

AS CONTRIBUIÇÕES DA IMPRESSÃO 3D PARA A VALIDAÇÃO DOS CONCEITOS NO ESTUDO DAS ESTRUTURAS RETRÁTEIS

THE CONTRIBUTIONS OF 3D PRINTING FOR THE VALIDATION OF CONCEPTS IN THE STUDY OF RETRACTAL STRUCTURES

Márcia Anaf¹

Ana Lúcia Nogueira de Camargo Harris²

Resumo

O propósito deste trabalho é aprofundar o estudo sobre as estruturas geométricas dinâmicas por meio de modelos físicos e simulações virtuais aplicáveis a elementos arquitetônicos, baseadas em suas construções, direcionada ao ensino da Geometria das Transformações. Esta pesquisa parte das estruturas geodésicas de Buckminster Fuller e das estruturas retráteis de Chuck Hoberman. Tem como objetivo, apresentar o método desenvolvido para a construção de domos geodésicas retráteis com uma geometria compatível preparada para um sistema de cobertura. Para isto foram adotados softwares de modelagem generativa e paramétrica e um software de fabricação digital para impressão 3D. O público alvo são estudantes e profissionais de Arquitetura, Design, Engenharia e áreas afins. O objetivo é apresentar novas ferramentas tecnológicas para o desenvolvimento de geometrias metamórficas que se aproximam de formas encontradas na Natureza, contribuindo assim para os avanços da Biomimética; e demonstrar a importância dos processos de Fabricação Digital, para a validação dos conceitos empregados.

Palavras-chave: estruturas retráteis; cuboctaedro; *Hoberman Sphere*; transformação; impressão 3D.

Abstract

The purpose of this work is to deepen the study on the dynamic geometric structures through physical models and virtual simulations applicable to architectural elements, based on their constructions, directed to the teaching of Geometry of Transformations. This research is part of the Buckminster Fuller geodesic structures and the retractile structures of Chuck Hoberman and aims to present the method developed for the construction of retractable geodesic domes with a compatible geometry prepared for a cover system. For this purpose, generative and parametric modeling software and digital manufacturing software for 3D printing were adopted. The target audience are students and professionals in Architecture, Design, Engineering and related fields. The objective is to present new technological tools for the development of metamorphic geometries that approach the forms found in Nature, thus

¹ Doutoranda, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, Tecnologia e Cidade – UNICAMP, marciaanaf@uol.com.br

² Professora Doutora do Departamento de Arquitetura e Construção da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP, luharris@fec.unicamp.br

contributing to the advances of Biomimetics; and demonstrate the importance of the Digital Fabrication processes, for the validation of the concepts employed.

Keywords: retractable structures; cuboctahedron; Hoberman Sphere; transformation; 3D printing.

1. Introdução

O presente estudo parte de uma Tese que introduz a Geometria de Chuck Hoberman como base para o desenvolvimento de estruturas experimentais dinâmicas, fornecendo um meio criativo e lúdico para o ensino e para a investigação dos princípios aplicados na Arquitetura Cinética. Tem origem no *Jitterbug* de Buckminster Fuller e na *Hoberman Sphere* de Chuck Hoberman. O *Jitterbug* é uma estrutura dinâmica, no qual Fuller emprega conceitos de mobilidade através da transformação do Cuboctaedro em outros poliedros. O Cuboctaedro, também conhecido como *Vector Equilibrium* foi o sólido geométrico escolhido para o estudo das estruturas articuláveis retrátéis.

Nesta pesquisa são apresentadas de forma didática as etapas para a obtenção do Cuboctaedro retrátil, que passam pela teoria e pela prática. O raciocínio empregado aponta um caminho de investigação para a obtenção de outros poliedros e até mesmo domos retrátéis. Ao longo do desenvolvimento são apresentados os princípios matemáticos destas estruturas e os cálculos usados para determinar a quantidade de elementos necessários para a construção do volume retrátil; os softwares adotados para a modelagem e simulação virtual e o software para a obtenção do modelo físico. O artigo tem várias ilustrações que vão desde a modelagem dos componentes até as peças impressas em 3D. Também são apresentados os softwares usados para a modelagem e a simulação virtual e o software adotado para a construção do modelo físico.

Para a modelagem foi adotado como software o Rhinoceros com seu plug-in Grasshopper, que permite a parametrização das variáveis, como por exemplo, número de divisões e raio da circunferência, dimensões, ângulos e controle de abertura. O Grasshopper é um plug-in do Rhinoceros que permite explorar soluções geométricas dinâmicas para a simulação digital de modelos. É um software de Geometria Generativa, que tem as ferramentas para o desenvolvimento de um modelo paramétrico, no qual é possível controlar várias transformações e movimentos, possibilitando inúmeras simulações.

Os processos de impressão 3D são processos de construção por camadas empregados na produção de protótipos, modelos e até na fabricação de objetos. Devido a sua praticidade, a impressão 3D é um dos processos de prototipagem rápida que está sendo cada vez mais utilizado na etapa da fabricação digital. Para a obtenção do modelo físico foi adotado como software o Simplify 3D, que faz o fatiamento do modelo em camadas para gerar o código de impressão, o G-Code. O modelo construído, assim como seus componentes, foi impresso na Felix PRO, uma impressora que emprega a tecnologia FDM (fused deposition modeling), ou seja, um processo de modelagem por adição de filamento no qual a matéria prima é depositada em camadas para formar o objeto. O emprego desta tecnologia proporciona a liberdade projetual, neste caso não foi necessário adaptar o desenho e a modelagem aos elementos e ferramentas disponíveis no mercado como pivôs, roscas e parafusos, estes foram elaborados e construídos de acordo a serviço da geometria das peças.

Ao longo deste experimento surgiram alguns conflitos entre a geometria gerada e a construção do modelo; pois além da tridimensionalidade, o modelo físico contém itens que não fizeram parte da simulação virtual, como por exemplo, os elementos de ligação entre as barras que não foram simulados anteriormente, fato que levou a conclusão da importância do

modelo físico para a verificação e validação dos conceitos empregados. Este material faz parte de uma pesquisa de Doutorado em fase de conclusão e dá continuidade ao estudo das tipologias e estruturas cinéticas, publicado anteriormente em alguns artigos citados ao longo deste texto.

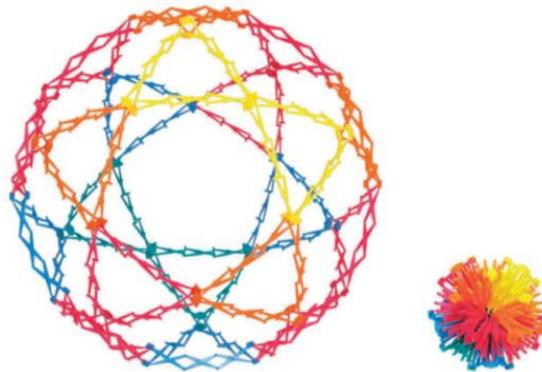
2. Estruturas de Desdobramento

Estruturas de Desdobramentos são objetos cuja estrutura e mecanismo são idênticos. Nesta pesquisa as experimentações com estruturas de desdobramento são apresentadas a partir da geometria empregada por Chuck Hoberman, na construção das estruturas articuláveis expansíveis.

Hoberman observa os princípios existentes na Natureza e os emprega em suas “Unfolding Structures”. A versatilidade de seus trabalhos assemelha-se a própria natureza, que com poucas regras consegue gerar uma multiplicidade enorme de resultados.

A Hoberman Sphere (Figura 1) foi escolhida como ponto de partida para o desenvolvimento das estruturas experimentais dinâmicas físicas e digitais. Foi criada em 1991 e passou a ser produzida desde 1995. É considerada por muitos um ícone de produto de design contemporâneo. Pertence a coleção do MoMA (Museum of Modern Art). Em 1998 recebeu o prêmio Parent’s Choice Gold Award [1].

Figura 1:Hoberman Sphere

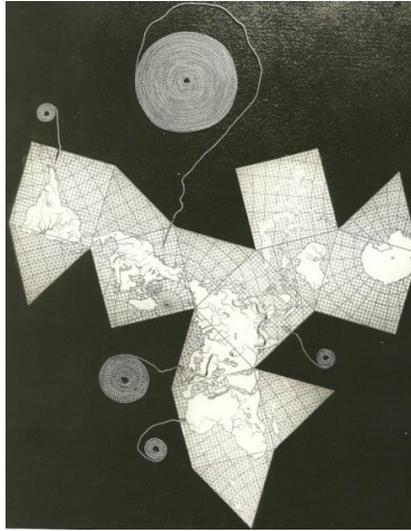


Fonte: Hoberman Portfolio

Esta é uma estrutura cinética que funciona com mecanismos em tesoura confeccionados a partir de unidades modulares variadas e outros componentes, como por exemplo, as juntas de conexão. O presente estudo parte da análise desta estrutura para o desenvolvimento de um poliedro arquimediano retrátil, com subdivisões internas que possibilitem a criação de um sistema de cobertura que acompanhe a contração e expansão do volume.

Para este estudo foi selecionado o Cuboctaedro, poliedro arquimediano formado por polígonos regulares sendo seis de suas faces quadradas e as outras oito triangulares. Devido as suas propriedades o cuboctaedro foi denominado por Buckminster Fuller “Dymaxion” ou “Vector Equilibrium”, como o próprio nome diz, é um poliedro composto por vetores que se mantêm em equilíbrio. O Dymaxion Map (Figura 2) foi uma de suas primeiras experiências geodésicas [2] para representar o esgotamento dos recursos energéticos e atraiu a atenção de muitas pessoas após sua publicação em 1943.

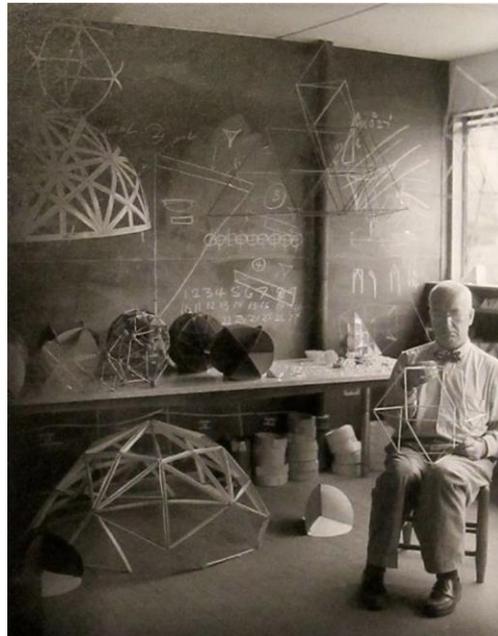
Figura 2: Dymaxion Map



Fonte: Buckminster Fuller/Designing for Mobility (p.89)

Além disto, a sinergia pode ser explicada pela geometria dinâmica do *Jitterbug*, que deriva do Cuboctaedro, com a ação dos vetores a estrutura se torna flexível permitindo sua rápida e fácil transformação. Fuller diz que o *Jitterbug* (Figura 3) contém total fenomenologia do universo.

Figura 3: Fuller/ Massachusetts, 1955



Fonte: <https://i.pinimg.com/originals/9c/7c/b3/9c7cb32f050a53e2d784b2e377db7396.jpg>

2.1. Princípios Matemáticos

Os princípios matemáticos aplicados para estas estruturas incluem a análise geométrica e cinemática e podem ser vistos como uma extensão da teoria dos mecanismos [3].

O movimento das barras permite alterações na forma. A estrutura varia de acordo com o número de barras e o número de conectores entre estas. Com a equação de Gruebler's, é possível calcular os graus de liberdade, conhecidos como *Degrees of Freedom* (DOF) destas barras. O grau de liberdade de um sistema mecânico é o número de parâmetros independentes que definem sua configuração [4].

A equação usada para este cálculo é:

$$DOF = 3 \times (N - 1) - 2P$$

N é o número de barras;

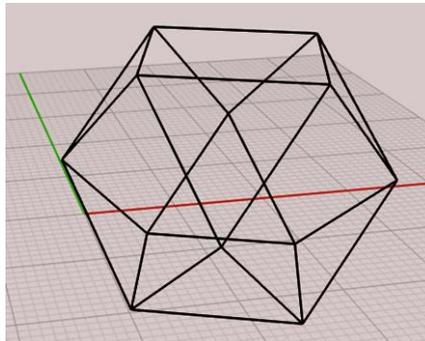
P representa o número de articulações, que são os conectores dos pivôs entre as barras, que se entrelaçam como mecanismos em tesoura que abrem e fecham mantendo sempre a curvatura constante.

$$P = 3N/2 - 2$$

A equação de Gruebler's foi aplicada no cálculo da quantidade de peças necessárias para a construção do Cuboctaedro Retrátil.

Os poliedros de Arquimedes são poliedros semirregulares, pois são formados por mais de um tipo de face, no entanto cada face é um polígono regular. Como dito anteriormente, o Cuboctaedro (Figura 4) é um poliedro arquimediano formado por 8 faces quadradas e 6 faces triangulares.

Figura 4: Cuboctaedro



Fonte: Elaborado pelas autoras

Nesta pesquisa foram desenvolvidos dois modelos diferentes de cuboctaedro retrátil, o primeiro de frequência 3 (Figura 5) e o segundo de frequência 4, que está em fase de construção.

Cada estrutura retrátil tem suas próprias características, que são provenientes do volume de onde foi gerada. No caso do cuboctaedro a secção central é um hexágono regular. Para obter o poliedro retrátil cada aresta é dividida em um determinado número de partes iguais, onde cada parte é formada por duas unidades modulares (barras).

Na construção do primeiro artefato cada aresta foi dividida em três partes iguais (Figura 6), sendo cada parte composta por 2 unidades modulares, formando um conjunto de 6 unidades. Como a secção do cuboctaedro é um hexágono regular, a circunferência é dividida em 18 partes iguais.

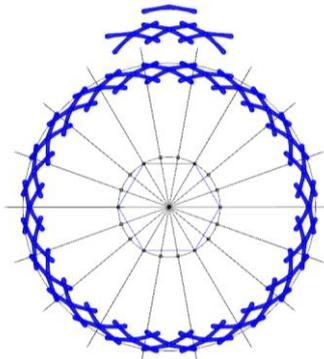
Figura 5: Cuboctaedro retrátil de frequência 3



Fonte: Elaborado pelas autoras

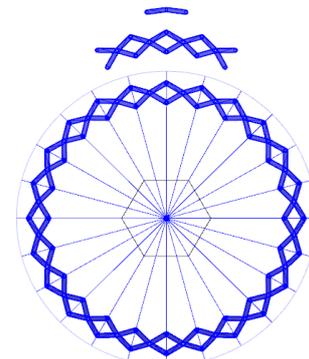
Na construção do segundo artefato cada aresta é dividida em quatro partes iguais (Figura 7), sendo cada parte composta por 2 unidades modulares, formando um conjunto de 8 unidades.

Figura 6: Vista de topo/ Artefato 1



Fonte: Elaborado pelas autoras

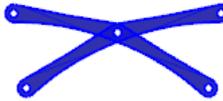
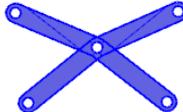
Figura 7: Vista de topo/ Artefato 2

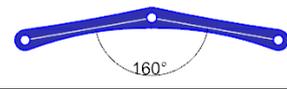
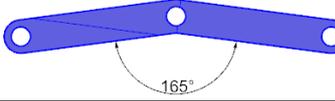
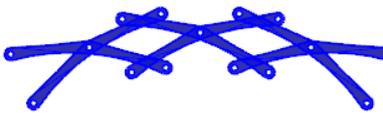
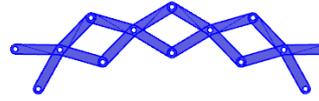


Fonte: Elaborado pelas autoras

O cuboctaedro possui 8 faces triangulares e 6 faces quadradas. Cada face triangular é formada por 3 arestas, portanto é um sólido geométrico de 14 faces, 24 arestas e 12 vértices. A tabela a seguir apresenta as semelhanças e diferenças em relação aos artefatos 1 e 2. O ângulo entre as barras é diferente e o desenho da barra usada na fabricação do artefato 1 foi modificado na construção do artefato 2, devido ao fato de ter sido construído diretamente no Grasshopper, mas isto não interfere na mecânica do movimento de transformação das barras.

Tabela 1: Quantidade de elementos dos Artefatos 1 e 2

	Artefato 1	Artefato 2
Módulo	 1 módulo = 2 unidades	 1 módulo = 2 unidades
Unidades	24 arestas de 3 módulos $24 \times 3 \times 2 = 144$ unidades	24 arestas de 4 módulos $24 \times 4 \times 2 = 192$ unidades

	Artefato 1	Artefato 2
Furos	 1 unidade = 3 furos	 1 unidade = 3 furos
Ângulo	 160°	 165°
Barras	Aresta de frequência 3: a_{f3} 	Aresta de frequência 4: a_{f4} 

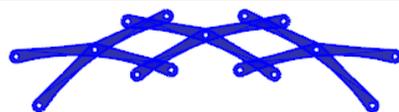
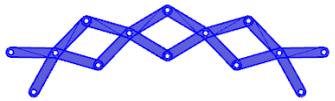
Fonte: Elaborado pelas autoras

A terminologia aresta de frequência n , representada por a_{fn} , foi adotada para representar o número de divisões da aresta do polígono, uma vez que esta é variável. No caso do artefato 1, a aresta do hexágono regular foi dividida em 3 partes iguais, de 2 módulos cada, sendo cada módulo composto de 2 unidades, totalizando 6 unidades para cada a_{f3} . No artefato 2 a aresta do hexágono regular foi dividida em 4 partes iguais, totalizando 8 unidades para cada a_{f4} .

Para calcular a quantidade de pivôs para cada a_{fn} do poliedro retrátil, foi aplicada a fórmula citada anteriormente, $P = 3N/2 - 2$. Esta fórmula é válida para o cálculo do número de pivôs que ligam uma barra a outra, portanto não entram as extremidades que são ligadas ao nó estrutural.

Para obter a quantidade total de conectores do poliedro retrátil é necessário considerar os outros quatro, que pertencem às extremidades e multiplicá-los pela quantidade de arestas do poliedro.

Tabela 2: Cálculo do número de conectores do poliedro retrátil

	N (número de unidades de cada a_{fn})	P (pivôs em comum entre 2 barras)	Total de conectores
Artefato 1		Se $N = 6$; $P = 18/2 - 2 = 9 - 2 = 7$	$(7 + 4) = 11$ $11 \times 24 = 264$
Artefato 2		Se $N = 8$; $P = 24/2 - 2 = 10$	$(10 + 4) = 14$ $14 \times 24 = 336$

Fonte: Elaborado pelas autoras

2.1.1. Cálculo da Barra Angular

O ângulo de cada barra é obtido pelo número de divisões da circunferência. Este valor pode ser determinado através de um simples cálculo, mas também pode ser obtido por um algoritmo gerado no *Grasshopper*, que será demonstrado adiante.

Tabela 3: Obtenção da barra angular

	Arestas	Divisões	Valor do ângulo	Suplemento
Artefato 1	6	3	$6 \times 3 = 18$ $360^\circ: 18 = 20^\circ$	160°
Artefato 2	6	4	$6 \times 4 = 24$ $360^\circ: 24 = 15^\circ$	165°

Fonte: Elaborado pelas autoras

2.1.2. Cálculo do DOF

O cálculo do número dos graus de liberdade de um sistema mecânico é igual para *tong linkage* e *closed tong linkage* [4], ou seja, para articulações em sistema de tesoura de superfícies abertas e fechadas, que permitem os movimentos de expansão e contração. Estas articulações são conhecidas como pantográficas e durante sua abertura e fechamento mantêm a mesma curvatura.

No entanto há uma diferença entre o cálculo do número de pivôs para a articulação aberta e fechada.

a) Número de pivôs para superfícies pantográficas abertas

$$P = 3N/2 - 2$$

b) Número de pivôs para superfícies pantográficas fechadas

$$P = 3N/2$$

Conforme foi citado anteriormente P representa o número de articulações, que são os conectores de pivôs entre as barras. No caso destes artefatos será aplicada a equação para superfícies pantográficas abertas.

Tabela 4: Degrees of Freedom/ DOF

	$P = 3N/2 - 2$	$DOF = 3 \times (N - 1) - 2P$
Artefato 1	7	$3 \times (6 - 1) - (2 \times 7) = 1$
Artefato 2	10	$3 \times (8 - 1) - (2 \times 10) = 1$

Fonte: Elaborado pelas autoras

Esta equação também pode ser resolvida literalmente:

$$DOF = 3 \times (N - 1) - 2P$$

Substituindo P por sua equação;

$$DOF = 3 \times (N - 1) - 2(3N/2 - 2)$$

$$DOF = 3N - 3 - 3N + 4$$

$$DOF = 1$$

Portanto no caso de *tong linkage* o resultado é sempre uma constante, no caso igual a 1.

3. Construção do Modelo

A construção do modelo foi dividida em duas etapas, na primeira foi desenvolvido um modelo virtual paramétrico e na segunda foram construídos os modelos físicos impressos em 3D, os artefatos 1 e 2.

A etapa da modelagem foi desenvolvida com o uso do software Rhinoceros, integrado ao seu plug-in Grasshopper, possibilitando desta forma a parametrização das variáveis do modelo virtual e as simulações necessárias para análise dos dados.

Em seguida os componentes modelados foram impressos em 3D e foi feita a montagem das estruturas, esta foi uma etapa muito importante para a análise e verificação dos dados obtidos.

3.1. Simulação Virtual

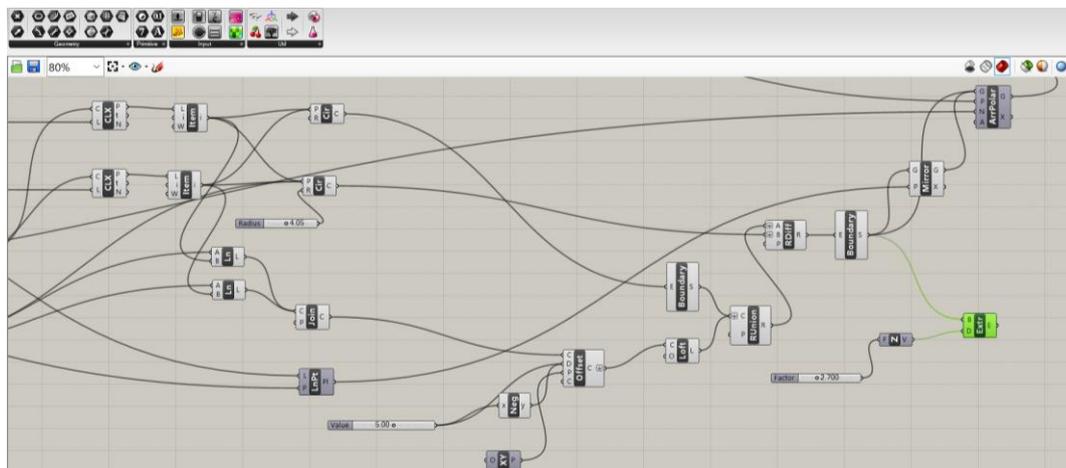
A simulação virtual foi feita de forma integrada entre o Rhinoceros e seu plug-in Grasshopper.

Foram selecionadas algumas das etapas do código gerado no Grasshopper. Em alguns momentos a geometria foi gerada no Grasshopper e exportada para o Rhinoceros e em outros, a imagem foi importada do Rhinoceros para ser trabalhada no Grasshopper.

O diâmetro estabelecido para o sólido retrátil é de 1 metro, visando facilitar os cálculos para a escala desejada, mas foi usada a constante 0.86 (Evaluation) para melhor visualização do movimento das barras.

As barras e componentes do artefato 1 foi construídas diretamente no Rhinoceros, no caso do artefato 2, estas foram modeladas no Grasshopper, tendo como vantagem a parametrização. Vale destacar a importância de trabalhar com 2 monitores simultaneamente (Figura 8), para acompanhar a geometria gerada pelo código.

Figura 8: Obtenção das barras simétricas

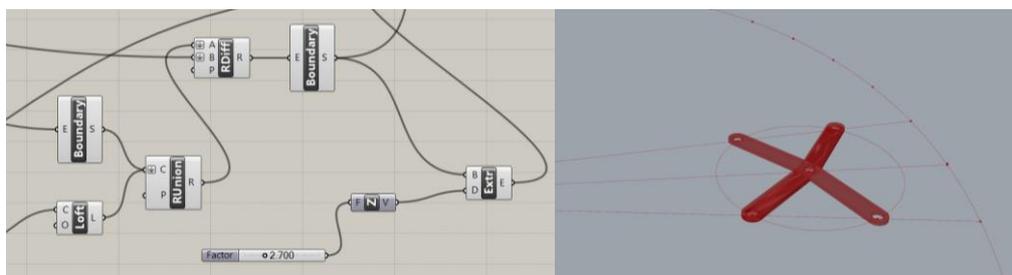




Fonte: Elaborado pelas autoras

Embora a barra tenha sido extrudada (Figura 9), o desenvolvimento foi feito com as superfícies planas, deixando a tridimensionalidade para a etapa do modelo físico.

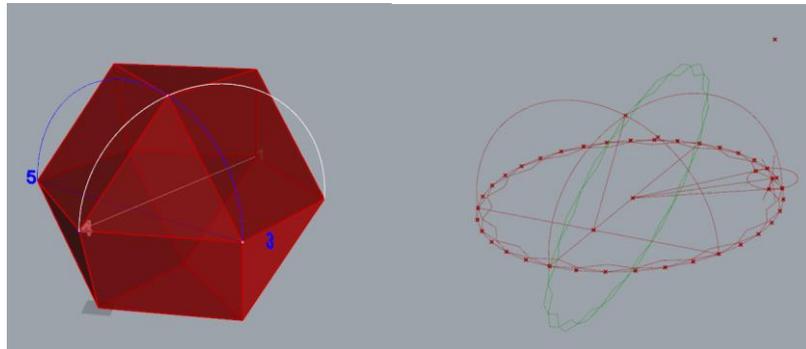
Figura 9: Barra extrudada



Fonte: Elaborado pelas autoras

O Rhinoceros tem um plug-in que permite a importação direta de um sólido geométrico, neste o cuboctaedro (Figura 10) foi importado. O Grasshopper possui muitos comandos, vale destacar a praticidade do *Preview On*, *Preview Off*, *Geo* e *Bake*. Quando o *Preview* está ligado, a figura aparece na tela do Rhinoceros, mas não é uma geometria, para que isto aconteça é preciso usar o *Bake* que torna a construção uma geometria propriamente dita. O *Bake* foi bastante usado durante as simulações e ao mesmo tempo foram aplicados *layers* permitindo visualizar ou apagar a imagem durante o desenvolvimento do projeto. Isto foi fundamental, uma vez que a geometria é bastante complexa e foram feitas várias simulações. E o *Geo* é o contrário deste, ele importa uma geometria do Rhinoceros para o Grasshopper. A grande vantagem disto é que ao contrário do que muitos imaginam, não há necessidade de ser um especialista em programação para trabalhar com o Grasshopper, uma vez que existem estas possibilidades, a geometria pode ser desenvolvida no Rhinoceros e parametrizada no Grasshopper.

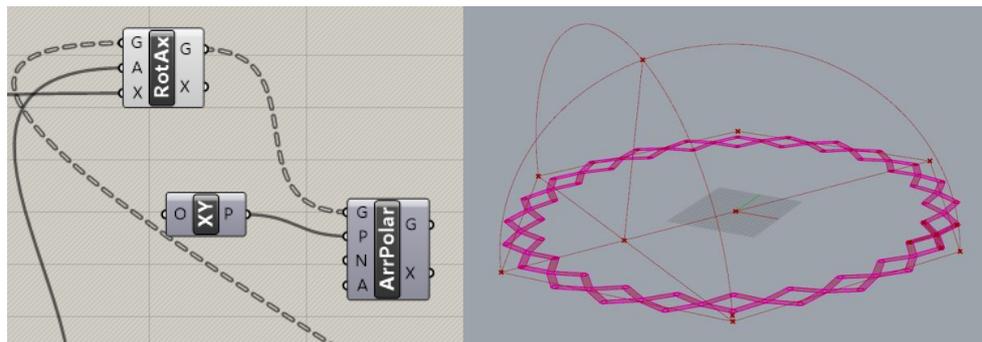
Figura 10: Intersecção de Planos



Fonte: Elaborado pelas autoras

Com o *Array Polar* (Figura 11) foi possível rotacionar o par de barras simétricas ao redor de uma circunferência e depois rotacionar estes círculos de barras entrelaçadas expansíveis.

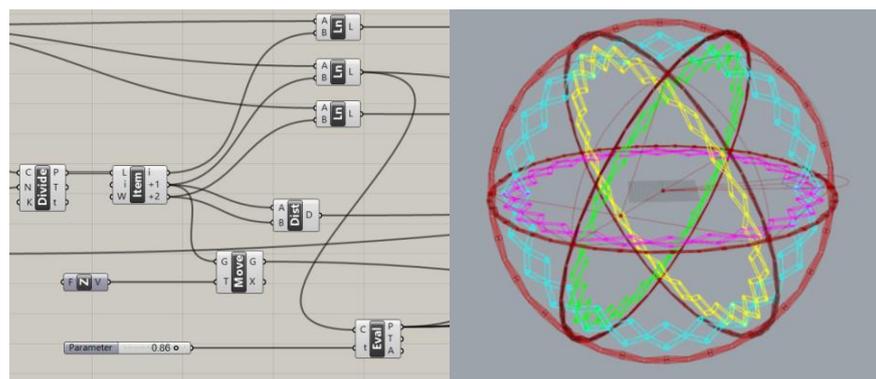
Figura 11: *Array Polar*

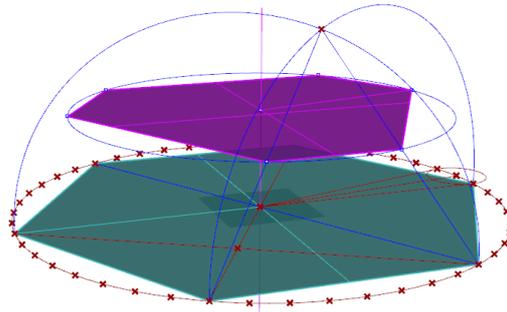


Fonte: Elaborado pelas autoras

Com o comando *Bake* as geometrias foram sendo exportadas para o Rhinoceros e armazenadas a partir da criação dos *layers* e com o comando *Eval* (*Evaluation*) foi criado um intervalo de números que possibilitam a parametrização da estrutura retrátil (Figura 12), criando assim o movimento de expansão e contração.

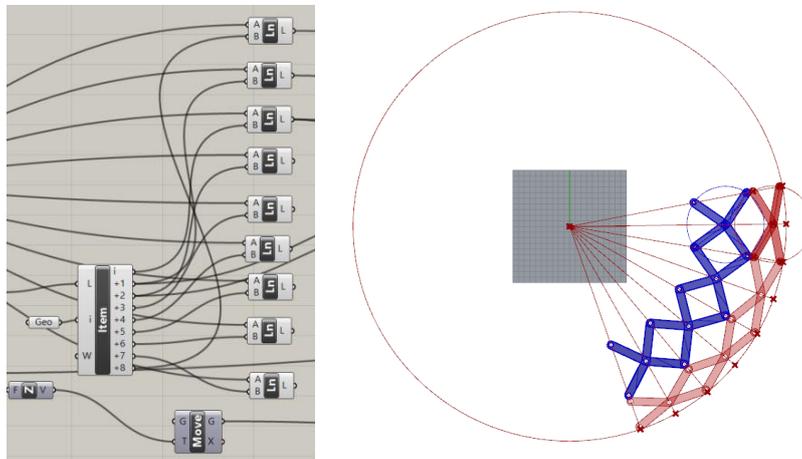
Figura 12: Círculos expansíveis





Fonte: Elaborado pelas autoras

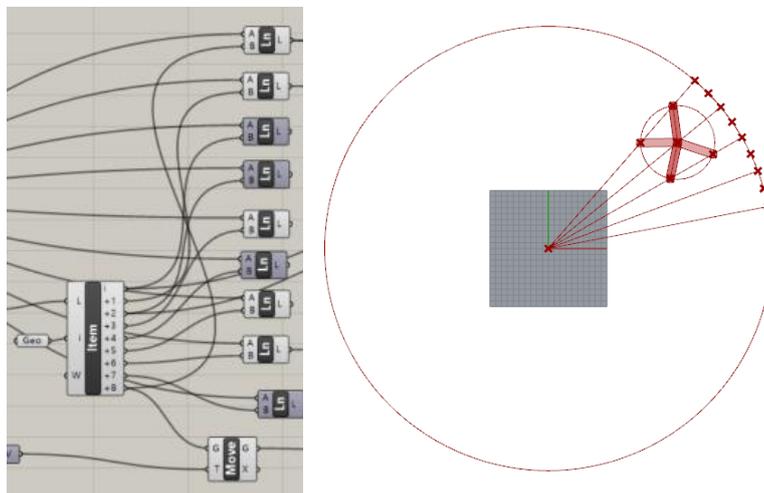
Figura 14: Divisão do arco de circunferência em 8 partes iguais



Fonte: Elaborado pelas autoras

O mesmo procedimento foi aplicado para a aresta da face triangular. Pelo Teorema de Tales esta é metade da aresta da face triangular da secção meridiana, neste caso o arco de circunferência é dividido em 4 partes iguais (Figura 15), uma vez que a frequência desta aresta é 2.

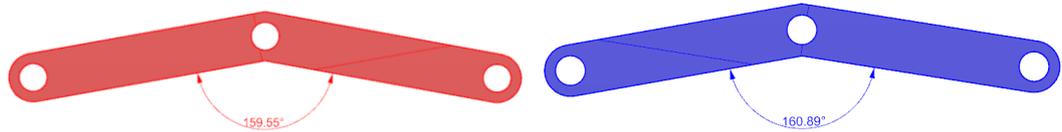
Figura 15: Divisão do arco de circunferência relativo em partes iguais



Fonte: Elaborado pelas autoras

Desta forma foram obtidas as barras com aresta de frequência 4 e 2, respectivamente (Figura 16), relativas a secção do cuboctaedro (Figura 17).

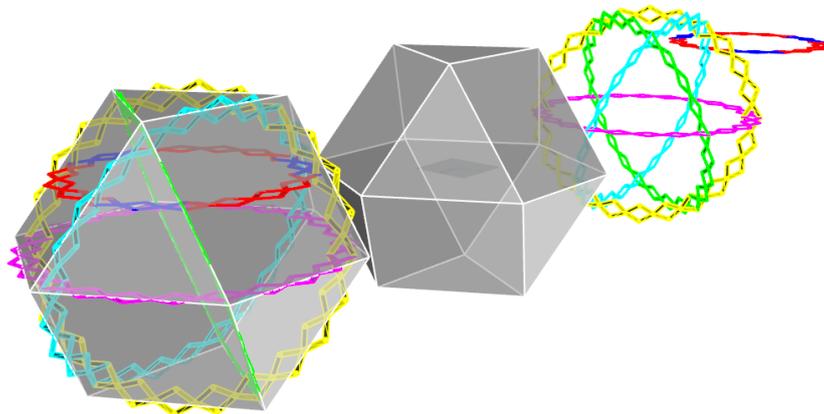
Figura 16: Barras para a secção do poliedro



Fonte: Elaborado pelas autoras

Estes resultados também poderiam ser obtidos pelo cálculo matemático, como foi mencionado anteriormente, porém estas são superfícies paramétricas que podem ter alterações a qualquer momento com o simples movimento de uma barra de rolagem, programada dentro dos intervalos numéricos desejados.

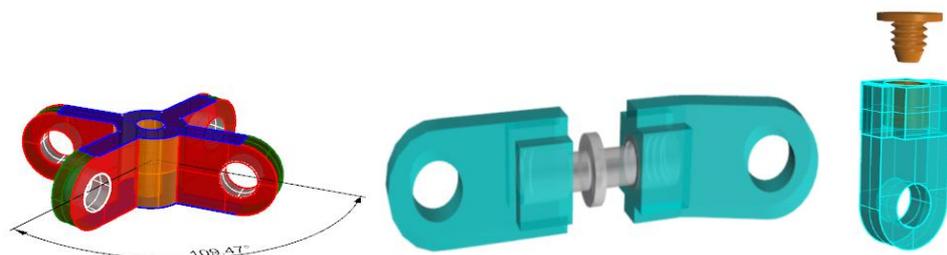
Figura 17: Perspectiva do Cuboctaedro retrátil obtido



Fonte: Elaborado pelas autoras

Em seguida foi montado um modelo físico para testar a mecânica da abertura e fechamento da estrutura. Nesta etapa foram impressos em 3D as barras e os componentes necessários para a montagem de 2 das 14 faces deste sólido retrátil. Para isto foi desenvolvida a modelagem dos demais elementos (Figura 18) no Rhinoceros, de acordo com as necessidades, como por exemplo, a variação do ângulo diédrico entre duas faces.

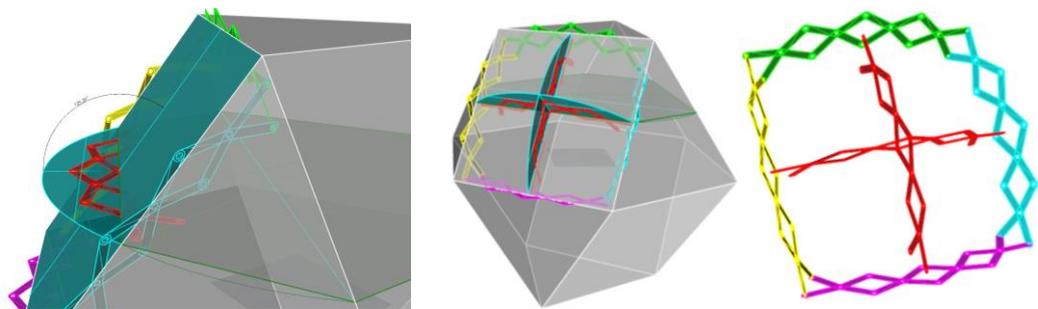
Figura 18: Modelagem dos componentes



Fonte: Elaborado pelas autoras

O ângulo diédrico formado entre o plano que contém a circunferência que passa pelo ponto médio das arestas da face quadrada e o plano que contém esta face quadrada é $125^{\circ}26'$. Portanto é necessário fazer uma rotação para que os planos fiquem perpendiculares entre si, para que as barras entrelaçadas obtidas, embora arqueadas também se mantenham perpendiculares entre si (Figura 19). Esta constatação foi feita após a montagem do modelo físico e foram realizadas algumas modificações na estrutura, inclusive em relação aos componentes.

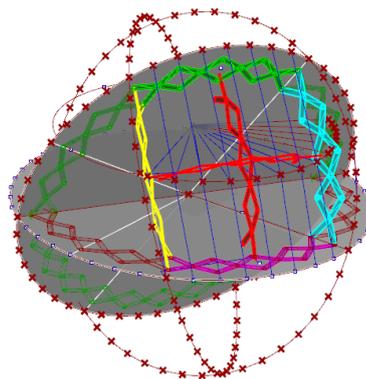
Figura 19: Planos perpendiculares



Fonte: Elaborado pelas autoras

Em virtude da cobertura proposta, foi idealizado um sistema para a união das arestas, criando superfícies que pudessem acompanhar o mecanismo durante a sua transformação (expansão e contração). Nesta etapa foi observado que para unir as barras é preciso determinar os pontos necessários, uma vez que as arestas pantográficas não são coplanares (Figura 20).

Figura 20: Simulação do sistema para cobertura

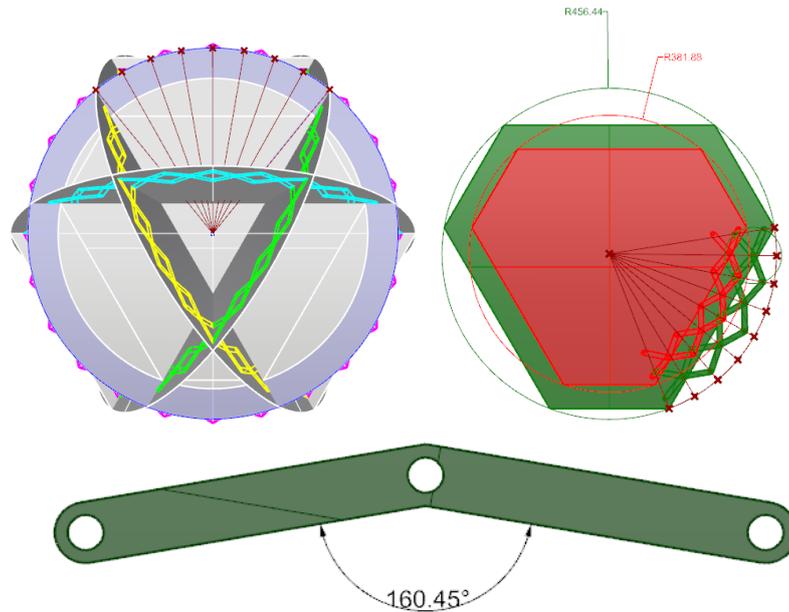


Fonte: Elaborado pelas autoras

Todos os poliedros platônicos e arquimedianos estão inscritos numa circunferência. As arestas dos poliedros projetadas nessa circunferência são trechos de círculos máximos [5]. Para dar continuidade ao estudo da geometria necessária para a cobertura, as divisões foram feitas na circunferência que envolve o volume. As arestas intermediárias, que neste caso são as arestas de frequência quatro são obtidas a partir da divisão do arco que passa pelos pontos médios dos círculos máximos. Para isto é só substituir a geometria nesta parte do código pelo novo arco de circunferência (Figura 21) e também alterar o ângulo ao fazer o *Array Polar*. Este foi o procedimento para a divisão do arco da circunferência que passa pela secção hexagonal,

paralela ao círculo máximo horizontal. Fuller aplicou a teoria dos círculos máximos e a trigonometria esférica no cálculo das geodésicas.

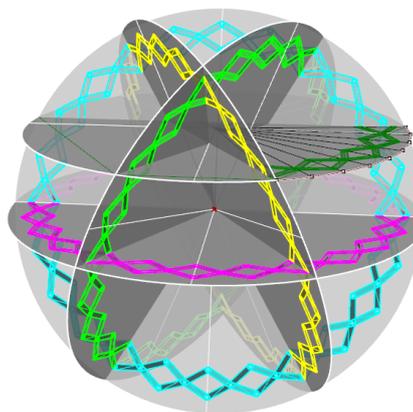
Figura 21: Vista superior do arco obtido



Fonte: Elaborado pelas autoras

A partir desta divisão (Figura 22) existem duas opções para o desenvolvimento do modelo físico. A primeira consiste em usar a aresta de frequência quatro obtida, com o nó estrutural adequado ao valor dos ângulos diédricos entre os planos. No caso da segunda opção é necessário fazer uma rotação deste plano intermediário de modo que seja perpendicular aos demais planos, passando pelo ponto médio destes; neste caso pode ser usado o nó estrutural de 90°. Para verificar qual é mais prática serão construídos novos modelos físicos.

Figura 22: Planos de simetria da esfera circunscrita ao cuboctaedro



Fonte: Elaborado pelas autoras

3.1.1. Impressão 3D

A impressão 3D é um dos processos de prototipagem rápida que agregou muitas vantagens a esta pesquisa. Um dos fatores principais está na liberdade projetual.

Há alguns anos atrás o mesmo sólido retrátil foi confeccionado (Figura 23), usando o processo de corte a laser que também é bastante apropriado a este estudo. Entretanto na ocasião foi preciso adequar o projeto às roscas e parafusos encontrados no mercado, além disto, a estrutura ficou repleta de elementos metálicos que além de interferirem visualmente, podem enferrujar com o tempo. Mas a principal diferença está no nó estrutural. Foram elaborados vários estudos, mas todos estavam condicionados a ferramenta de fabricação e na ocasião a modelagem do nó foi adaptada às restrições do corte a laser (Figura 24).

Figura 23: Cuboctahedron Retractable



Fonte: The Geometry of Chuck Hoberman .CAAD Futures 2015 [1]

Figura 24: Estudos para o nó estrutural



Fonte: Elaborado por Márcia Anaf

Com o processo de impressão 3D foi possível construir o nó estrutural com a angulação desejada e ainda com espaços para encaixar as barras e parafusos de rosca (Figura 25).

Figura 25: Impressão 3D do nó estrutural



Fonte: Márcia Anaf

Outra vantagem importante deste processo de fabricação digital adotado é atribuída à facilidade e rapidez de montagem e desmontagem do volume. Este é um fator muito importante, uma vez que existe a intenção de usar os resultados desta pesquisa na produção de material didático específico para o estudo das estruturas retráteis.

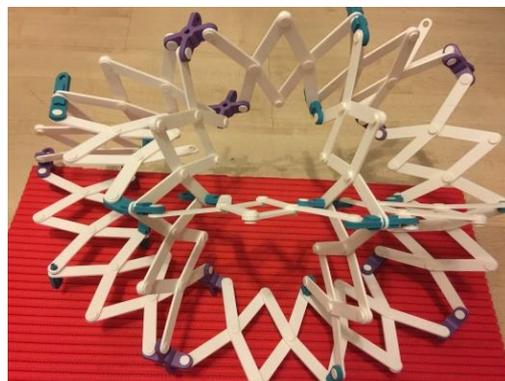
Como resultado foram construídos dois modelos, o Artefato 1 (Figura 26) e do Artefato 2 (Figura 27) em fase de desenvolvimento.

Figura 26: Artefato 1



Fonte: Elaborado pelas autoras

Figura 27: Artefato 2



Fonte: Elaborado pelas autoras

Para a impressão de um objeto em 3D, é necessário um arquivo do modelo virtual digital, modelado em softwares que usam a linguagem CAD (*Computer Aided Design*), para que em seguida possam ser exportados como STL (*Stereolithography*). Neste caso os modelos foram exportados do Rhinoceros para o Simplify 3D, que é um software para fatiamento e geração do código G-Code.

Em relação à matéria prima, foram usados materiais diferentes na confecção dos artefatos, como o PLA (da Fillamentum) um termoplástico biodegradável derivado de fontes renováveis como amido de milho, raízes de mandioca e de cana e o ABS-X da Felix que é um material novo no mercado e está sendo empregado atualmente pela *McNeill* (fabricante do Rhinoceros), a vantagem deste em relação aos demais ABS é que não precisa de cola para aderir a superfície (mesa aquecida) e não tem o efeito *wrap* (deformação).

3. Considerações Finais

O método empregado apontou um caminho de investigação para a obtenção de outros poliedros e até mesmo domos retrátéis. Neste artigo foram apresentadas as etapas para a obtenção do Cuboctaedro retrátil, que passam pela teoria e pela prática, atendendo desta forma o propósito de aprofundar o estudo sobre as estruturas geométricas dinâmicas por meio de modelos físicos e simulações virtuais. Para a modelagem foi adotado como software o Rhinoceros com seu plug-in Grasshopper que tem as ferramentas para o desenvolvimento de um modelo paramétrico, no qual é possível controlar várias transformações e movimentos, possibilitando inúmeras simulações. O raciocínio empregado aponta um caminho de investigação para a obtenção de outros poliedros e até mesmo domos retrátéis. Também foram apresentados os princípios matemáticos destas estruturas e os cálculos usados para determinar a quantidade de elementos necessários para a construção do volume retrátil.

O desenvolvimento do modelo físico é uma das etapas do processo de projeto, que foi fundamental para o presente estudo. Se a simulação virtual não for feita por completo, algumas questões podem passar despercebidas. Neste caso a simulação feita com o Grasshopper foi relativa às barras planas, sem tridimensionalidade e sem os componentes, como por exemplo, os nós estruturais, os pivôs e parafusos de rosca. Durante a montagem do modelo físico foram observadas algumas questões que indicavam uma solução mais adequada e a partir disto foram feitas adaptações no projeto, comentadas ao longo desta pesquisa. O uso da impressão 3D na atividade projetual permite a visualização de conceitos e auxilia a orientação espacial.

Referências

1. Anaf M., Nogueira de Camargo Ana Lúcia H. (2015) **The Geometry of Chuck Hoberman**. In: Celani G., Sperling D., Franco J. (eds) Computer-Aided Architectural Design Futures. The Next City - New Technologies and the Future of the Built Environment. CAAD Futures 2015. Communications in Computer and Information Science, vol 527. Springer, Berlin, Heidelberg.
2. GORMAN, Michael John. Buckminster Fuller: **Designing for Mobility**. Italy: Skira, 2005.
3. You, Zhong; Chen, Yan. **Motion Structures: Deployable Structural Assemblies of Mechanisms**. Hardcover, 2011.
4. HOBBERMAN, C. **Mechanical Invention through Computation: Mechanism Basics**. In: MIT Class 6.S080 (AUS), 2013.
5. LOTUFO, Vitor Amaral & LOPES, João Marcos Almeida. Geodésicas & Cia. São Paulo: Ed. Projeto, s.d.