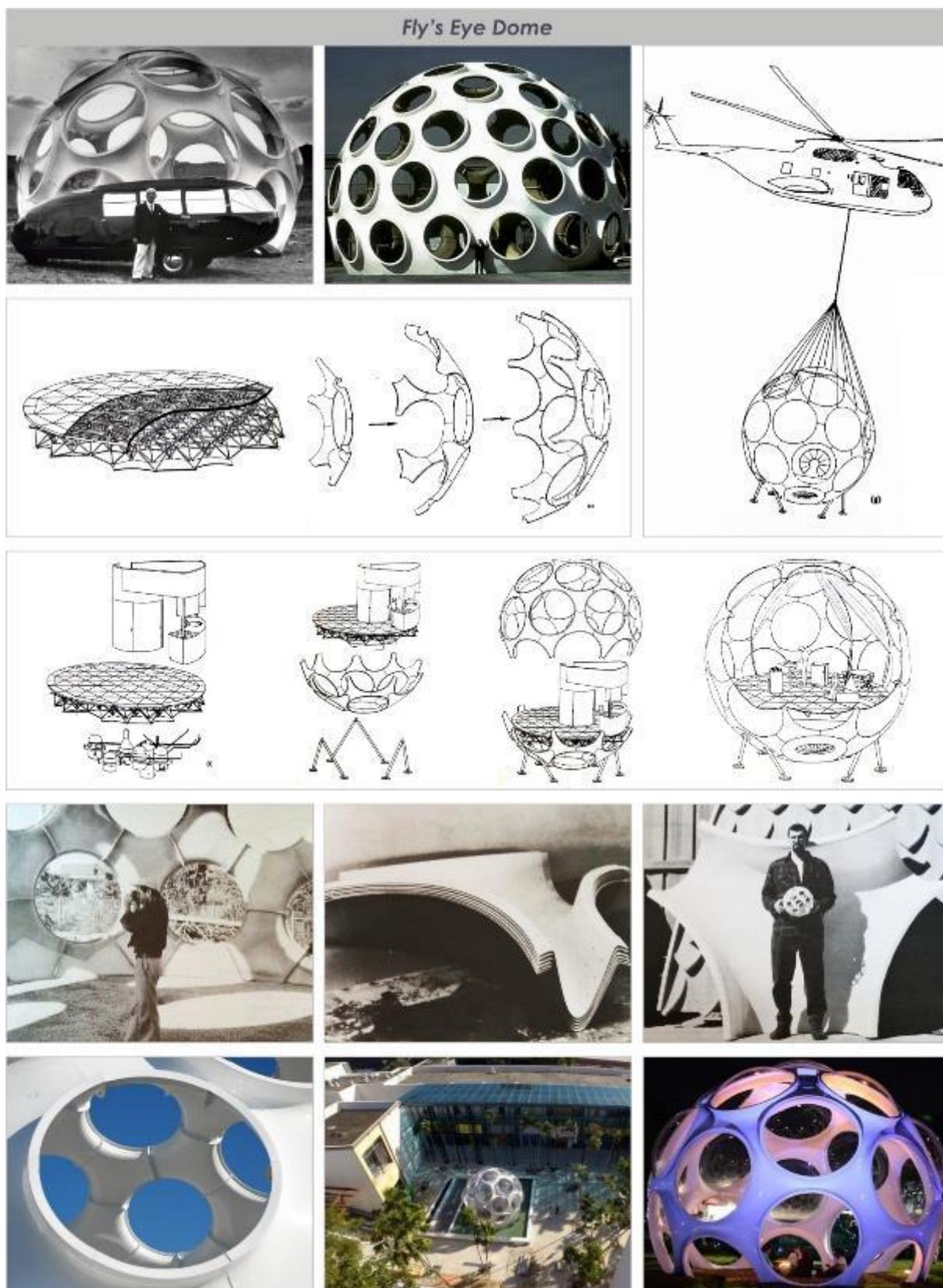


Em 1965, concebeu o *Fly's Eye Dome* ("olho de mosca"), uma geometria peculiar, mais orgânica, que apesar de não parecer, guarda os mesmos princípios construtivos da modulação triangular dos domos convencionais (**Figura 99**). Ele projetou a cúpula como sua idéia da casa portátil acessível, do futuro, com janelas e aberturas redondas na cúpula para manter painéis solares e sistemas de coleta de água, permitindo assim que a cúpula fosse auto-suficiente, e ainda pudesse ser transportada por aeronaves, uma versão atualizada da *Dymaxion House*, que ele chamou de "máquina de habitação autônoma". Planejou fazer a estrutura modular barata e portátil, mas o projeto não vingou e ele só construiu apenas três protótipos de diferentes diâmetros: 3,6m (atualmente pertence à Norman Foster); 7,3m (atualmente pertence à Craig Robins) e um de 15,24m (atualmente reside no parque de Toulouse/FRA, construído com 50 peças iguais de 4,5mm de espessura).

Na década de 1970 ele havia patenteado o conceito do *Fly's Eye Dome*, mas só o desenvolveu anos depois com **John Warren**, surfista e especialista em fibra de vidro da Califórnia que inspirado por Bucky, construía suas próprias cúpulas, as **Turtle-Dome** (de hexágonos e pentágonos), e as vendia como abrigos de férias. Fuller mostrou o projeto e o contratou para construir em fibra de vidro, então Warren fez um protótipo de 3,6m de diâmetro, que Fuller ficou tão satisfeito com o resultado, que encomendou outros dois maiores. Quando ficaram prontas, exibiu a maior delas numa exposição em Los Angeles, em 1981.

Quando faleceu, as três cúpulas ficaram armazenadas e só em 2012 o *Buckminster Fuller Institute* começou a procurar colecionadores para comprar e restaurar as cúpulas já em estado de grave deterioração. "Foi incrivelmente importante levá-la ao mundo", disse *Elizabeth Thompson*, diretora executiva do Instituto que chamou *Robert Rubin*, proprietário de casas icônicas, e ele imediatamente adquiriu a cúpula maior para fazer parte do recém-renovado festival de arte de Toulouse, encontraram uma localização ideal na margem do rio em *Port Viguerie*, onde estaria no centro do festival brilhando magnificamente com sua nova pintura. John Warren foi ajudar a instalá-la e revê-la após 35 anos que havia construído.

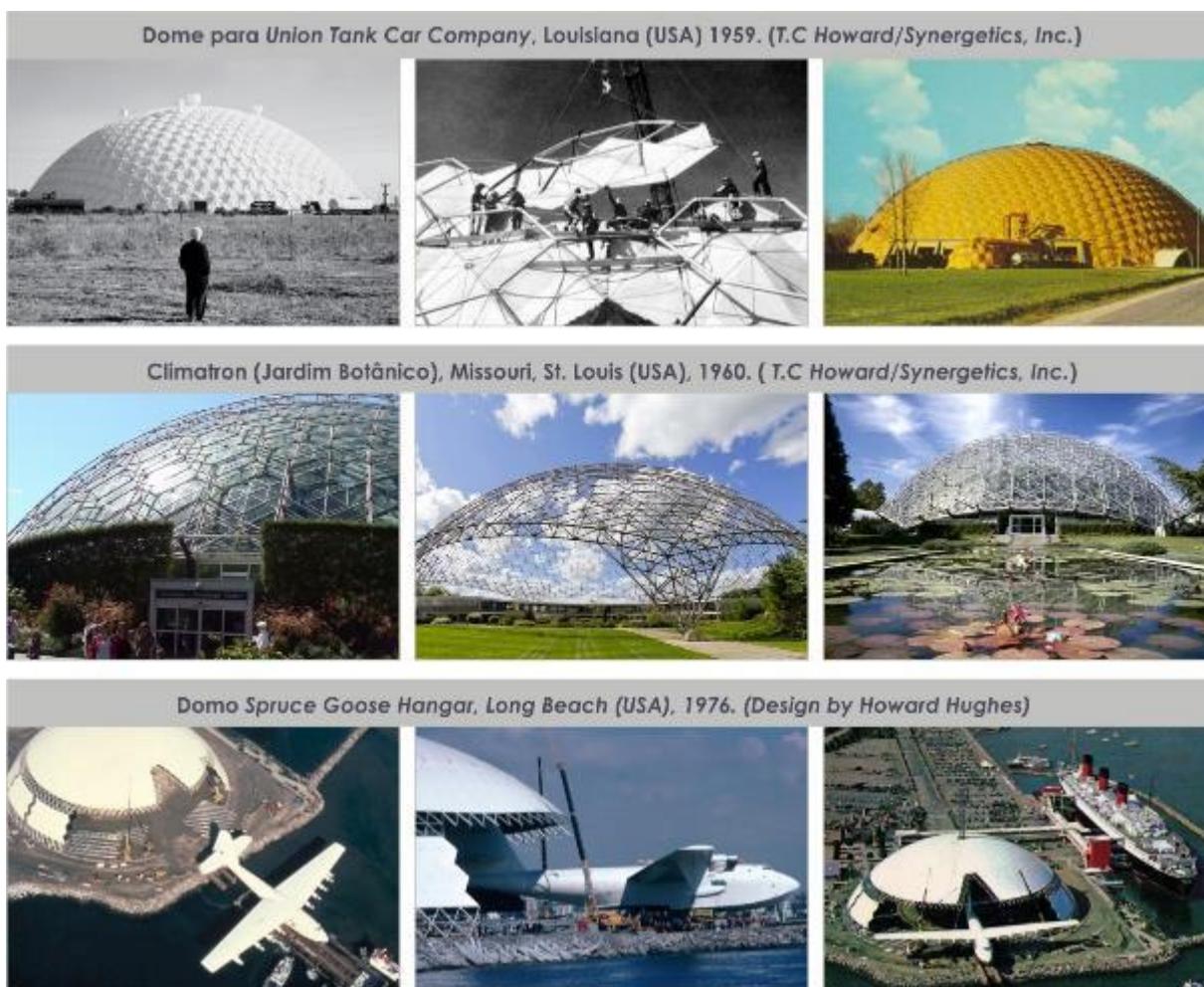
Figura 99 – Imagens do Fly's Eye Dome em sua idealização e atualmente em Miami (USA).



Fonte: Elaborado pela autora, do banco de imagens do Laboratório do BIODESIGN e de (BALDWIN, 1996).

Outras cúpulas famosas receberam consultoria de Fuller, uma delas foi a grandiosa cúpula para a **Union Tank Car Company**, em 1959, com 117,04m de diâmetro e 73m de altura, em *Louisiana* (USA). Apresentava dupla camada, com emprego de um conjunto do tubo e da tela por um lado, e células hexagonais pré-fabricadas por outro lado, criando uma estrutura indeformável. Também notável, a cúpula do **Climatron**, em Saint-Louis (USA), construída em 1960 com 53m de diâmetro e 21m de altura, também apresentando dupla camada com malhas hexagonais em alumínio recoberta de *plexiglas*, cobrindo o Jardim Botânico. E também, a **Spruce Goose Hangar Dome** em 1976, construída para abrigar o grandioso hidroavião Spruce Goose, em Long Beach (USA) (**Figura 100**). (MARTINS JÚNIOR, 2008)

Figura 100 – Imagens das cúpulas geodésicas do *Union Tank*, *Climatron* e *Spruce Goose Hangar*.



Fonte: Elaborado pela autora, do banco de imagens do Laboratório do BIODESIGN.

Nesta compilação das mais representativas cúpulas, não poderia deixar de fora o projeto utópico em que Fuller propôs uma biosfera para regular o clima e reduzir a poluição do ar na cidade de Nova York em 1959. Segundo o biógrafo *Alden Hacht*, o projeto consistia em uma cúpula de 3,22km de diâmetro cobrindo parte da cidade, da rua 22th a 62th, alegando que as economias em condicionamento de ar, ruas limpas, remoção de neve e horas de trabalho perdidas resultante do frio, pagariam rapidamente o investimento inicial de US\$200 milhões (para se ter idéia, de acordo com o New York Times, a cidade gastou US\$ 92,3 milhões removendo a neve no ano de 2014) (**Figura 101**). De acordo com sua análise, esta cúpula teria o peso avaliado em torno de 4000 toneladas e poderia ser montada em seções de cinco toneladas com auxílio de helicópteros em um período de três meses.

Figura 101 – Imagens da cúpula geodésica proposta por Fuller para a cidade de NY.



Fonte: <http://www.treehugger.com/urban-design/look-bucky-fullers-dome-over-new-york-city.html>.

Acesso em: 05 set 2016.

Uma das geodésicas mais famosas do mundo é a **Spaceship Earth** (*Nave Espacial Terra*), o maior ícone do parque temático do *Epcot Center* (Disney World/USA), inaugurada em 1982 em Orlando, na Flórida. Trata-se de uma esfera geodésica com 49m de diâmetro composta de 954 painéis triangulares. O passeio dentro dela também é chamado de *Spaceship Earth*, onde os visitantes experimentam uma viagem através do tempo, sendo mostrado como os avanços na comunicação

humana ajudaram a criar o futuro. A atração envolve um cronograma desde as origens do homem pré-histórico até o alvorecer do século 21, projetada com a ajuda do escritor de ficção científica *Ray Bradbury*. (HENCH, 2009)

Walt Disney estava profundamente interessado no progresso e no trabalho de grandes futuristas de seu tempo, como *Ray Bradbury*, mas a grande mente, em particular, que realmente inspirou o nome e a forma da atração clássica do Epcot foi mesmo a de Fuller, quando em 1968, publicou o livro "*Manual de Operações para a Nave Espacial Terra*", no qual ele chama as pessoas de astronautas e descreve o planeta Terra como uma nave que precisa de manutenção contínua para continuar operando, assim como ocorre num veículo. Isto acabou por dar a ideia para o nome da atração e da obra.

De acordo com *John Hench* em seu livro "*Designing Disney*", o trabalho de Fuller foi uma enorme inspiração para moldar o que se tornaria o ícone do parque, ele diz que desde o início pensaram numa grande esfera como ícone do *Epcot* (*Experimental Protótipo da Comunidade de Amanhã*), um parque temático focado em inovações tecnológicas, que precisava de uma peça central para encarnar o tema do parque e atrair os convidados, mas ainda, ter espaço suficiente para abrigar dentro dela a atração. Como haviam visto a cúpula da Expo '67 em Montreal e sabiam sobre suas ideias sobre a *Spaceship Earth*, tudo casou com os ideias do projeto. (HENCH, 2009)

A parte superior do Epcot apresenta 3/4 da geodésica que repousa sobre uma plataforma com 6 apoios, e o fundo com os restantes 1/4 da geodésica. Estes apoios suportam a plataforma de aço no perímetro da esfera, a cerca de 30 graus. A parte superior apoia-se na plataforma e sua grade de aço suporta as duas estruturas helicoidais do sistema de passeio do show no interior da geodésica. A construção levou 26 meses e 40.800 horas de trabalho. Um carro pequeno de serviço é estacionado entre as superfícies estruturais e de revestimento, e pode carregar um técnico para fazer reparos. Precisavam de um exterior impermeável e resistente ao fogo para proteger os visitantes, como ainda não havia nenhum material que pudesse realizar tudo, nasceu então o conceito de esfera dentro da esfera para resolver o problema. (HENCH, 2009)

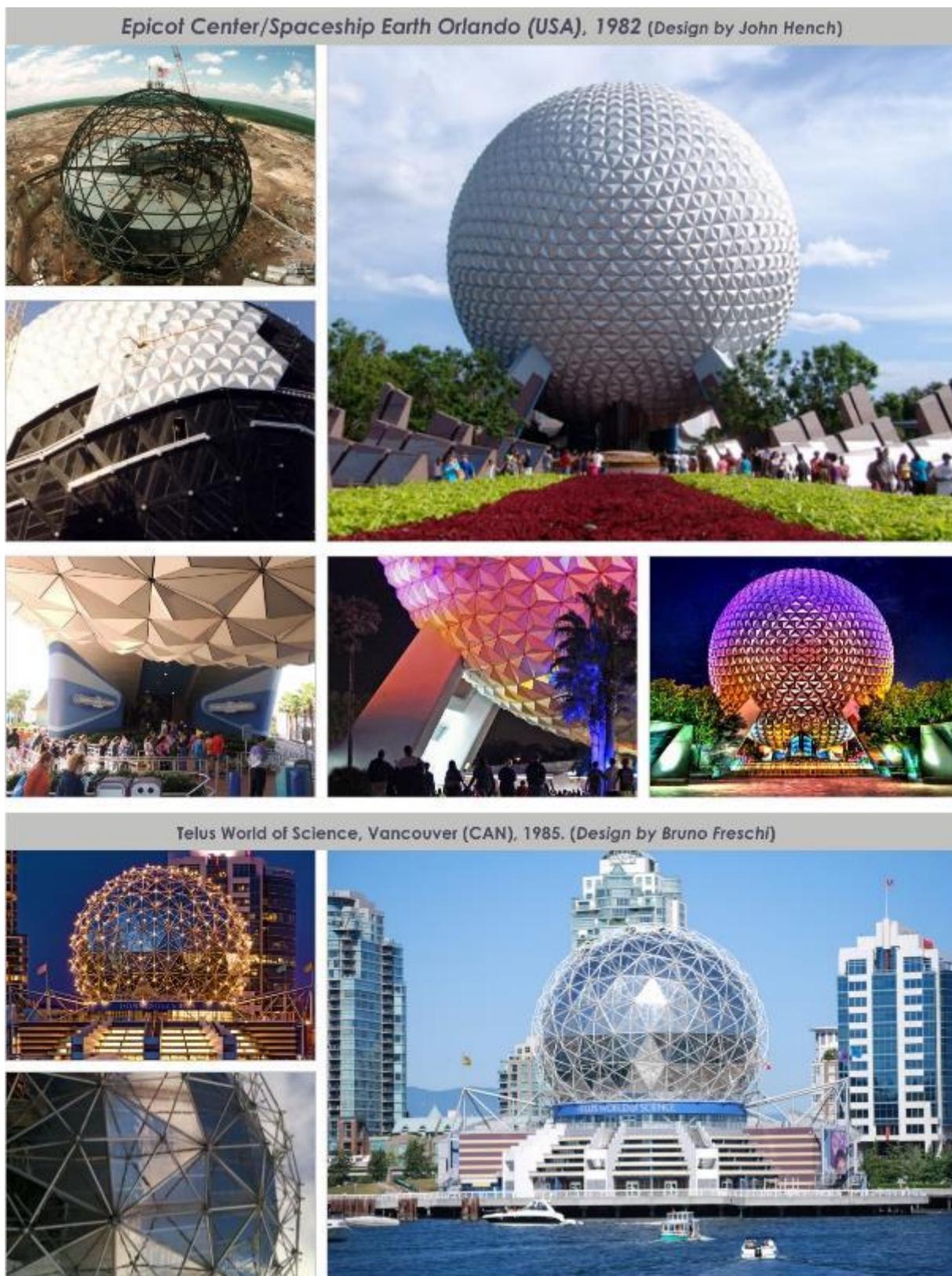
Os painéis triangulares de aço com uma folha de neoprene impermeabilizante foram ligados para formar a estrutura interna. A estrutura externa seria puramente estética e para isto escolheram o material chamado *Alucobond*, que contém um plástico de polietileno intercalado entre duas folhas de alumínio. A estrutura básica do invólucro interno é uma matriz de grandes triângulos, e para a casca externa, John decidiu subdividir cada um dos grandes triângulos em 4 triângulos menores e cada um desses em pirâmides triangulares feitas de *Alucobond*, o que é visto na *Spaceship Earth*. Em teoria, existem 11.520 triângulos isósceles totais formando 3840 pontos, mas na realidade, alguns desses triângulos são parcialmente ou totalmente inexistentes devido a suportes e portas. Outra questão resolvida no projeto é o escoamento da água da chuva, ao deixar lacunas entre as facetas de *Alucobond*, a água da chuva escorre para a estrutura interior impermeável, onde se acumula em um sistema de calha escondido perto do equador, em seguida, é levado para a *Lagoa World Showcase*. (HENCH, 2009)

Uma última cúpula a ser referenciada trata-se do ***Telus World Science*** (Vancouver/CAN). Esta não obteve consultoria de Buckminster, mas seu arquiteto, *Bruno Freschi*, expôs ter sido muito influenciado por ele quando concluiu o projeto em 1985 para sediar a EXPO 86. Hoje, a estrutura comporta um grande teatro.

Todos estes projetos remetem a vantagem estrutural das geodésicas de manter sua forma simplesmente pela natureza de seu projeto. Na verdade, mais na frente se verá que quanto maior a cúpula, mais forte ela se torna. A diversidade das aplicações das geodésicas de Buckminster Fuller em seu tempo, do ponto de vista funcional, escolha dos materiais e condições climáticas, são um reflexo da eficiência da sua teoria estrutural. Muitos projetistas foram e são inspirados em todo o mundo por estas geodésicas, que de tão leves, podiam ser entregues prontas de avião no local, respondiam a todas as condições climáticas e que resultou em mais de cem industriais que se beneficiaram de licenças para fabricação. (MARTINS JÚNIOR, 2008)

Por fim, na **Figura 102**, imagens com detalhes da geodésica *Spaceship Earth* do Epcot (USA) e também do *Telus World Science* em Vancouver (CAN).

Figura 102 – Imagens da esfera geodésica *Spaceship Earth* Orlando (USA) e da cúpula do *Telus World Science* em Vancouver (CAN).

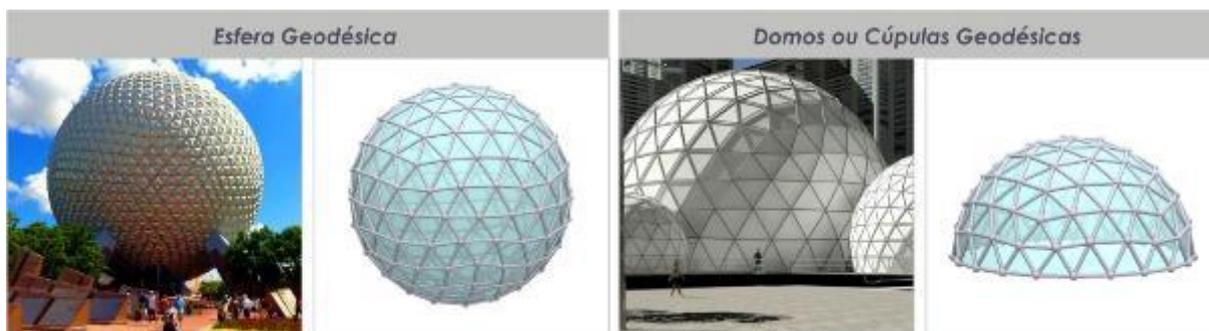


Fonte: Elaborado pela autora, do banco de imagens do Laboratório do BIODESIGN e <http://www.disneyparkhistory.com/spaceship-earth.html>. Acesso em 05 set 2016.

3.2 A Geometria das Cúpulas Geodésicas de Fuller

A geometria das geodésicas normalmente corresponde a um poliedro esférico de faces planas triangulares cujos vértices coincidem com a superfície de uma esfera imaginária que o circunscribe. Quando completa, é chamada de *esfera geodésica*, e *domo ou cúpula geodésica* quando incompleta, parecer apenas uma fração da esfera geodésica. (Figura 103)

Figura 103 – Exemplo de esfera e domo ou cúpula geodésica.

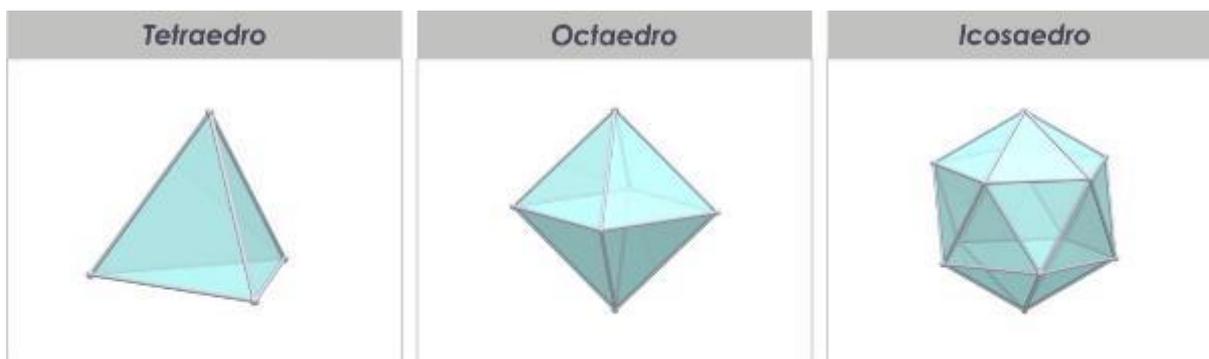


Fonte: Elaborado pela autora adaptado de

https://simplydifferently.org/Geodesic_Polyhedra?page=10#Geodesic_Icosahedron. Acesso em: 07 set 2016.

Na maioria das vezes, derivam da divisão das faces dos poliedros regulares platônicos de face **triangular**, ou seja, do **tetraedro**, do **octaedro** e do melhor e mais comum a ser utilizado, inclusive por Fuller, do **icosaedro** (20 triângulos regulares), por ser o mais arredondado dos 3. (Figura 104)

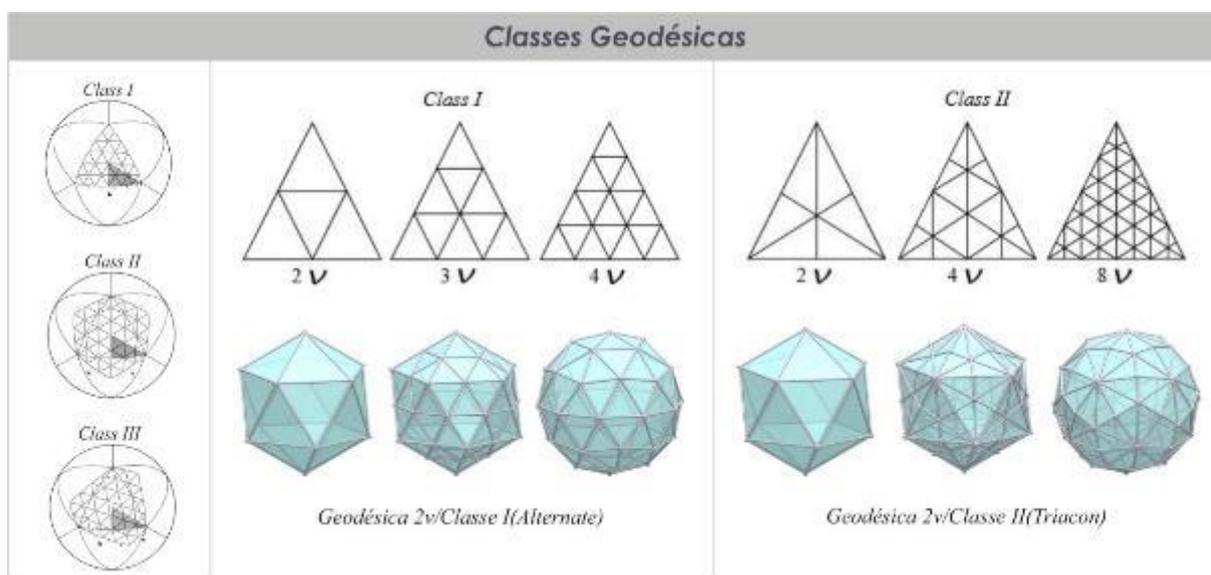
Figura 104 – Tetraedro, octaedro e icosaedro, chamados por Fuller de “os três sistemas estruturais primários no Universo”.



Fonte: Elaborado pela autora adaptado de https://simplydifferently.org/Geodesic_Polyhedra. Acesso em: 07 set 2017.

Esta divisão dos triângulos maiores em triângulos menores pode ocorrer de diversas formas, gerando diferentes desenhos para cúpulas geodésicas em potencial. A **Figura 105** corresponde às 3 classes Geodésicas derivadas do icosaedro (**Classes I, II e III**), com suas diferentes formas de divisão, porém, serão explicadas apenas as classes 1 e 2, pois não foram encontradas descrições, nem exemplos da *Classe III*. A mais usual e comum dentre elas é a **Classe I**, também chamada **Alternate**, em virtude de uma menor quantidade de triângulos gerados, e pela pequena diferença de tamanhos entre eles. Apresentam a divisão apenas em linhas paralelas a cada lado do triângulo, e é esta classe que Fuller mais representou e será esta que este trabalho abordará. A outra é a **Classe II**, também chamada **Triacon**, cuja divisão se dá por linhas ortogonais à cada lado do triângulo (possuem 90° com cada lado). Observa-se um maior número de triângulos gerados nesta que na *Classe I*.

Figura 105 – Exemplos de Classes de Geodésica, *Classe I* e *Classe II*.



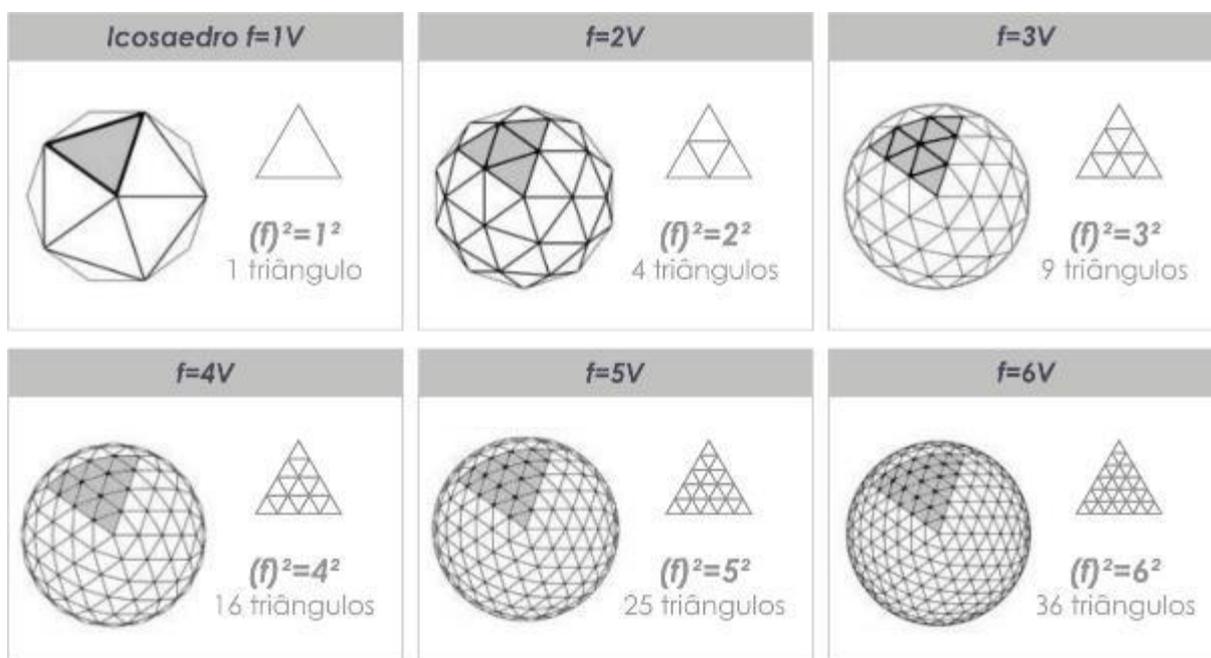
Fonte: Elaborado pela autora, adaptado de Kitrick, 2004 e

https://simplydifferently.org/Geodesic_Polyhedra?page=10 Acesso em: 07 set 2016.

Uma outra característica importante associada às cúpulas geodésicas trata da **freqüência**, representada pela letra grega (Nu) ν , que indica quantas vezes cada lado do triângulo principal é subdividido. Quanto maior o número da freqüência, maior o número de divisões e de triângulos, e portanto, maior a sua resistência, mais redonda é a sua aparência e também maior é a sua complexidade.

Para facilitar o entendimento, pode-se associá-la com a densidade de triângulos. Por exemplo, para gerar diferentes estruturas geodésicas com o mesmo diâmetro, basta aumentar o número da frequência. Os três sólidos platônicos, o tetraedro, o octaedro e o icosaedro, são consideradas esferas geodésicas de **frequência 1 (1v)**. Considerando-se uma esfera geodésica derivada do icosaedro da **Classe I**, para **f=2v**, divide-se com linhas paralelas a cada lado do triângulo por 2 cada lado da face triangular, gerando 4 triângulos menores, para **f=3v**, divide-se por 3 cada lado, gerando 9 triângulos menores, e assim por diante. O número de triângulos gerados por cada triângulo dividido é derivado da fórmula: frequência ao quadrado - $(f)^2$, ou seja, para **f=5v**, existirão $(5)^2$, ou seja, 25 triângulos. (**Figura 106**)

Figura 106 – Números de triângulos gerados da divisão do triângulo base do icosaedro de acordo com o número da frequência.

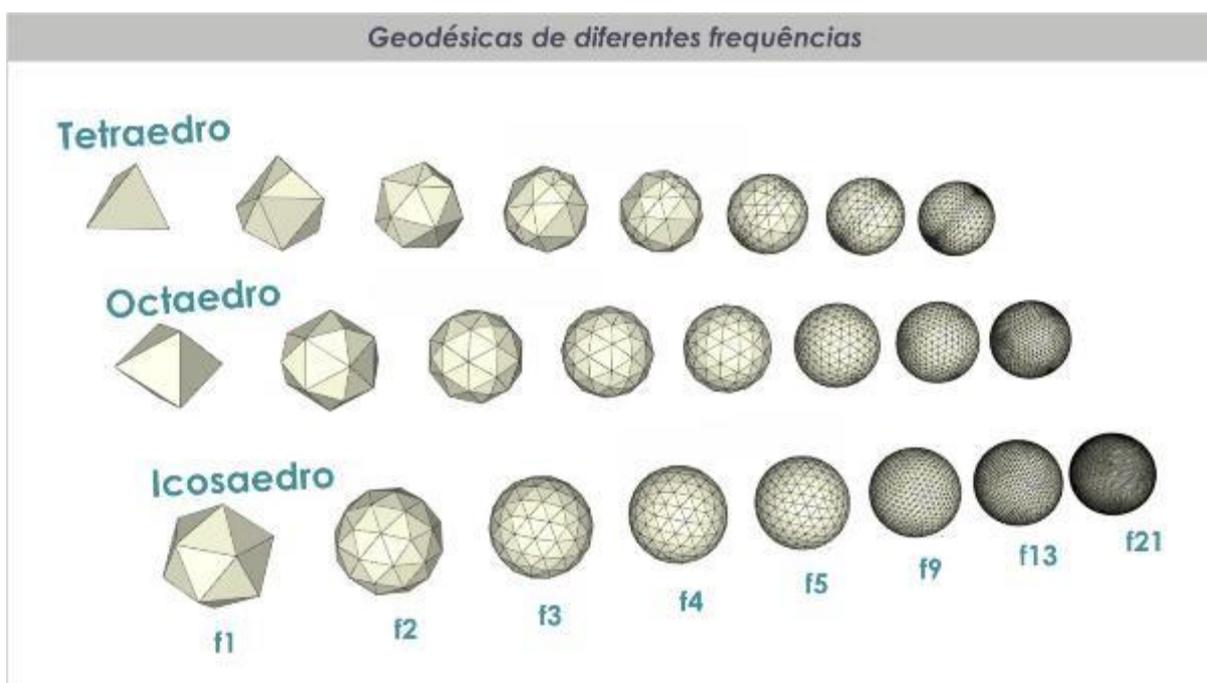


Fonte: Elaborado pela autora.

Dessa forma, para obter o número de triângulos total da geodésica derivada do icosaedro, basta multiplicar o valor encontrado do número de triângulos menores por 20, ou seja, para uma geodésica de frequência 2, se terá 80 triângulos ao todo, ou, 40 para o domo, **f=2** ($f^2=2^2=4 \times 20 = 80$ triângulos para a esfera, e 40 para o domo). Então, a esfera geodésica completa **3v** terá 180 triângulos, **4v** terá 320 triângulos, **5v** terá 500 triângulos, **6v** terá 720 triângulos, e assim por diante.

A **Figura 107** mostra diferentes frequências para gerar as esferas geodésicas derivadas dos 3 sólidos platônicos, observa-se bem as divisões mais regulares nas geodésicas derivadas do icosaedro, devido a isto, e por ser o sólido mais usado por Fuller, que experimentou as vantagens econômicas desta escolha, a partir de agora, quando se falar de esfera geodésica neste trabalho, será referente a *Classe I* derivada do icosaedro. Embora, deixa-se claro que existem outras cúpulas derivadas de sólidos diferentes e até mesmo de diferentes métodos.

Figura 107 – Geodésicas de diferentes frequências derivadas do tetraedro, octaedro e icosaedro



. Fonte: Elaborado pela autora adaptado de

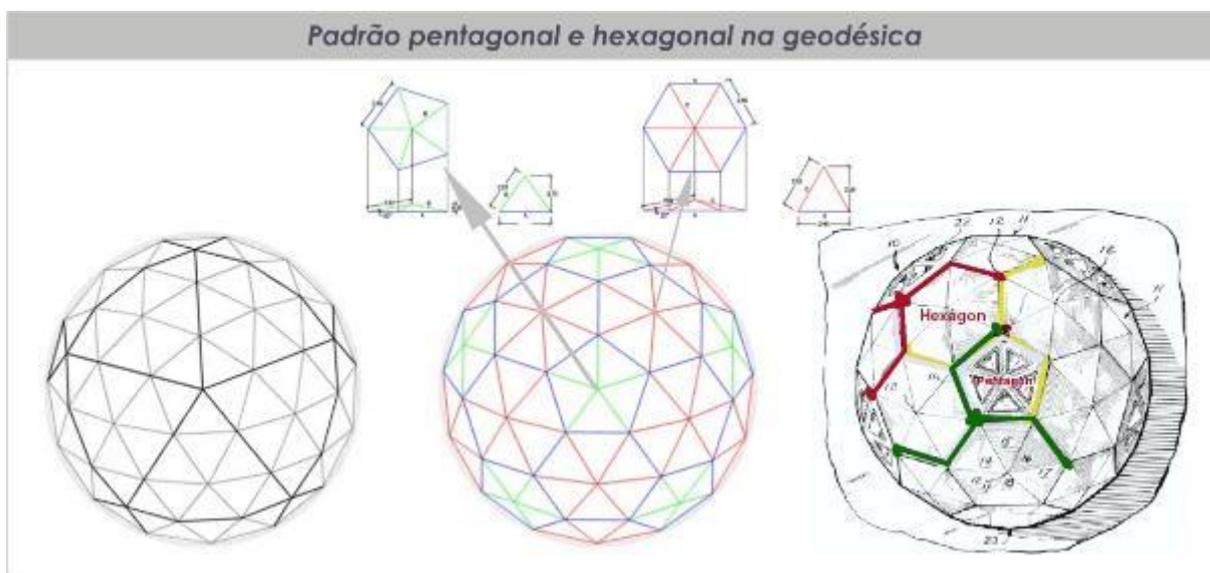
http://phrogz.net/CSS/Geodesics/VariousGeodesics_planar.png. Acesso em: 07 set 2016.

Percebe-se então, que o segredo que define a transformação do poliedro em uma geodésica acontece quando essa divisão em triângulos menores passa para o espaço 3D, com a alteração do comprimento das linhas internas desenhadas e geração de ângulos, dando ao sólido uma aparência mais esférica. Nesta projeção, o tamanho que era regular nas hastes do triângulo original do icosaedro, passa a sofrer variações, ou seja, tais triângulos deixam de ser equiláteros e começam a ter tamanhos de hastes diferentes. Observa-se que este também é o motivo pelo qual se prefere utilizar o icosaedro, pois apresenta mais regularidade e pouca diferença de tamanhos dos triângulos gerados do que o tetraedro e o octaedro, e isto facilita a fabricação. Numa geodésica **2v Classe I**, se terá 2 tamanhos de haste, numa **3v**, 3

tipos, numa **4v**, 6 tipos, etc., como se verá de forma mais detalhada adiante. (DAVIS, 2004)

Uma observação importante é que a geodésica resultante terá sempre seis triângulos em cada vértice, exceto aqueles localizados nos doze vértices do icosaedro original, que continuam a juntar cinco triângulos (**Figura 108**). O sistema pode ter indefinidamente muitos vértices com 6 triângulos (configuração hexagonal), mas a existência de exatamente 12 vértices com 5 triângulos (configuração pentagonal) é uma característica e pré-requisito para se obter geodésicas derivadas do icosaedro, ou seja, independente da frequência, se terá apenas 12 pentágonos (para uma geodésica inteira) e 6 pentágonos (para o domo hemisférico ou uma fração menor dele). (EDMONDSON, 2007)

Figura 108 – As geodésicas derivadas do icosaedro possuem organização dos triângulos em 12 pentágonos e hexágonos em números variáveis.

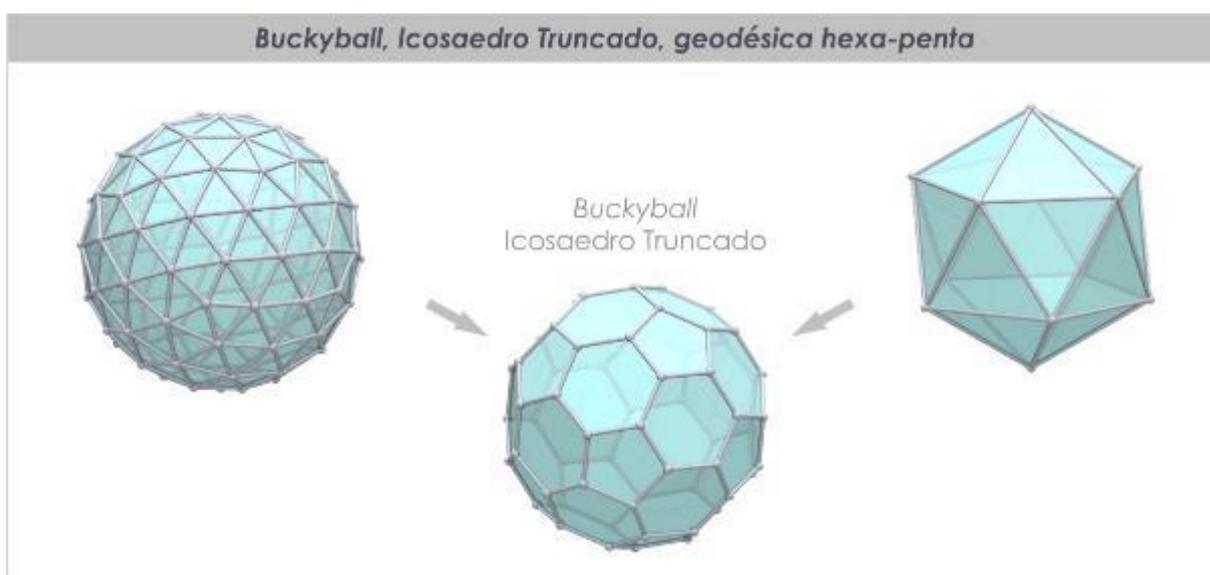


Fonte: Elaborado pela autora, adaptado de http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0717-69962013000200003&script=sci_arttext&tlng=en. Acesso em: 07 set 2016.

Em outras palavras, como seus triângulos são normalmente organizados em pentágonos e hexágonos, pode-se juntar os triângulos e formar geodésicas apenas com estes 12 pentágonos e hexágonos, configuração vista nas “buckyballs” (alotrópico do C_{60}), esta organização possui menor força estrutural e é menos estável que a situação triangulada, mas facilita a montagem de cúpulas enormes, pois diminui o número de componentes, e conseqüentemente, o número de conexões, conceito

usado no *Eden Project*, a maior estufa do mundo, que mais adiante será melhor analisada. Também pode-se obter esta configuração de geodésica hexa-penta através do *dual* de qualquer geodésica triangulada. Os poliedros duais são também chamados recíprocos, as faces do dual correspondem aos vértices do original, assim como seus vértices correspondem às faces do original. A *buckyball* derivada do dual de uma geodésica de frequência 3 é também um sólido de arquimedes chamado de *Icosaedro truncado*. (**Figura 109**)

Figura 109 – Buckyball, configurações hexa-penta nas geodésicas, sólido pode ser derivado do dual da geodésica icosaédrica ou do truncamento do icosaedro.



Fonte: Elaborado pela autora, adaptado de

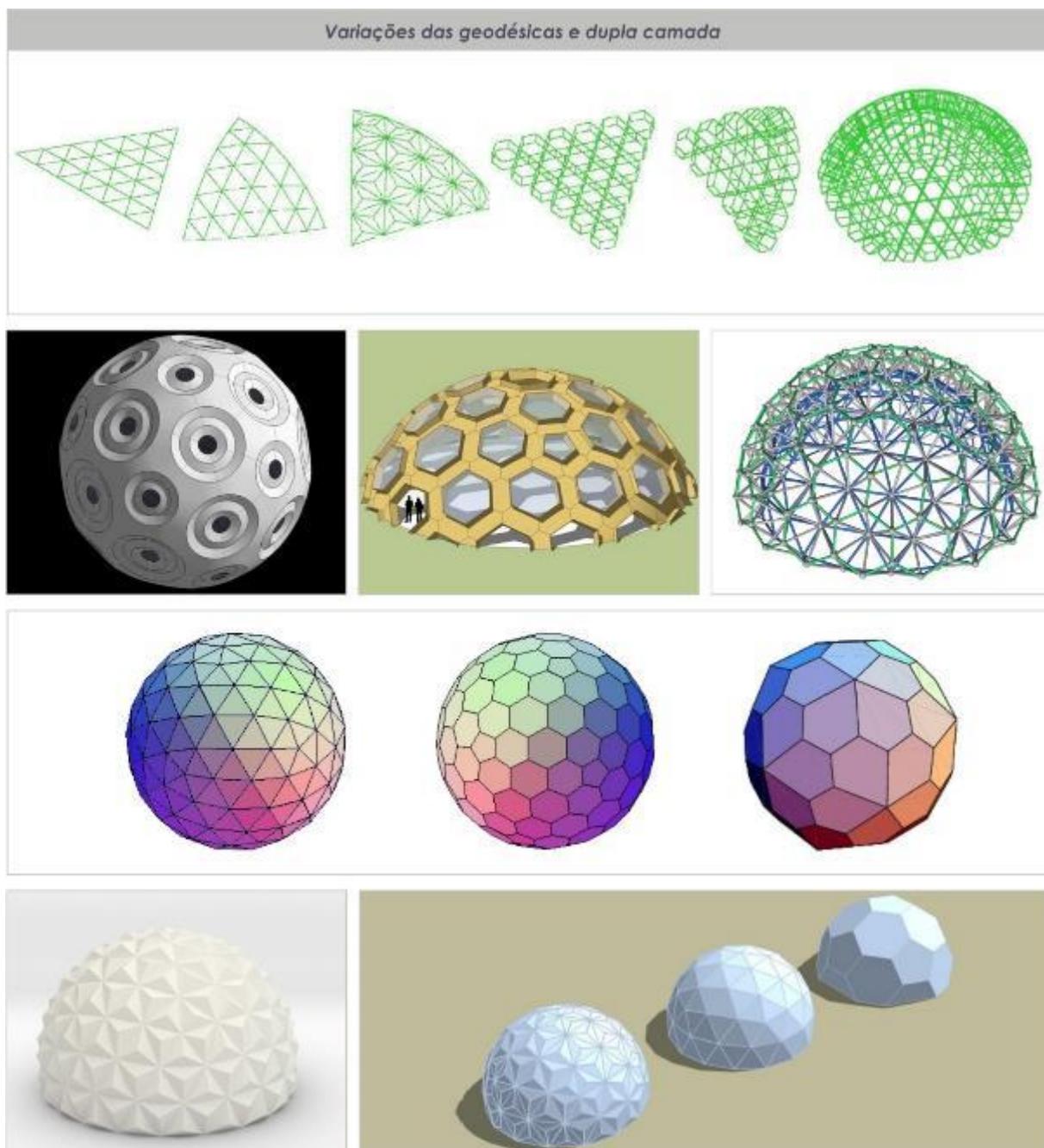
[https://simplydifferently.org/Geodesic_Polyhedra?page=13#Geodesic Truncated Icosahedron](https://simplydifferently.org/Geodesic_Polyhedra?page=13#Geodesic%20Truncated%20Icosahedron).

Acesso em 07 set 2016.

Outros padrões de divisões mais complexos também podem ainda ser adotados, com variações no tamanho dos triângulo base do icosaedro, divisão em forma de estrela, adição ou remoção de partes de seus variantes pentágono/hexágono, ou seja, se pode formar novos módulos baseados na mesma geometria triangular, mas formando novos rearranjos; ou ainda, um padrão ainda mais complexo onde o domo resultante se apresenta ondulado ou curvo. Enfim, são muitas as possibilidades. A superfície da esfera também pode ser dividida e posteriormente estruturada em faces de camadas duplas (***double layer faces***), que reforçam a força estrutural de cúpulas de grandes dimensões. Na **Figura 110** são

mostrados alguns exemplos dessas variações e de camadas dupla a partir de uma divisão triangulada. (DINIZ, 2006)

Figura 110 – Diferentes padrões de geodésicas por modificação ou rearranjo do triângulo principal e exemplo de camada dupla.



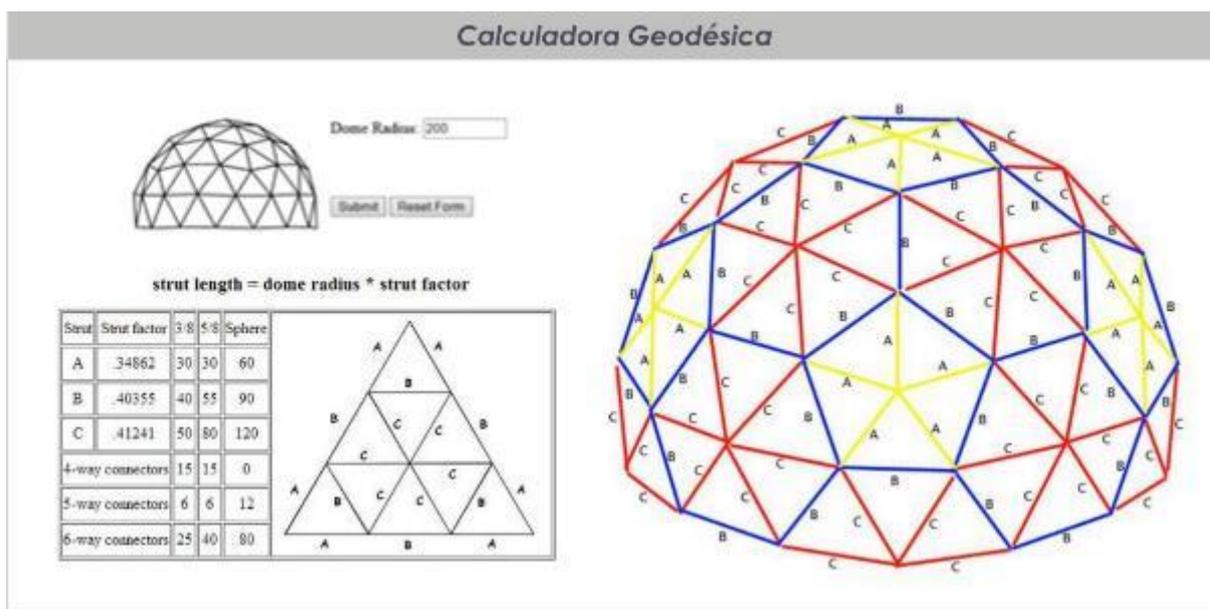
Fonte: Elaborado pela autora, do banco de imagens do Laboratório do Biodesign.

Sabendo-se o raio da cúpula que se pretende construir e definindo a frequência que se deseja, há a possibilidade de calcular as dimensões, quantidade das barras e nós que são necessários. Para facilitar estes cálculos, normalmente usa-se uma

calculadora geodésica, disponível em diversos websites na internet, tais como o <http://www.desertdomes.com> ou o <http://www.domerama.com/calculators/>. Eles fornecem de maneira mais rápida e prática, o número de arestas, vértices, faces, ângulos e dimensões das barras necessárias, além de gerar um prático modelo virtual tridimensional, organizando os tamanhos das diferentes barras por cores distintas, o que ajuda na construção prévia de uma maquete para facilitar a montagem.

Como pode ser visto no exemplo do *desertdome* na **Figura 111**, o diagrama mostra 3 cores diferentes, para os 3 tamanhos de arestas/barras diferentes, o tamanho A (amarelo) para as barras internas dos pentágonos, o tamanho C (vermelho) para as barras internas do hexágono e o tamanho B (azul), para as barras do contorno externo dos pentágonos e hexágonos. Uma dica para identificar a frequência do triângulo base/principal apenas olhando um diagrama é sempre ligar os pontos do centro de 3 pentágonos numa formação triangular, e contar o número de triângulos menores inscritos em um dos lados, no caso desse exemplo, são 3, então a frequência é **3v**.

Figura 111 – Exemplo de calculadora Geodésica com diagrama de montagem.



Fonte: www.desertdomes.com/dome3calc.html. Acesso em: 3 fev 2016.

Esta ferramenta tem ajudado muitas pessoas a conseguirem construir suas próprias cúpulas, isto é possível porque alguns dados importantes para estes cálculos, como o **Strut fator** (*fator de suporte*) e o **ângulo** que se necessita para cada

haste, possuem uma tabela de valores fixos para cada frequência. O *Strut fator* é ligado ao tamanho das barras, sendo diretamente proporcional ao raio, então, a fórmula para o comprimento de $C_{(A)} = \text{Strut fator}_{(A)} \times \text{raio do domo}$. No exemplo acima, o *Strut fator* para A na frequência **3v** é de 0.34862, se o raio for 2m, então o seu comprimento deve ser 0.697m ou 69,7cm. Nas **Figuras 112 e 113** mostram tabelas com estes valores fixos do **Strut fator** e dos **ângulos** de todas as barras para as frequências **1v, 2v, 3v, 4v, 5v e 6v** e também os diagramas com os triângulos base para ajudar a identificar os diferentes comprimentos de barras, nestas figuras também fica mais clara a identificação desse triângulo principal derivado do icosaedro. Observa-se ainda que quanto maior a frequência, maior a quantidade de barras diferentes.

Fórmulas para geodésicas derivadas do icosaedro, *Class I*, onde:

(nu) **v** = frequência, **V** é a quantidade de vértices (nós) necessários, **F** é a quantidade de faces ou triângulos gerados, **E** é a quantidade de arestas ou barras, **C** é o comprimento da aresta ou barra e **r** é o raio do domo.

$$1) V = 10v^2 + 2$$

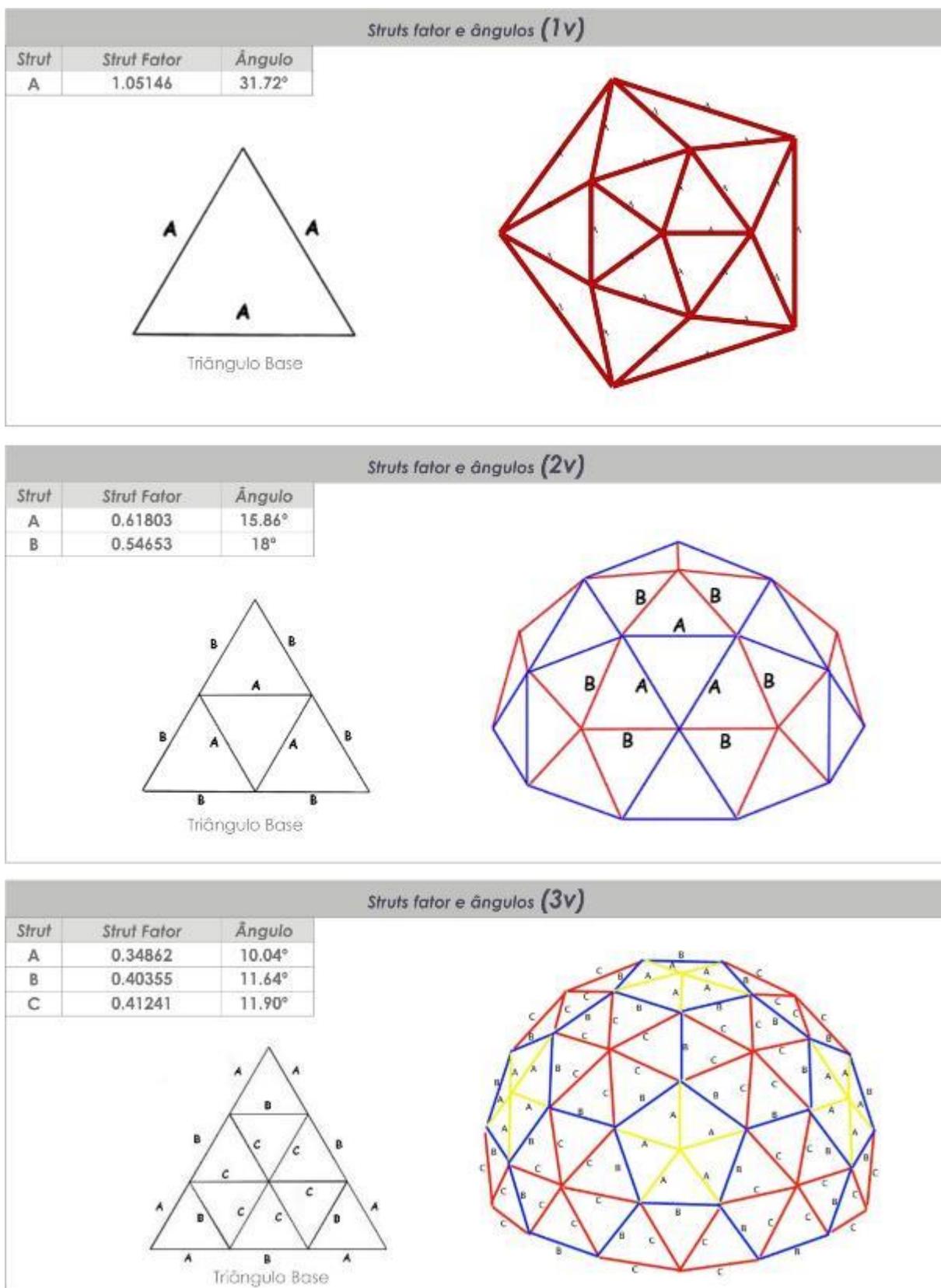
$$2) F = 20v^2$$

$$3) E = 30v^2$$

$$4) C = \text{Strut fator} \times r$$

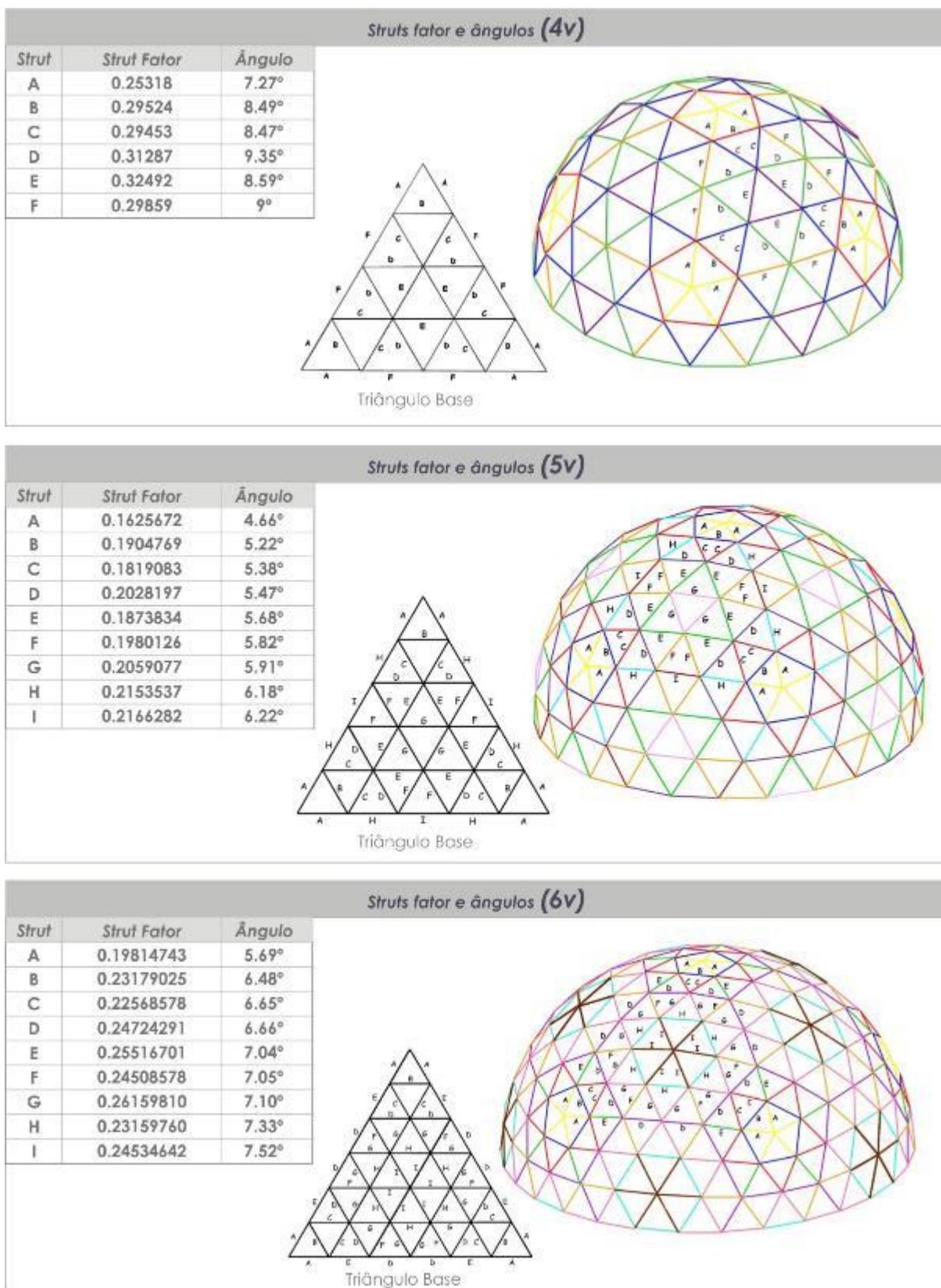
Com estas fórmulas, as tabelas com os *struts fator* e os ângulos, fica mais fácil conseguir desenvolver geodésicas de frequência **1v** até **6v**. Para frequências maiores será necessário calcular o *strut fator* e os ângulos para a nova frequência ou ter acesso a estes dados através de alguma empresa especializada em fabricação personalizada de domos geodésicos.

Figura 112 – Tabelas com os *Strut Fator* e os ângulos e diagramas para as frequências 1v, 2v e 3v.



(Fonte: <http://www.desertdomes.com/formula.html>; <http://www.domerama.com/calculators/>. Acesso em: 3 fev 2016.

Figura 113 – Tabelas com os *Strut Fator* e os ângulos e diagramas para as frequências 4v, 5v e 6v.



Fonte: <http://www.desertdomes.com/formula.html>; <http://www.domerama.com/calculators/>. Acesso em: 3 fev 2016.

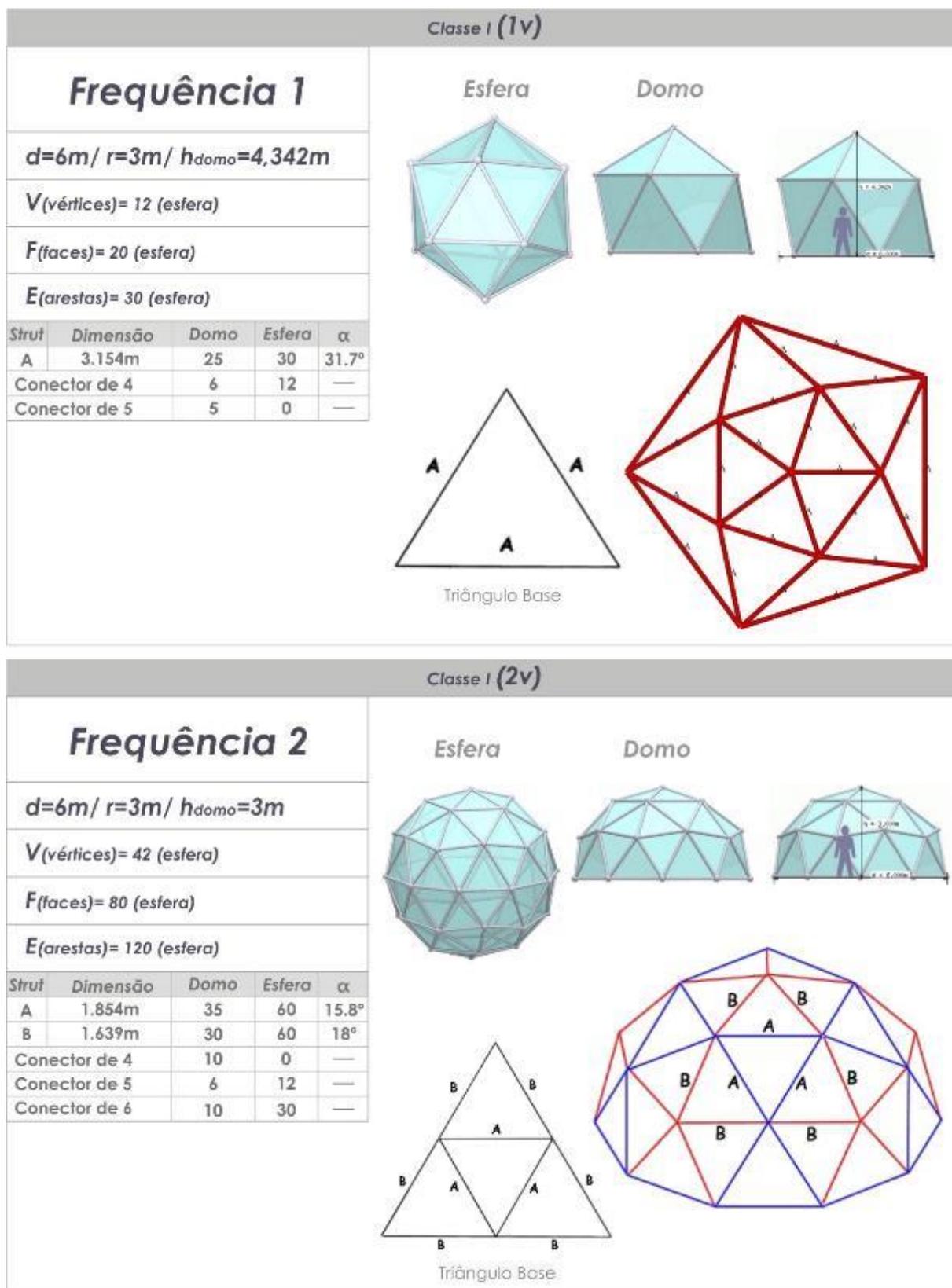
Ainda sobre estes ângulos, é possível observar que para uma montagem com barras, estas não são curvas, permanecem retas, havendo a necessidade apenas de que suas extremidades sejam curvadas de acordo com os ângulos da tabela, se pode fazer isto apertando a extremidade em um torno e dobrando o tubo até um gabarito com o ângulo desejado. A precisão da curva não é tão importante, pois na montagem os ângulos se ajustam e os suportes vão dobrar para os ângulos exatos por conta própria. Dessa forma, para facilitar o trabalho e a execução de gabaritos numa montagem, pode-se arredondar estes ângulos de flexão da seguinte maneira:

- 1) Cúpula **1v**: Todas com 32° em cada extremidade.
- 2) Cúpula **2v**: Barra **A** com 18° , e **B** com 16° em cada extremidade.
- 3) Cúpula **3v**: Barra **A** com 10° , **B** e **C** com 12° em cada extremidade.
- 4) Cúpula **4v**: Todas as barras com 7° - 9° em cada extremidade.
- 5) Cúpula **5v**: Todas as barras com 6° - 7° em cada extremidade.
- 6) Cúpula **6v**: Todas as barras com 5° - 6° em cada extremidade.

As seguintes **Figuras 114, 115 e 116** apresentam os valores e informações necessárias sobre cúpulas geodésicas de frequências **1v, 2v, 3v, 4v, 5v e 6v**, numa simulação de ambas com o mesmo diâmetro (**6m**), para se verificar as diferenças de valores, configuração, ângulos, quantidade e comprimentos das hastes, quantidade e tipos de **connectors** (nós), que podem variar para **4, 5 ou 6** conexões na situação de domo e apenas **5 e 6** nas esferas geodésicas.

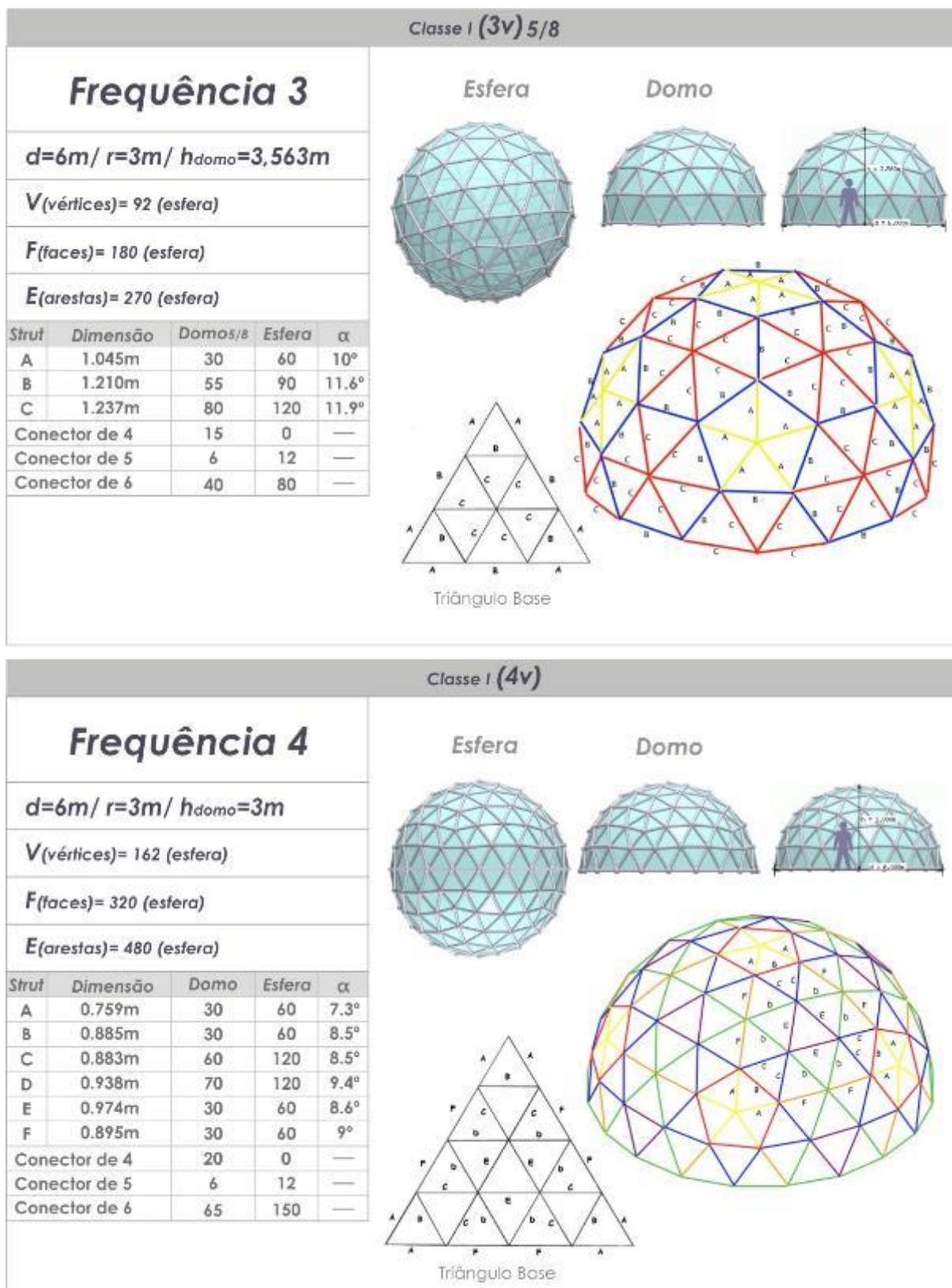
Outro detalhe que se deve atentar é que as frequências geodésicas de número **ímpar** normalmente não vão gerar domos ou hemisférios perfeitos ($1/2$ da esfera geodésica), mas frações da mesma. A **1v** corresponde a $2/3$ da esfera geodésica; a **3v** e a **5v** geram 2 tamanhos, $3/8$ e $5/8$ da esfera geodésica, e assim por diante (**Figura 117**). Por conta disso, possuem uma base irregular (borda em zigue-zague), ou seja, não tem uma base plana, porém, existem versões chamadas **Kruschke method**, que modificam os tamanhos e ângulos das barras para forçar esse apoio plano na base, além disso, não apenas estas, mas qualquer esfera geodésica pode ser dividida em diferentes frações.

Figura 114 – Tabela de dados e representações das geodésicas 1v e 2v com 6m de diâmetro.



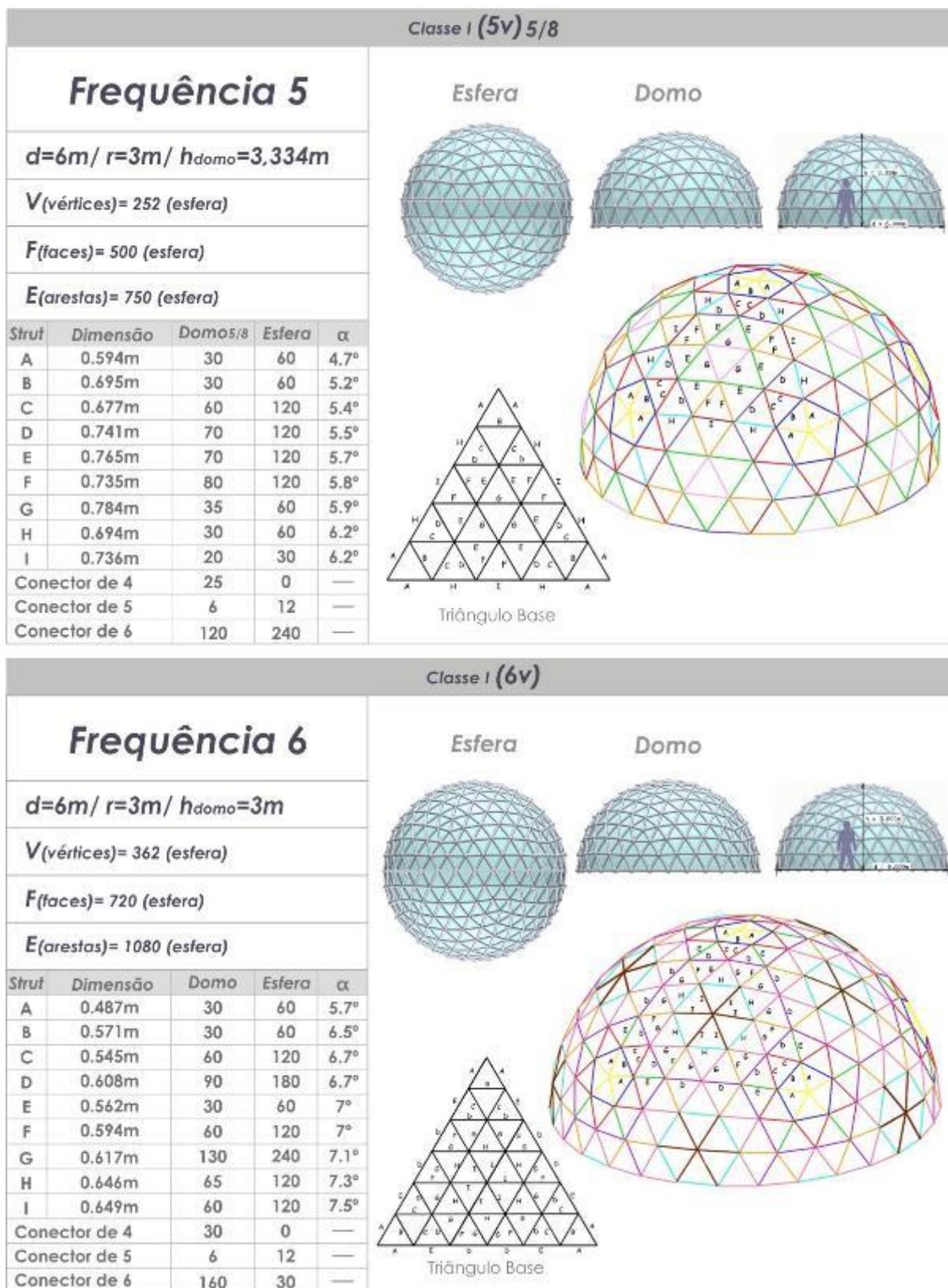
Fonte: <http://www.desertdomes.com/formula.html>; <http://www.domerama.com/calculators/>; https://simplydifferently.org/Geodesic_Dome_Notes?page=3#The_Icosahedron. Acesso em: 3 fev

Figura 115 – Tabela de dados e representações das geodésicas 3v e 4v com 6m de diâmetro.



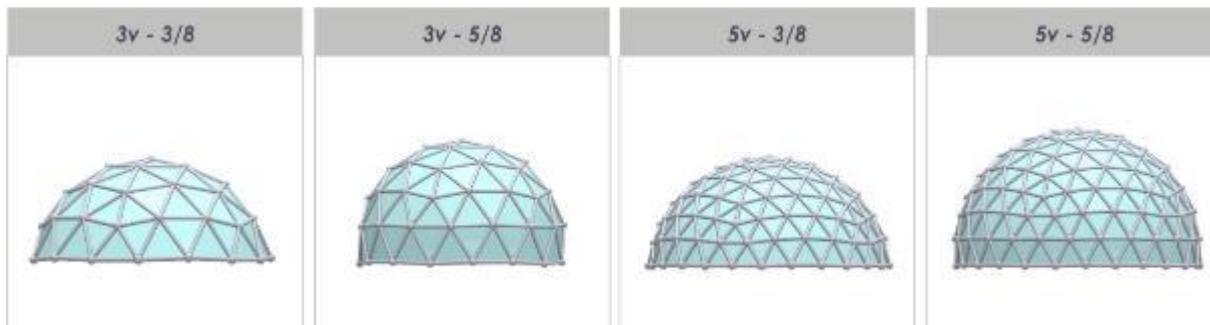
Fonte: <http://www.desertdomes.com/formula.html>; <http://www.domerama.com/calculators/>;
https://simplydifferently.org/Geodesic_Dome_Notes?page=3#The_Icosahedron. Acesso em: 3 fev

Figura 116 – Tabela de dados e representações das geodésicas 5v e 6v com 6m de diâmetro.



Fonte: <http://www.desertdomes.com/formula.html>; <http://www.domerama.com/calculators/>; https://simplydifferently.org/Geodesic_Dome_Notes?page=3#The_Icosahedron. Acesso em: 3 fev

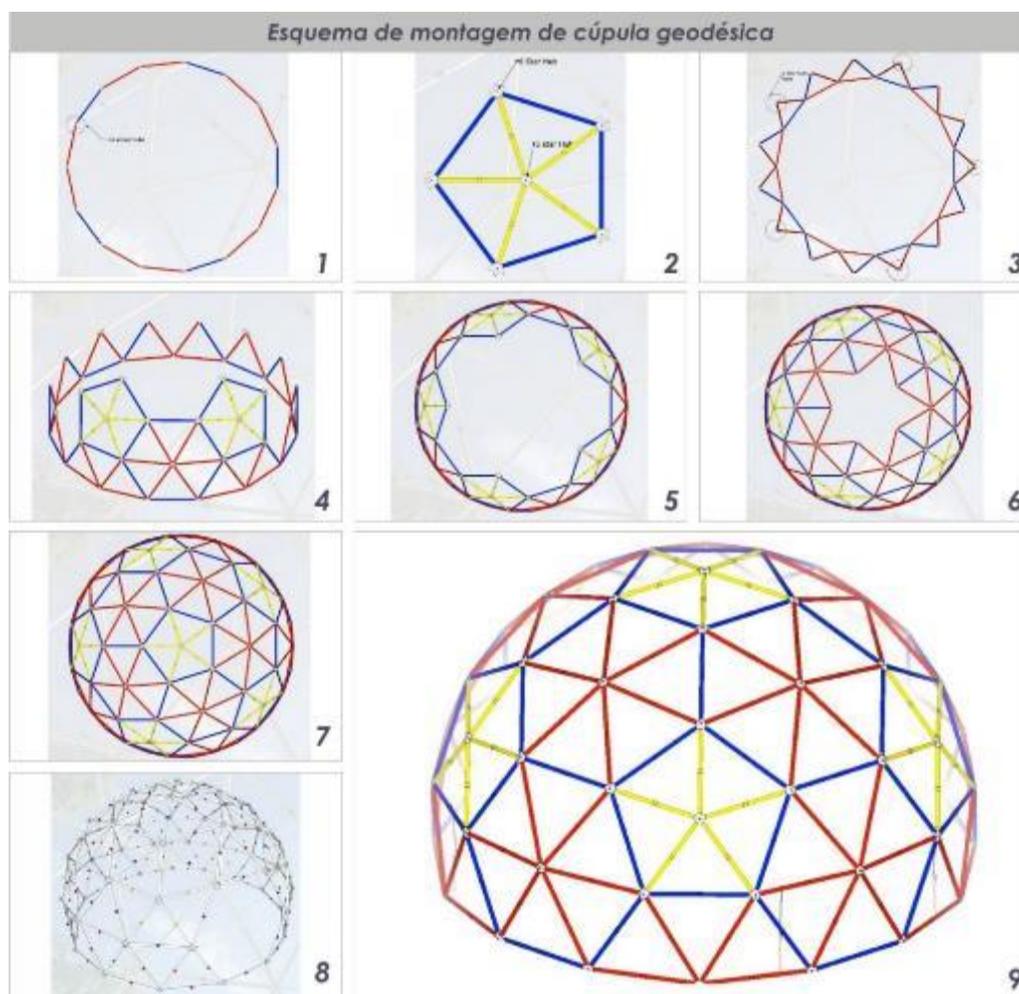
Figura 117 – Geodésicas de frequência ímpar não geram hemisférios geodésicos, como o exemplo da 3v e a 5v que geram frações as frações 3/8 e 5/8.



Fonte: https://simplydifferently.org/Geodesic_Dome_Notes?page=3#The_Icosahedron. Acesso em: 3 fev 2016.

Para exemplificar, a **Figura 118** apresenta um esquema ilustrado de uma sequência com a ordem de montagem para uma cúpula geodésica **3v** Classe I.

Figura 118 – Tabelas com os *Strut Fator* e os ângulos e diagramas para as frequências 4v, 5v e 6v.



Fonte: <http://sketchup.dozuki.com/Guide/On+site+assembly/28>. Acesso em: 3 fev 2016.

O site da empresa *domosgeodesicos.es* fornece indicação sobre a escolha das frequências, revelando que para uma estufa média, por exemplo, a mais indicada é a **3v**, em casos de domos para residência ou outras aplicações a **4v** é ideal para gerar um hemisfério perfeito, mas se o objetivo for domos ainda maiores ou para lugares que sofram com intempéries naturais, indica as **5v** ou **6v** por sua resistência à neve e grandes cargas de ventos. Portanto, para a escolha da frequência, se deve levar em consideração alguns aspectos, como o tamanho, necessidade de força e a finalidade de uso.

Edmondson (2007) revela que mesmo não havendo um limite superior inerente, recomenda que a cúpula não ultrapasse a frequência **32v**, dependendo do diâmetro e material, pois em frequências muito altas, esse valor exponencial de um número crescente de diferentes tipos de hastes se tornam difíceis e complicados para fabricação, dependendo da tecnologia que se utilize.

O padrão geodésico é também uma variável. Além deste método que foi mais detalhado, Fuller também desenvolveu outros formatos, como o *Fly's Eye Dome*, em que a configuração do padrão triangular apresenta um desenho diferente, mas com os mesmos princípios geométricos que são explorados para obter uma eficiência estrutural, assim como faz a natureza, na interação das forças físicas para produzir padrões geodésicos icosaédricos em muitas situações. E por isto, entender e tornar conhecida esta geometria básica é tão necessária, porque muitas outras configurações ainda podem ser criadas a partir dela. (EDMONDSON, 2007)

A matemática por trás das geodésicas é complicada, mas não conceitualmente difícil. Os cálculos são simplificados (ou pelo menos mantidos sob controle) por meio de uma simetria: a informação completa para uma cúpula inteira de qualquer frequência está contida dentro de seu triângulo principal. Usando as fórmulas de trigonometria, pode-se manipular os ângulos centrais e superficiais dos triângulos esféricos para derivar valores com os quais se obtém os comprimentos das hastes que são cordas do grande círculo, e cada uma é submetida a um ângulo central específico. Dependendo dos métodos e materiais de construção, deve-se buscar manter as barras o mais perto possível do mesmo comprimento ou tentar desenvolver

triângulos com formas maximamente semelhantes, onde reside o segredo da eficiência.

A frequência é ela própria uma variável importante, maiores números de barras menores são mais eficientes em termos de suporte de cargas, porém, mais difícil de executar e isto deve ser avaliado. Felizmente, a trigonometria permite uma enorme flexibilidade em termos de soluções potenciais. As cúpulas geodésicas podem ser alongadas, geminadas, em forma de pêra, ou mesmo em forma de elefantes (teoricamente). Sobre estas modificações para alterar de maneira mais radical a configuração, é bom lembrar que certamente o formato original esférico da geodésica é o que produz a maior força, embora isto não exclui que se possa testar, desenvolver e experimentar outras opções. (EDMONDSON, 2007)

Há muita facilidade para modelagem das geodésicas em softwares específicos para esta finalidade, como o *Antiprism*, *Geodome*, *Cadre Geo*, etc., mas também existem plugins dentro dos softwares voltados para o design, como o *Grashopper* já mencionado, que dentro do Rhinoceros, oferece grandes facilidades para construção e modificação destas estruturas.

Por fim, é importante perceber que, enquanto a teoria por trás das geodésicas parece ser surpreendentemente simples, e por outros antes de Fuller até terem sido construídas, a sua patente em 1954 é um mérito por ter se dedicado a estudar para traduzir a real teoria destas estruturas de maneira prática, o que envolveu um desenvolvimento matemático incrivelmente complicado com os recursos vigentes da época, para evitar erros de cálculos ele teve que desenvolver um sistema complexo de dados trigonométricos para permitir a construção das suas enormes cúpulas exemplificadas no início deste capítulo.

3.3 Vantagens da Geometria das Geodésicas

O *American Institute of Architects* (Instituto Americano de Arquitetos/AIA) designou a cúpula geodésica, como: "o meio mais forte, mais leve e mais eficiente de incluir espaço conhecido pelo homem".

Verschleisser (2008) revela que as cúpulas geodésicas possuem auto sustentação com extraordinária resistência e leveza devido à sua forma esférica e às formas geométricas que as constituem, elas se comunicam e se apoiam umas nas outras criando um sistema chamado por Fuller de *tensegrity* (tensão integral), em que qualquer força aplicada em uma delas retransmite a tensão e a distribui igualmente entre as demais até a sua base, assim como os arcos na engenharia.

Além disso, grande parte dessa vantagem estrutural vem da enorme estabilidade proporcionada por sua malha triangular. Um triângulo é um elemento estável independente do seu tamanho, são as únicas formas que permanecem rígidas, mesmo quando construídas com conexões flexíveis, tendo cada vértice estabilizado pelo lado oposto. Quando forças geram uma forma estabilizada, isto é, capaz de se auto sustentar, criam uma *Estrutura*. Em seu livro *Synergetics*, Fuller (1979) afirma que o triângulo é o único polígono auto estabilizado e que tudo que é reconhecível no Universo como um Padrão é identificável como anteriormente já visto, e o triângulo persiste como um padrão constante. Quaisquer outros padrões conhecidos são inerentemente reconhecíveis apenas pela virtude de sua integridade estrutural triangular, onde estrutura significa uma *omnitriangulação*. Apenas padrões estruturados triangularmente são padrões regenerativos e a estruturação triangular é um padrão de integridade em si.

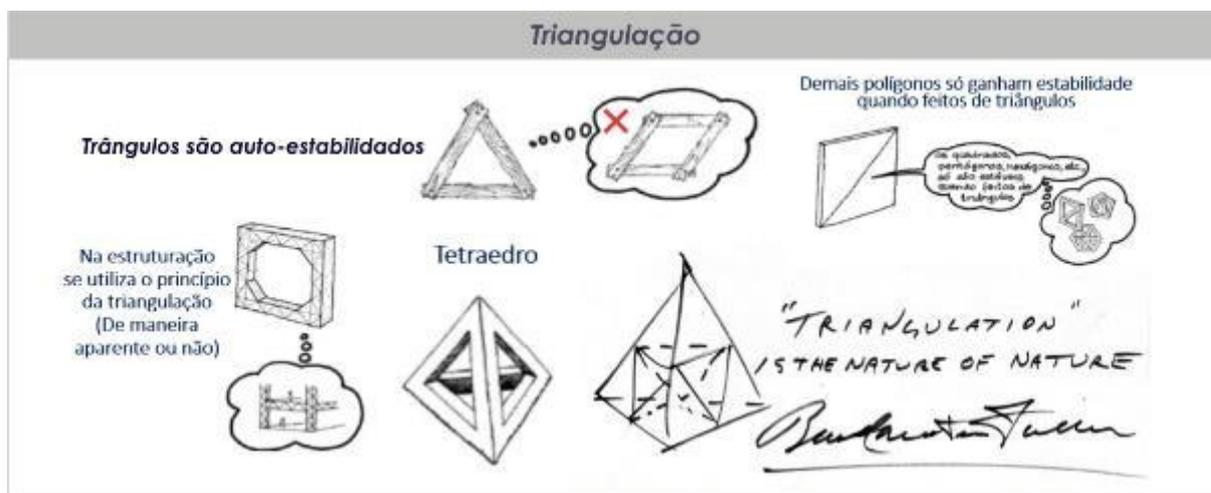
Uma das maneiras que Fuller (1979) descreve sobre a resistência de força entre um retângulo e um triângulo seria aplicar pressão a ambas as estruturas. O retângulo dobra sobre seus vértices e seria instável, mas o triângulo resiste a pressão e é cerca de duas vezes mais forte e mais rígido. Este princípio orientou seus estudos para a criação da cúpula geodésica, em que descobriu que se uma estrutura esférica fosse criada a partir de triângulos, teria uma força inigualável.

Desta forma, os poliedros formados totalmente por faces triangulares regulares correspondem as estruturas mais auto-estabilizadas, e, por conseguinte, são os mais

indicados e utilizados por Fuller nas configurações de geodésicas, pois outras geometrias como quadrados, pentágonos, hexágonos, pela tendência inerente a deformação em seus vértices, são mais instáveis, então, os sólidos esféricos derivados de malhas diferentes da triangular, precisam ser rearranjados dentro de uma lógica triangular ou distribuídas em conjunto com ela, para obterem mais resistência. (PEARCE,1980)

O triângulo é uma figura matemática natural que, em combinação com outros triângulos, fornece máxima eficiência com mínimo esforço estrutural. Ao reunir uma série de unidades geométricas idênticas que são auto-sustentáveis e leves, Fuller obteve uma construção dinâmica na qual os componentes individuais contribuem para a estrutura geral, e não é à toa que tal sistema é tão usado pela engenharia, de maneira aparente, em aplicações tetraédricas, como por exemplo nas coberturas de amplos galpões; ou em aplicações não aparentes, como nas vigas. (**Figura 119**)

Figura 119 – Ilustrações sobre a estabilidade e força da triangulação.



Fonte: Elaborado pela autora com ilustrações de (LOTUFO&LOPES, 1981).

Outra vantagem geométrica destas estruturas se refere a configuração esférica. Fuller (1979) enfatiza a idéia de que quando o diâmetro da esfera é dobrado, a sua área quadruplicará e ampliará em oito vezes o volume. Naturalmente as esferas casam perfeitamente com o princípio de "fazer mais com menos" porque incluem o maior volume com a menor quantidade de área superficial, nas cúpulas, isto reflete de imediato numa garantia de economia de materias. Além disso, a estrutura esférica de uma cúpula é uma das atmosferas interiores mais eficientes para habitações

humanas, porque ar e energia podem circular sem obstrução, permitindo que tanto o aquecimento quanto o resfriamento ocorram de maneira natural.

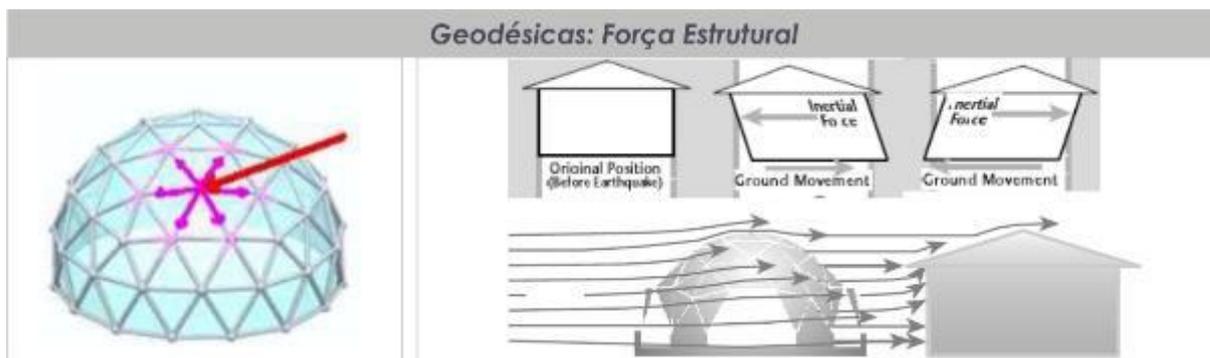
Ainda em relação a configuração específica das geodésicas, há também uma considerável vantagem nas cinco ou seis barras que saem de cada vértice: forças são instantaneamente distribuídas em muitas direções *omniradialmente*, motivo pelo qual, produzem uma força sem precedentes em relação ao seu peso. (EDMONDSON, 2007)

A arquitetura para Fuller tinha como objetivo criar abrigos versáteis, baratos, eficientes energeticamente, leves e flexíveis: máquinas de morar, capazes de se modificar conforme as necessidades de quem as habitasse. E em mais de 50 anos de existência das cúpulas geodésicas, novos usos têm sido acrescentados a lista sobre mais características vantajosas desse sucesso inventivo. No site do *Buckminster Fuller Institute*, órgão disseminador das ideias de Fuller, são disponibilizadas informações sobre essas vantagens das geodésicas, assim como muitas empresas especializadas em construções das cúpulas, também foram identificando e contabilizando vantagens ao longo do tempo e divulgam tais informações em seus sites e redes sociais. A seguir, serão resumidas de forma explicativa algumas delas:

a) Força estrutural

Devido a sua malha triangular esférica, a forma geodésica otimiza cargas, propriedade da *tensão integral*, deslocando as forças em toda sua estrutura, uma vantagem à frente das estruturas retangulares dos edifícios tradicionais. Foram projetadas para suportar ventos fortes e temperaturas extremas, como visto nas cúpulas das regiões polares, e ainda, suportam muitas vezes o próprio peso, sendo ideais para locais de fortes intempéries como tempestades, furacões, terremotos, tsunamis, e outros abalos. Não há limite estabelecido para o seu tamanho, quem limita é a tecnologia disponível para a construção, mas é sabido que quanto maior, mais triângulos, e quanto mais triângulos, mais forte. (**Figura 120**)

Figura 120 – Ilustração da distribuição da força e da resistência da cúpula em relação ao design ortogonal.



Fonte: <http://domes.com/>. Acesso em: 3 fev 2016.

b) Economia de materiais

A esfera tem 25% menos área de superfície por volume fechado do que qualquer outra forma, por isto, construções esféricas ou derivadas da esfera, como as cúpulas geodésicas, são vantajosas quando o objetivo é obter grande volume interno conjugado com uma superfície externa mínima, proporcionando uma economia de materiais construtivos. Estratégia similar existe nos microrganismos da radiolaria que vivem no fundo do mar, onde a pressão é constante. Para armazenar materiais sob pressão, os recipientes esféricos são os mais indicados, por terem uma distribuição dos esforços mais homogênea, e em consequência disto, necessitarem de menos material construtivo do que, por exemplo, os recipientes cilíndricos para reterem um mesmo volume de líquidos ou gases. (RAMOS, 1993)

A empresa *Pacific Dome*, ratifica que com essa relação volume-superfície-área alta, exige menos materiais para armazenar mais espaço e quanto menor a proporção do perímetro exterior de um edifício de área fechada, menos energia é necessária para sua construção, aquecimento e resfriamento. Ainda, quanto maior a cúpula, mais eficiente em termos de espaço ela se torna, isto demonstra-se duplicando o diâmetro da esfera, onde resulta num aumento de 8 vezes em seu volume. Há estimativa de redução é de cerca de 30% de materiais, segundo a empresa americana *Omega Dome*, que prevê redução também de custos com a mão de obra, pois a montagem é mais fácil, mais simples e mais rápida.

c) Economia de energia

Segundo Fuller (1979) há duas razões para que os domos sejam eficientes em termos energéticos, primeiro por ter uma menor área superficial por unidade de volume garantida pela geometria esférica, o que se traduz em uma menor área para exposição ao frio no inverno e ao calor no verão em comparação a outras arquiteturas de mesmo espaço. Segundo, porque o fluxo de ar dentro da cúpula é contínuo, sem cantos estagnados, exigindo menos energia para circular o ar e manter temperaturas uniformes. De acordo com o site das empresas *Pacif Dome* e *Omega Dome*, a energia necessária para aquecer ou arrefecer uma cúpula é aproximadamente 30% a menos do que um edifício convencional, o que reflete numa economia de 30% com gastos de energia elétrica anual líquida para um proprietário de cúpula, o que é bastante significativo. (DINIZ, 2006)

d) Leveza

Tendo menos material, menos área de superfície (em certos casos, até ausência de paredes internas) e composto de materiais mais leves que a alvenaria, alguns exemplares de Fuller já montados, conseguiam até ser carregados e transportados inteiros por aeronaves, utopicamente ele previa isto para que quando se precisasse morar ou passar um tempo em outro lugar, a casa pudesse acompanhar as pessoas para onde quisessem ir. Independente do quão distante se está desta ideia, a leveza é de fato uma das características mais importantes das cúpulas, tanto que devem sempre ser bem parafusadas no chão para evitar que sejam carregadas pelo vento. Apesar de extremamentes fortes, as maiores cúpulas visualmente transmitem proporcionalmente a sensação da leveza de uma bolha de sabão prestes a desaparecer, é o que pode ser observado na imagem da cúpula de Montreal da **Figura 121**.

Figura 121 – Uma característica inerente das geodésicas, leveza.



Fonte: Elaborado pela autora, do banco de imagens do laboratório do BIODESIGN.

e) Segurança

O design da cúpula geodésica é ergonômico, aerodinâmico e por ser tão forte é ideal para resistir a situações extremas como: ventos fortes, tempestades, terremotos e acumulação de neve, Fuller projetou vários exemplares para observatórios e laboratórios na Antártica. Quanto mais forte o vento, não tendo superfícies de sucção, ele o rodeia e o firma ainda mais no terreno. (**Figura 122**)

Figura 122 – Pela força da sua estrutura, se traduzem em abrigos seguros.



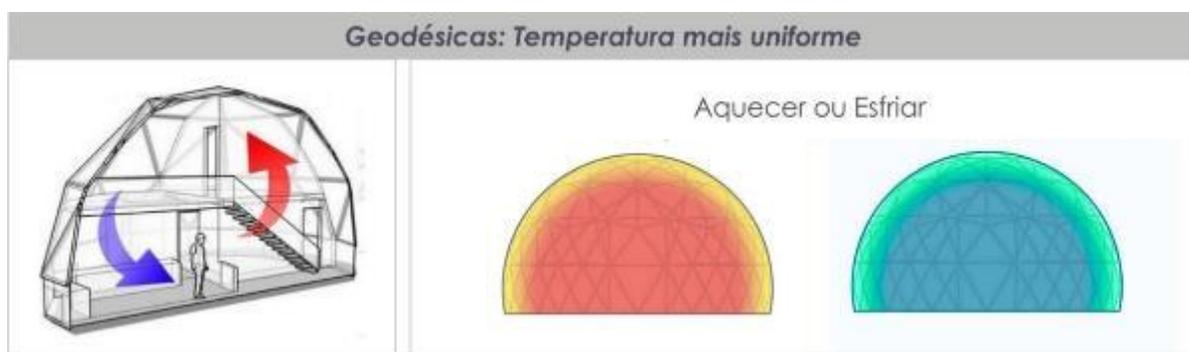
Fonte: Elaborado pela autora, do banco de imagens do laboratório do BIODESIGN.

f) Temperatura mais uniforme

Devido ao fluxo melhorado do ar, a temperatura é mais uniforme do que numa habitação convencional. Fuller (1975) ressalta que cúpulas maiores perdem calor mais devagar, característica de um interior côncavo que cria esse fluxo de ar natural permitindo que o ar quente ou frio flua uniformemente por toda a cúpula, com a ajuda de dutos de ar de retorno. A área de superfície exposta no exterior das cúpulas também é menor, permitindo menos troca de calor com o ambiente, o que se traduz

em economia para se manter morno no inverno, ou frio no verão, poupando-se energia para aquecer ou esfriar. (**Figura 123**)

Figura 123 – Ilustração da uniformidade da temperatura (aquecer ou esfriar), devido a geometria do domo.



Fonte: Elaborado pela autora, do banco de imagens do laboratório do BIODESIGN.

g) Concentrador de luz e calor

Fuller (1979) ressalta que as cúpulas funcionam como um grande ponto refletor, refletindo e concentrando a temperatura interior, evitando a perda de calor radiante nos climas mais frios. Dessa forma, muitas cúpulas são usadas como estufas, pois as coberturas de vidro translúcido as tornam como excelentes coletoras de energia solar, refletindo a luz e o calor para dentro da estrutura, evitando a perda de calor por irradiação, essa situação se torna útil, por exemplo, para regiões com invernos rigorosos tanto para habitações quanto para estufas de plantas. (**Figura 124**)

Figura 124 – Efeito estufa intensificado pela geometria do domo e pelo material (vidro).

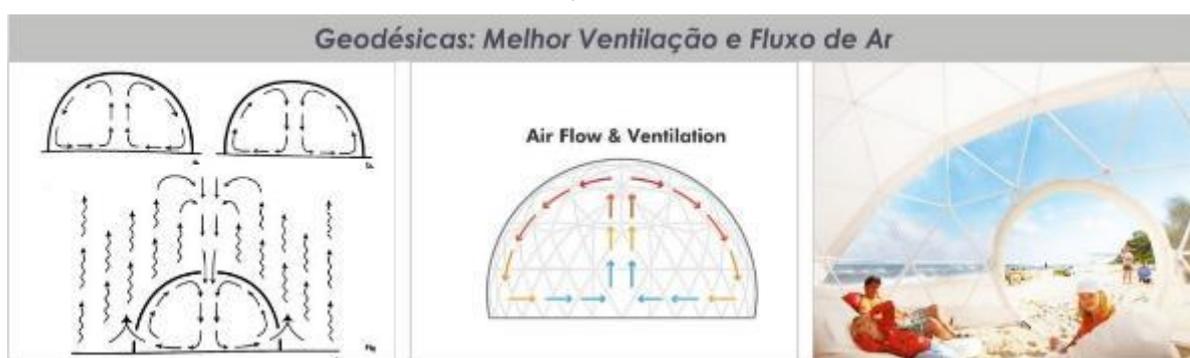


Fonte: Elaborado pela autora, do banco de imagens do laboratório do BIODESIGN.

h) Melhor ventilação e fluxo de ar

Com as devidas aberturas, os domos fornecem uma excelente mistura do ar e temperatura, promovendo uma distribuição excelente que impede o estancamento de ar, evitando assim, a proliferação de fungos, bactérias e umidade; com essa distribuição de fluxos de ar, a propagação de odores é uma característica que pode ser bem aproveitada por estabelecimentos comerciais de alimentação. **(Figura 125)**

Figura 125 – Ilustração do fluxo de ar melhorado dentro do domo e exemplo de domo *lounge* na praia.



Fonte: Elaborado pela autora, do banco de imagens do laboratório do BIODESIGN.

i) Design aerodinâmico

Nenhum sólido pode ser mais curvo que uma esfera ou um domo, já que apresentam curvatura tridimensional, e como é de se esperar, curvas facilitam os deslocamentos de massas (seja do ar ou da água) ao redor da construção. Fuller (1979) descreve que as turbulências externas de vento são minimizadas porque este vento que contribui para aquecer ou esfriar, perde força em torno dele, por efeito aerodinâmico. Por isto, o design esférico é eficiente para situação de abrigo seguro. **(Figura 126)**

Figura 126 – Ilustração do design aerodinâmico e exemplos de domos em locais de fortes ventos.



(Fonte: Elaborado pela autora, do banco de imagens do laboratório do BIODESIGN)

j) Coberturas auto-sustentáveis

Em construções, de maneira geral as cúpulas permitem amplos espaços desobstruídos sem a necessidade de vigas, colunas ou paredes de suporte interiores. Esta situação é muito interessante para certos usos que necessitam de grandes áreas livres para atividades, ou mesmo em situação residencial, cujos espaços mais abertos propiciam a interação social e desfavorecem os enclausuramentos. (**Figura 127**)

Figura 127 – Criação de espaços amplos sem necessidade de paredes ou vigas de sustentação.



Fonte: Elaborado pela autora, do banco de imagens do laboratório do BIODESIGN.

k) Facilidade e rapidez na montagem

Com método relativamente simples de construção, existe a possibilidade de comprar kits prontos para a montagem, cujas instruções tornam o processo mais fácil e rápido até mesmo por pessoas com pouca experiência. Seu tempo de montagem é certamente mínimo em comparação com métodos tradicionais, podendo ser completamente construído em algumas horas por mão de obra não especializada. Mesmo em se tratando de casas domo, feitas de módulos de madeira ou de cimento,

ainda assim, a construção é mais rápida que a convencional. Além disso, a manutenção pode ser feita de maneira localizada, sem a necessidade de, por causa de alguma estrutura danificada, se reconstruir uma grande área, por exemplo. (**Figura 128**)

Figura 128 – Facilidade e rapidez na montagem pela modularidade dos componentes.



Fonte: Elaborado pela autora, do banco de imagens do laboratório do BIODESIGN.

I) Padrão de circulação radial

O padrão radial nos interiores é uma arquitetura que converge. Nas escolas, ele favorece as atividades em grupo; nos teatros e igrejas, possibilita maior número de cadeiras e melhor visibilidade, e nos demais ambientes, tanto públicos quanto privados, a própria disposição interna favorece a criação de espaços mais sociáveis, em que parece inevitável não interagir. (**Figura 129**)

Figura 129 – Padrão de circulação radial é convergente e favorece interação social.



Fonte: Elaborado pela autora, do banco de imagens do laboratório do BIODESIGN.

m) Construção em lugares remotos

Com poucos e leves materiais, e sendo de fácil montagem, torna-se bem indicado até mesmo para lugares sem tanta estrutura, ou seja, mais ermos, tais como: desertos, pólos, florestas, praias, montanhas, etc. (**Figura 130**)

Figura 130 – Acessível para locais sem tanta estrutura, mais afastados ou ermos.



Fonte: Elaborado pela autora, do banco de imagens do laboratório do BIODESIGN.

n) Alicerce mais simples

Devido a estrutura mais leve, não há necessidade de um alicerce complicado como geralmente é utilizado nas construções de alvenaria para suportar grandes cargas. Dessa forma, há economia de materiais também nesta parte. Há muitos casos que inclusive utilizam apenas plataformas de madeira. Entretanto é recomendável sempre fazer algum tipo de base para evitar a entrada de água da chuva e de insetos. (**Figura 131**)

Figura 131 – Alicerce mais simples e plataformas para apoio de geodésicas.



Fonte: Elaborado pela autora, do banco de imagens do laboratório do BIODESIGN.

o) Design original, geometricamente belo

Novos materiais e métodos de construção permitem uma quebra de paradigma em detrimento ao padrão ortogonal na arquitetura e no design de interiores. Além disso, podem ser ressaltadas formas geométricas atrativas e belas tanto no interior destas estruturas, quanto no exterior. **(Figura 132)**

Figura 132 – Design das geodésicas, padrão geométrico triangular de beleza original.



Fonte: Elaborado pela autora, do banco de imagens do laboratório do BIODESIGN.

p) Variedade de materiais

Podem ser construídas praticamente com qualquer material, geralmente, ferro galvanizado é o mais utilizado para as barras das cúpulas abertas, ou as de dupla camada estrutural, mas também podem ser cobertas com lona, placas de carílico, vidro, ou ainda, podem ser feitas de bambu, aço, madeira, pvc, fibra de vidro, plástico, concreto, e até papelão. O problema de vedação das cúpulas fechadas, uma das maiores queixas em seus primeiros anos de surgimento, hoje, já podem ser considerados resolvidos, com sistemas de vedação existentes no mercado que permitem até mesmo visitas a aquários submersos. **(Figura 133)**

Figura 133 – Cúpulas de materiais diversos.



Fonte: Elaborado pela autora, do banco de imagens do laboratório do BIODESIGN.

q) Qualidade acústica

Lotufo & Lopes (1981) ressaltam ainda a qualidade acústica proporcionada pela geometria dos domos geodésicos, em seu interior, a reverberação é favorecida, sendo por isto bem indicado para igrejas, teatros, estúdios e apresentações musicais, etc; enquanto a própria geometria, favorece uma proteção natural como uma barreira para sons externos. (**Figura 134**)

Figura 134 – Geometria ajuda a reverberar dentro do domo e ajudar a diminuir ruídos externos.



Fonte: Elaborado pela autora, do banco de imagens do laboratório do BIODESIGN.

r) Redondo acolhedor

Lotufo & Lopes (1981) também comentam a sensação psicológica do redondo no interior do domo, pois explicam que há uma replicação inconsciente da sensação de segurança dentro da barriga materna, e por isto, é mais agradável estar sob a curvatura côncava no interior do domo, que por maior que seja, se percebe acolhedora, em detrimento da sensação também inconsciente de opressão transmitida por uma laje plana em cima da cabeça, principalmente quando o Pé-direito é baixo. **(Figura 135)**

Figura 135 – Sensação psicológica de ambiente acolhedor dentro do domo.



Fonte: Elaborado pela autora, do banco de imagens do laboratório do BIODESIGN.

s) Modularidade

Uma última vantagem, ainda segundo Lotufo & Lopes (1981), trata do aspecto de modularidade deste tipo de construção, que por apresentar peças semelhantes, facilita o processo de fabricação em série, reduzindo custos e desperdícios, contribuindo para a sustentabilidade. Ramos (1993) também reflete esta questão da modularidade como uma vantagem importante, lembrando dessa praticidade de fabricação e montagem a partir de um número reduzido de elementos diferentes. **(Figura 136)**

Figura 136 – Modularidade nas geodésicas facilita fabricação.



Fonte: Elaborado pela autora, do banco de imagens do laboratório do BIODESIGN.

A síntese de todas estas vantagens está no fato de a cúpula combina a estabilidade inerente de triângulos com a relação vantajosa volume-superfície-área de uma esfera, e com ela, Fuller demonstrou que era possível criar um espaço habitável usando menos materiais e energia do que os normalmente usados em um projeto arquitetônico convencional. Muitas cúpulas geodésicas já foram construídas em todo o mundo, em diferentes climas e temperaturas, e provaram ser o mais eficiente abrigo humano que se pode encontrar. Muitos fabricantes de cúpula oferecem vários projetos para a habitação, inclusive algumas, mais simples, podem ser montadas em questão de horas e no mesmo dia, embora construções mais elaboradas possam demorar mais, ainda assim, as cúpulas são sempre uma opção melhor se comparadas com outros processos.

Como mencionado, algumas empresas disponibilizam kits prontos em que se pode escolher ou não o serviço de montagem, havendo muitas pessoas inclusive, que preferem construir elas mesmas suas próprias cúpulas. Sobre isto, uma característica interessante observada é este aspecto social na montagem. Foram identificados diversos casos em que a participação solidária se faz presente, algumas empresas, inclusive, chamam os familiares e seus amigos no dia da montagem para fazer parte do evento, num senso de cooperação e de sinergia análoga ao que significa a própria geometria prevista por Fuller. Isto pode ser constatado nos vídeos disponíveis na rede social Youtube da empresa *Omega Dome* e em vários outros vídeos de montagens de cúpulas geodésicas na mesma rede social, em que, curiosamente, se percebe que o caráter cooperativo nestes projetos é uma constante.

3.4 A Biomimética nas Geodésicas de Fuller

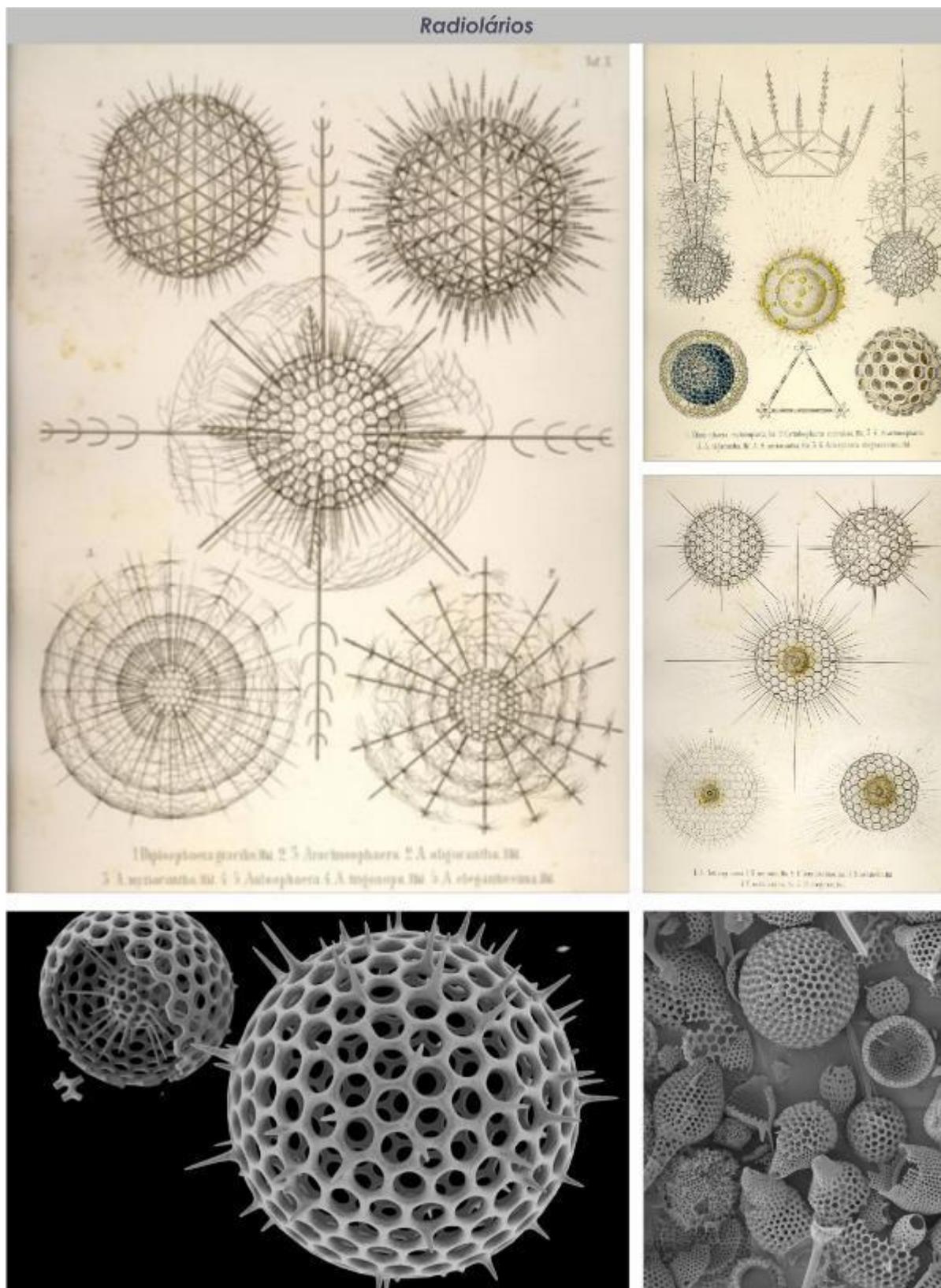
Para alguém que não conheça a história, um olhar não criterioso para as cúpulas geodésicas poderia não traduzir claramente os conceitos e a inspiração por traz destas estruturas. Como a forma é demasiadamente geométrica e projetada, isto pode levar ao equívoco em se pensar que não haja nenhuma relação com a natureza, mas como já foi dito, na verdade, a relação existe.

Gorman (2005) revela que em *Explorações da Geometria Sinérgica*, a partir dos anos 1940, Fuller realmente acreditava que ele estava investigando “o sistema de coordenadas da natureza”, inspirado pelas obras “*Kunstformen der Natur*” do naturalista alemão *Ernst Haeckel* e “*On growth and form*” de *D’Arcy Thompson*. Desta forma, os domos geodésicos tiveram inspiração no “*macrocosmo*”, considerando as configurações esféricas celestiais, e no “*microcosmo*”, considerando os microorganismos esféricos como os da Radiolaria (**Figura 137**). “Os Radiolários são protozoários marinhos, cujas espécies apresentam o citoplasma envolvido por uma delicada cápsula siliciosa central, com perfurações que deixam passar os pseudópodes, simples ou ramificados”. (HAECKEL, 2005)

Esta classe de protozoários que vive no plâncton marinho teve suas formas reveladas nos estudos ilustrados nos livros de *Haeckel* que foram primeiro apresentados em 1904, ano da sua primeira publicação. Alguns destes radiolários foram representados por uma série de esqueletos radiais que formam padrões geométricos, definindo as bases lógicas e analógicas referenciais e conceitual.

Não apenas os Radiolários, mas ele observou que várias outras estruturas naturais também se utilizam do princípio de estruturas vazadas e de invólucro esférico protetor e contenedor como as observadas no capítulo 2. Desta forma, Fuller (1998) se convenceu de que a natureza favorece o padrão esférico, e que por isto, este seria uma representação do sistema de coordenadas da natureza, o que desencadeou o seu estudo da matemática para a engenharia dessa configuração.

Figura 137 – Imagens dos desenhos de Haeckel de radiolários esféricos e abaixo imagens de microscopia eletrônica de radiolários reais.



Fonte: HAECKEL, 2005 e <http://www.abovetopsecret.com/forum/thread863028/pg1>. Acesso em: 25 abr 2016.

Edmondson (2007), professora de *Havard* que foi aluna de Fuller, revela na obra *A Fuller explanation: the synergetic geometry of R. Buckminster*, que na verdade, **Fuller acreditava que um poliedro geodésico de alta frequência fornece o verdadeiro modelo de sistemas físicos que se interpreta como esferas**, pois ele não concordava com essa noção de superfície contínua equidistante de um ponto central. Para ele, esta definição era cientificamente inaceitável e inconsistente com a realidade física, pois justificou que em alguns níveis de resolução todas as "esferas" consistem em um número incalculável de eventos energéticos interconectados por um número ainda maior de relações vetoriais ou forças.

O próprio Fuller (1979) esclarece como estas equivocadas sensações esféricas são produzidas:

“Por causa das matrizes de interferências poliédricas identificados como pontos muitíssimo aproximadamente equidistantes de um ponto central e porque as relações massa-atrativa ou massa-repulsiva de todos os pontos entre si são mais economicamente manifestadas por cordas e não por arcos... a matriz esférica é na realidade produzida por pontos de estruturas geodésicas omnitrianguladas de altíssima frequência. ”

Em verdade, os olhos não podem ver moléculas individuais na transparência de uma bolha de sabão, nem se pode detectar as atrações químicas entre as moléculas através destas cordas identificadas por Fuller (pelo menos não até o momento), no entanto, tais ligações existem, e por mais duvidosa que possa parecer, há coerência em sua teoria.

Edmondson (2007) revela que o objetivo de Fuller com tal explicação era fornecer modelos tangíveis de **Fenômenos invisíveis**, na sua tentativa de entender e ensinar sobre o Universo, e acredita que, de todas as soluções possíveis, uma geodésica *omnitriangulada* de alta simetria icosaédrica fornece o método mais eficiente de englobar espaço com um mínimo de material e esforço. Diz ainda que em conformidade, a natureza se baseia neste design elegante em muitos invólucros de proteção, independente da escala, citando o exemplo da radiolaria, dos vírus esféricos e das fibras do globo ocular. Na **Figura 138**, um exemplo mostrando esse padrão geodésico nos olhos da libélula azul (*Coenagrion puella*).

Figura 138 – A Libélula Azul e o padrão geodésico identificado em seus olhos.



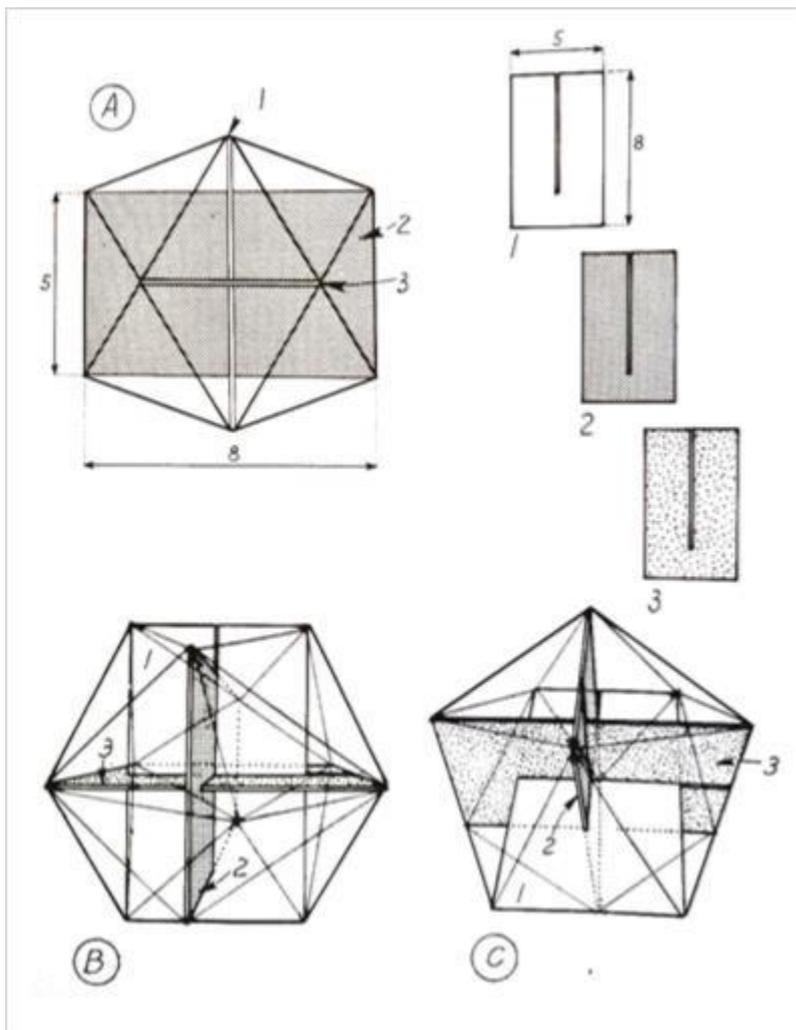
Fonte: Elaborado pela autora, do banco de imagens do laboratório do BIODESIGN.

Não apenas com os padrões de formas esféricas, mas também, pode-se identificar relações das suas cúpulas com a teoria dos **Fractais**, baseando-se nesta característica de divisão de triângulos dentro de outros triângulos menores, indefinidamente, uma repetição em escala que guarda as principais propriedades que caracterizam os fractais, a *auto semelhança* de triângulos e a *complexidade infinita*, já que não há limite de frequência em teoria.

Também há relação das geodésicas com a **Proporção Áurea**, pois sendo derivadas do icosaedro, geram **configurações pentagonais e hexagonais** que possuem essa relação com o número áureo. Segundo Doczi (1990) os padrões hexagonais são mais comuns na natureza inorgânica, pois a natureza orgânica tende a privilegiar padrões pentagonais, no entanto, há uma conexão interessante entre esses dois padrões no icosaedro, em que visto de um lado aparece o perfil hexagonal e de outro, o pentagonal, sendo seus planos diagonais retângulos áureos (ligações entre as arestas opostas diagonalmente). O autor reflete se este não é um reflexo da relação existente entre a matéria orgânica e a inorgânica, sendo uma formada a partir da outra, como o corpo humano que é formado por dois terços de água.

Inclusive o icosaedro pode ser construído a partir de 3 retângulos áureos iguais, feitos de papelão, com uma fenda central, deslizando-se uns dentro dos outros a 90°, em três planos diferentes. 20 elásticos presos nas fendas dos cantos dos retângulos áureos completam o modelo, mostrado em projeção ortogonal, onde os retângulos 1 e 3 aparecem de perfil, a **Figura 139** apresenta estas vistas dos contornos hexagonal (B) e pentagonal do icosaedro (C). (DOCZI,1990)

Figura 139 – Construção do icosaedro demonstrando relações entre o padrão pentagonal, o hexagonal e a Proporção Áurea.



Fonte: (DOCZI, 1990).

Como já é claro, Fuller se dedicou mais a estudar geodésicas derivadas do padrão icosaédrico pela regularidade dos triângulos gerados, produzindo uma quantidade menor de triângulos diferentes, e que, por conseguinte, isto facilita a **modulação**, característica esta, também já observada como um padrão na natureza e que também facilita a concepção seja para as criações naturais ou artificiais, pois sabe-se que este recurso promove uma redução de matéria e energia.

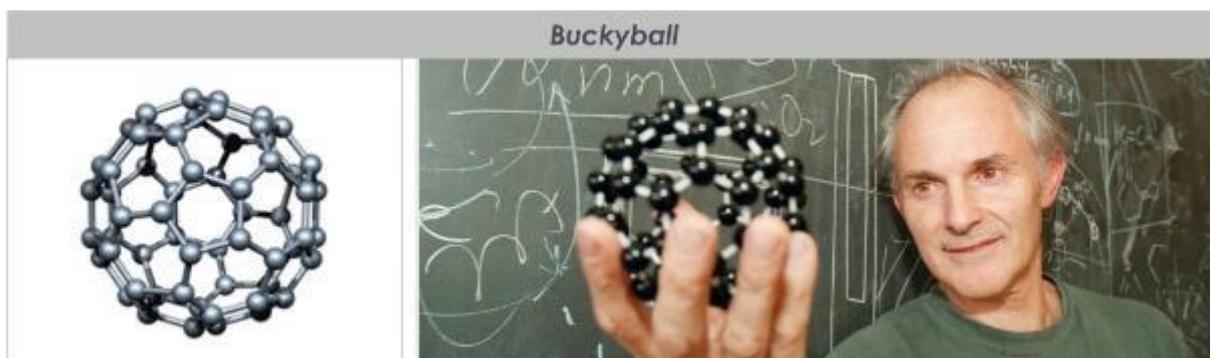
É curioso então perceber que as cúpulas geodésicas se relacionam com os padrões identificados na natureza, sejam através das formas esféricas, nas proporções com o número áureo encontradas no icosaedro do qual derivam as geodésicas, seja com os princípios de *autosemelhança* e *complexidade infinita* dos

fractais, seja com a configuração estrutural triangular, pentagonal e hexagonal, etc. E toda essa coincidência se explica justamente porque seu descobridor, se inspirou em princípios naturais para a sua concepção.

As formas geodésicas possuem aplicações revolucionárias na arquitetura e nos métodos de construção, mais também em outras áreas da ciência e tecnologia elas têm sido reveladas. Em 1968, biólogos moleculares descobriram que a fórmula matemática para a concepção da cúpula geodésica aplica-se perfeitamente à estrutura do invólucro de proteína que rodeia todos os vírus conhecidos. Vários físicos nucleares estão convencidos de que esta mesma fórmula explica a estrutura fundamental do núcleo atômico, e é, portanto, a base de toda a matéria. (EDMONDSON, 2007)

Também em 1985, um grupo de pesquisadores fez uma curiosa descoberta ao irradiar laser para vaporizar o grafite, o material sofreu decomposição em diversos outros compostos, entre eles, um constituído apenas em 60 átomos de carbono. Richard Smalley, Harry Kroto e Robert Curl ganharam o prêmio Nobel de Química em 1996, por esta, que foi a primeira fórmula alotrópica descoberta no séc XX. Na explicação da estrutura da molécula, Kroto disse que observou uma configuração similar, a enorme cúpula de Fuller que havia visitado em Montreal, a Biosphère da EXPO 67, a estrutura da molécula, como já foi explicada, é de fato uma geodésica hexa-pentagonal e/ou um icosaedro truncado (**Figura 140**), de modo que foi batizada como “**buckminsterfullerene**” e posteriormente apelidada de “**Buckyball**” em clara homenagem à Fuller. Mas tarde, foram descobertas outras formas alotrópicas do Carbono e as que se organizam em formatos geodésicos são classificados como **Fulerenos**. As “Buckyballs” se destacam por sua estabilidade incomum, graças a sua geometria, além das propriedades de supercondutividade e aplicações médicas, notavelmente no tratamento do câncer.

Figura 140 – Esquema da *Buckyball* e Harry Kroto, um dos cientistas que descobriu o Carbono 60.



Fonte: <http://www.npr.org/2015/10/08/445339243/a-discoverer-of-the-buckyball-offers-tips-on-winning-a-nobel-prize>. Acesso em: 29 jul 2016.

À medida que mais e mais pessoas descobrem a relevância abrangente das ideias de Fuller, elas alcançam cada vez mais novas áreas. Há muito tempo ele tinha chegado à conclusão de que a natureza tem um sistema de coordenadas básico, e ele estava convencido de que a descoberta desse sistema acabaria por reunir todas as disciplinas científicas. (EDMONDSON, 2007)

3.5 Projetos Contemporâneos com Cúpulas Geodésicas

Desde a década de 50, as cúpulas geodésicas tem se demonstrado de fato, uma opção inteligente para incontáveis tipos de construção. De acordo com o *Buckminster Fuller Institute*, existem mais de 300.000 cúpulas geodésicas em todo o mundo, muitas destas, com aplicações diferentes das utilizadas por Fuller, e espera-se que ainda muitas outras novas formas de uso sejam descobertas, ocasionadas pelo avanço dos processos produtivos, tecnológicos e pela criatividade humana em suprir seus anseios e curiosidades.

Com a globalização de informações da era digital, foram identificadas diversas empresas, tais como *Pacif Domes*, *Omega Dome*, *Freedomes*, *Domosgeodésicos.es*, *Solardome*, *Domos Valdívia*, etc.; que possuem o foco na construção das geodésicas, seja para venda, aluguel ou montagem, estas empresas disponibilizam diversas opções de kits com diversos tamanhos pré-fabricados, além de atenderem também através de projetos personalizados. (Figura 141)

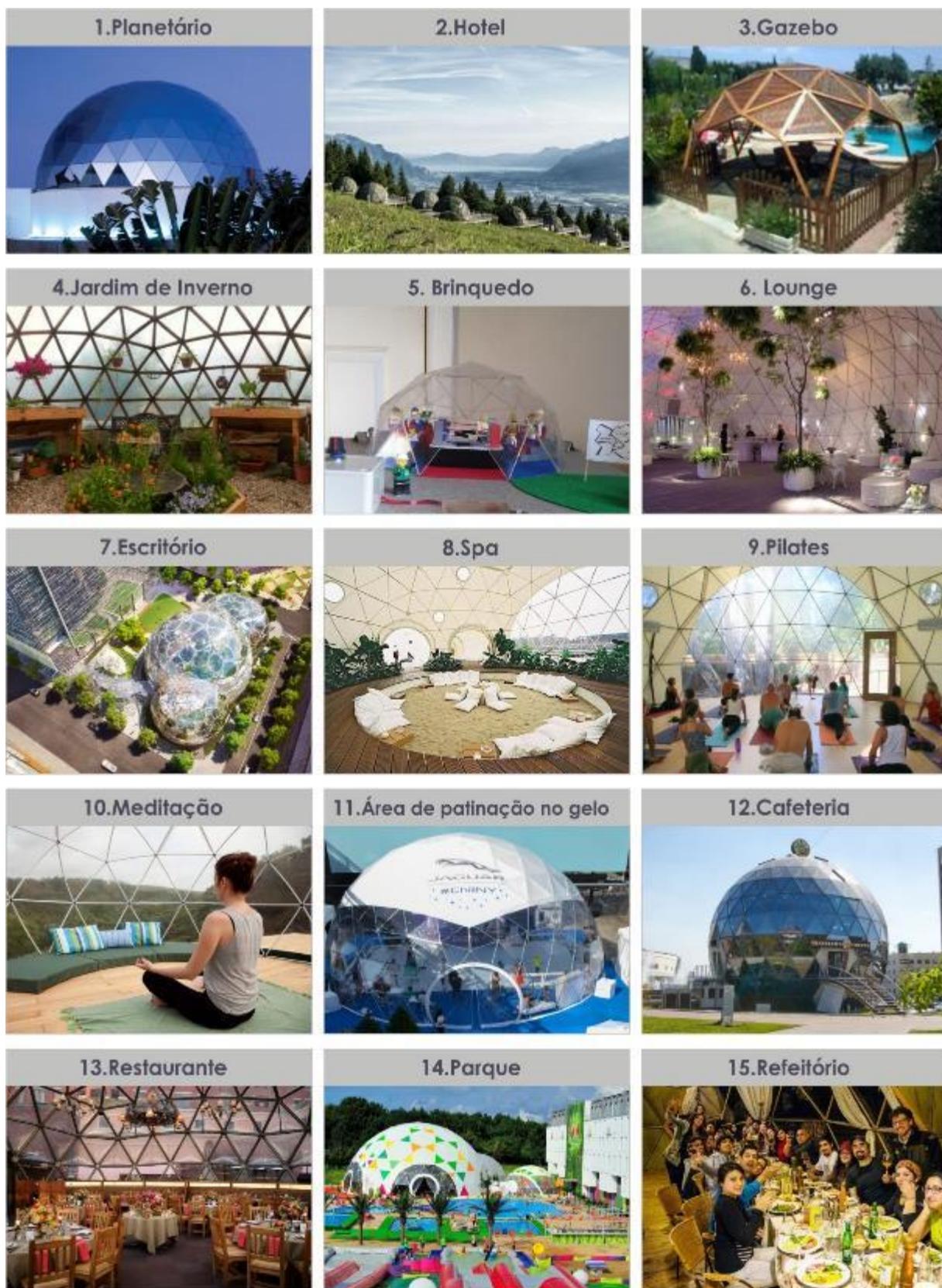
Figura 141 – Geodésicas da empresa *Freedomes* com tamanhos e preços.



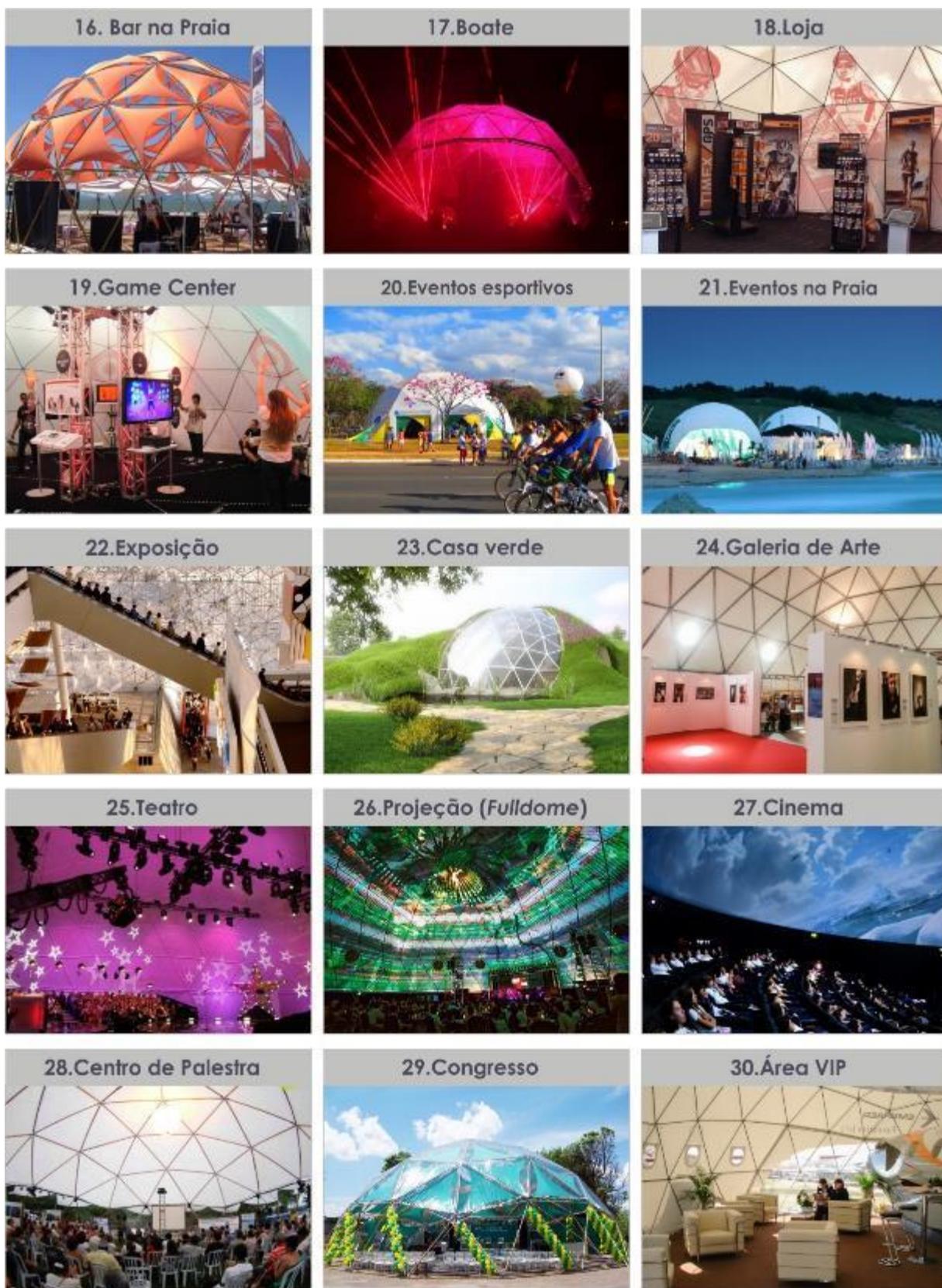
Fonte: <https://fdomes.com/dome-kits/>. Acesso em: 3 fev 2016.

Muitas destas empresas disponibilizam materiais informativos, imagens e vídeos, em seus diversos meios de comunicação, como sites, blogs e redes sociais, o que colaborou para que esta pesquisa pudesse visualizar e organizar alguns dos inúmeros tipos de usos destas estruturas. Outras pesquisas de usos foram feitas no google e estarão compilados de maneira ilustrativa nas seguintes figuras 142,143,144,145 e 146.

Figura 142 – Exemplos de usos das Cúpulas Geodésicas.

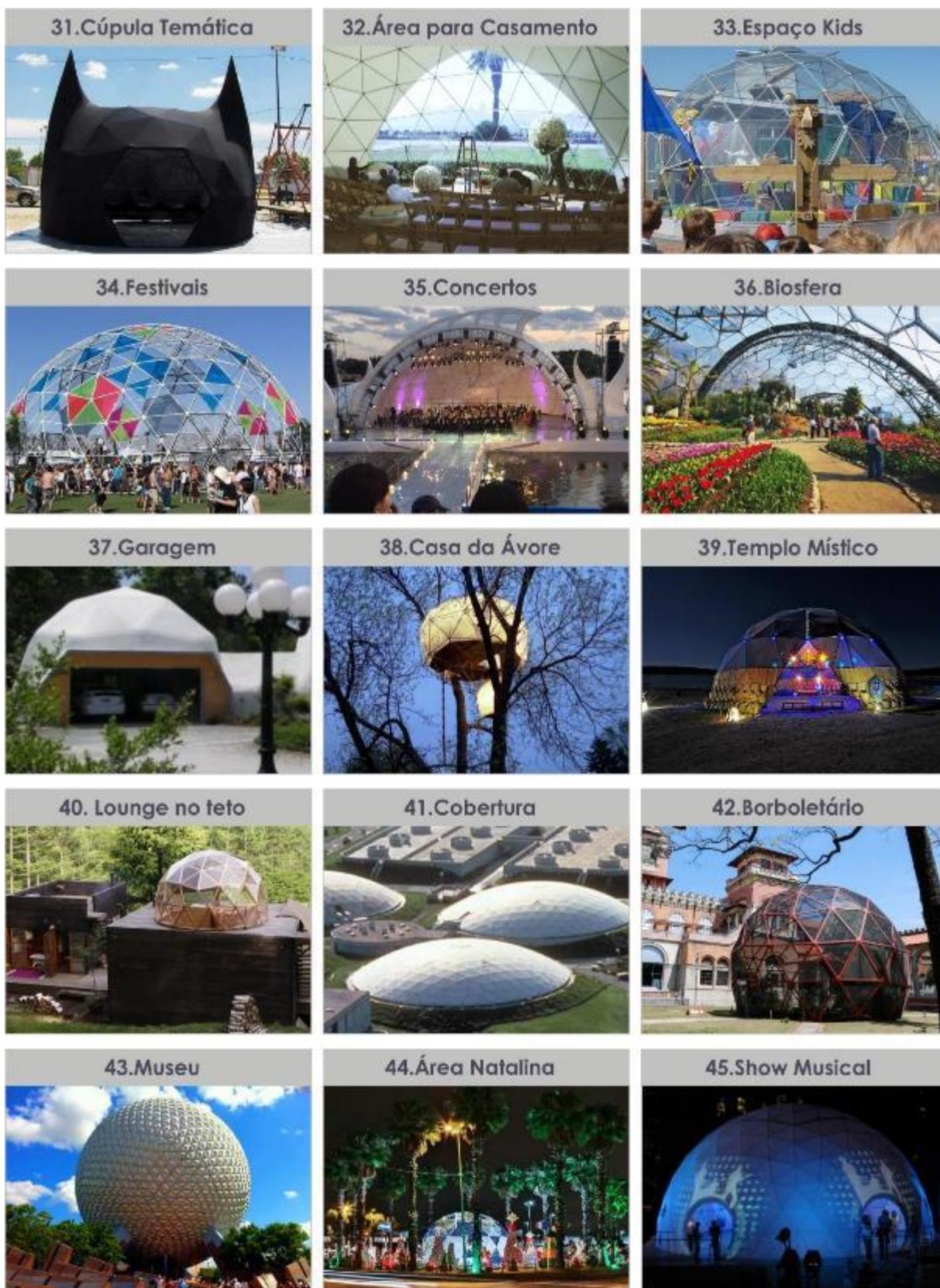


Fonte: Elaborado pela autora, do banco de imagens do laboratório do BIODESIGN.

Figura 143 – Exemplos de usos das Cúpulas Geodésicas.

Fonte: Elaborado pela autora, do banco de imagens do laboratório do BIODESIGN.

Figura 144 – Exemplos de usos das Cúpulas Geodésicas.



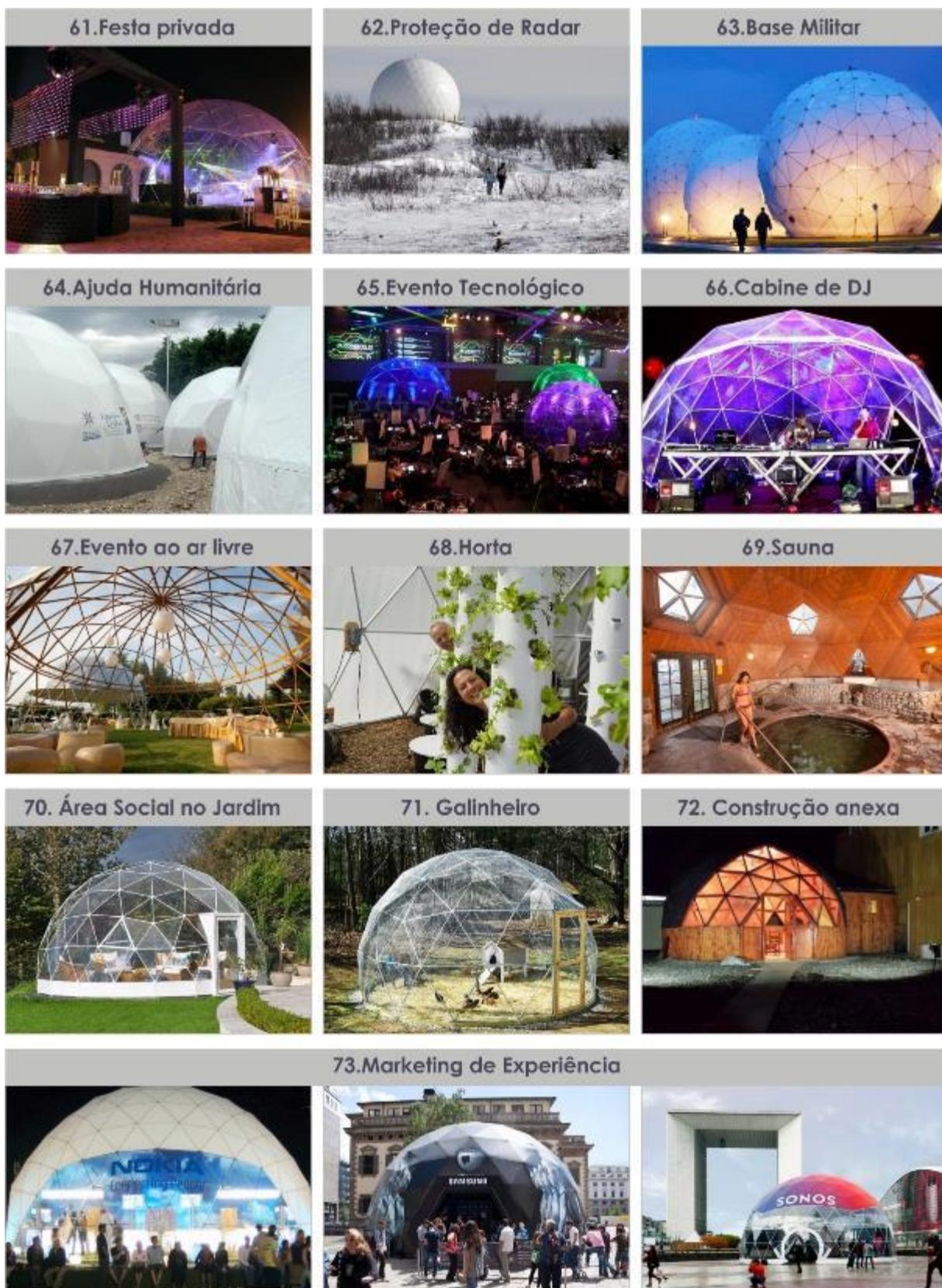
Fonte: Elaborado pela autora, do banco de imagens do laboratório do BIODESIGN.

Figura 145 – Exemplos de usos das Cúpulas Geodésicas.



Fonte: Elaborado pela autora, do banco de imagens do laboratório do BIODESIGN.

Figura 146 – Exemplos de usos das Cúpulas Geodésicas.



Fonte: Elaborado pela autora, do banco de imagens do laboratório do BIODESIGN.

Na **Figura 147**, um mapa chamado *Domes of the world*, mantido pelo *Google Group "Geodesic Help"*, mostra as maiores áreas de concentração de geodésicas no planeta.

Figura 147 – Mapa do Google Group “Geodesic Help” com localização de geodésicas.



Fonte: https://www.google.com/maps/d/viewer?msa=0&mid=1OEV_62VqiyMt01IktyI3jpbZkW0.

Acesso em 25 jul 2016.

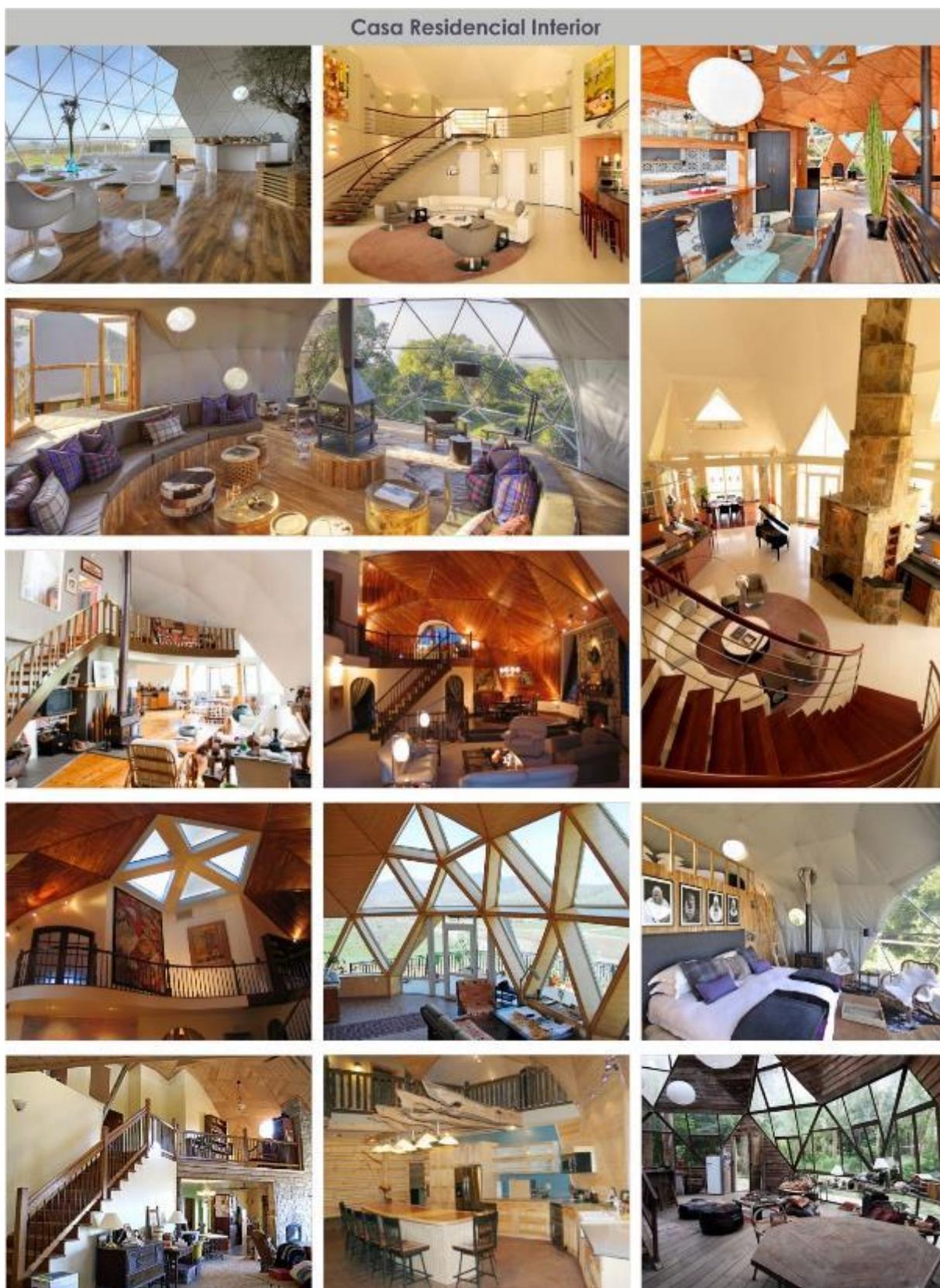
Além destes diversos tipos de usos, tem se difundido também como residência eficiente e ecológica, especialmente pelo seu baixo custo de implementação e manutenção. Nos Estados Unidos e na Europa onde existem mais exemplos, há diversas empresas especializada nelas, trazendo soluções cada vez mais atraentes com uma arquitetura moderna e eficiente de alto padrão de qualidade. Vale lembrar aqui que as tecnologias e materiais disponíveis no contexto atual podem trazer diversas soluções para problemas com geodésicas, tais como: vedação e padronização de portas, janelas e mobiliário. Na **Figura 148**, algumas imagens das fachadas para exemplificar estas casas domos e, na **Figura 149**, imagens com exemplos do interior deste tipo de construção para demonstrar o quanto podem ser tão ou mais bonitas do que a arquitetura convencional.

Figura 148 – Exemplos de Cúpulas Geodésicas para uso residencial.



Fonte: Elaborado pela autora, do banco de imagens do laboratório do BIODESIGN.

Figura 149 – Exemplos do interior de Cúpulas Geodésicas no uso residencial.



Fonte: Elaborado pela autora, do banco de imagens do laboratório do BIODESIGN.

Por fim, para agregar nesta parte de projetos contemporâneos, não podia ficar de fora o projeto simples e inovador para construções de cúpulas geodésicas com os conectores **Hubs** (Figura 150). Estes conectores que inicialmente em estudos foram fabricados por impressora 3D possuem 5 ou 6 saídas para pinos em formato de esferas que são unidas às barras com parafuso, para em seguida, serem apenas encaixadas neste conector, fazendo com que o processo de montagem seja muito mais rápido e prático. Além disso, os conectores possibilitam utilizar qualquer tipo de madeira para as barras (e na verdade podem ser utilizados quaisquer outros materiais desde que não sejam tão mais pesados que a madeira e que as dimensões sejam calculadas corretamente. No site <http://buildwithhubs.co.uk/stickguide.html> existe uma calculadora que já informa as dimensões dos dois tipos de barras, colocando-se o raio da cúpula pretendida. Até o momento só há disponível o kit para venda da cúpula de frequência **2v**, portanto, para este, só são necessárias 2 medidas de barras. O projeto foi desenvolvido por *Chris Jordan e Mike Pasley* do Reino Unido que desde 2011 vêm aprimorando este sistema e otimizando o produto.

Em 2015 a dupla lançou o **Hubs mini**, uma versão em miniatura do produto que é bem interessante, pois permite que se faça uma maquete antes da montagem, ou mesmo que se estude novas configurações, geminando os mini-domos, etc. Pode também ser usado como brinquedo para crianças, o que também promete ser igualmente motivador e educador. A dupla colocou o projeto no site *Kickstarter* para angariar fundos e continuar a desenvolver o produto, pelo site, é possível adquirir o kit de conectores por £80.00; o Kit completo para a construção de uma cúpula **2v** de 4m, incluindo também as barras de madeira já no tamanho correto, por £375.00; e o kit do Hubs mini por £45.00. No mesmo site, está disponível um material com guia de montagem, demais instruções sobre o produto e a apresentação de um vídeo que demonstra uma montagem que dura apenas 10min se realizada por 2 pessoas.

É interessante observar também que nas mídias sociais como o *Youtube*, existem muitos vídeos explicando as montagens de cúpulas feitas com os mais variados materiais e tamanhos (madeira, ferro, perfil de alumínio, papelão, papel, canudos, etc.), feitas pelas muitas pessoas que se aventuram por construí-las e desejam partilhar a experiência, incentivando que outras também o façam.

Figura 150 – Conector Hubs e Hubs mini.

Projeto Hubs

hubs™ what would you build. I. hub kit (everything but the sticks)

Prototype 6-way hub

- Ball joints snap in and out easily
- Wide angles of movement simplify construction
- Ball joints can be screwed onto any type of wood

hubs work with different stick lengths to make domes of different sizes

works with any wood

Stick width: 32mm (1 1/4" APPROX)

Stick length calculator: Enter your desired dome diameter in millimeters here: 5500 mm. Calculate. You need to cut: 33 x SHORTS at 1414 mm, 35 x LONGS at 1611 mm.

Taper the ends of wider sticks

constructed in under an hour (20 mins if you know what you're doing)

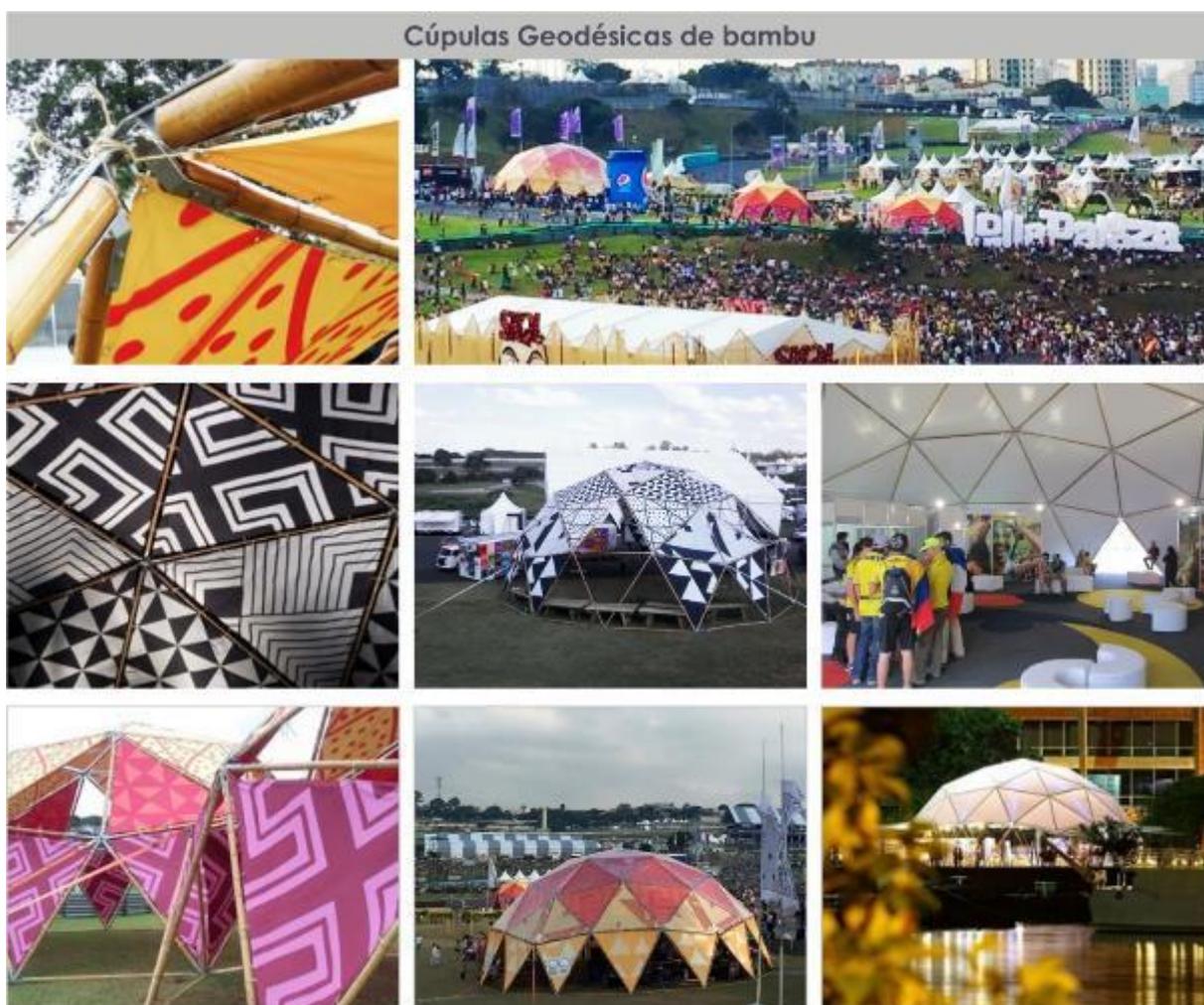
hubs mini test ideas

Fonte: <http://buildwithhubs.co.uk/#top>; <https://www.kickstarter.com/projects/942255452/hubs-geodesic-domes-made-simple>. Acesso em 25 jul 2016.

3.5.1 APLICAÇÕES NO BRASIL

No Brasil, estas cúpulas são mais usadas como estruturas temporárias por empresas como a *Domebambu*, *Criativa Tendas* e a *Eco Domo*, dentre outras, que trabalham com eventos e feiras, disponibilizando venda e aluguel destas estruturas. A empresa Domebambu, reduz ainda mais o peso e os custos de instalação das suas cúpulas por inserir o Bambu como matéria-prima. Inclusive é importante citar também o laboratório do professor José Luís Mendes Ripper (PUC-RJ), que também fez diversos estudos de implementação do bambu em cúpulas geodésicas. **(Figura 151)**

Figura 151 – Cúpulas geodésicas de bambu no Lollapalozza da empresa brasileira *Domebambu*.



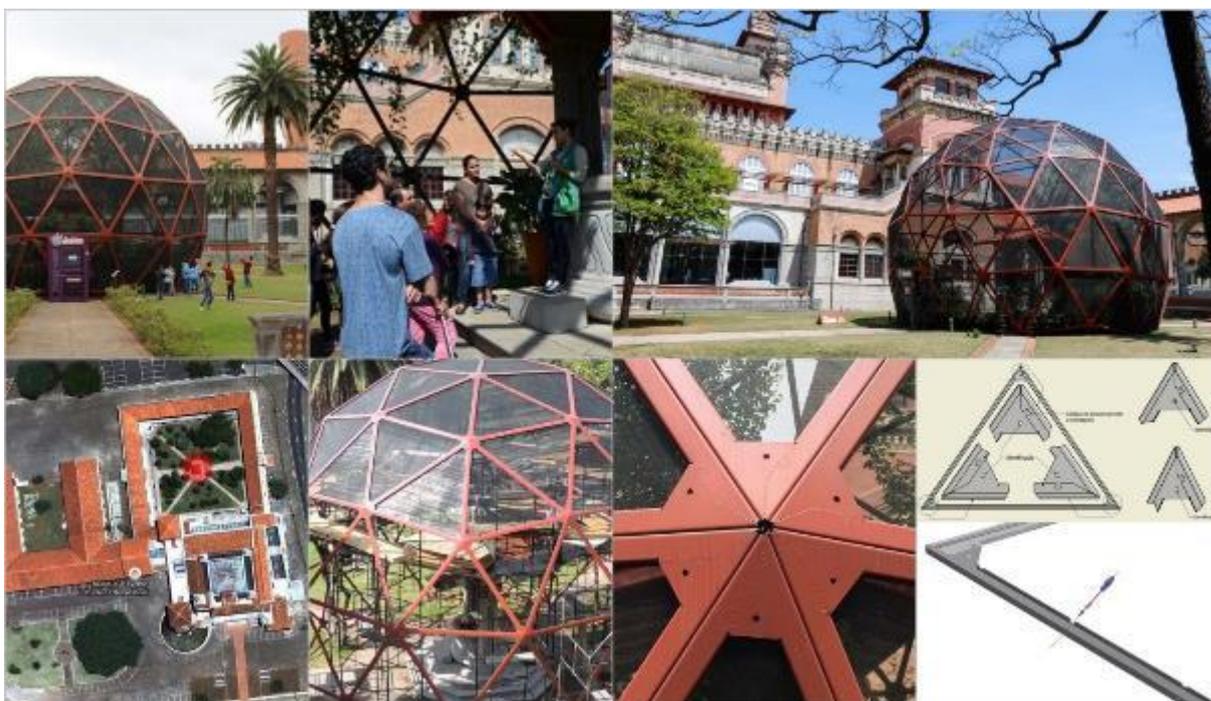
Fonte: <http://www.domebambu.com.br/dome-eventos-4/>. Acesso em 25 jul 2016.

Além destas estruturas temporárias para eventos, serão também apresentados nesta parte, alguns exemplos no país de uso permanente de cúpulas geodésicas encontradas durante a pesquisa:

- **Borboletário (Catavento Cultural, Centro de São Paulo/SP)**

O primeiro exemplo é o Borboletário instalado no Catavento Cultural, sediado no Palácio das Indústrias no centro de São Paulo, que entrou em funcionamento em julho de 2015. Apresenta o formato de cúpula geodésica com diâmetro de 13,75m, altura de 10,60m, superfície de 561 m², composta por 145 elementos de geometria triangular, resultando num conjunto harmônico, em volumetria e proporções, com o entorno (**Figura 152**). A frequência escolhida foi a **3v**, para permitir que os componentes tivessem dimensões compatíveis com os seis processos utilizados na produção: corte; conformação; solda; jateamento; galvanização e pintura eletrostática. A pequena construção existente no centro do claustro, foi incorporada ao projeto, e nela, foi instalado o berçário das borboletas. (DOMINGUES & OLIVEIRA, 2015)

Figura 152 – Cúpula geodésica do Borboletário no Catavento Cultural, no Palácio das Indústrias (SP).



Fonte: (DOMINGUES & OLIVEIRA, 2015).

- **Lama Lâmina (Instituto Ilhotim/MG)**

Desde 2009, o Instituto Inhotim abriga a obra *Lama Lâmina* idealizada pelo americano *Matthew Barney* cujo tema é a destruição da floresta. Incrustada na mata, a escultura está instalada dentro de 2 domos geodésicas geminadas de aço e vidro, em meio a um bosque de eucaliptos. Em seu interior, o espaço é tomado por um enorme trator que ergue uma árvore de resina. Com diâmetros de 10m e 15m, as cúpulas de vidro foram executadas pela *Avec Design*, com o sistema *Ecoglazing* patenteado pela empresa, uma tecnologia capaz de simplificar as etapas de instalação mesmo em geometrias mais complexas. Utiliza um caixilho sintético em borracha de silicone de alta consistência HTV (vulcanizados a alta temperatura), com painéis de vidro emborrachados pelo sistema VES (vidro encapsulado em silicone). São 115 diferentes tipos de triângulos num total de 1200m² de vidro laminado refletivo dourado encapsulado, de 10mm de espessura e aplicado sobre a estrutura metálica tubular em aço patinável (com liga de cobre), de modo elástico e definitivo. Este é um laminado com metalização PR108 (8% de transmissão luminosa). As chapas foram fabricadas pela *Fanavid* e cortadas e lapidadas pela *Vidraçaria Iguatemi*. **(Figura 153)**

Figura 153 – Cúpula geodésica obra *Lama Lâmina* de Matthew Barney no Instituto Ilhotim (Ilhotim/MG).



Fonte: <http://www.avec.com.br/obras/cupulas-geodesicas-inhotim/>. Acesso em: 25 jul 2016.

- **Planetário Johannes Kepler (Santo André/SP)**

Localizado na *Sabina Escola Parque do Conhecimento*, o **Planetário Johannes Kepler** é o mais moderno do Brasil e único com sistemas de projeção óptico e digital, que funcionam de forma sincronizada para reproduzir quase 6 mil estrelas pontuais, com brilho, cores e cintilações semelhantes aos da natureza. O projeto da cúpula geodésica é assinado pelo arquiteto *Paulo Mendes da Rocha* e executado pela *AVEC Design*. Possui 21,5m de diâmetro, 640 quadros triangulares acústicos de alumínio revestidos por 10mm de vidro laminado branco fosco. O projetor instalado é do modelo *Starmaster SB*, fabricado pela empresa alemã *Carl Zeiss*, que utiliza um sofisticado sistema de automação eletromecânica. Com ele, as estrelas e os planetas são projetados sobre o teto hemisférico (full dome), produzindo a experiência de um incrível céu estrelado num espaço para 247 pessoas e 13 cadeirantes. O resultado é um conjunto tecnológico de última geração que reúne um sistema imersivo de altíssima qualidade para a reprodução de imagens, vídeos e animações, proporcionando incríveis efeitos visuais. **(Figura 154)**

Figura 154 – Cúpula geodésica do Planetário Johannes Kepler (Santo André/SP).



Fonte: <http://www2.santoandre.sp.gov.br/hotsites/sabina/index.php>. Acesso em: 25 jul 2016.

- **Planetário Rúbens de Azevedo (Fortaleza/CE)**

O Planetário fundado em 1998 e reinaugurado em junho de 2010, fica dentro do *Centro Dragão do Mar de Arte e Cultura* em Fortaleza/CE. Solicitado pelo governo do estado, o projeto foi feito pelos arquitetos *Delberg Ponce de Leon* e *Fausto Nilo* também com execução da *AVEC Design*. A cúpula de 12m de diâmetro e 78m² de área, possui 360 triângulos de vidro laminado refletivo prata revestindo quadros de isolamento termo-acústicos com a instalação da *ZKP4* da *Carl Zeiss*, controlados por um conjunto de 8 computadores de última geração que permitem a exibição de imagens de alta qualidade em projeção FULL DOME (em toda a cúpula - 360° x 180°), feita por tecnologia de fibras ópticas (patente mundial da Carl Zeiss), que reproduz com bastante fidelidade o céu estrelado de 88 constelações e o céu noturno de qualquer lugar da Terra, com a localização exata das estrelas, com projeções em alta definição e em 3D sem o uso de óculos especiais. O espaço tem capacidade para 80 pessoas. Todos os equipamentos foram fabricados pela empresa alemã Carl Zeiss, inventora do planetário, e há mais de 80 anos detém a tecnologia dos melhores planetários do mundo. **(Figura 155)**

Figura 155 – Cúpula geodésica do Planetário Rubens de Azevedo (Fortaleza/CE).



Fonte: <http://www.dragaodomar.org.br/planetario/institucional.php>. Acesso em: 25 jul 2016.

- **5. “Flor do Cerrado” (Torre da TV Digital-Brasília/DF)**

Em 2010, a “Flor do Cerrado” (Torre da TV Digital), como era chamada pelo seu projetista, o mais expressivo e famoso arquiteto brasileiro, Oscar Niemeyer, está situada em Brasília/DF, o que corresponde a mais um dos seus monumentos nesta cidade. Com 120m de estrutura de concreto armado, 50m de torre metálica e 12m de antena, sua base cilíndrica funciona como um "caule" que exibe duas "hastes" para abrigar dois espaços cobertos em formato de cúpulas geodésicas, implementadas também pela *AVEC Design*. As duas possuem 21m de diâmetro. A primeira, fica situada à 60m de altura, é um espaço de exposições, e a segunda, à 80m do solo, é um bar e restaurante. Como são de vidro, também funcionam como mirante. Próximo ao topo de concreto, a 120m, encontram-se o mirante mais alto dentro da própria torre, com 14 janelas redondas de 2m de diâmetro. O vidro de controle solar seletivo é um laminado de 10mm na cor cinza, cujas especificações consideraram o conforto térmico e lumínico. (**Figura 156**)

Figura 156 – Cúpulas geodésicas na Torre da TV digital de Niemeyer (Brasília/DF).



Fonte: <http://www.avec.com.br/obras/torre-da-tv-digital/>. Acesso em: 25 jul 2016.

- **Casa Lotufo (SP) e Casa Duvivier-Ripper (RJ)**

A figura 157 apresenta 2 construções de domos geodésicos com finalidade residencial, a casa do arquiteto e professor *Vitor Lotufo* (inclusive autor do livro *Geodésicas & Cia*) e a casa de hóspedes no quintal do artista plástico *Edgar Duvivier* no Rio de Janeiro. Em meados de 1960 Duvivier convidou o arquiteto e professor *José Luis Mendes Ripper* para desenvolverem juntos um domo geodésico de fibra de vidro. O artista já havia montado um exemplar com elementos de madeira e coberto com compensado que utilizaram para fazer os moldes em barro, e em seguida, em fibra de vidro, resultando numa cúpula de 40m² e apenas 250kg, instalada no bairro do Sumaré (RJ) que servia para abrigar seus hóspedes. Já a casa de Lotufo, com 52m², apareceu na revista *Casa Claudia* em uma de suas edições de 1981, a qual publicou uma matéria com o título “*Casa geodésica: a arquitetura do futuro*”, apontando a mesma como um modelo para a construção industrial de casas geodésicas pré-fabricadas. (**Figura 157**) (CAMPOS, 2009)

Figura 157 – Cúpulas Geodésicas da Casa Lotufo (à esquerda) e Casa Duvivier-Ripper (à direita).



Fonte: (CAMPOS, 2009).

3.5.2 APLICAÇÕES MODERNAS

Um exemplo bastante especial de aplicação moderna é o **Eden Project**, a maior estufa de plantas já construída no mundo, localizada em *St. Austell, Cornwall* (Inglaterra), com projeto do arquiteto *Nicholas Grimshaw*, em 2001. A obra contém um jardim botânico e parque temático que representam uma completa apresentação da biodiversidade global. A estrutura corresponde a enormes cúpulas geodésicas geminadas que recriam um bioma natural, que foram idealizadas para ser um centro de educação construído dentro de uma antiga área de mineração, o que topologicamente já facilitou a criação de um microclima. **(Figura 158)**

As enormes estufas (Biosferas) abrigam inúmeras espécies vegetais provenientes da Amazônia, África, Malásia, USA, do Mediterrâneo, Chile, Himalaia e Australásia, distribuídas em dois espaços climatizados, criando respectivamente as atmosferas: Úmida Tropical, representando um ambiente de floresta tropical, e Morno Temperado, para simular condições mediterrâneas. (DINIZ, 2006)

A maior das cúpulas tem 100m de diâmetro e 45m de altura. O módulo hexagonal é capaz de variações adaptáveis à topografia do terreno. A estrutura de aço utilizada é composta de elementos estruturais tubulares e sistema de conectores padronizados, é altamente eficiente e facilmente transportável. Esta estrutura tem o fechamento dos módulos estruturais executados em painéis de *ETFE* transparente, um polímero derivado do nome *polyethene-co-tetrafluoroethene*, que formam uma espécie de almofadas de ar, proporcionando uma grande redução de peso comparando-se com uma possível execução em vidro, reduzindo os custos com transporte e facilitando a montagem. (DINIZ, 2006)

Os domos possuem diâmetros diferentes, para atender tanto à topografia quanto às exigências de espaços internos, onde a forma resultante dá a impressão de um organismo biomórfico. Há uma sinergia entre arquitetura e a paisagem, assim, o centro de visitantes com forma de arco achatado com cobertura de grama reforça a noção que a área externa também faz parte do conjunto, criando ainda a integração entre os dois conjuntos de esferas. Esta estrutura central comporta área de serviços, restaurante e espaço para exposições. (DINIZ, 2006)

O *Eden project* é a maior cobertura transparente autoportante do mundo, cobrindo uma área aproximada de 23.000m² com painéis hexagonais e pentagonais individuais de até 80m², entre os quais, 232 painéis são controlados por computador e operáveis para ventilação. (DINIZ, 2006)

Um ponto importante a ser observado é que as mudanças de temperatura usualmente não são críticas para estruturas com domos, já que podem expandir livremente na direção radial, por isto, não houve a necessidade de construção de juntas de dilatação neste projeto.

Abaixo, um resumo da sua Ficha Técnica para se ter ideia das suas proporções:

Local: Saint Austell, Cornwall, Inglaterra.

Superfície Total: 39540m².

Peso total do aço utilizado: 700 ton.

Total comprimento de todas as vigas: 36000m.

Peso do aço por área: menos que 24kgf/m².

Área do maior hexágono: 80m² e vão de 11m.

Diâmetro do maior Domus: 125m.

Área total coberta: 23000m².

Projeto arquitetônico: Nicholas Grimshaw & Partners Ltd, London.

Engenharia estrutural: Anthony Hunt Associates e Ove Arup & Partners.

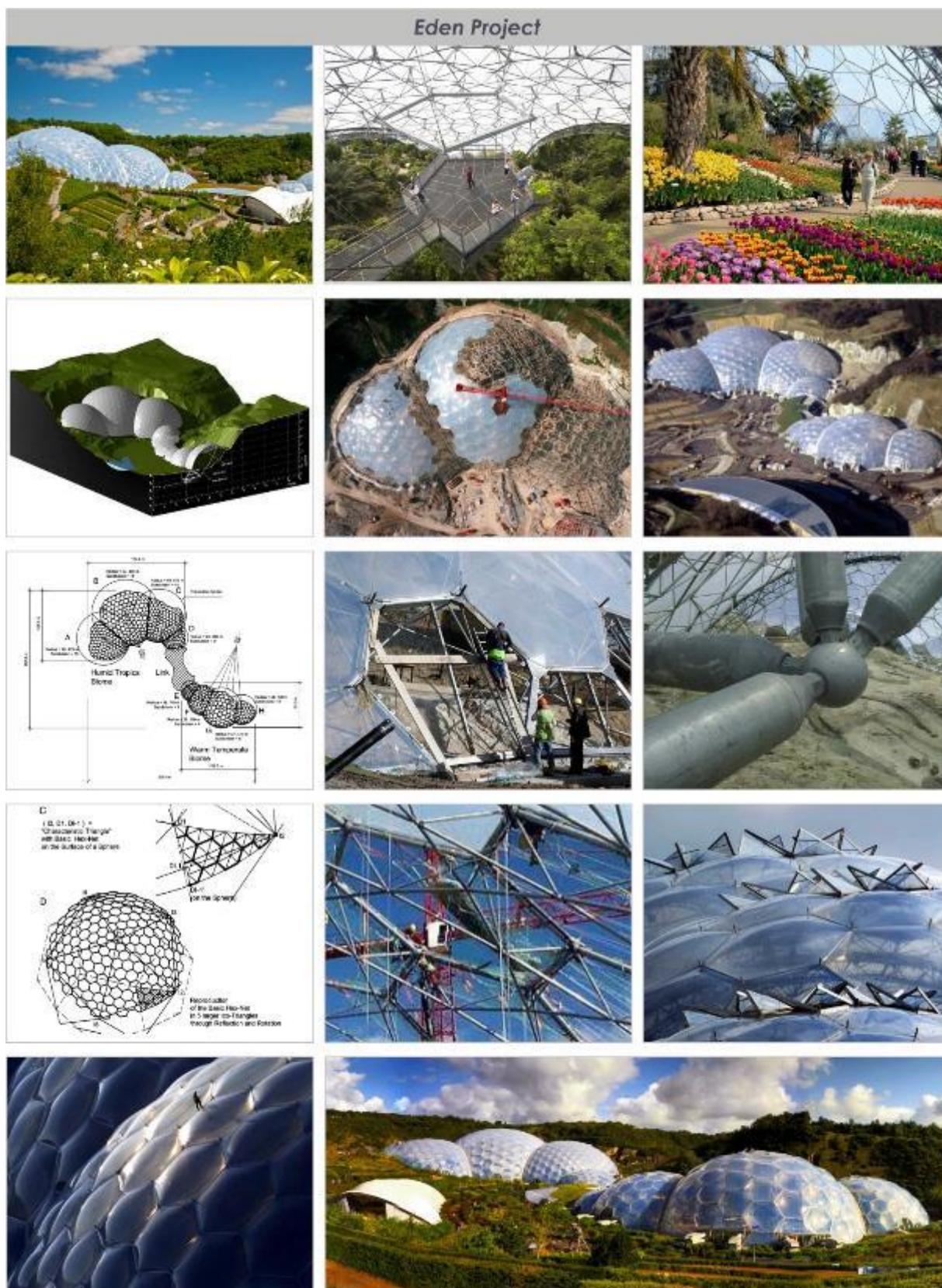
Construção: Alfred McAlpine Construction e Sir Robert McAlpine.

Estrutura de aço: Mero GmbH & Co. KG.

Membranes: Foiltec Verarbeitung von Folien und Textilien GmbH.

(KNEBEL, SANCHEZ-ALVAREZ e ZIMMERMAN, 2005 apud DINIZ, 2006.)

Figura 158 – Imagens do interior, exterior e de detalhes da construção do *Eden Project* (Inglaterra).



Fonte: (DINIZ, 2006).

É importante mostrar também que, recentemente, muitas empresas têm observado o potencial de uso destas configurações e as utilizado em empreendimentos de hotelaria vinculado aos conceitos de sustentabilidade e consciência ambiental aliado a facilidade do seu design propício e resistente para lugares com natureza mais selvagem, se revelando uma excelente opção de turismo de aventura, como os exemplos do *Ecocamp Patagônia*, *Punta de Domos*, *Magma Lodge*, *Elqui Domos*, *Whitepod* e *Aurora dome*, etc. (**Figura 159**). O caso específico do *Ecocamp Patagônia*, o primeiro hotel a perceber as vantagens de utilização destas configurações neste tipo de negócio será mostrado numa análise mais detalhada, assim como também os valores que geralmente estão relacionados com este tipo de empreendimento.

Figura 159 – Exemplos de hotéis de cúpulas geodésicas.

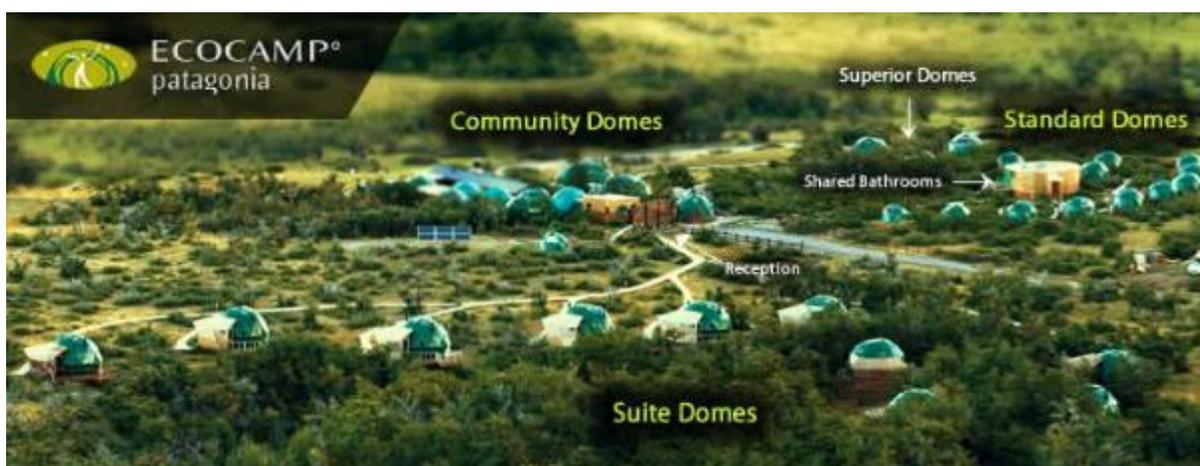


Fonte: Elaborado pela autora, do banco de imagens do laboratório do BIODESIGN.

3.5.2.1 Hotel Ecocamp Patagônia

O EcoCamp é um hotel localizado dentro de um parque natural na Patagônia (Chile) com vista privilegiada para a região montanhosa Torres del Paine. Fundado em 2001 pelos engenheiros e proprietários da Cascada Expediciones (empresa de turismo aventureiro) Javier Lopez, Yerko Ivelic e Nani Astorga, foi pioneiro em construir quartos de hotel com cúpulas geodésicas baseado no modelo derivado de Fuller, embora a forma hemisférica também seja uma referência das originais cabanas indígenas da região. (**Figura 160**)

Figura 160 – Ecocamp Patagônia.



Fonte: www.ecocamp.travel. Acesso em: 25 jan 2016.

Similar como nos hotéis tradicionais que possuem várias opções de quartos, no EcoCamp existem 4 opções de cúpulas para hospedagem: *Standard* com 10m², *Suíte* com 28m², *Loft* com 37m² e *Superior* com 23m². Os locais para as refeições, aulas de yoga, loja e bar são cúpulas geodésicas comunitárias que fornecem um ponto de encontro onde os hóspedes podem compartilhar histórias entre si e planejar futuras excursões. Na **Figura 161**, imagens evidenciando detalhes do exterior e interior das diferentes cúpulas geodésicas, retiradas do site da empresa.

Figura 161 – Ecocamp Patagônia, detalhes do exterior e interior.



Fonte: www.ecocamp.travel. Acesso em: 25 jan 2016.

Alguns aspectos relativos a ergonomia do ambiente construído levantados por VILLAROUCO (2008), tais como: conforto térmico, acústico e lumínico; acessibilidade e percepção ambiental serão apresentados a seguir; assim como também serão abordados os aspectos sustentáveis do hotel que atendem as tendências e urgências vigentes no cenário atual. O Objetivo destas análises é facilitar a visualização e o entendimento do contexto em que geralmente se inserem as aplicações de construções com geodésicas. São elas:

- a) **Conforto Térmico, Acústico e Lumínico:** A geometria das geodésicas favorece um fluxo melhorado do ar, a concentração de luz e calor e a uma temperatura mais uniforme do que numa habitação convencional. A área de superfície exposta no exterior nas cúpulas também é menor, permitindo menos troca de calor com o ambiente; aliado a isso, o volume de ar dentro da cúpula também é menor, o que se traduz em economia para se manter ameno no inverno, poupando-se até 50% em energia para aquecer. A distribuição excelente do fluxo de ar no interior das cúpulas evita ainda as áreas de estancamento de ar e, por conseguinte, que haja proliferação de fungos, bactérias e umidade.

As áreas translúcidas da cobertura das cúpulas as tornam naturalmente como excelentes coletoras de energia solar, refletindo a luz e o calor para dentro da estrutura como uma estufa, evitando a perda do calor por irradiação. Essa situação se torna muito útil para regiões com inverno rigoroso como na Patagônia, permitindo

que mesmo sem paredes de alvenaria, com a ajuda da lareira à lenha, do aquecimento solar, e da aparente estrutura de ferro galvanizado com a cobertura exterior de lona verde e transparente, mais uma camada interna de almofada isolante, sejam eficientemente suficientes para garantir calor e proteção contra os ventos fortes e frios do local (**Figura 162**). Aliado a isto, o conforto térmico também é garantido por um sistema a gás para o aquecimento da água.

Figura 162 – Ecocamp, conforto térmico e iluminação natural por claraboias.



Fonte: www.ecocamp.travel. Acesso em: 25 jan 2016.

Sobre o conforto acústico, LOTUFO *et al* (1981) ressalta ainda a qualidade acústica proporcionada no interior das cúpulas, a geometria favorece que o som seja reverberado dentro delas e que se torne uma barreira para os sons de fora. No caso do hotel, esta qualidade pode ser aproveitada dentro das cúpulas para o convívio social com apresentações musicais e a privacidade pode ser garantida com a distância dada entre estas cúpulas (**Figura 163**). Por estar numa região de ventos fortes, o formato ajuda a diminuir o ruído externo, embora permitindo ainda que os sons da natureza sejam aproveitados, o que não deixa de ser um ponto positivo.

Figura 163 – Ecocamp, conforto acústico.



Fonte: www.ecocamp.travel. Acesso em: 25 jan 2016.

Já a iluminação do hotel privilegia a luz natural na maior parte do dia. Dentro das cúpulas há claraboias que facilitam a captação da luz de dia e durante a noite há a iluminação por lâmpadas e lanternas de *led* (**Figura 164**) provenientes da energia verde por captação solar. Ela é suficiente, mas um ponto negativo é que na versão da cúpula Standard é necessário solicitar lanternas pois a iluminação é inexistente, chegando a ficar comprometida nas outras áreas do hotel nos dias de inverno rigoroso, quando a iluminação solar é precária mesmo com gerador elétrico.

Figura 164 – Ecocamp, iluminação à led por lâmpadas solares.



Fonte: www.ecocamp.travel. Acesso em: 25 jan 2016.

- b) **Acessibilidade:** Apesar da proposta do hotel ser claramente direcionada para um público ativo em busca de aventura, esportista, o que é evidenciado pelos programas de atividades disponíveis no hotel como: trilhas à pé, de bicicleta

ou à cavalo por terrenos irregulares, picos, pontes de madeiras, ou mesmo a prática da loga, canoagem, etc., outro aspecto importante a se discorrer é sobre a facilidade de deslocamentos entre os ambientes construídos do hotel.

Para pessoas com dificuldades de locomoção, como cadeirantes e idosos, isto se torna um ponto negativo, pois não há rampas e como as construções são suspensas, mesmo por plataformas de madeira relativamente baixas, há sempre escadas e batentes dificultando as passagens (**Figura 165**). A versão Standard com apenas 10m² também não é adequada para cadeirantes, embora nas demais áreas, o fato destas cúpulas serem maiores e livres de paredes internas possa garantir um deslocamento sem obstrução. Idosos também podem se sentir desencorajados a ficar nas cúpulas mais afastadas das áreas comunitárias, pois teriam que fazer longas caminhadas para ir e vir, mesmo que para alguns isto não chegue a ser um problema excludente.

Figura 165 – Ecocamp, batentes e escadas.



Fonte: www.ecocamp.travel. Acesso em: 25 jan 2016.

Sobre esta acessibilidade para pessoas com deficiências visuais, estas também sentiriam certa dificuldades por causa dos batentes e escadas, mas também não seria um total empecilho, principalmente se estiverem acompanhadas. Os deficientes auditivos não teriam problemas com deslocamentos nos ambientes do hotel pois são bem intuitivos com as passarelas de madeira fazendo a ligação entre todas as cúpulas. Entretanto, podem sentir dificuldade de comunicação, caso estejam desacompanhados e não haja pessoa do hotel capacitada para a linguagem de sinais, ainda assim, nada que um bloco de notas não ajude.

Um ponto positivo do hotel se refere a acessibilidade de maneira mais abrangente, se preocupando com o entorno do ambiente a qual está inserido, e isto pode ser observado no planejamento das construções das cúpulas sobre plataformas elevadas e na ausência de cercas em torno do EcoCamp, o que permite que não seja bloqueada a passagem de animais por baixo das estruturas e que cavalos e demais animais do parque possam entrar livremente (**Figura 166**) Lâmpadas solares iluminam as passarelas e as cúpulas à noite, sendo muito sutis, de modo a não perturbar os animais noturnos para que não se sintam ameaçados pelo hotel. Não pensar apenas na acessibilidade do Homem no projeto do ambiente construído, mas também na dos animais que vivem no local não deixa de ser um enfoque inovador, de acordo com as tendências atuais de preocupação ambiental.

Figura 166 – Ecocamp, plataformas para acessibilidade dos animais do entorno.



Fonte: www.ecocamp.travel. Acesso em: 25 jan 2016.

- c) **Percepção Ambiental:** As cúpulas oferecem um visual bem diferente e atrativo para o layout do hotel e o padrão radial permite a criação de espaços mais sociáveis. Com coberturas autossustentáveis, é possível ter amplos espaços desobstruídos sem a necessidade de vigas, colunas ou paredes de suporte no interior, e isto tende a aproximar ao invés de separar as pessoas. Outra percepção pertinente é que psicologicamente a curvatura côncava no interior da cúpula é mais acolhedora que o teto plano.

Todas as cúpulas de dormir são confortáveis (**Figura 167**), mesmo a versão menor, a *Standard*, em que o banheiro é compartilhado e não possui sistema de aquecimento, nem iluminação. As demais versões possuem área espaçosa para

camas, lareira, banheiro privativo, aquecimento de água à gás e energia elétrica para carregamento de celulares e laptops, porém um ponto que para alguns seria negativo é o fato de não disponibilizar *wifi* (só nas áreas comunitárias), nem secadores, já que o consumo de energia é limitado e o objetivo é ter uma experiência mais natural dentro do que é possível em termos de conforto de interação com a natureza, pois tudo é pensado para que se perceba a premissa do hotel de preocupação e responsabilidade ambiental.

Figura 167 – Ecocamp, cúpula de dormir visão interior.



Fonte: www.ecocamp.travel. Acesso em: 25 jan 2016.

O aspecto social é um dos seus atributos mais célebres, que promove atividades, passeios em grupos e estimula o convívio. Há quatro cúpulas de uso comunitário, elas são ligadas às demais cúpulas de dormir por passarelas de madeira suspensas. Uma delas é o refeitório onde todos comem juntos, a outra, um bar/lounge, uma terceira é destinada à prática de ioga, e uma última, contém uma loja e uma pequena biblioteca. Nelas, os hóspedes podem interagir entre si, sentar, ler, conversar, fazer ioga, desfrutar da boa gastronomia do hotel, relaxar, compartilhar suas histórias e aventuras do dia, etc. Usualmente os guias também utilizam a cúpula comunitária da biblioteca para mostrar aos hóspedes os mapas das trilhas e pontos de observação de animais selvagens. Todas as cúpulas comunitárias estão rodeadas por terraços, com amplo espaço para favorecer a interação social. (**Figura 168**)

Figura 168 – O Ecocamp favorece a interação social.



Fonte: www.ecocamp.travel. Acesso em: 25 jan 2016.

Apesar de ter uma configuração diferente do usual, as cúpulas são muito bem vistas pelos visitantes que evidenciam o design original no interior de belas formas geométricas, além da aprovação da ideia de hotel verde. Em sua página do *facebook*, possui mais de 20.000 curtidas e uma aprovação de quase 5 estrelas, a mesma aprovação possui no *Tripadvisor* com quase 500 comentários de hóspedes satisfeitos com suas experiências, cujos pacotes turísticos variam de \$2600 à \$5300 dólares, (incluindo: atividades, hotel, refeições e traslados).

d) Design Portátil e Econômico: A forma geodésica é bastante vantajosa, pois ela otimiza a carga, deslocando as forças em toda sua estrutura, por isto é ergonômico, aerodinâmico e forte para resistir a situações extremas como: ventos fortes, tempestades, terremotos e acumulação de neve. Quanto mais forte o vento, não tendo superfícies de sucção, ele o rodeia e o firma mais ainda no terreno, inclusive na região do hotel a velocidade dos ventos pode chegar à 200km/h. Além disso, a esfera tem 25% menos área de superfície por volume fechado do que qualquer outra forma. A cúpula combina a estabilidade inerente dos triângulos com a proporção vantajosa volume/área de superfície de uma esfera, o que resulta em menos materiais de construção para englobar mais espaço. Há uma estimativa de redução de 30% de materiais e 50% de energia em relação a uma construção convencional de alvenaria de mesma área construída. Redução também de custos com a mão de obra, pois a montagem e manutenção é mais fácil, simples e rápida.

Tendo menos material, menos área de superfície, ausência de paredes internas e composto de materiais mais leves que a alvenaria, como tubos de ferro galvanizado, lona, almofadas isolantes e madeira, este design portátil não precisa de um alicerce complicado, no caso do EcoCamp uma plataforma suspensa de pinho foi o suficiente, isto facilitou que em 2005 o hotel mudasse de local, indo para o pé das Torres sem deixar vestígios no local anterior. Sendo de fácil montagem, torna-se bem indicado até mesmo para lugares remotos como lá, mas também é bem indicado para desertos, pólos, florestas, praias, montanhas, etc. Outra observação interessante sobre a composição visual do hotel é que pelas cúpulas serem verdes, com plataformas de madeira e ter altura limitada, se camuflam harmoniosamente na paisagem natural (**Figura 169**).

Figura 169 – Ecocamp, cores e texturas se camuflam na paisagem.



Fonte: www.ecocamp.travel. Acesso em: 25 jan 2016.

- e) **Diminuição de Emissões de CO²**: Em 2008, tornou-se uma empresa com certificado livre de Carbono, que só é possível para as empresas que visam minimizar ao máximo as emissões CO². A estimativa é que em 1 ano, as políticas do hotel compensem cerca de 230.000 toneladas de emissões de CO². Por comprar de fornecedores locais também evita a emissão por transportes, visto que os outros hotéis da região recebem entregas em voos provenientes da capital ou do exterior. Como oferecem expedições de aventuras, os meios de transportes que disponibilizam também são livres de emissão, tais como cavalos, bicicletas, canoas e as pernas para as caminhadas nas trilhas, sendo necessário o uso de carros só para a chegada e partida dos hóspedes. (**Figura 170**)

Figura 170 – Ecocamp, Transportes livre de carbono.



Fonte: www.ecocamp.travel. Acesso em: 25 jan 2016.

- f) **Energia Verde:** Toda energia elétrica do hotel vem de turbinas hídricas e painéis fotovoltaicos, ou seja, obtenção de energia a partir de fontes 100% renováveis, sendo 40% solar, já que se é muito eficiente no verão, quando a Patagônia recebe até 17 horas de sol por dia, e 60% hidroelétrica. A captação de energia através de recursos hídricos é feita com 5 l/s de água do rio que passam pelas turbinas entregando uma potência constante de 800 Watts. Um inversor é usado para alternar as baterias de 24V para 220V, a voltagem padrão no Chile. Aliado a isso, uma matriz de 1700 painéis fotovoltaicos também ligados ao banco de baterias completam a quantidade de energia necessária para o funcionamento do hotel. (**Figura 171**)

Figura 171 – Painéis de captação de energia solar do Ecocamp.



Fonte: www.ecocamp.travel. Acesso em: 25 jan 2016.

Assim, estas baterias alimentam todos os frigoríficos, iluminação, eletrodomésticos, aparelhos de som, etc. O gás propano só é usado para aquecer a água e as cúpulas superiores, mas existe um projeto para aquecer a água do chuveiro também com energia solar. Com a política de economia de energia elétrica do hotel, ela é limitada e está disponível apenas para os hóspedes carregarem seus *gadgets*, não sendo possível utilizar para secadores de cabelo ou máquinas de barbear, por exemplo.

A implementação e manutenção de toda esta estrutura sustentável é um trabalho direto dos proprietários e engenheiros Javier e Yerko. Eles não só projetaram todo o conceito, como ensinaram, qualificaram e supervisionam toda uma equipe para manter estes recursos. (**Figura 172**)

Figura 172 – Esquema de energia verde das cúpulas do Ecocamp.



Fonte: <http://www.ecocamp.travel/en/Sustainability/Green-Energy>. Acesso em: 25 jan 2016.

g) **Gestão de Resíduos:** Possui uma gestão de resíduos que visa reduzir ao máximo o descarte de papel, latas e plástico, até os fornecedores são

escolhidos com muito cuidado, garantindo que estejam cientes de cumprir com as normas ambientais do hotel, que procura comprar a granel, de modo a limitar embalagens individuais a um mínimo a ser trazida para o parque. Todos os resíduos são separados de acordo com o estatuto de reciclagem: orgânico, papel, vidro e materiais perigosos ou tóxicos. Os não-orgânicos são removidos e enviados para a cidade mais próxima de Punta Arenas para serem reciclados, e o material orgânico serve de alimentação para os porcos numa fazenda da vizinhança.

Guias cuidam para evitar que os hóspedes joguem lixo nas rotas durante as caminhadas, trazendo de volta para o hotel todo o material não-biodegradável. Existe reutilização dos *zip-lock* do almoço e das garrafas de água e também há um manual em todas as cúpulas informando as práticas ecológicas que incluem: ficar nas passarelas de madeira, não fumar dentro das cúpulas, usar produtos de higiene biodegradáveis, não descartar pilhas, minimizar o tempo no chuveiro e partilhar o transporte.

Além disso, trabalha com o dispositivo de compostagem mais moderno do mundo, sendo o primeiro na indústria hoteleira em todo o Chile e Patagônia. As câmaras recolhem os resíduos dos sanitários e separam o material sólido do líquido. O sólido é misturado com papel e aparas de madeira e recebe calor para manter microrganismos vivos e o processo de compostagem ativa. Já o material líquido passa pela câmara de limpeza onde é filtrado, em seguida, passado para a terra. Devido às baixas temperaturas na Patagônia, há um grande esforço para manter este processo (**Figura 173**).

Figura 173 – Banheiro comunitário e dispositivo de compostagem do Ecocamp.



Fonte: www.ecocamp.travel. Acesso em: 25 jan 2016.

- h) **Responsabilidade Social:** Pensando em desenvolvimento sustentável do entorno, o apoio social mais lógico que o hotel pode oferecer é comprar localmente e empregar moradores da região, garantindo-lhes uma boa renda mensal. Por isto, até os cavalos são contratados de fazendeiros das redondezas, a maioria do mobiliário, artesanato e decoração também são de Punta Arenas e todos os alimentos são comprados da região (ovos, carnes, peixes, queijos, frutas secas, grãos, marmelada, pães, frutas e legumes). Além disso, dispõe também de uma loja que vende roupas de produtores locais, principalmente de lã e couro. (**Figura 174**)

Figura 174 – Mobiliário, artesanato, decoração e alimentos de produtores locais.



Fonte: www.ecocamp.travel. Acesso em: 25 jan 2016.

Cerca de 90% de todo o pessoal empregado são da região local, sendo a maioria de Puerto Natales e de Punta Arenas, inclusive seus guias especializados

criaram na região e estudaram em universidades sobre ecoturismo em áreas como geologia, ornitologia e botânica (**Figura 175**). Os proprietários e o gerente são de Santiago. Todos vivem uma vida *eco-friendly*, cuidando da energia, água e gestão de resíduos. Compartilham a filosofia ambientalmente sustentável ao longo dos anos, e incentivam seus clientes, fornecedores e acionistas a pensarem e agirem da mesma forma. Fomenta também essa compreensão da importância da natureza entre os vizinhos, compartilhando as suas estratégias e inovações sustentáveis com o órgão de desenvolvimento da região com o intuito de ajudar outros empresários a seguirem o mesmo caminho.

Figura 175 – Funcionários do Ecocamp.



Fonte: www.ecocamp.travel. Acesso em: 25 jan 2016.

Possui certificação ISO14001, até o momento, única em todo Chile, cumprindo elevados padrões ambientais e constantemente testando e partilhando novas ideias verdes, buscando ser exemplo para outros desenvolvedores de turismo; e também a ISO9001, garantindo o cumprimento dos mais elevados padrões de princípios de gestão.

Líder em viagens ambientalmente responsáveis para as áreas frágeis de recursos naturais, procura minimizar o impacto de cada visitante no Parque Nacional *Torres del Paine* e está constantemente a estudar, testar, comprar e instalar tecnologias sustentáveis para o fornecimento de energia verde e de gestão de resíduos. Este caso do Ecocamp foi importante de ser detalhado pois possui a premissa de levar conforto aos limites somente daquilo que é sustentável, onde a conservação ambiental se demonstrou prioridade sobre quaisquer práticas que

poderiam ser prejudiciais para o parque, e este é um ponto de vista muito válido, pois proteger o parque é ser responsável de uma maneira mais ampla, é estar preocupado com o futuro das próximas gerações.

3.5.2.2 *Spheres (Os Domos da Amazon)*

Um projeto que demonstra o quão atual e inovador pode ser um projeto com esta configuração é o que está sendo desenvolvido pelo escritório de arquitetura americano *NBBJ*, que já fez parcerias com outras grandes empresas do ramo da tecnologia como *Google*, *Samsung* e *Microsoft*, e que agora está trabalhando para a *Amazon*, que com apenas 22 anos de mercado é a maior varejista online do mundo, pioneira em compras e leitura de livros eletrônicos pela internet e computação em nuvem. Este novo projeto será no bairro *Denny Regrade*, bem na região central da cidade de Seattle/USA, abrange a revitalização do espaço corporativo e comercial da empresa com cerca de 1 milhão de metros quadrados em três blocos da cidade, incluindo a criação de um novo espaço corporativo, com três torres de escritórios de 37 andares, dois edifícios de escritórios de altura média e um complexo de 3 domos conectados, intitulados de ***Spheres***, que abrigará cerca de **3.000 espécies de plantas** (oriundas de 50 países), inclusive algumas destas ameaçadas de extinção, também com o intuito de preservação. (Figuras 176 e 177)

Figura 176 – Projeto das *Spheres* da NBBJ para Amazon



Fonte: www.nbbj.com/work/amazon. Acesso em 25 jul 2016.

Para refletir uma cultura focada na comunidade da *Amazon*, que atualmente corresponde ao maior empregador privado em Seattle, com mais de 20.000

funcionários e um investimento de mais de US\$ 4 bilhões na construção e desenvolvimento dos seus escritórios, já distribuídos em mais de 30 edifícios pela cidade, o novo projeto procura construir um bairro em vez de um campus, onde os princípios de design urbano desempenham um papel de destaque, com ênfase nas atividades no nível do plano que incluem um parque público para cães, pista de ciclismo nos 2 sentidos na *7th Avenue*, com entradas separadas para trabalhadores ciclistas, e a própria loja, que também será no térreo criando um bairro de uso misto em uma área urbana dominada por estacionamentos de superfície.

Figura 177 – Projeto da NBBJ para Amazon.

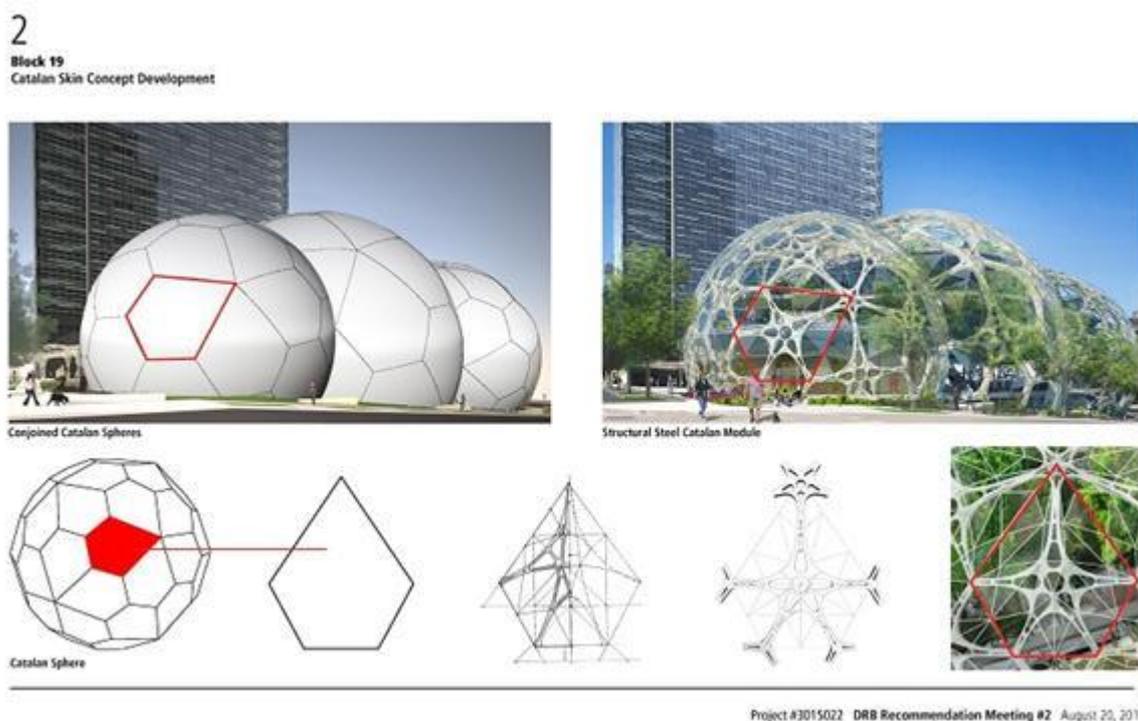


Fonte: www.nbbj.com/work/amazon. Acesso em 25 jul 2016.

O primeiro arranha-céu de 37 andares, chamado *Doppler*, foi concluído em 2015, mas a peça central da nova sede da Amazon será o projeto *Spheres* com visual que quebra o paradigma ortogonal vigente. Possui os mesmo princípios, mas difere um pouco do modelo de geodésicas tradicional, apresentando sistemas modulares com estrutura interna de aço soldado em um design orgânico baseada em pentágonos chamados pelos arquitetos de *catálogo* (**Figura 178**); e estrutura externa fechada envidraçada com uma malha triangular também baseada nestes pentágonos. Estas pequenas alterações da malha triangular tradicional das cúpulas de Buckminster, favorece o potencial que se dispõe hoje com novas tecnologias

(softwares, materiais, processos) para criar novas configurações destes módulos construtivos baseado nos mesmos princípios construtivos. Com previsão de conclusão para 2018, vão agir como estufas de alta tecnologia, com cerca de 30m de altura e 6mil m² de área, 5 andares com escritórios, salas de reunião, restaurantes, lanchonetes e muitas áreas verdes. **(Figura 179)**

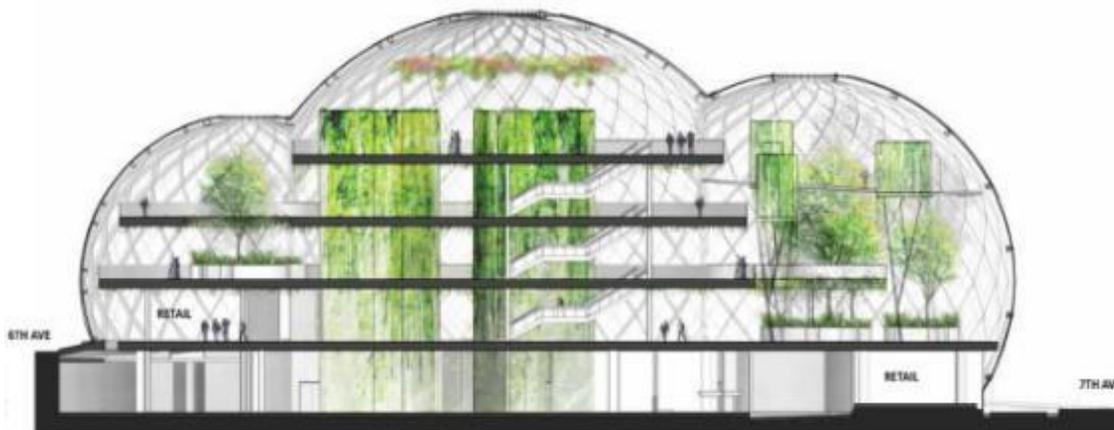
Figura 178 – Esquema dos pentágonos chamados *catalão* das *Spheres* para a empresa Amazon.



Fonte: www.nbbj.com/work/amazon. Acesso em 25 jul 2016.

"Nós queríamos que fosse icônico, uma estrutura que seria semelhante a um outro ícone da cidade, como o *Space Needle*, para os visitantes em Seattle... Seria um tesouro encontrado no bairro central da cidade.", informou *John Schoettler*, diretor da imobiliária global da Amazon em entrevista para a revista Times de New York em julho de 2016.

Figura 179 – Detalhe da secção lateral das *Spheres* para Amazon.



Fonte: www.nbbj.com/work/amazon. Acesso em 25 jul 2016.

A empresa quer usar a natureza no interior para inspirar os funcionários, permitindo que caminhem entre as copas de cerca de 40 árvores, dentre elas, uma figueira de 15 metros; reúnam-se com colegas em salas com paredes feitas de vinhas e almocem ao lado de um riacho artificial.

"A idéia era levar as pessoas a pensarem mais criativamente, talvez chegar a uma nova idéia que eles não teriam se fossem apenas em seu escritório", comenta *Dale Alberda*, o arquiteto chefe do projeto na NBBJ. Muitas empresas de tecnologia estão testando maneiras de tornar os locais de trabalho cada vez mais propícios à criatividade, seja com playgrounds, piscinas de bolas, mesas de pingue-pongue e por que não, com um maravilhoso jardim? (**Figura 180**)

Figura 180 – Detalhes da maquete das *Spheres* da Amazon evidenciando os espaços verdes.



Fonte: www.nbbj.com/work/amazon. Acesso em 25 jul 2016.

Dessa forma, este é um projeto que visa também o bem estar dos funcionários, já que pesquisas apontam que a exposição à natureza ocasiona diminuição nos níveis de estresse e isto ajuda a pensar mais criativamente, colaborando com a produtividade dos funcionários. Por enquanto, as *Spheres* só serão acessíveis apenas para os empregados da *Amazon*, mas com o sucesso do projeto, a empresa prevê, o acesso à passeios públicos. **(Figura 181)**

Figura 181 – Imagem renderizada de uma vista do interior das *Spheres* da Amazon.



Fonte: www.nbbj.com/work/amazon. Acesso em 25 jul 2016.

Jeff Bezos (CEO da *Amazon*) pretende suprir também a uma já existente carência de mais áreas de vegetação na região do centro, incluindo-as em tetos verdes em cima dos demais edifícios da empresa e em áreas abertas ao público ao redor das *Spheres*, visando integrar a empresa com o bairro. A **Figura 182** abaixo com imagens tiradas em agosto deste ano, demonstram o avanço destas instalações.

Figura 182 – Projeto da NBBJ para Amazon.



Fonte: Ian C. Bates para o *The New York Times* 11/07/2016.

O que se percebe é que o escritório da NBBJ procurou trabalhar em estreita colaboração entre a *Amazon* e a cidade de Seattle para criar uma comunidade de

edifícios que se traduzam em um ambiente urbano adequado para os empregados da empresa, seus vizinhos e os cidadãos de Seattle. Observa-se também que, inserir configurações como as dos domos cria uma alternativa de construção urbana espacial mais sustentável, que favorece as relações sociais, resgata o contato com o plano e também com a natureza, em detrimento aos prédios vigentes. (**Figura 183**)

Figura 183 – Parte da Planta do Projeto da NBBJ para Amazon.



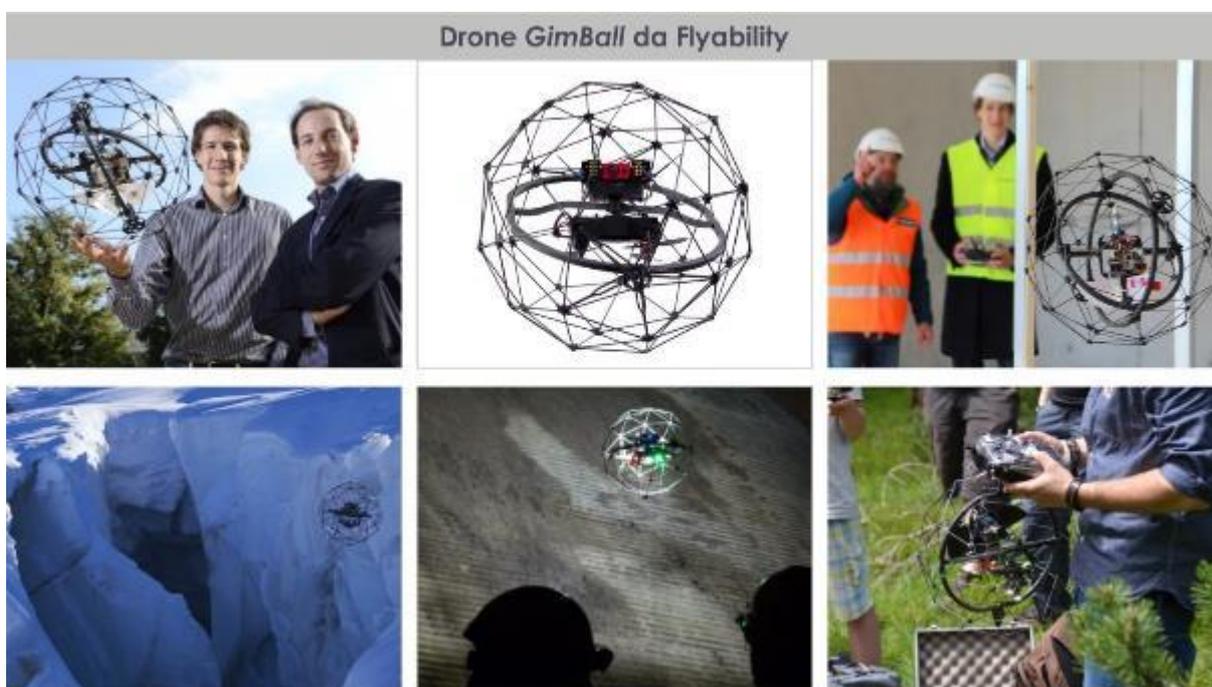
Fonte: www.nbbj.com/work/amazon. Acesso em 25 jul 2016.

3.5.3 APLICAÇÕES NO DESIGN DE PRODUTO

Com uma estética interessante e geometria marcante, as geodésicas também inspiram diversos projetos de design de produtos, em que novos materiais e processos ampliam as possibilidades de uso. Em alguns casos, inclusive, observa-se que esta forma otimiza o desempenho e eficiência do produto, como o exemplo do drone **GimBall** da empresa suíça *Flyability*. Os drones são capazes de captar imagens em pleno vôo, mas nem todos os lugares são de fácil acesso e os sensores podem não funcionar corretamente, provocando colisões e a perda do equipamento. Para solucionar estes transtornos, o *Gimball* apostou na esfera geodésica em fibra de carbono leve e flexível, esta forma representa uma inovação, pois permite que o drone absorva impactos, role através de qualquer terreno, trazendo ainda segurança, evitando possíveis danos à vítimas que poderiam colidir com as hélices do objeto.

Não é à toa que o projeto é vencedor do concurso “*Drone for good*” realizado nos Emirados Árabes em 2015, e levou um prêmio de US\$ 1 milhão, que a empresa usará para continuar a desenvolver o produto adicionando mais funções como: imagens em infravermelho e melhoramento da interface dedicada para busca e salvamento de vítimas em áreas de acidentes. Atualmente o drone já é usado para obter imagens em locais de difícil acesso, mas ainda há potencial para melhorar as condições de voo e duração da bateria para que possa ajudar ainda mais no resgate de vítimas, na identificação de vazamentos químicos, na avaliação de estruturas danificadas e na inspeção de construções perigosas. Este é um excelente exemplo que soube aproveitar bem as vantagens da geometria da geodésica de leveza e resistência estrutural, que resultou claramente numa melhora significativa para este tipo de produto. **(Figura 184)**

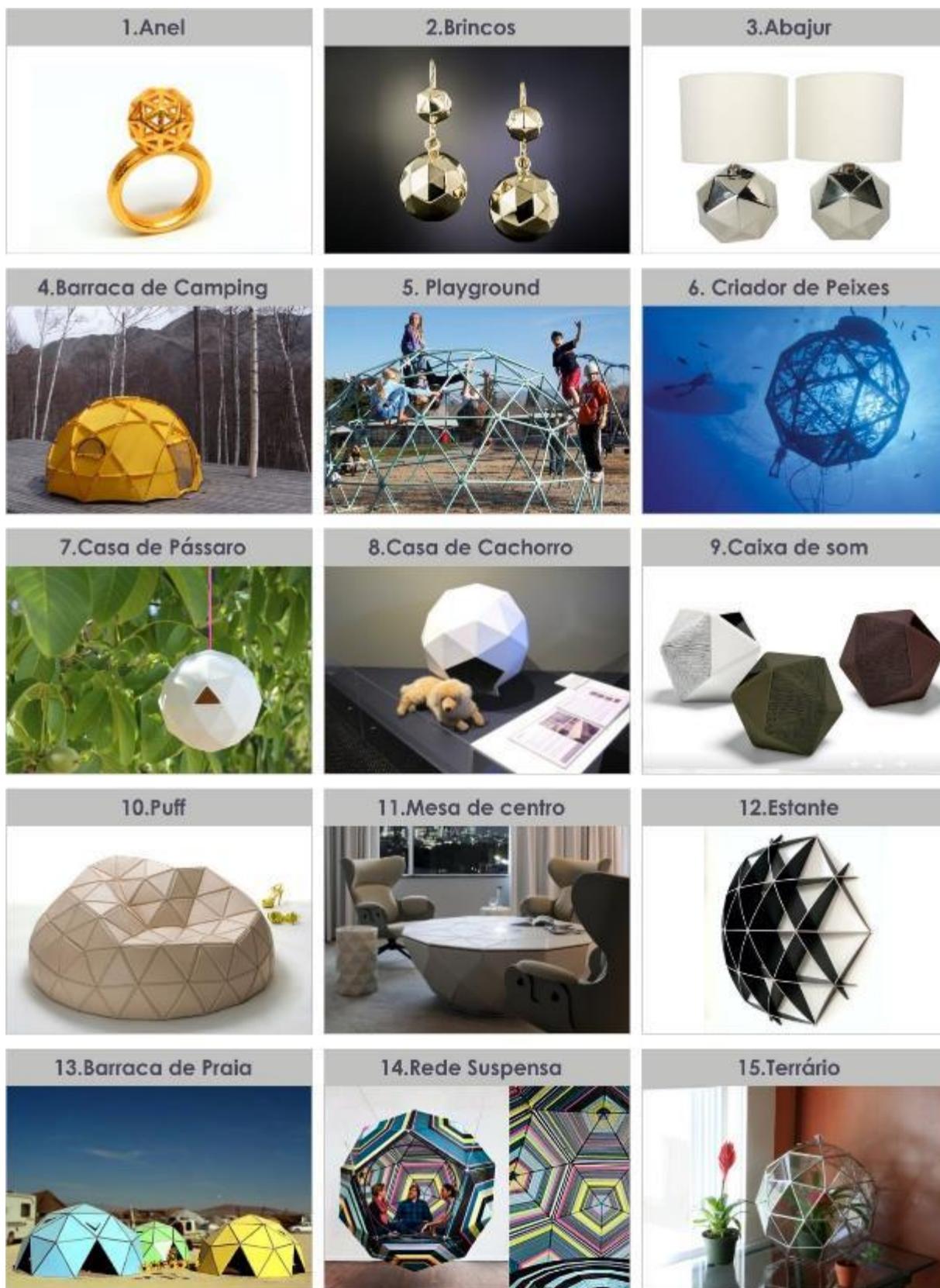
Figura 184 – GimBall, drone da empresa Flyability em forma de geodésica capaz de acessar áreas remotas.



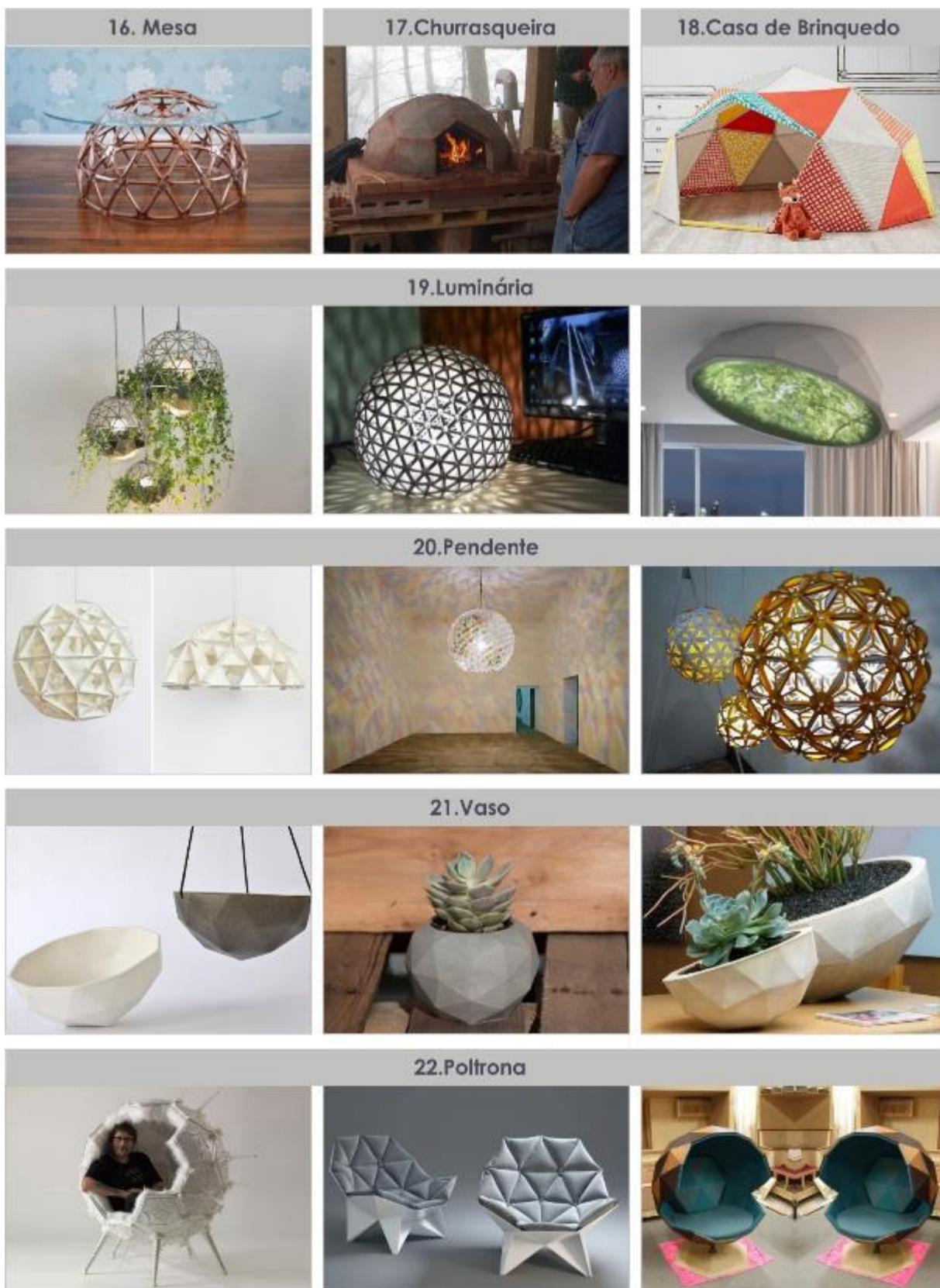
Fonte: <http://www.flyability.com/elios/>. Acesso em 25 jul 2016.

Isto demonstra que existe um grande potencial de uso desta forma no design, ampliando a sua atuação para além da construção arquitetônica. Além deste exemplo, existem muitos outros produtos interessantes no mercado com referência na configuração geodésica, como observa-se nas **Figuras 185 e 186**.

Figura 185 – Exemplos de produtos com configuração geodésica



Fonte: a autora, do banco de imagens do laboratório do BIODESIGN.

Figura 186 – Exemplos de produtos com configuração geodésica

Fonte: a autora, do banco de imagens do laboratório do BIODESIGN.

4 EXPERIMENTO: AS GEODÉSICAS COMO ESTRATÉGIA DE BIODESIGN

Devido a grande relevância e a todas as vantagens inerentes a configuração das cúpulas geodésicas encontradas na pesquisa, é justificável o uso destas como estratégia de Biodesign, visto que inserem em si vários princípios que estão relacionados com a Biomimética, que pela própria geometria já é traduzido como uma estrutura econômica em matérias e energia.

Uma das atividades fundamentais do *Biodesign* referida na pesquisa no capítulo 2 na parte de fundamentos, trata da investigação e experimentação básica, que partem da observação de fenômenos naturais sem, necessariamente, ter presentes aplicações utilizáveis posteriormente em projetos específicos. A ideia fundamental desta opção é a de criar um banco de dados que alimente o projeto, não somente em soluções técnicas, mas também, em aspectos metodológicos.

Desta forma, esta parte trará um pequeno experimento para produzir duas propostas diferentes de cúpulas geodésicas baseadas na analogia simbólica de duas referências naturais sem o intuito de utilização num projeto em si, mas apenas com caráter investigativo para justificar o potencial de realização de novas configurações da geometria geodésica, que de acordo com as tecnologias atuais são facilitadas pelo design paramétrico e pela prototipagem rápida.

4.1 Sistematização da Estratégia

A estratégia para o desenvolvimento dos modelos baseados na configuração geodésica foi através da ferramenta CAD para modelagem 3D já mencionada no capítulo 2, o *Grasshopper*, uma interface de programação visual para a criação de formas no software de modelagem tridimensional *Rhino3D*, em que a grande inovação dessa ferramenta consiste em facilitar o acesso para que profissionais, que não possuem bases de programação, possam desenvolver formas e estruturas visuais complexas, como as que existem na natureza.

Nesta parte, o trabalho contou com a parceria do Laboratório do Departamento de Expressão Gráfica da UFPE, através do professor Pedro Aléssio, doutor em Informática pela *Conservatoire National des Arts et Métiers* (CNAM-França), colaborando com a modelagem no *Grasshopper*.

Desta forma, foram desenvolvidas três cúpulas geodésicas *Classe I* derivadas do icosaedro com frequência **4v**. Uma com a mesma malha triangular apenas para estudo e mais 2 modelos diferentes com referência biológica. As descrições a seguir, visam demonstrar de maneira breve os passos técnicos executados no programa.

Para o primeiro modelo original da geodésica, como de regra, foi usado o icosaedro como base, para gerá-lo foi utilizado o plug-in **WeaverBird** para *Grasshopper*, que pode gerar diretamente uma malha do polígono regular de maneira automática, sem a necessidade de cálculos prévios. Este componente recebe como parâmetro de entrada um plano de base e um valor usado para calcular o raio, que neste caso específico se instituiu 9cm.

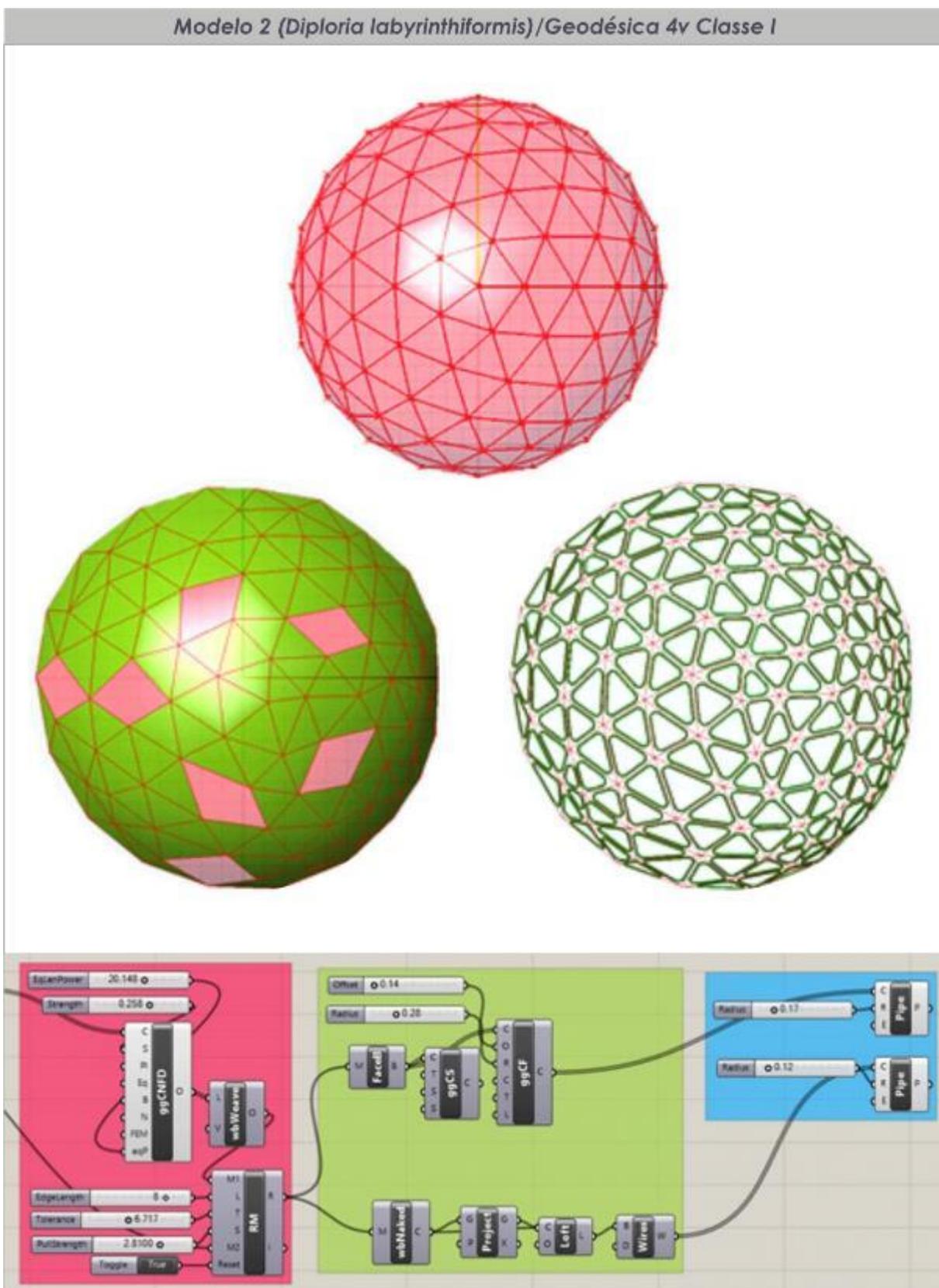
O plug-in *Weaverbird* possui também um componente intitulado **Split Triangles subdivision** que divide as faces desse icosaedro em triângulos equiláteros menores. Além destes componentes, o *Weaverbird* disponibiliza o componente **wbEdges** que separa as arestas das faces tridimensionais em segmentos individuais. Então, foram selecionadas as extremidades dos segmentos com o componente **END** para serem em seguida projetados em uma esfera. Para isto, a esfera foi criada com o mesmo centro e com o raio maior que o icosaedro, nela foram projetados os pontos relativos as extremidades dos segmentos criados anteriormente. Os componentes **Brep Closest Point** projetam o conjunto de pontos que representam os extremos dos segmentos em uma superfície. Esses pontos são recebidos como dados de entrada assim como a superfície esférica. Desses pontos projetados são criadas linhas que ligam esses pontos formando a cúpula geodésica original. A **Figura 187** apresenta o *script* do processo e algumas imagens do sólido criado.

As referências naturais usadas para a analogia simbólica dos dois modelos em questão foram duas espécies de corais, *Diploria labyrinthiformis* e o *Palythoa caribaeorum*, animais marinhos celenterados em que foram identificados um padrão modular interessante de ser traduzidos nestes modelos. Essa escolha não foi baseada num estudo biomimético destes animais, pois a intenção não foi de fazer um projeto, mas apenas em caráter de investigação e experimentação de novos padrões de geodésicas com referências naturais. Dessa forma, foi utilizada apenas a técnica de analogia simbólica, traduzindo nestas, algumas das características geométricas destes animais.

No modelo baseado no coral cérebro (*Diploria labyrinthiformis*), como o seu nome sugere, o seu desenho sinuoso curvo sobressalente é uma característica que dá identidade a este animal e foi esta a inspiração para tradução, mas ao invés de fazer uma replicação direta desse desenho sinuoso irregular, o que se gerou foram triângulos mais orgânicos com cantos arredondados de espessuras cilíndricas proporcionais a espessura do aspecto do coral, pois o que se pretendia era dar modularidade e leveza ao modelo, sem fugir das características da geometria da geodésica.

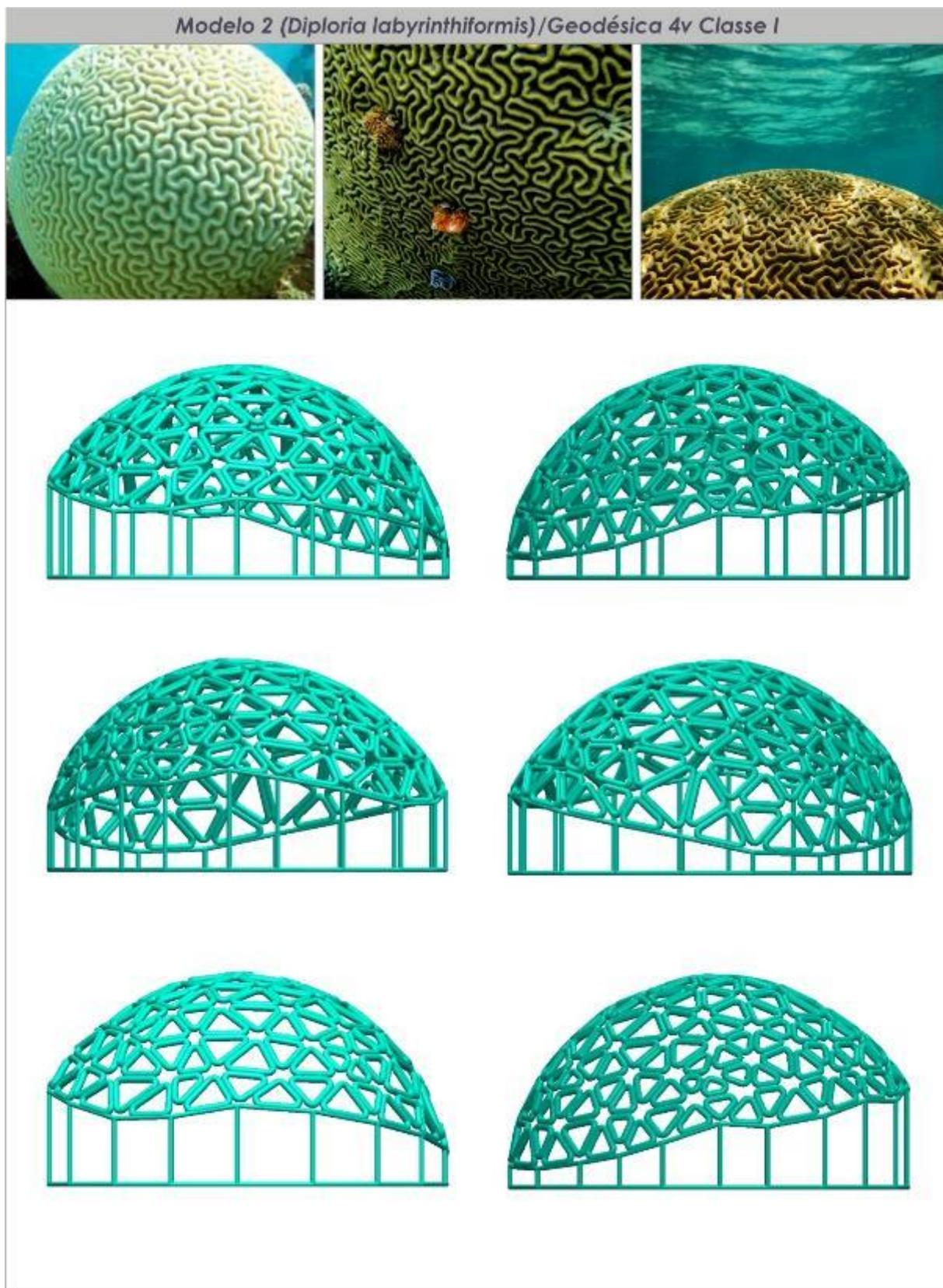
Então, a partir da cúpula original **4v Classe I** construída foram projetados os pontos em uma esfera, e em seguida usado o plug-in **BullAnt** da **Geometry Gym**, mais especificamente o **ggCurveNetworkForceDensity**, para simular diferentes tensões na malha dessa cúpula. O segundo Componente foi o **Remesh** do simulador de física para o *Grasshopper* chamado **kangooroo**. Ele projeta os vértices da malha em uma superfície de maneira orgânica. A partir disso foram criadas células internas à malha com um arredondamento dos triângulos e quebrando de forma branda o posicionamento dos nós para gerar uma aparência mais orgânica à cúpula. Nesta parte também foram criadas colunas de sustentação usando os limites da parte inferior do domo e uma projeção no solo. Por fim foram usados os componentes que criam tubos em torno das linhas para dar espessura à estrutura, evidenciando a tradução da inspiração com a referência natural. Nas **Figuras 188, 189 e 190** são apresentados o *script* da programação no *Grashopper* e imagens da referência e do modelo gerado.

Figura 188 – Script da criação do modelo 2 no Grasshopper.



Fonte: Elaborado pela autora.

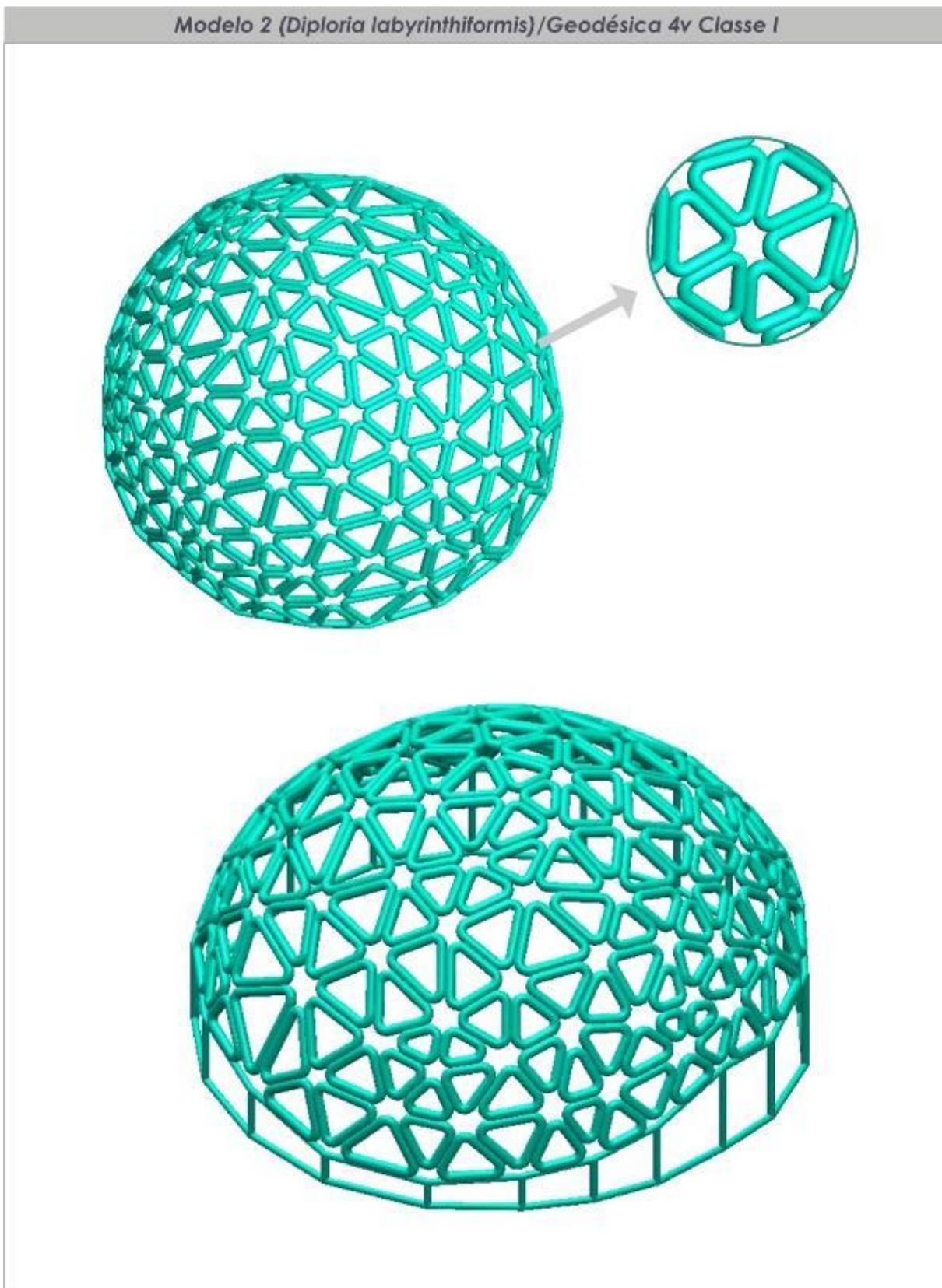
Figura 189 – Referência natural (*Diploria labyrinthiformis*), vistas laterias (dir/esq), frontal, posterior e secção (dir/esq) do modelo 2.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 190 – Vistas superior, isométrica e detalhe do modelo 2.

Modelo 2 (Diploria labyrinthiformis)/Geodésica 4v Classe I

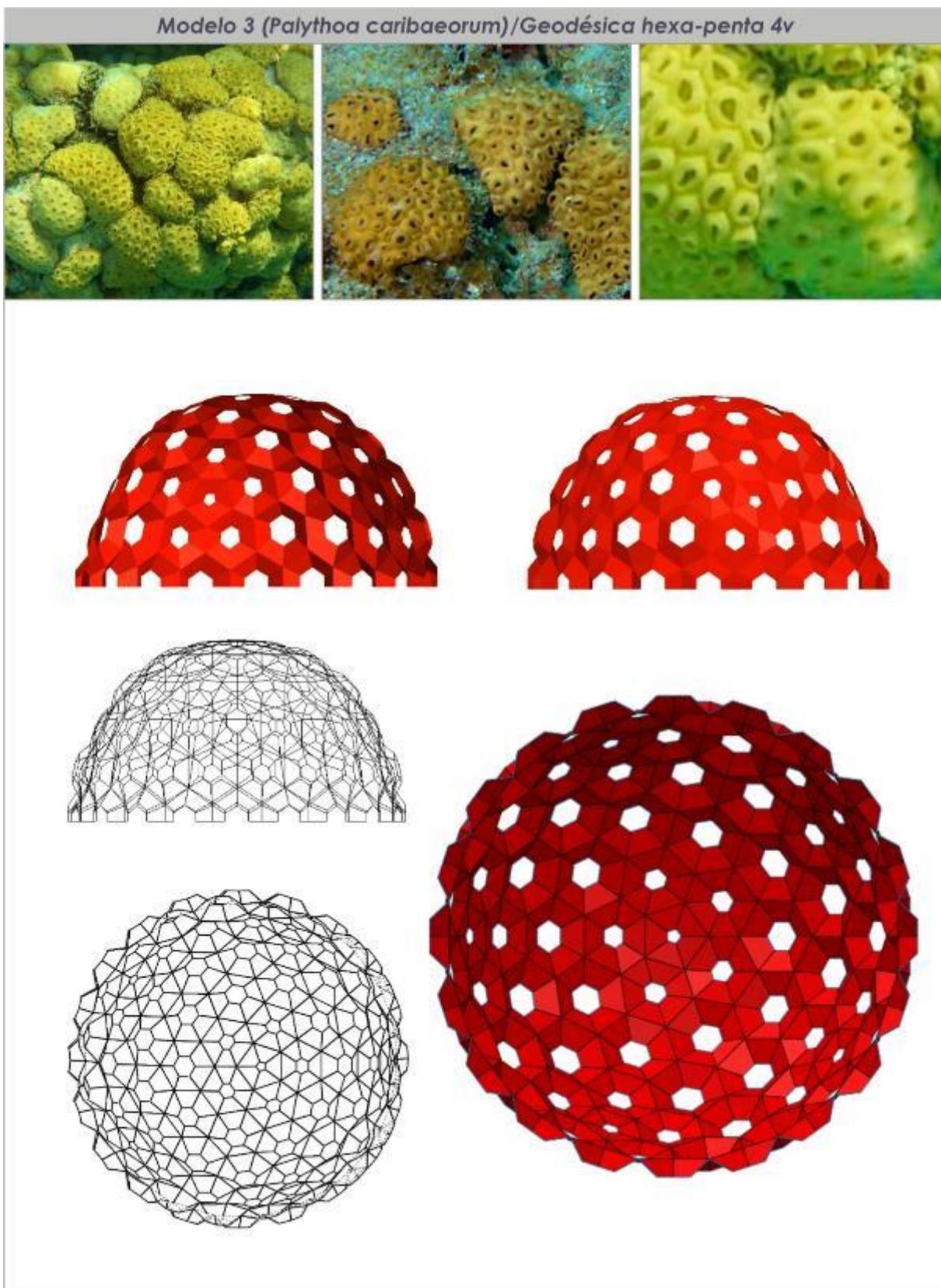


Fonte: Elaborado pela autora.

No último modelo com referência no coral (*Palythoa caribaeorum*), a característica que traduz o animal é esse padrão de múltiplos componentes cilíndricos aglomerados apresentando orifícios com diferenciação de tamanhos de aberturas e alturas. Uma característica da aglomeração de elementos esféricos, cilíndricos e elipsoides é que resultam numa malha visual hexagonal, e por isto, a analogia simbólica utilizada aqui é traduzida desta forma e o modelo em questão será uma geodésica hexa-penta também de frequência **4v** (o equivalente a uma geodésica de malha triangular **8v**); em que serão feitos orifícios de aberturas também com diferenciação de alturas e aberturas, proporcionando uma característica mais orgânica ao modelo.

Para isto também foi tomado como base o primeiro modelo original de geodésica **4v Classe I**. A partir dele foram selecionados os centros dos triângulos dessa cúpula original para criar uma nova cúpula com novo padrão das faces graças ao componente **Facet Dome**, algoritmo que preencheu a superfície de hexágonos e pentágonos, na mesma disposição da geodésica hexa-penta **4v**. A partir dele, foi duplicada sua malha para criar uma superfície adjacente a estrutura. Com os vértices criados anteriormente no centro dos triângulos da cúpula original, foi criado um plano direcionado pelas normais das faces, em que foi inserida uma cópia reduzida das faces hexa/pentagonais junto aos vértices. Essas cópias foram movidas para fora da superfície original e em seguida preenchidas com uma superfície graças ao comando **Loft**, o que deu volume aos elementos aglomerados. Para finalizar, se deu o comando de diferença de altura e abertura dos seus orifícios. Nas **Figuras 191 e 192** são apresentados o *script* da programação no Grashopper e imagens da referência e do terceiro modelo gerado.

Figura 191 – Referência natural (*Palythoa caribaeorum*), vistas laterais (dir/esq) e superior, desenho em linhas (lateral e superior) do modelo 3.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 192 – Vistas superior, isométrica e detalhe do modelo 3.



Fonte: Elaborado pela autora.

A ideia aqui não foi de estabelecer uma nova proposta para a configuração geodésica e sim de confirmar a sua vantagem construtiva, alterando o padrão, mas mantendo as mesmas características construtivas. O intuito foi o de demonstrar que é possível o uso de estratégias em Biodesign para gerar esses novos modelos de geodésicas incorporando seus aspectos sustentáveis, como modulação e economia de materiais, como previa Fuller, e somando nestas a tendência por um design com referências mais orgânicas e naturais, incentivando a utilização destas estruturas, demasiadamente fortes, em aplicações específicas de soluções, seja para arquitetura ou para a criação de novos artefatos.

5 CONCLUSÃO

Por fim, o que se pode constatar é que sem dúvida alguma, em seu tempo, Fuller utilizou os princípios vigentes da Biomimética, mesmo antes de terem sido estabelecidos, pois a sua solução para as geodésicas partiu de estudos sobre os princípios construtivos na natureza (natureza como *modelo e mentora*), visando para a sua criação, o uso eficiente de recursos, evitando desperdício de material e energia, contemplando uma melhoria na habitação humana, para fazer um abrigo mais confortável, eficiente e economicamente acessível a um maior número de pessoas, o que comprova a utilização dos princípios da natureza também como *medida*.

O princípio de “fazer mais com menos” encontrado nas soluções ótimas de economia de materiais e energia para as construções na natureza também está inserido no cerne da filosofia de Buckminster Fuller, cuja tradução maior deste princípio, dentre as suas inúmeras invenções, são justamente as suas cúpulas geodésicas, estruturas consideradas as mais eficientes (em trabalho, materiais e energia) para se englobar um espaço, justamente por possuir o maior volume interno com a menor cobertura externa possível por causa da configuração esférica, padrão também encontrado na natureza, inspiração para a concepção, acumulando inúmeras vantagens pela geometria, tais como: leveza, força, resistência, fluxo de ar melhorado no interior, qualidade acústica, temperatura mais uniforme, ergonomia aerodinâmica, economia de materiais, de energia e ampla variedade de materiais disponíveis para construção, dentre outras.

Como pensa Edmondson (2007), os princípios por trás da cúpula geodésica não são novos, eles representam as eternas leis da natureza. A aplicação desses fatos geométricos num sistema de construção foi que representou um fator de inovação, e representa grande potencial de aplicações, devido as muitas vantagens já discutidas. A tecnologia possibilita, através de softwares paramétricos, que se consiga traduzir formas mais orgânicas e facilitam a concepção de novos modelos baseados na configuração geodésica, ampliando ainda mais as possibilidades de novas aplicações.

De fato, estas estruturas correspondem a um exemplo bem especial de aplicação Biomimética, e comprovam que embora existam outros caminhos, projetar

se guiando pela natureza, contribui para se encontrar soluções ótimas como as de Fuller, e de tantos outros exemplos biomiméticos citados nesta dissertação, para que se consiga resolver os problemas humanos em um cenário de complexidade e de urgência em sustentabilidade.

Todos os conceitos, métodos e aplicações do levantamento teórico de Biomimética demonstram o quanto são significativas estas oportunidades de novas descobertas neste sentido e como é importante estimular este pensamento, seja nas escolas de Design, como feito pelo CRIED, no laboratório do BIODESIGN e na UCG, e porque não, até mesmo no ensino fundamental?

É bem verdade que se tem avançado neste campo, mas ainda é pouco do que se deveria, novas pesquisas no sentido de investigar métodos mais eficientes e práticos de aplicação biomimética podem ser formuladas, métodos que auxiliem esta interpretação com foco mais sustentável, ou que ampliem parâmetros e técnicas para esta tradução com o mundo natural.

Sobre as geodésicas são vários os possíveis desdobramentos, inclusive de pesquisas mais profundas sobre estas vantagens levantadas, do ponto de vista de buscar mais dados técnicos, econômicos, energéticos, testes de laboratório, testes relativos ao tempo das construções, transporte, montagem etc. Da mesma forma, há um vasto campo para pesquisas de novos materiais e processos com foco em sustentabilidade para estas estruturas, assim como há ainda muito a ser feito em relação a sugestões de novas aplicações, principalmente no design de artefatos. Não esquecendo aqui que há ainda a possibilidade de continuidade da breve experimentação para gerar novos padrões para as geodésicas, através de diferentes módulos construtivos, incorporando a complexidade de outros fatores para propor aplicações reais que sejam soluções passíveis de implementação a nível de projeto, estando de acordo um cenário sustentável.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, Gabriela R. **Biomimética no Design: Abordagens, limitações e contribuições para o desenvolvimento de produtos e tecnologias**. 2014. 106 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado de Minas Gerais, Belo Horizonte, Programa de Pós-Graduação em Design.

ANDRADE, Mateus G. **Articulações: Análise de estruturas naturais e brinquedos como estudo de caso**. 2º Congresso Internacional de Pesquisa em Design, Rio de Janeiro, 2003.

ARAÚJO, Rodrigo B. **Biomimética e artefatos para ambientes aquáticos: Estratégias de leveza e resistência inspiradas na estrutura celular do Agave**. 2015. 115 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Departamento de Design do Centro de Artes de Comunicação.

ARRUDA, Amilton. **Bionic Basic: Verso un nuovo modello di ricerca progettuale**. 2002. 175 p. Tese (doutorado) – Univesidade Politécnico de Milão, Dottorato di Ricerca in Disegno Industriale e Comunicazione Multimediale.

_____. **Verso una didattica nel campo biônico: ipotesi per lo sviluppo di una strategia progettuale**. 1993. 185 p. Dissertação (mestrado) – Istituto Europeo di Disegn di Milano, Centro Ricerche in Strutture Naturali.

_____. **Bionica e ou Biodesign**. Milano: Politecnico di Milano, 2000.

_____. **Organismi viventi come modelli tecnologici**: Milano: Politecnico di Milano, 2000.

BALDWIN, J. **Bucky works: Buckminster Fuller's ideas for today**. New York: John Wiley & Sons, 1996.

BARONI, Daniele. **La forma de design, rappresentazione della forma nel linguaggio del basic design**. Bologna: Zanichelli, 2011.

BAUMEISTER, Dayna; BENYUS, Janine; DWYER, Jamie; RITTER, Sherry; TOCKE, Rose. **Biomimicry resource handbook, a seed bank of knowledge and best practices**. Missoula MT/USA: Biomimicry 3.8, 2012.

BENYUS, J. M. **Biomimética: Inovação inspirada pela natureza**. 6ª ed. São Paulo: Ed. Pensamento- Cultrix, 1997.

BOMBARDELLI, Carlo. **Come nasce un prodotto biônico**. Milano: Istituto Europeo di Design, 1985.

BONSIEPE, G. **Diseño industrial**. Madri: Alberto Corazón Editor, 1978.

BLUCHEL, Kurt.G. **Biônica: Como podemos usar a engenharia da natureza a nosso favor**. 1 ed. São Paulo: PHL, 2009.

BROECK, F. V. **O uso de analogias biológicas**. Revista Design e Interiores. São Paulo: n.15, p.97-100, 1989.

_____. **Biodesign: Uma filosofia de projeção**. Cadernos de Textos em Biodesign, Caderno 2/ Biônica. Laboratório de Biodesign da UFPE. Recife, 2003.

CAMPOS, Daniel Malagute. **Design de estruturas reticuladas de bambu geradas a partir de superfícies mínimas**. 2009. 212p. Dissertação (Mestrado) Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Departamento de Design.

CARDOSO, Rafael. **Design para um mundo complexo**. São Paulo: Cosac Naify, 2012.

COOK, Theodore Andrea. **The curves of life**. New York: Dover, 1979.

CRUZ, André J. A. B. **Arquitetura [bio]lógica, uma análise da obra de Frei Otto**. 2012. 229p. Dissertação de Mestrado Integrado em Arquitectura Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, Departamento de Arquitectura.

DAVES, Tom. **Geodesic Domes**. Disponível em: <<http://www.geometer.org/mathcircles>>. Escrito em 2004 e acesso em 20 de fevereiro de 2016.

DETANICO, F.B. **Sistematização de princípios de solução da natureza para a aplicação no processo criativo do projeto de produtos**. 2011. 191 p. Programa de Pós-Graduação em Design, Faculdade de Arquitetura, Escola de Engenharia, Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

_____. TEIXEIRA, R.G., SILVA, T.K. **A Biomimética como método criativo para o projeto de produto**. Design e Metodologia 2, Pgdesign UFRGS, Porto Alegre, 2010.

DIAS, Eduardo. **A natureza no processo de design e no desenvolvimento do projeto**. São Paulo: Senai, 2014.

DI BARTOLO, Carmelo. **Strutture naturali e modelli bionici**. Milão: Departamento of Industrial Design, Istituto Europeo di Design, 1981.

DINIZ, Estruturas Geodésicas: **Estudos retrospectivos e proposta para um espaço de educação ambiental**. 2006. 146p. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Departamento de Engenharia Civil.

DOCZI, György. **O poder dos limites: harmonias e proporções na natureza, arte e arquitetura**. São Paulo: Mercuryo, 1990.

DOMINGUES, Eduardo; OLIVEIRA, Cláudia. **Interoperabilidade no processo de produção de edificação com geometria não convencional**. VII Encontro de Tecnologia da Informação e Comunicação na Construção. Edificações, Infra-estrutura e cidades: Do BIM ao CIM. Recife, 2015.

EDMONDSON, Amy C. **A Fuller explanation: the synergetic geometry of R. Buckminster Fuller**. Pueblo: EmergentWorld, 2007.

EINSTEIN, A. **The World As I See It**. New York: Philosophical Library, 1949. 5 p.

ENGEL, Heino. **Sistemas de estruturas**. São Paulo: Hemus, 1981.

FERNANDES, Mara. **Biomimética como conceito para uma embarcação na Ria de Aveiro**. 2012. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Aveiro, Aveiro/Portugal, Departamento de Design.

FORD, E. **The details of modern Architecture**. Cambridge: The MIT Press, 1996.

FORLANI, M.Cristina. **Materiali strutture forme**. Firenze: Alinea, 1983.

FORNIÉS, Ignacio López. **Modelo metodológico de Diseño conceptual con enfoque biomimético**. 2012. 319p. Tese (Doutorado) – Universidad de Zaragoza, Zaragoza/España, Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación.

FULLER, Richard Buckminster. **Critical path**. New York: St. Martin's Press, 1981.

- _____ **Designing a new industry**. Wichita: Fuller Research Foundation, 1946.
- _____ **Manual de instruções para a nave espacial Terra**. Porto: Via Optima, 1998.
- _____; APPLEWHITE, E.J. **Synergetics: Explorations in the geometry of thinking**. New York: Macmilian, 1975.
- _____ **Synergetics 2: Further explorations in the geometry of thinking**. New York: Macmilian, 1979.
- _____; MARKS, Robert W. **The dymaxion world of Buckminster Fuller**. New York: Doubleday Anchor Book, 1973.
- _____ **Utopia or oblivion: The prospects for humanity**. New York: Bentam Books, 1969.
- _____ **"Geodesic Dome"**, Patent #2,682,235, 1954.
- GHYCA, Matila. **The Geometry of Art and Life**. New York: Dover, 1977.
- GORDON, William. **Sinética: El desarrollo de la capacidad creadora**. México: Herreros Hnos. S. A., 1965.
- GORMAN, John M. **Buckminster Fuller: Designing for mobility**. Milano: Skira Editore S.p.A., 2005.
- GRUBER, P. **Biomimetic in Architecture [Architekturbionik]**. In: **Biomimetics materials, structures and processes - examples, ideas and case studies**. Berlim: Springer-Verlag, 2011.
- HAECKEL, Ernest. **Art Forms from the Ocean**. New York: Prestel, 2005.
- HAYS, K. M.; MILLER, D. **Buckminster Fuller: Starting with the Universe**. New Haven: Whitney Museum of Art, NY. Yale University Press, 2008.
- HENCH, John; PELT, Peggy Van. **Designing Disney: Imagineering and the art of the show**. Orlando: Disney Editions, 2009.
- HEMENWAY, Priya. **O código secreto: a fórmula misteriosa que governa a arte, a natureza e a ciência**. Koln: Evergreen, 2010.

HSUAN-AN, Tai. **Desenho e organização bi e tridimensional da forma**. Goiânia: Ed. Da PUC-Goiás, 2010 (2ª Ed.)

_____. **Sementes do cerrado e design contemporâneo**. Goiânia: Ed. da UCG, 2002.

HUNTLEY, H.E. **The divine proportion, A study in mathematical beauty**. New York: Dover, 1970.

LEFAIVRE, Liane; TZONIS, Alexander. **Santiago Calatrava**. São Paulo: Folha de São Paulo, 2011.

LAWLOR, Robert. **Sacred Geometry, philosophy and practice**. London: Thames & Hudson, 1982.

LIUA, Kesong Liua, JIANG, Lei. **Bio-inspired design of multiscale structures for function integration**. *Nano Today*. n 6, p. 155—175. Elsevier, 2011.

LÖBACH, Bernd. **Design Industrial: Bases para configuração dos produtos industriais**. Tradução Freddy Van Camp. Rio de Janeiro: Edgard Blücher, 2001.

LOTUFO, Vitor Amaral; LOPES, João Marcos de Almeida. **Geodésicas & Cia**. 1ª ed. São Paulo: Projeto Editores Associados Ltda., 1981.

LOVEGROVE, Ross. **Supernatural: The work of Ross Lovegrove**. New York: Phaidon, 2004.

LOZANO, Pedro Crespo. **El Diseño natural, aproximación histórica, metodologías, Aplicación y consecuencias**. 1994. 384p. Tese (doutorado) – Universidad Complutense de Madrid, Madrid, Facultad de Bellas Artes.

KENNER, Hugh. **Geodesic Math and How to Use It**. University of California Press Ltd., 1976.

KITRICK, Christopher J. **Geodesic Dome**. *Topologie structurale # 1*, 1985.

KRAUSE, Joachim; LICHENSTEIN, Claude, ed. - **Your private sky: R. Buckminster Fuller, the art of design science**. Baden : Lars Müller Publishers, 1999.

_____. **Your private sky: R. Buckminster Fuller, discourse**. Baden : Lars Müller Publishers, 2001.

MANDELBROT, Benoît B. **La geometria della Natura, Sulla Teoria dei Frattali**. Roma-Napoli: Theoria, 1989.

MANZINI, Ezio; VEZZOLI, Carlo. **O desenvolvimento de produtos sustentáveis: os requisitos ambientais dos produtos industriais**. São Paulo: Edusp, 2002.

MARCOLLI, Attilio. **Teoria del campo 2, corso de teoria della visione**. Firenze: Sansoni, 1985.

MIRANDA, José; ASSIS, Thiago; MOTA, Fernando; ANDRADE, Roberto; CASTILHO, Caio. **Geometria fractal: propriedades e características de fractais ideais**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 30, n. 2, 2304 (2008).

MARTINS JÚNIOR, Albano Soares. **MontaDesmontaRemonta: Significação dos Sistemas de Montagem**. 2008. 137p. Dissertação (Mestrado), Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Paulo, Departamento de Arquitetura.

MONTÙ, Aldo. **La escoperta del pentagono**. Bologna: Zanichelli, 1981.

_____ **Modelli di Bionica**. Bologna: Zanichelli, 1985.

_____ **$\Phi = 1,618033...$ Sezione Aurea e Forme Pentagonale**. Bologna: Zanichelli, 1980.

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

MUNARI, Bruno. **Das coisas nascem coisas**. São Paulo: Martins Fontes, 1981.

OTTO, Frei. **IL 33 Radiolaria: Shells in nature and technics II**. Stuttgart: Institut fur leichte Flachentragwerke, 1990.

_____ **Architecture et Bionique – constructions naturelles**, Denges: Editions Delta & Spes SA, 1982.

PAPANEEK, Victor. **Structure in nature is a word**. New York: Batam books inc., 1971.

_____. **Design for the real world: human ecology and social change**. London: Thames & Hudson, 2004.

PAWLEY, M. **Buckminster Fuller**. London: Trefoil Publications, 1990.

PEARCE, Peter. **Structure in nature is a strategy for Design**. Cambridge: MIT Press, 1978.

PEREIRA, Inês, V.M. **Arquitetura Biônica, narrativas de analogias biológicas na Arquitetura**. 2013. 171p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Arquitetura, Porto, Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto.

PÉREZ, R. López. **Manual de criatividade**. Santiago: Bravo e Allende, 1999.

PICADO, Jorge. **A beleza matemática das conchas marinhas**. Coimbra: Centro de Matemática da Universidade de Coimbra, 2006. Disponível em: <<http://mat.uc.pt/~picado/conchas/index.html>>. Acesso em 8 de agosto de 2016.

PRODANOV, Cleber; FREITAS, Ernani. **Metodologia do trabalho científico** [recurso eletrônico]: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico. – 2. ed. – Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

QUEIROZ, Natália. **Artefatos geradores de microclima: biomimética e parametrização na busca por soluções bioclimáticas para clima quente e úmido**. Recife (PE), 2015. 137p. Dissertação de Mestrado (Curso de Pós-Graduação em Design) – Universidade Federal de Pernambuco.

RAMOS, Jaime. **A Biônica aplicada ao projeto de produtos**. 1993. 132 p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Florianópolis, Universidade Federal de Santa Catarina.

RATTES, Rafael. **Biomimética aplicada ao Metadesign: Geração de máquinas abstratas com base no estudo do mandacaru**. 2015. 96 p. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Departamento de Design do Centro de Artes de Comunicação.

SÁ, Ricardo. **Edros**. São Paulo: Projeto, 1982.

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

SCARPA, Giorgio. **Modelli di bionica**. Bologna: Zanichelli, 1985.

SIEDEN, Lloyd. S. **Buckminster Fuller's universe: His life and work**. Cambridge: Perseus Publishing, 2000.

_____. **Buckminster Fuller's universe: An appreciation**. Cambridge: Plenum Press, 1989.

SOARES, M. A. R. **Biomimetismo e Ecodesign: Desenvolvimento de uma ferramenta criativa de apoio ao design de produtos sustentáveis**. Lisboa. Universidade Nova de Lisboa – Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2008.

SOARES, Theska; ARRUDA, Amilton; BALESTRA, Rodrigo; HARTKOPF, Celso e BARBOSA, Justino. **A relação entre a Biomimética e a geodésica de Buckminster Fuller no planejamento de construções sustentáveis**. PLURIS 2016, 7º Congresso Luso Brasileiro para o Planejamento Urbano, Integrado e Sustentável - Maceió/BRA 2016.

SOARES, Theska; ARRUDA, Amilton. **As Estruturas geodésicas do Ecocamp na Patagônia: um estudo sobre seus aspectos ergonômicos e sustentáveis**. 1º CONAERG - Congresso Internacional de Ergonomia Aplicada - Recife/BRA 2016.

SONGEL, Gabriel. **Estudio metodológico de la biónica aplicada al diseño industrial**. 1991. Tese (doutorado) - ETSI Industriales, Universidad Politécnica de Valencia.

STEADMAN, Philip. **The evolution of designs – biological analogy in architecture and applied art**, 1ª ed., Cambridge, Cambridge University Press, 1979, 1988, revised edition, 2008.

THOMPSON, D'arcy Wentworth. **On growth and form**. 1ªed., Cambridge, Cambridge University Press, 1961.

VASCONCELOS, Augusto Carlos. **Máquinas da natureza: um estudo da interface entre biologia e engenharia**. São Paulo: Ibracon, 2004.

VASCONCELOS, Augusto Carlos. **Estruturas da natureza: um estudo da interface entre biologia e engenharia**. São Paulo: Ibracon, 2004.

VERSCHLEISSER, R. **Aplicação de estruturas de bambu no design de objetos, como construir objetos leves, resistentes, ecológicos, e de baixo custo**. 2008. Tese (Doutorado em Design), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

VERSOS, Carlos. A.M. **Design biônico: A natureza como inspiração criativa.** Dissertação (Mestrado). 2010. 186p - Universidade da Beira Interior, Covilhã, Departamento de engenharia Eletromecânica.

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

VINCI, Leonardo. **Da Vinci por ele mesmo/** tradutor Marcos Malvezi. São Paulo: Madras, 2004.

WINGFIELD, Nick. **Forget Beanbag Chairs. Amazon Is Giving Its Workers Treehouses.** (The New York Times) Disponível em: <<http://www.nytimes.com/2016/07/11/technology/forget-beanbag-chairs-amazon-is-giving-its-workers-treehouses.html>>. Acesso em 20 de setembro de 2016.

WAHL, D. C. **Bionics vs. Biomimicry: From control of nature to sustainable participation in nature.** New Forest, WIT Transactions on Ecology and the Environment: 2006.

WARD, J. **The artifacts of R.Buckminster Fuller.** New York: Garland: 1985.

Websites

Acervo Buckminster Fuller na Stanford. Disponível em:

<<https://collections.stanford.edu/bucky/bin/page?forward=home>>. Acesso em 3 de setembro de 2015.

Ask Nature. Disponível em: <<http://asknature.org>>. Acesso em 1 de fevereiro de 2015.

Biomimicry Institute. Disponível em: <<http://biomimicry.org>>. Acesso em 1 de março de 2015.

Buckminster Fuller Institute. Disponível em: <<http://www.bfi.org>>. Acesso em 1 de março de 2015.

Desertdomes. Disponível em: <<http://www.desertdomes.com>>. Acesso em 3 de fevereiro de 2016.

Doderama. Disponível em: <<http://www.doderama.com>>. Acesso em 3 de fevereiro de 2016.

Domos Valdívía. Disponível em: <<http://domosvaldivia.cl/>>. Acesso em 25 de julho de 2016.

Domosgeodesicos.es. Disponível em: <<http://domosgeodesicos.es>>. Acesso em 25 de julho de 2016.

Ecocamp Patagônia. Disponível em: < www.ecocamp.travel>. Acesso em: 25 jan 2016.

Fuller Dome Home. Disponível em: <<http://www.fullerfomehome.org>>. Acesso em 3 de março de 2015.

Grasshopper. Disponível em: < www.grasshopper3d.com/>. Acesso em 3 de março de 2015.

Inhabitat. Disponível em: <<http://www.inhabitat.com>>. Acesso em 3 de fevereiro de 2015.

Omega Dome. Disponível em: <<http://www.domes.com>>. Acesso em 3 de fevereiro de 2015.

Pacífic Domes. Disponível em: <<http://www.pacificdomes.com>>. Acesso em 3 de fevereiro de 2016.

Rhino 3D. Disponível em: < www.rhino3d.com>. Acesso em 21 de Setembro de 2016.

Santiago Calatrava Architetics & Engineers. Disponível em: < <http://calatrava.com>>. Acesso em 20 de setembro de 2016.

Sinectics. Disponível em: < <http://www.rinconpsicologia.com/2011/07/que-es-la-sinectica> >. Acesso em 20 de setembro de 2016.

Spheres da NBBJ para Amazon. Disponível em: < www.nbbj.com/work/amazon. >. Acesso em 25 de julho de 2016.

University of Stuttgart. ICD (Institute for Computational Design and Construction). Disponível em: < <http://icd.uni-stuttgart.de/?p=6553>. Acesso em: 20 abr 2016.

WeaverBird. Disponível em: <www.giuliopiacentino.com/weaverbird>. Acesso em 02 de novembro de 2016.