



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE
CURSO DE Mestrado Profissional em Eficiência Energética e Sustentabilidade

TENSEGRITY: CONFIGURAÇÕES GEOMÉTRICAS, SCRIPTS E PROTOTIPAGEM

Natacha Figueiredo Miranda

**FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E
GEOGRAFIA
MESTRADO PROFISSIONAL EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E
SUSTENTABILIDADE**

**TENSEGRITY: CONFIGURAÇÕES GEOMÉTRICAS,
SCRIPTS E PROTOTIPAGEM**

NATACHA FIGUEIREDO MIRANDA

Trabalho de Conclusão de Curso (para defesa) do Mestrado Profissional apresentada na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, para obtenção do título de Mestre em Eficiência Energética e Sustentabilidade, na área de concentração de Gestão e Produção do Ambiente Construído.

Orientador: Prof. Dr. Gilfranco Alves

**CAMPO GRANDE
MAIO / 2024**



Serviço Público Federal
Ministério da Educação

Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE MESTRADO

Por Videoconferência, da Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, reuniu-se a Banca Examinadora composta pelos membros: Gilfranco Medeiros Alves (UFMS), Andres Batista Cheung (UFMS) e Cynthia Nojimoto (UNB), sob a presidência do primeiro, para julgar o trabalho da aluna: NATACHA FIGUEIREDO MIRANDA, CPF 77917472191, do Programa de Pós-Graduação em Eficiência Energética e Sustentabilidade, Curso de Mestrado, da Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, apresentado sob o título "TENSEGRITY: CONFIGURAÇÕES GEOMÉTRICAS, SCRIPTS E PROTOTIPAGEM" e com orientação de Gilfranco Medeiros Alves. O presidente da Banca Examinadora declarou abertos os trabalhos e agradeceu a presença de todos os Membros. A seguir, concedeu a palavra à aluna que expôs sua Trabalho de Conclusão de Curso. Terminada a exposição, os senhores membros da Banca Examinadora iniciaram as arguições. Terminadas as arguições, o presidente da Banca Examinadora fez suas considerações. A seguir, a Banca Examinadora reuniu-se para avaliação, e após, emitiu parecer expresso conforme segue, declarando a dissertação APROVADA:

EXAMINADOR

Dr. Gilfranco Medeiros Alves (Interno)

Dra. Ana Paula da Silva Milani (Interno) (Suplente)

Dr. Andres Batista Cheung (Interno)

Dra. Cynthia Nojimoto (Externo)

Dra. Juliana Couto Trujillo (Externo) (Suplente)

RESULTADO FINAL:

Aprovação (X) Aprovação com revisão () Reprovação ()

OBSERVAÇÕES:

Nada mais havendo a ser tratado, o Presidente declarou a sessão encerrada e agradeceu a todos pela presença.

NOTA
MÁXIMA
NO MEC

UFMS
É 10!!!



Documento assinado eletronicamente por **Gilfranco Medeiros Alves, Professor do Magisterio Superior**, em 26/06/2024, às 16:34, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

NOTA
MÁXIMA
NO MEC

UFMS
É 10!!!



Documento assinado eletronicamente por **CYNTHIA NOJIMOTO, Usuário Externo**, em 26/06/2024, às 17:04, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

NOTA
MÁXIMA
NO MEC

UFMS
É 10!!!



Documento assinado eletronicamente por **Andres Batista Cheung, Professor do Magisterio Superior**, em 26/06/2024, às 19:29, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufms.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4868205** e o código CRC **31FD6435**.

FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA

Av Costa e Silva, s/nº - Cidade Universitária

Fone:

CEP 79070-900 - Campo Grande - MS

Referência: Processo nº 23104.015566/2024-59

SEI nº 4868205

AGRADECIMENTOS

Agradeço à PPGEES, UFMS, CAPES e FUNDECT pela possibilidade de realizar esse mestrado, ao meu orientador que esteve sempre presente, e à minha família e amigos que torceram e estiveram comigo na jornada.

RESUMO

O trabalho se propõe a pensar espacialidades e estruturas que possam ser versáteis, dinâmicas e eficientes do ponto de vista estrutural, assim como, do ponto de vista funcional, possam ser acopladas e conectadas a edifícios, servir de abrigo temporário, constituir-se em pavilhões etc., porém com foco em estratégias de baixo impacto em relação ao meio ambiente. A partir da noção da bioinspiração, tais estruturas possibilitam, a exemplo do que acontece nos mamíferos nos quais um sistema biônico envolvendo ossaturas e tendões, buscar uma metáfora no sentido da otimização estrutural e espacial, e como consequência, desenvolver um modelo de projeto mais sustentável. Utilizando métodos de projeto contemporâneos a partir da mediação digital, tais como parametrização, prototipagem e fabricação digital, a pesquisa desenvolveu prototipagens e fez análises em várias escalas e materiais a fim de montar um Catálogo com as *Tensegrities* para divulgar o conhecimento e ajudar iniciantes a utilizar esse sistema estrutural. Serão consideradas para a pesquisa as estruturas do tipo implantáveis ou transformáveis, por terem um caráter adaptável, modular e dinâmico, sendo a *Tensegrity*, a estrutura recortada para esse estudo.

Palavras-chave: arquitetura digital, arquitetura regenerativa, estruturas paramétricas, estruturas implantáveis, *Tensegrity*.

ABSTRACT

The work proposes to think about spatialities and structures that can be versatile, dynamic and efficient from a structural point of view, as well as, from a functional point of view, they can be coupled and connected to buildings, serve as temporary shelter, constitute pavilions etc., but with a focus on low-impact strategies in relation to the environment. Based on the notion of bioinspiration, such structures make it possible, like what happens in mammals in which a bionic system involving bones and tendons, to seek a metaphor in the sense of structural and spatial optimization, and as a consequence, to develop a project model with conception regenerative – the building collaborating with the natural phenomena of the place. Using contemporary design methods based on digital mediation, such as parameterization, prototyping and digital fabrication, the research will develop prototyping and analysis at various scales and materialities in order to assemble a Catalog with Tensegrities to disseminate knowledge and help beginners to use this structural system to design projects. Implantable or transformable structures will be considered for research, as they have an adaptable, modular and dynamic character, with *Tensegrity* being the structure chosen for this study.

Keywords: digital architecture, regenerative architecture, parametric structures, deployable structures, *Tensegrity*.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fluxograma do processo metodológico da pesquisa	18
Figura 2 - Modelo da espinha vertebral conectado ao modelo da cintura escapular em Tensegrity.....	21
Figura 3 - Forças que atuam no Tensegrity.....	22
Figura 4 - Tensegrity em estudos de anatomia	23
Figura 5 - Escultura de Kenneth Snelson ,1968. Columbus Museum of Art, Columbus, OH.....	24
Figura 6 - Escultura de Kenneth Snelson – Soft Landing ,1975 - 77	25
Figura 7 - Relação entre frames e sólidos em um Tensegrity	26
Figura 8 - Duas simétricas e irregulares estruturas de Tensegrity – protótipo físico	27
Figura 9 - Origami baseado em estruturas recíprocas	28
Figura 10 - Origami baseado em estruturas recíprocas on Reciprocal Figures.....	28
Figura 11 - Pavilhão iWeb	31
Figura 12 - Pavilhão iWeb	31
Figura 13 - Ajuste de parâmetros de um mesmo modelo	34
Figura 14 - Ajuste de parâmetros de um mesmo modelo	34
Figura 15 - Evolução de um <i>script</i> no Grasshopper	36
Figura 16 - Centro Cultural Heydar Aliyev	38
Figura 17 - Modelagem de pontos de controle em um software CAD, onde uma superfície é gerada por NURBS	42
Figura 18 - Imagem do Projeto da West 8 para a Ponte Cascara	42
Figura 19 - Projeto Aurora por <i>Future Cities Lab</i>	43
Figura 20 - Exoesqueleto - Torre O-14 em Dubai, projeto da Reiser + Umemoto	44
Figura 21 - Sistema Tensegrity de Ordem 1.....	48
Figura 22 - Hastes duplas com palitos unidos por “enforca gato”.....	49
Figura 23 - Protótipos em escala reduzida: sequência de montagem	50
Figura 24 - Testes com diferentes cargas	51
Figura 25 - Procedimentos de montagem	52
Figura 26 - Gráfico Carga x Deslocamento	54
Figura 27 - Variação do Deslocamento das barras x Variação de 1,009 kgf.....	55
Figura 28 - Lógica de montagem e passagem dos fios	56
Figura 29 - Dificuldade de montagem com cabo único.....	57

Figura 30 - Processo de montagem do protótipo.....	58
Figura 31 - Protótipo em bambu, em escala maior.....	59
Figura 32 - Representação da sequência de montagem.....	60
Figura 33 - Início da montagem.....	60
Figura 34 - Tipos de conexões entre cabo e haste.....	61
Figura 35 - Conexão cabo – cabo.....	61
Figura 36 - Conexão haste – cabo.....	62
Figura 37 - Conexão.....	62
Figura 38 - A estrutura montada.....	63
Figura 39 - Croquis das estruturas que conformam os frutos.....	65
Figura 40 - Secção transversal.....	65
Figura 41 - Esquema da topologia do fruto analisado.....	66
Figura 42 - Estrutura autoportante.....	67
Figura 43 - Utilização da geometria do fruto como ponto de partida para a concepção da estrutura e da forma do projeto.....	68
Figura 44 - Vistas, sugestões de coberturas e materialidade do modelo.....	70
Figura 45 - Solução de implantação.....	72
Figura 46 - Modelagem do tensegrity no Rhino (via Grasshopper).....	73
Figura 47 - Montagem do <i>script no Grasshopper</i>	74
Figura 48 - Prisma do tipo <i>Tensegrity</i>	75
Figura 49 - Prisma de base triangular.....	75
Figura 50 - Alterações dos parâmetros em tempo real.....	76
Figura 51 - <i>Tensegrity</i> de torre.....	77
Figura 52 - Alteração dos valores via number slider.....	77
Figura 53 - Alteração das forças de tração e consequente deformação.....	78
Figura 54 - Achatamento da estrutura.....	79
Figura 55 - Achatamento da estrutura.....	79
Figura 56 - O desenho mostra como observar padrões e relações da Tensegrity com geometrias e volumes já conhecidos.....	83
Figura 57 - Diagrama ilustrando o <i>feedback looping</i> , conforme proposto pela Cibernética de Segunda Ordem, nas etapas realizadas no <i>workshop</i>	85
Figura 58 - Analogia de estruturas naturais (colmeia) com as estruturas de tensegridade.....	86
Figura 59 - Diagrama da metodologia aplicada.....	88

Figura 60 - Os 3 tipos de Tensegrity que foram desenvolvidos pelos participantes .	89
Figura 61 - Desenvolvimento do script no Grasshopper por meio das relações com as figuras prismáticas	91
Figura 62 - Com o <i>script</i> mais desenvolvido, as imagens ilustram a facilidade de alteração do design depois do ajuste das parametrizações	92
Figura 63 - Estufa em Marte, projeto proposto pela equipe 1	94
Figura 64 - Desenvolvimento da modelagem paramétrica mediada pela prototipagem, realizado pela equipe que propôs o projeto para o Pantanal	95
Figura 65 - Arquitetura e Coexistência, fotomontagem da equipe que propôs o projeto para o Pantanal	95
Figura 66 - Diagrama dos resultados obtidos	96
Figura 67 - Tipos de Tensegrity	100
Figura 68 - Processo de prototipagem de antiprisma de 5 hastes.....	102
Figura 69 - Protótipos	104
Figura 70 - Desenho esquemático.....	105
Figura 71 - Lógica da construção algorítmica.....	106
Figura 72 - <i>Script grasshopper</i>	107
Figura 73 - <i>Script grasshopper</i>	107
Figura 74 - <i>Script grasshopper</i>	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Grupo Pantanal.....	97
Tabela 2 - Grupo Marte.....	97

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Contextualização e Justificativa.....	13
1.2 Objetivos.....	15
1.3 Procedimentos Metodológicos.....	16
1.4 Estrutura da Dissertação	19
2 TENSEGRITY	20
3 PROCESSOS HÍBRIDOS - ENTRE SCRIPTS E PROTÓTIPOS	30
3.1 Mediação Digital	30
3.2 Geometrias Complexas x Digital	41
3.3 Design paramétrico e arquitetura algorítmica	44
3.4 Prototipagem e fabricação digital	46
3.4.1 Prototipagem Física – Poliedro (Icosaedro)	47
3.4.2 Prototipagem Física – Prisma Triangular	58
3.4.3 Prototipagem Digital	64
4 WORKSHOP	81
4.1 Introdução.....	81
4.2 Metodologia aplicada no <i>workshop</i>	84
4.2 Desenvolvimento	89
4.2.1 Prototipagem Física	89
4.2.2 Prototipagem Digital	90
4.3 Resultados do <i>workshop</i>	93
4.4 Discussão e considerações finais.....	98
5 CATÁLOGO: COMO PRODUZIR ESTRUTURAS DO TIPO TENSEGRITY? .	100
5.1 Introdução.....	100
5.2 Aplicações	109
5.3 Conclusão sobre o catálogo	109
CONSIDERAÇÕES FINAIS	110
REFERÊNCIAS	112
APÊNDICE A - CATÁLOGO	115

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Como tornar a vida nas cidades mais sustentável é uma preocupação atual, pois a qualidade da vida urbana está intrinsecamente ligada ao equilíbrio dos ecossistemas. Nesta pesquisa estudaremos estruturas que performam de forma mais inteligente com o meio ambiente, direcionando o conhecimento da arquitetura ao *design* regenerativo, conforme Buckminster Fuller ambicionava, para assim perceber funções e comportamentos das estruturas da natureza, conforme proposto pelo conceito de Bioinspiração (*Biomimicry*), tanto em relação à performance física e sistêmica dos organismos, quando à própria geometria da forma.

Quando Bucky descobriu que a política jamais traria a “boa vida para todos”, ele anunciou “a revolução da Ciência do *Design*”. A política, dizia ele, decide quem vai sobreviver. Somente por meio da “**Ciência do *Design* Antecipatório Abrangente**” poderiam ser distribuídos, com lisura os recursos do mundo para todos, fazendo com que o emprego das guerras se tornasse obsoleto. No tempo de Bucky, quase nenhum *designer* pensava assim e poucos o fazem hoje em dia. O movimento pelo bem-estar do ambiente focou sua atenção no *design* ecologicamente correto, mas os *designers* ecológicos, com base na biologia, desconfiam muito da tecnologia. Bucky não se dizia um cientista, mas ele afirmava que uma tecnologia bem desenhada, baseada na ciência (Biônica), seria a nossa única chance de sobrevivência (Verschleisser, 2008, p. 86, grifo nosso).

Acreditando no potencial da Ciência do *Design*, conforme citado acima, esta pesquisa trata de estudos de concepção e fabricação digital de *design* de estruturas que, possuem como contexto a busca por inspiração na natureza, visando encontrar meios mais eficientes de construir, não gerando resíduos, e buscando soluções que otimizam o uso de materiais, dentre outras preocupações com as quais o *design* contemporâneo deve se responsabilizar. Então, abordaremos as estruturas implementáveis e mais especificamente as do tipo *Tensegrity*, que embora possam aparentar em um primeiro momento uma forma complexa e de difícil montagem, trazem inúmeras características que se contrapõem ao crescente desgaste dos recursos naturais e a geração de resíduos que não podem ser reaproveitados na construção civil. Podemos destacar nessas estruturas a capacidade de adaptação e implantação menos impactante, pois com geometrias fechadas em si mesmas e praticamente desconsiderando a ação da gravidade, dispensam fundações, já que nesse tipo de espacialidade autoportante, as forças atuam gerando um sistema a que

Buckminster Fuller nomeia de Sinergia – do micro ao macro, de átomos ao cosmos, presente em “tudo” (Fuller, 1975).

A reutilização e mobilidade são outros pontos fortes da estrutura, indicada para construção de abrigos temporários, pavilhões, coberturas, etc. A alta performance estrutural e a capacidade de modularidade conferem à *Tensegrity* a possibilidade de trabalhar em rede facilitando alguns processos de concepção de projetos (LIAPI, 2001). Outro ponto importante a salientar é a pouca materialidade que a estrutura traz em sua forma, e isso mostra a economia evidente e que leva a menos gastos nas obras, como argumenta Burkhardt (2008).

Essa pesquisa pretende, ainda, contemplar o objetivo 9 das ODS, no que se refere ao uso da tecnologia para desenvolver produtos que tragam a inovação atrelada ao desenvolvimento sustentável. Segundo o texto explicativo no site da *Sustainable Development Goals*¹, ainda temos um percurso longo para atingir esse potencial que a tecnologia traz, mas acreditamos que a pesquisa científica e a academia têm esse papel de divulgar e potencializar estudos que se relacionam com o desenvolvimento sustentável, sendo assim, a motivação pelo tema proposto carrega consigo essa responsabilidade social. De acordo com o texto do site citado acima, os países menos desenvolvidos necessitam aumentar o setor de manufatura para atingir a meta estabelecida pelos critérios das ODS até 2030, e em países em desenvolvimento como o Brasil, aumentaram em apenas 1 % os investimentos em pesquisa (dados de 2017), sendo esse um requisito fundamental para o desenvolvimento da tecnologia.

O tema abordado traz estruturas que carregam a inteligência de fenômenos da natureza, e sendo assim, cumprem alguns processos. O reuso dos materiais, por exemplo, faz com que o produto criado não gere resíduo retornando ao ciclo, sendo o mesmo material e cumprindo a mesma função estrutural. No caso dessa pesquisa, essa é uma das características desses produtos que se fundamentam no *Design Regenerativo*, que será explanado mais oportunamente.

Acredita-se que é fundamental, para a pesquisa, entender como a arquitetura regenerativa amplifica o conceito de sustentabilidade, e como funciona o pensamento sistematizado dessa observação, concepção e desenvolvimento dessas estruturas, que são pensadas não apenas por meio da forma pela forma, mas sim por um

¹ Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>

entendimento do sistema relacionado à estrutura, fazendo isso de forma inteligente com apoio da tecnologia, estudando materiais e técnicas.

Com a diminuição dos recursos naturais e os grandes impactos no meio ambiente, a preocupação com a produção mais sustentável é primordial num pensamento consciente e responsável para criação de produtos. Há a necessidade de se planejar toda a vida útil do produto a fim de diminuir seus impactos negativos, e a Arquitetura e a Engenharia – grandes produtoras de edificações, espacialidades, materiais e técnicas – têm que estar atualizadas e pensar em sistemas mais inteligentes e integrados aos sistemas naturais. Acreditamos que seja necessário o pensamento do *design* regenerativo, segundo Pires e Pereira (2017), assim como são necessárias estratégias de bioinspiração nas construções, o que possibilitaria tornar as edificações parte constitutiva, interativa e colaborativa para com o meio ambiente. Nessa concepção idealizada, o projetista faz análises do comportamento das estruturas da natureza, e busca trazer essa inteligência para o projeto de modo integrado e sistêmico. É deste modo, que os estudos e experimentos realizados com as estruturas do tipo *Tensegrity* podem se inserir, com este tipo de pensamento sistêmico e integrador.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal da pesquisa é produzir e analisar modelos tipológicos de estruturas do tipo *Tensegrity*, que ofereçam otimizações em nível estrutural, funcional e com baixo impacto ambiental em função dos recursos mínimos utilizados. Para tal, realizará uma pesquisa de fundamentação teórica e experimentações com estruturas do tipo *Tensegrity*, nas quais foram testados protótipos físicos e digitais e em diferentes escalas, que contribuirão para a criação de um catálogo que possa servir de referência para a produção desse tipo de espacialidade.

Como objetivos específicos temos:

- Produzir protótipos físicos em escalas variadas, que possibilitem análises de forma e função;
- Experimentar diferentes materiais capazes de melhorar a performance estrutural frente ao suporte de cargas e seu reuso (montagem e desmontagem);
- Catalogar tipos de *Tensegrity* sistematizando a sua concepção: modelagem, simulação e prototipagem.

- Contemplar o objetivo 9 das ODS, a saber: o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 9 é sobre "indústria, inovação, infraestrutura e pesquisa".

1.3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A metodologia da pesquisa é baseada no princípio de *feedback looping*, conforme proposto pela Cibernética de Segunda Ordem, no qual há o desenvolvimento dos experimentos e modelos com prototipagem, tanto física quanto digital, retroalimentados por análise e síntese teórica entre cada modelo, de modo sequencial e alternado. A prototipagem também contribui para o método na medida em que se busca a evolução do *design*, no qual cada novo protótipo evolui algum aspecto em relação ao anterior. Foram utilizadas também, estratégias de revisão bibliográfica, análises de referências, entrevistas, pesquisas e análise de documentários que abordam o tema levantado no trabalho, fazendo com que o projeto explore o potencial da interdisciplinaridade que o assunto traz em si.

Para melhor entendimento da pesquisa é necessário conceituar as bases da metodologia utilizada, pois é por essa lógica de pensamento a partir do qual se desenvolveram todos os experimentos e suas implicações.

Segundo Alves (2014), a base da teoria Cibernética² surgiu com o intuito de controle entre a relação homem e máquina no final da década de 1950, conforme proposto por Norbert Wiener. Esta ciência parte do fundamento de que a troca de informações desempenha um papel fundamental nas relações entre seres humanos e máquinas, pois direciona possibilidades buscando o equilíbrio dos sistemas. Logo a comunicação entre os elementos do sistema, sejam homens ou máquinas, assume um papel muito importante na sociedade, já que a partir da lente da Cibernética, a sociedade só pode ser entendida por meio do conhecimento e análise das informações disponíveis sobre seus modos de vida e suas produções.

Assim, Wiener inaugura um desencadeamento científico extremamente relevante, envolvendo noções sistêmicas que se relacionam diretamente com processos de auto-organização, e com os conceitos de Autopoiésis, equilíbrio e trocas de informação, dentre outros, que influenciaram e continuam a

² No final da década de 1950, Norbert Wiener propôs as bases da teoria Cibernética, com o propósito de estabelecer relações de controle e comunicação entre seres humanos e máquinas. Surge então uma ciência onde a comunicação desempenha um papel importante, na medida em que esta se caracteriza por gerenciar possibilidades e equilibrar sistemas. Sua tese era a de que a sociedade só pode ser compreendida através das possibilidades de comunicação existentes. Para ele, as mensagens entre homens e máquinas, entre máquinas e homens e entre máquinas e máquinas, estavam destinadas a desempenhar um papel cada vez mais importante na sociedade (Wiener, 1954, p. 16 *apud* Alves, 2014, p.135).

influenciar a maneira como hoje podemos ver o universo de modo mais holístico e imprevisível (Alves, 2014, p.136).

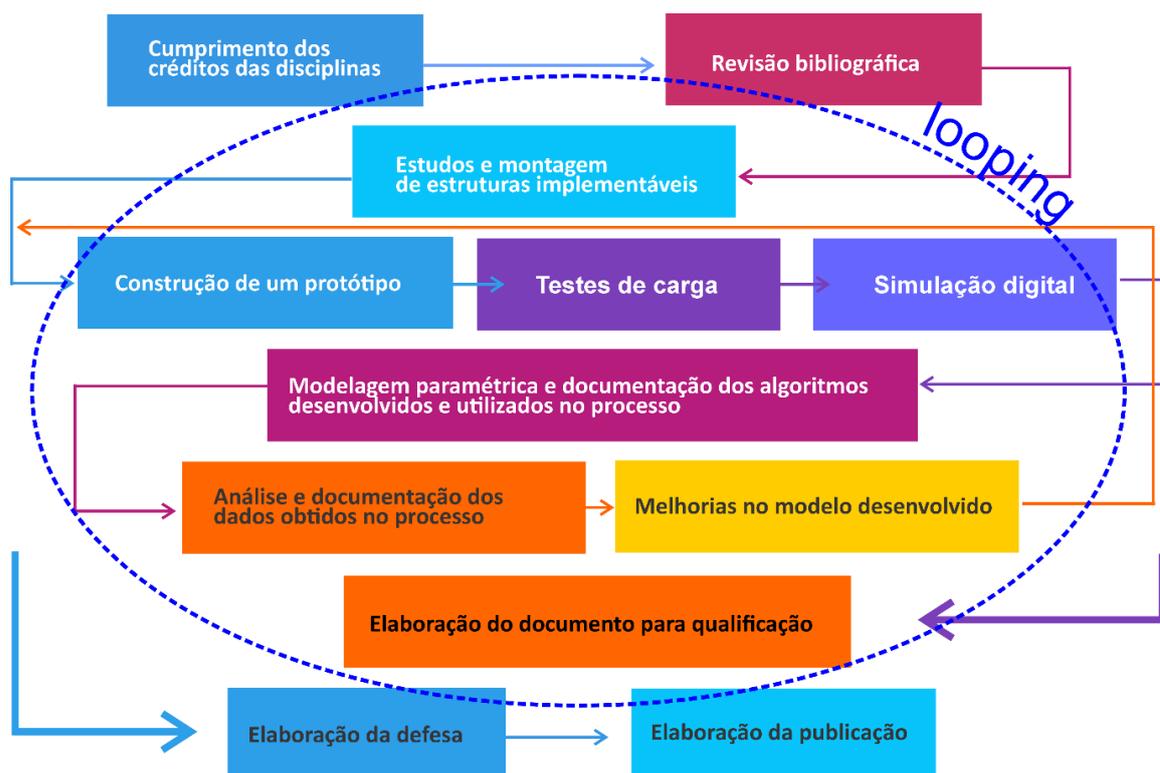
Alves (2014) destaca também, que a Cibernética é a ciência que se fundamenta em observar sistemas e suas trocas de informações, utilizando-se de conceitos que se apoiam em comportamentos de organizações naturais.

Já a Cibernética de Segunda Ordem, que norteia metodologicamente a pesquisa, foi uma atualização proposta por Heinz von Foerster no começo da década de 1970 e que propõe a observação de sistemas, sendo que o próprio sistema que observa pode também ser observado, e com isso sugere o mecanismo de movimento circular de retroalimentação (*feedbackloop*), auto-organização e controle, em direção a um objetivo pré-estabelecido (*goal*). Ainda conforme Alves (2014), isso amplifica a comunicação entre os atores do sistema e o equilíbrio é conseguido por meio de ajustes e refinamentos.

Assim, pretende-se explorar as possibilidades que o ato de desempenhar tem em relação à autorregulação e à responsividade, e isso possibilita a conexão da Arquitetura com a Cibernética, uma vez que com as tecnologias atuais (*internet, hardware, softwares, prototipagem, fabricação digital etc.*) ficam evidenciadas a velocidade na produção de modo otimizado, e a capacidade de experimentações em escala real com o melhor desempenho possível.

Abaixo, apresentamos um fluxograma (Figura 1) que visa representar o processo metodológico da pesquisa, ressaltando que os *feedbacks loops* (retroalimentação) podem ocorrer mais vezes em alguns pontos, de forma que esse pensamento não é linear, mas sim ramificado com pontos de conferência e escolhas alternativas.

Figura 1 - Fluxograma do processo metodológico da pesquisa



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Dados foram colhidos e avançamos para a simulação digital, onde buscamos transpor a experiência da prototipagem no campo real para o digital, desenvolvendo *scripts*, que foram ajustados num processo de experimentação híbrida (sucessivas idas e voltas do modelo físico para o modelo digital). Assim, a prática foi sendo implementada pela tecnologia digital, e o processo ganhou a solidez da experiência do saber fazer que a prototipagem e fabricação digital oferecem. Este pensamento em ciclos que se retroalimentam, destacamos em azul como *looping* no fluxograma. Este *looping* é um *feedback looping* e acontece de forma fluida e de acordo com a necessidade do processo, pois podemos fazer várias interações e ajustes em uma etapa até regularmos o suficiente para avançar e depois voltar para novas implementações.

Portanto, os processos de prototipagem são resultados de estudos de lógica computacional em combinação com a interface gráfica de *softwares* de *design* paramétrico, além de simulações físicas e digitais dos modelos. Desse modo, o projeto contido na pesquisa foi abastecido por experiências retroalimentadas pela teoria e pela prática, o que contribuiu de modo decisivo para produção do catálogo dedicado

a quem desejar se aproximar dos conceitos, técnicas de montagem e programação paramétrica de estruturas do tipo *Tensegrity*.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Além das partes introdutórias, a estrutura da dissertação é composta de quatro capítulos:

No capítulo 1 [*TENSEGRITY*], tratamos das estruturas implantáveis ou transformáveis, em específico a *Tensegrity*. Abordamos aspectos e características dessa estrutura e sua relação com a arquitetura biomimética na busca por sistemas regenerativos de projeto. Os principais autores utilizados foram: Burkhardt (2008), Fuller (1975), Liapi (2001), Pires e Pereira (2017), Snelson (2012), Verschleisser (2008) e Tachi (2012).

No capítulo 2 [PROCESSOS HÍBRIDOS - ENTRE SCRIPTS E PROTÓTIPOS], tratamos da relação da arquitetura mediada pela tecnologia digital, abrangendo elementos fundamentais da fabricação digital contemporânea, tais como: modelagem paramétrica, arquitetura algorítmica, geometrias complexas, prototipagem física e digital, levantando discussões que tratam dessa abordagem híbrida de concepção de projeto, além de testar na prática a transposição físico-digital, retroalimentando a pesquisa, e assim avançando nas experimentações.

No capítulo 3 [WORKSHOP], esse capítulo descreveu e analisou o processo do *workshop* Digital Futures 2022, desenvolvido com metodologia baseada no conceito de *feedback looping*, conforme proposto pela Cibernética de Segunda Ordem. Utilizamos os seguintes autores: Alves (2014), Bertol (2011), Dunn (2012), Hensel, Menges e Weinstock (2010), Iwamoto (2009) e Pawlyn (2016).

O capítulo 4 [CATÁLOGO] apresenta o produto final que visa uma contribuição para futuros pesquisadores, conforme determinado nos objetivos do trabalho. Utilizamos os autores: Liapi (2009), Motro (2003), Snelson (2012), Verschleisser (2008), Victor *et al.* (2018), Zhang e Ohsaki (2015).

Concluimos a dissertação com as Conclusões e as Referências Bibliográficas utilizadas.

2 TENSEGRITY

Passaremos a detalhar os estudos das estruturas do tipo *Tensegrity*, tensoestruturas de bioinspiração, por possuírem alta performance estrutural, serem autoportantes e modulares, além de reutilizáveis tanto em questão de material e função, como de montagem, transporte e desmontagem.

Um importante conceito que essa estrutura traz é a recorrência de partes de sua geometria na natureza. *Tensegrity* é uma estrutura complexa formada por combinações ou costuras de triângulos e hexágonos, cuja estrutura traz em suas características desempenhos que estão presentes em várias estruturas vivas, Fuller (1975), Snelson (2012), Ripper, Seixas e Victor (2018) e Ohsaki e Zhang (2015). Buckminster Fuller, na arquitetura, fez vários estudos e aplicações utilizando essas geometrias. O hexágono tem como característica utilizar o mínimo de área das superfícies (a forma mais econômica de um círculo é um hexágono, por exemplo), e essa é uma propriedade que ocorre com as superfícies mínimas; por exemplo, o padrão das colmeias que são hexágonos minimizam a quantidade de energia e material (cera) que as abelhas usam para construí-las. De acordo com o Pires e Pereira (2017), é esse padrão e essa inteligência que devemos observar para conseguir estruturas eficientes e com pouco material, por exemplo.

As autoras Pires e Pereira (2017) apontam que Bertol (2011) afirma que o *design* inspirado na natureza, traz intrinsecamente outras áreas da ciência para atuarem junto ao projeto, desde forma e beleza como também estruturas e outras performances de utilização de recursos com o máximo de eficiência. Porém, para a arquitetura, observar a geometria das formas e identificar os padrões ajudam a entender os fenômenos (biológicos, físicos, ambientais etc.) envolvidos. A natureza oferece o conceito ou inspiração para se conceber uma forma ou objeto artificial.

Tais modelos paramétricos de estruturas geométricas regenerativas podem ser usados para suportar: a atividade de análise de padrões que moldam as formas do local, no sentido de compreender como estes padrões influenciam nos processos de regeneração; a avaliação de desempenho das estruturas quanto ao condicionamento térmico do edifício projetado; a proposição formal de estruturas em um processo generativo, alcançado por meio de técnicas paramétricas de representação digital (Pires; Pereira, 2017, p. 06).

Conhecer as geometrias complexas das formas naturais e suas superfícies mínimas é, segundo as autoras, o primeiro passo para conseguir representar

parametricamente as geometrias das estruturas naturais visando o *design* regenerativo, conforme explicam as autoras.

Os autores Ripper, Seixas e Victor (2018), trazem uma pesquisa que aborda o sistema estrutural de tensegridade em construção de protótipos para elaboração de modelos didáticos do corpo humano, usando estudos da biomimética e biomateriais para simular comportamento físico próximo à fisiologia dos animais vertebrados e do corpo humano – o que eles chamam de sistema biotensegrity (Figura 2):

Figura 2 - Modelo da espinha vertebral conectado ao modelo da cintura escapular em Tensegrity



Fonte: Revista Estruturas Autoportantes Biotensegrity Aplicando Materiais Naturais", p. 152 -171. In: Métodos e Processos em Biônica e Biomimética: a Revolução Tecnológica pela Natureza. p. 167.

Para Pawlyn (2016), biomimética é quando o *design* é resolvido inspirando-se na inteligência da natureza, ou seja, observando como os sistemas biológicos funcionam e se relacionam (Cibernética de Segunda Ordem), e, portanto, valendo-se de uma grande fonte de aprendizado encontrar soluções mais sustentáveis. Segundo o autor (Pawlyn, 2016), a natureza vem trabalhando há bilhões de anos nesse processo evolutivo e regenerativo do mundo natural.

Os seres humanos alcançaram algumas coisas verdadeiramente notáveis, como a medicina moderna e a revolução digital, mas quando se vê algumas das extraordinárias adaptações que evoluíram em organismos naturais, é difícil não sentir uma sensação de humildade sobre o quanto ainda temos que aprender (Pawlyn, 2016, p. 01, tradução nossa³).

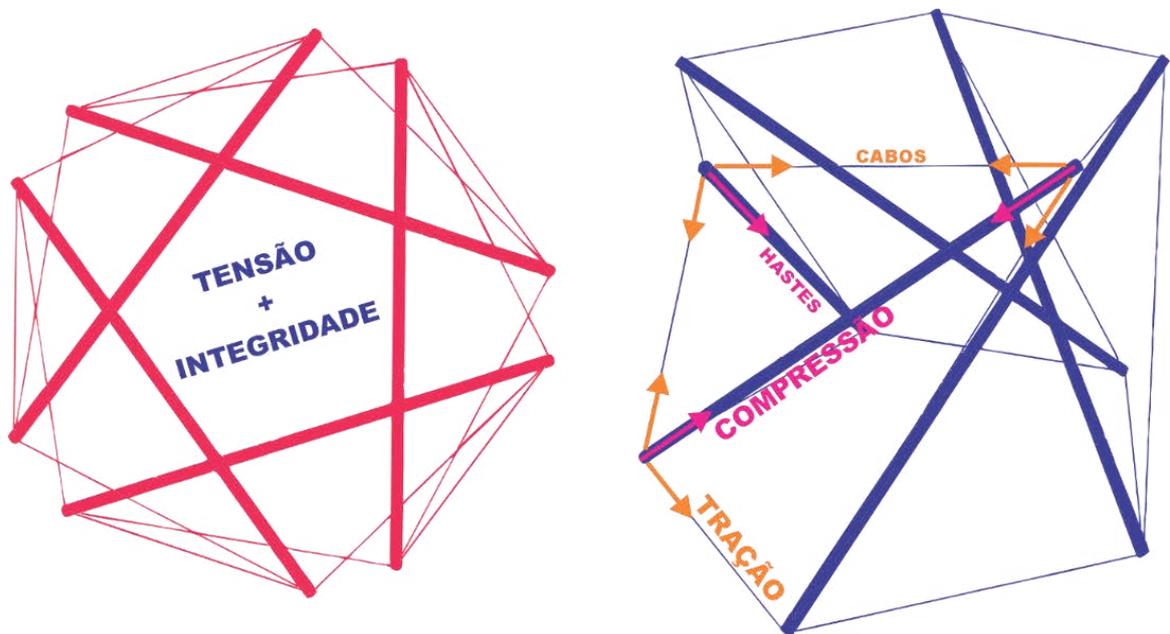
³ **Do original em Inglês:** Humans have achieved some truly remarkable things, such as modern medicine and the digital revolution, but when one sees some of the extraordinary adaptations that have evolved in natural organisms, it is hard not to feel a sense of humility about how much we still have to learn.

O autor ainda argumenta que apesar da grande capacidade criativa da mente humana, a biologia passou por anos e anos de lapidação evolutiva, e é nessa ideia, de que sozinho não se pode atingir essa eficiência, que o *design* contemporâneo deve se apoiar. É importante ressaltar que a biomimética ultrapassa a abordagem de referência estética, e é dessa forma que a pesquisa irá adotar o termo.

Na engenharia biomédica, segundo os autores Ohsaki e Zhang (2015), os pesquisadores estavam interessados em usar a estrutura de tensegridade para simular o comportamento estrutural de um vírus de acordo com a mudança de ambiente.

Na imagem abaixo (Figura 3), pode-se perceber como as forças se organizam em um sistema equilibrado e fechado em si mesmo, em princípio. As hastes não se tocam, uma vez que os cabos tensionados são responsáveis pela transmissão e distribuição dos esforços.

Figura 3 - Forças que atuam no Tensegrity



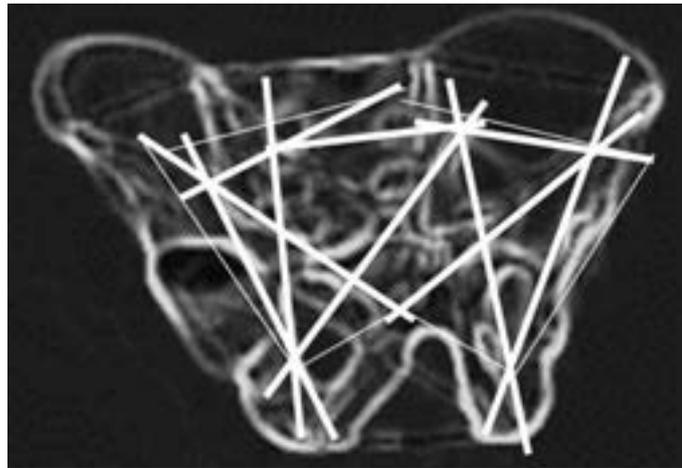
Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Estruturas do tipo *Tensegrity* são bastante usadas na biomecânica e em estudos de anatomia, engenharia aeroespacial, automação e robótica. Erik Demaine⁴

⁴ **Erik Demaine:** Erik D. Demaine (nascido em 28 de fevereiro de 1981) é professor de ciência da computação no Massachusetts Institute of Technology e ex-criança prodígio. Demaine concluiu seu bacharelado aos 14 anos na Dalhousie University, no Canadá, e concluiu seu doutorado na University of Waterloo aos 20 anos. A dissertação de doutorado de Demaine, um trabalho no campo do origami computacional, foi concluída na Universidade de Waterloo sob a supervisão de Anna Lubiw e Ian Munro. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Erik_Demaine. Acesso em: 28 jul. 2023.

mostra várias aplicações em seus estudos e aulas no MIT que estão disponíveis no site <http://erikdemaine.org/>. Especialistas usam as estruturas para simular movimentos mecânicos comparando-os com articulações, ossos e músculos dos organismos humanos (Verschleisser, 2008). O diagrama esquemático abaixo (Figura 4) ilustra as forças que atuam no sistema de tensegridade nessa suposta comparação, ou como preferimos, inspiração.

Figura 4 - Tensegrity em estudos de anatomia



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Analisando uma aplicação direta de estruturas do tipo *Tensegrity*, destacamos o atrativo de ser uma tecnologia mais econômica e de grande desempenho, conforme comenta Burkhardt (2008). Segundo ele, os elementos de tração predominam em relação aos que sofrem compressão, sendo estes os mais intensivos em materiais, porém são minimizados perante a natureza da própria estrutura, logo há uma redução de gastos.

A imagem abaixo (Figura 5) ilustra uma das famosas esculturas de Kenneth Snelson, feito em aço inoxidável medindo 3 x 4,3 x 4,3 m.

Figura 5 - Escultura de Kenneth Snelson ,1968. Columbus Museum of Art, Columbus, OH



Fonte: <http://kennethsnelson.net/category/sculptures/outdoor-works/>.

Burkhardt (2008) afirma que a configuração das estruturas de tensegridade permitem uma produção em larga escala, e sendo mais viável economicamente, tornaram-se mais eficientes para construção de pontes, edifícios entre outras estruturas do tipo *Tensegrity*. Ele complementa explicando que construir estruturas onde as condições de fundação são mínimas – por sua própria característica – é muito útil em áreas de confinamento – áreas urbanas congestionadas, terrenos perigosos ou acidentados, ou até mesmo fora do planeta, em outras forças gravitacionais, dentre outras aplicações.

Se formos além do pensamento prático e econômico que a *Tensegrity* traz em sua composição formal, estrutural e olharmos as estruturas de tensegridade como um corpo que carrega as forças encontradas em todas as formas da natureza e que de maneira sistêmica as mantém em equilíbrio como: ossos, articulações e músculos, estrutura atômicas e vegetais, as quais Buckminster nomeia de Sinergia - micro ao macro, átomos a cosmos, presente em “tudo” (Fuller, 1975). Especulamos de que se

trata de um conceito que amplifica as potencialidades que a arquitetura pode atingir atualmente.

Assim, nesse sistema vivo de interações e dinamicidade, porém equilibrado em sua estrutura, estruturas do tipo *Tensegrity* respondem às estas problemáticas, já que representam um tipo de estrutura espacial responsiva e implementável.

A imagem abaixo (Figura 6) apresenta uma escultura do artista Snelson que ficou em exibição no *Berlin Nationalgalerie*, na Alemanha.

Figura 6 - Escultura de Kenneth Snelson – *Soft Landing*, 1975 - 77

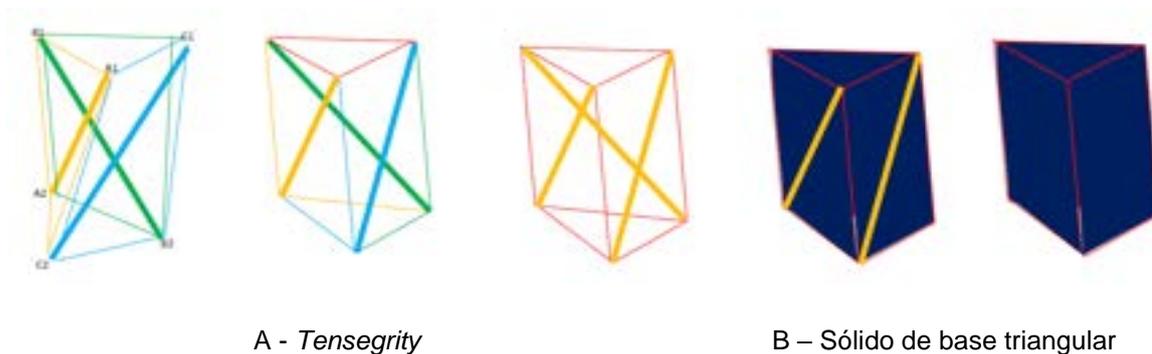


Fonte: <http://kennethsnelson.net/category/sculptures/outdoor-works/>

O funcionamento mecânico de alguns seres vivos, como os vertebrados, pode ser considerado uma estrutura de tensegridade e os experimentos a serem desenvolvidos nesta pesquisa objetivam interação mais integrada com o espaço arquitetônico. Portanto, pela característica de ser modular, flexível, ter leveza estrutural e alta performance com pouca materialidade, além de serem autoportantes, as estruturas de tensegridade são indicadas para inúmeros tipos de espacialidades e funções. Porém, apesar dessas vantagens estruturais e de economia de energia e gastos, as estruturas *Tensegrity* tem o uso pouco difundido devido a sua complexidade geométrica, desde a concepção até a montagem, sendo este desafio uma motivação para se buscar melhores caminhos e aplicações para esse tipo de estrutura.

O desenho esquemático abaixo (Figura 7) mostra uma transição de uma *Tensegrity* e sua estrutura de *frames*, para um sólido geométrico (prisma), para ilustrar como essa unidade é capaz de cumprir sua função estrutural com pouca materialidade.

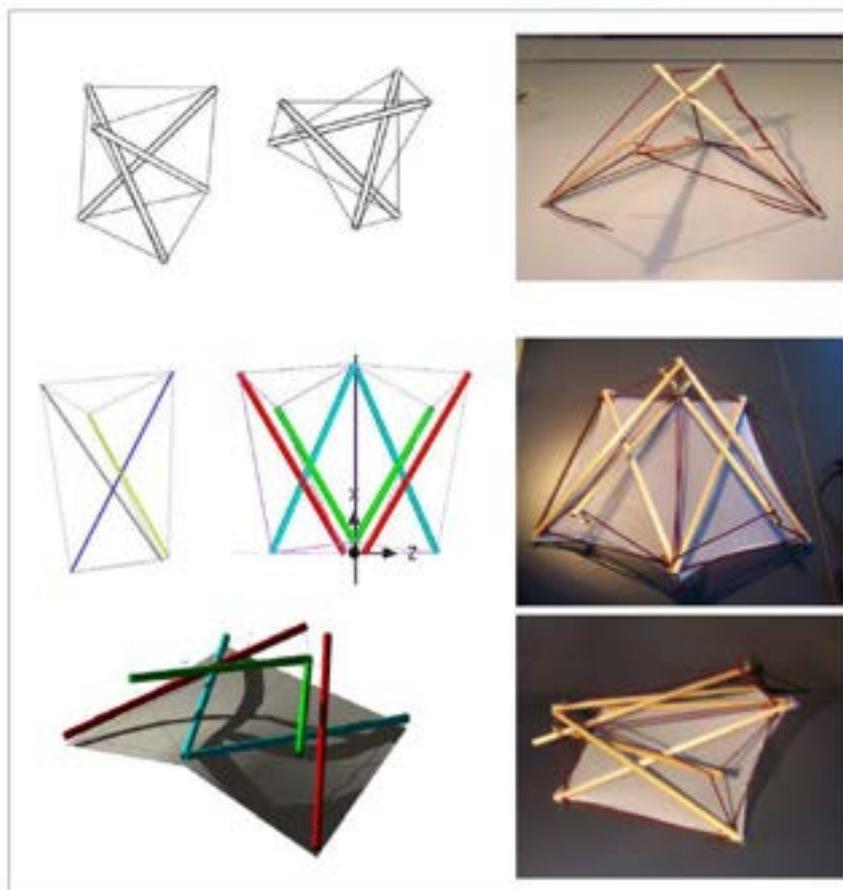
Figura 7 - Relação entre frames e sólidos em um Tensegrity



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Liapi (2009) traz em seu artigo o uso do conceito de tensegridade para o projeto das estruturas leves do Museu Marítimo Helênico, que sendo dois tipos de formas geométricas de Tensegrity foram estudadas.

Figura 8 - Duas simétricas e irregulares estruturas de Tensegrity – protótipo físico



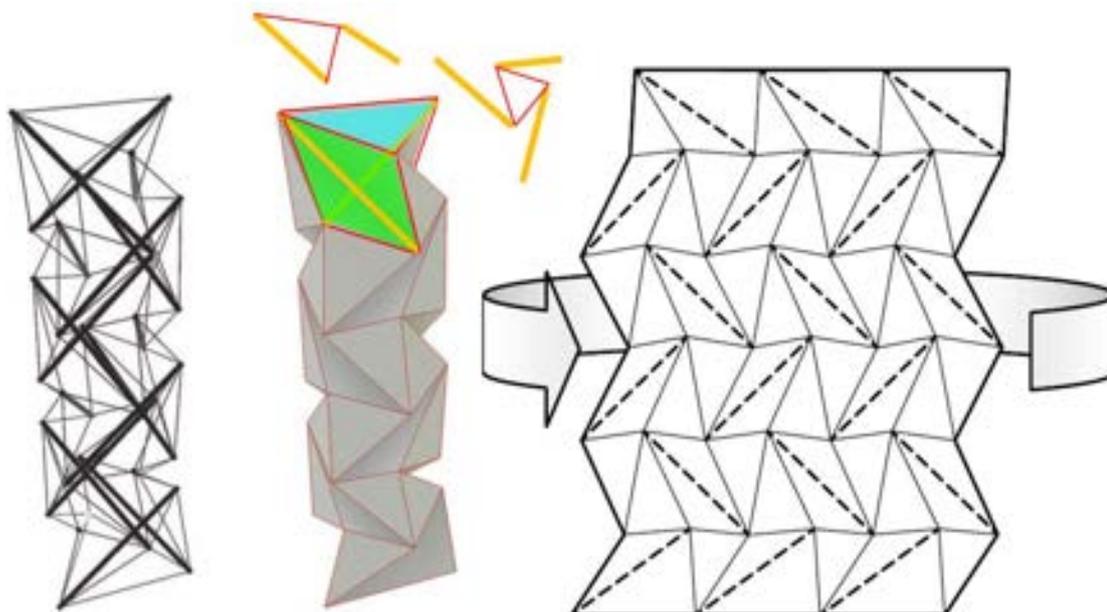
Fonte: *Tensegrity Structures for the Hellenic Maritime Museum Katherine* (Liapi, 2009).

Num primeiro momento uma geometria com configuração conhecida, prismática, e depois, outras configurações foram estudadas no projeto com ajuda de modelos físicos de pequena escala, e isso conduziu as duas novas estruturas de tensegridade (Figura 8).

Os protótipos físicos representam o melhor meio de análise de estruturas do tipo *Tensegrity*, conforme Liapi (2001), facilitando a exploração de novas montagens, já que para autora, é nessa etapa que se encontram os maiores desafios deste tipo de estrutura, pois qualquer imprecisão de medidas pode afetar a sua rigidez, que é o que sustenta a forma, ou seja, os elementos tensionados.

As figuras abaixo (Figura 9; Figura 10), mostram essa dificuldade metodológica devido a sua complexidade geométrica, mas, além disso, ilustram as relações entre as estruturas implementáveis (estruturas recíprocas, tecelagem, *Tensegrity*, tesouras, origamis, por exemplo).

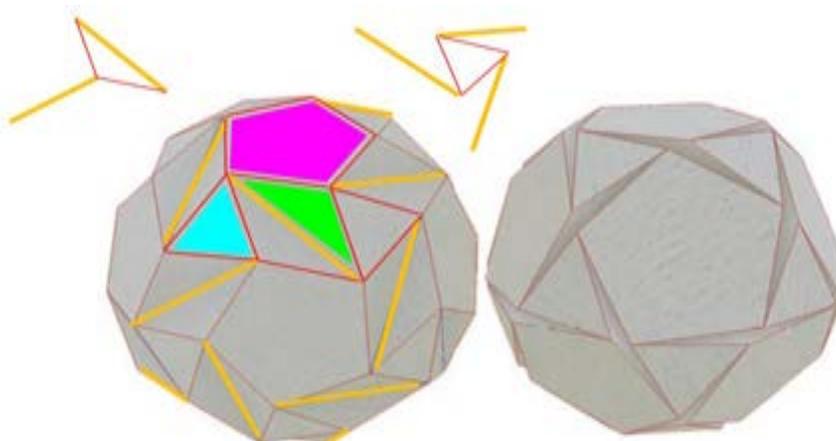
Figura 9 - Origami baseado em estruturas recíprocas



Fonte: Figura adaptada do artigo *Design of Infinitesimally and Finitely Flexible*

Observar as relações entre os tipos de estruturas e as geometrias que elas abordam, nos ajuda a transpor essas lógicas para os *scripts*, como um ponto de partida para o pensamento lógico necessário para exploração da modelagem algorítmica. Isso será demonstrado na modelagem paramétrica no capítulo a seguir.

Figura 10 - Origami baseado em estruturas recíprocas on Reciprocal Figures



Fonte: Figura adaptada do artigo *Design of Infinitesimally and Finitely Flexible*

A natureza tem uma sofisticada e complexa inteligência, buscando sempre de modo sistêmico e equilibrado, alcançar melhor desempenho estrutural, resistência, economia de materiais e energia, dentre outros. Incorporar esse conhecimento dos organismos e sistemas naturais nos processos de concepção de projeto tem relevância por se tratar de uma inteligência construtiva que se comporta com menos impacto negativo no meio ao qual se integra, pois trazem em si funções e comportamentos próximos aos sistemas vivos.

Conforme descrito nos objetivos da pesquisa, propõe-se desenvolver uma sistematização de informações que possam percorrer as estruturas do tipo *Tensegrity*, seu funcionamento, sua geometria e estrutura, e a partir desse conhecimento aperfeiçoar vários protótipos físicos e digitais, de maneira a conseguir gerar uma sistematização de dados a serem resumidos em um catálogo, de modo fornecer um possível *framework* que facilite o acesso a esse pensamento estratégico para pesquisadores e pesquisas futuras.

3 PROCESSOS HÍBRIDOS - ENTRE SCRIPTS E PROTÓTIPOS

3.1 Mediação Digital

A arquitetura, segundo Dunn (2012), tem como aspecto fundamental a habilidade de comunicação e com o surgimento de processos de projetos aliados à tecnologia se tem ampliado essa capacidade, já que inúmeras técnicas, *softwares*, objetos físicos e digitais, modelos em diferentes escalas com diferentes materialidades podem ser experimentados, tornando o processo mais carregado de informações (dados) se comparados com os métodos tradicionais. A modelagem digital permitiu aos pesquisadores no campo da Arquitetura a possibilidade de explorar tipos de *design* muito complexos de serem resolvidos apenas no lápis e papel.

Em particular, o surgimento de um novo *software* de modelagem computacional, que permite que sistemas paramétricos e organizações “biológicas” complexas sejam gerados e explorados, oferece novos caminhos para a produção de design holístico e fabricação de componentes detalhados para o designer de arquitetura (Dunn, 2012, p. 06, tradução nossa⁵).

Segundo o autor, Dunn (2012), essas mudanças na forma de pensar estão além da disciplina da arquitetura, já que implica em aspectos culturais, pois a pesquisa e a tecnologia estão cada vez mais transdisciplinares e multidisciplinares, e se espalhando pelo mundo, sendo tecnologias CAD/CAM⁶ (Manufatura Assistida por Computador), CNC⁷ (Controle Numérico Computadorizado) e prototipagens variadas, sejam aditivas ou subtrativas, as mais difundidas.

As imagens abaixo mostram o *iWeb*, um pavilhão desenvolvido pelo ONL, um escritório holandês liderado pelo arquiteto e professor Kas Oosterhuis, que também foi líder do grupo de pesquisa *Hyperbody*, da TU Delft (Figura 11; Figura 12).

⁵ **Do original em Inglês:** In particular, the emergence of new computational modeling software, which allows parametric systems and complex “biological” organizations to be generated and explored, offers new avenues of holistic design production and detailed component manufacturing for the architectural designer.

⁶ Como um termo abrangente, o **CAD** (em inglês: *computer aided design*) abrange uma vasta gama de programas que produzem resultados diferentes. Alguns criam apenas desenhos bidimensionais, enquanto outros são capazes de renderizações e animações tridimensionais altamente sofisticadas” (Dunn, 2012, p. 34).

⁷ **Controle Numérico Computadorizado** ou Controlo Numérico Computadorizado (sigla CNC, do inglês *Computer Numeric Control*), eventualmente chamado de *comando numérico computadorizado*, é um método que controla os movimentos de máquinas pela interpretação direta de instruções codificadas na forma de números e letras. O sistema interpreta os dados e gera o sinal de saída que controla os componentes da máquina. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Controle_Num%C3%A9rico_Computadorizado. Acesso em: 16 jul. 2023.

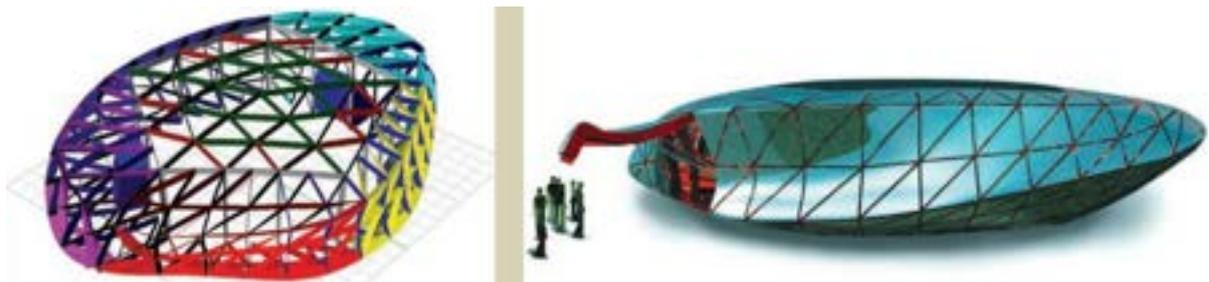
Figura 11 - Pavilhão iWeb



Fonte: Digital Fabrication in Architecture

As figuras mostram como o método de fabricação digital foi utilizado em todos os processos do projeto - concepção, modelagem e prototipagem.

Figura 12 - Pavilhão iWeb



Fonte: Digital Fabrication in Architecture

Para Dunn (2012), atualmente, os processos digitais estão presentes desde a concepção do projeto até a sua elaboração e montagem final, isso dá ao *designer* maior capacidade exploração e análise de performance de um projeto, pois há muitas camadas de conhecimento e tecnologia envolvidas em cada etapa: modelagem, simulação digital, prototipagem, além da visualização tridimensional da espacialidade, o que permite maior entendimento do projeto. O professor Gilfranco Alves, pesquisador do PPGEES/UFMS, soma-se a esta visão estratégica e propõe, de modo complementar, que:

Processos de projeto com mediação e produção digital são cada vez mais utilizados na Arquitetura. Inicialmente explorados apenas no auxílio à representação, os processos digitais de projeto demonstram ser atualmente elementos fundamentais nas possibilidades de concepção, assim como na mudança dos paradigmas da própria Arquitetura (Alves, 2014, p. 02).

Integrante da mediação digital, a fabricação digital, de acordo com Dunn (2012), é uma parte do processo CAD/CAM, na qual primeiramente o objeto é modelado em *software* tridimensional, e depois são produzidos os modelos físicos através da prototipagem rápida (a qual lê dados digitais e os transforma em um produto). Esse processo, conhecido como *file-to-factory* (do arquivo à produção), é revisado e remodelado numa espécie de *looping* interativo, até alcançar o modelo final (ou protótipo final) desejado, para que se possa construí-lo em escala real.

O potencial de fazer coisas diretamente a partir de informações de *design* precipitou uma transformação nas disciplinas de *design*, pois permite que o *designer* se envolva com todo o processo, desde o conceito até o produto final, de uma maneira sem precedentes (Dunn, 2012, p. 20, tradução nossa⁸).

Essa possibilidade mais fluida de transitar entre as etapas de projeto desde a concepção até sua construção, exige maior participação e uma visão mais integrada do processo, pois na fabricação digital não se trata apenas de migrar o desenho de régua e lapiseira para o computador, mas sim uma nova forma de conceber um projeto, no qual a modelagem é tridimensional e orientada a objetos. Esta modelagem pode ainda ser gerada por algoritmos ou *scripts* de programação, como também são conhecidos, e a forma ser buscada é aperfeiçoada por testes e simulações físicas e digitais, visando melhor desempenho, de acordo com os parâmetros que o projeto se destina.

No *design* computacional, a forma não é definida por meio de uma sequência de procedimentos de desenho ou modelagem, mas gerada por meio de processos algorítmicos baseados em regras (Hensel *et al.*, 2010, p. 51).

Isso significa um salto no modo de se projetar, no qual o projetista agora não arbitra alguma forma “de baixo para cima”, mas torna-se, sim, um mediador de informações que não somente condicionam, mas também são intrínsecas ao projeto. Dessa forma, projetar envolve uma nova linguagem e estabelece relações entre

⁸ **Do original em inglês:** The potential to make things directly from design information has precipitated a transformation in design disciplines, as it allows the designer to engage with the entire process from concept to final product in an unprecedented manner.

homem e máquina a partir de *inputs* que serão trabalhados dentro de uma linguagem de aproximação e diálogos que faz essa relação acontecer.

Alves (2014), também aponta questões sobre a concepção de projeto por meio da mediação digital.

Portanto este conjunto de procedimentos exploratórios tende a localizar o discurso arquitetônico dentro de um objetivo mais recortado onde diversos parâmetros como o uso eficiente dos recursos, o comportamento dos materiais, a incorporação de conceitos biológicos de organização e interação, o equilíbrio sistêmico, o potencial da geometria como suporte estrutural, entre outros, substituem assim as especulações estético-formais de obras do período pós-moderno que estavam vigendo até a virada do século, e que poder-se-ia afirmar, privilegiavam a representação em detrimento do desempenho (Alves,2014, p. 36).

Sendo assim, acredita-se que não seja desejável a manutenção de métodos tradicionais de projeto, já que podemos ter controle sobre parâmetros e informações que agora podem ser testados em protótipos físicos e digitais, para serem melhorados antes do projeto ser executado, minimizando erros característicos das obras em geral.

Isso envolve várias camadas de mudanças, e se, ao que tudo indica, o mundo caminha sempre em busca de lucro e acúmulo de capital, mas ao mesmo tempo os recursos naturais do planeta são finitos, é justificável pensar em economia de recursos, e diminuir erros no projeto significa muito provavelmente reduzir erro na obra, pois há como verificar tudo por simulações de modelagem de informação no ambiente digital contemporâneo representado pelos *softwares* disponíveis no mercado. Iwamoto (2009) traz uma contribuição importante sobre esse estreitamento entre o projeto e a construção:

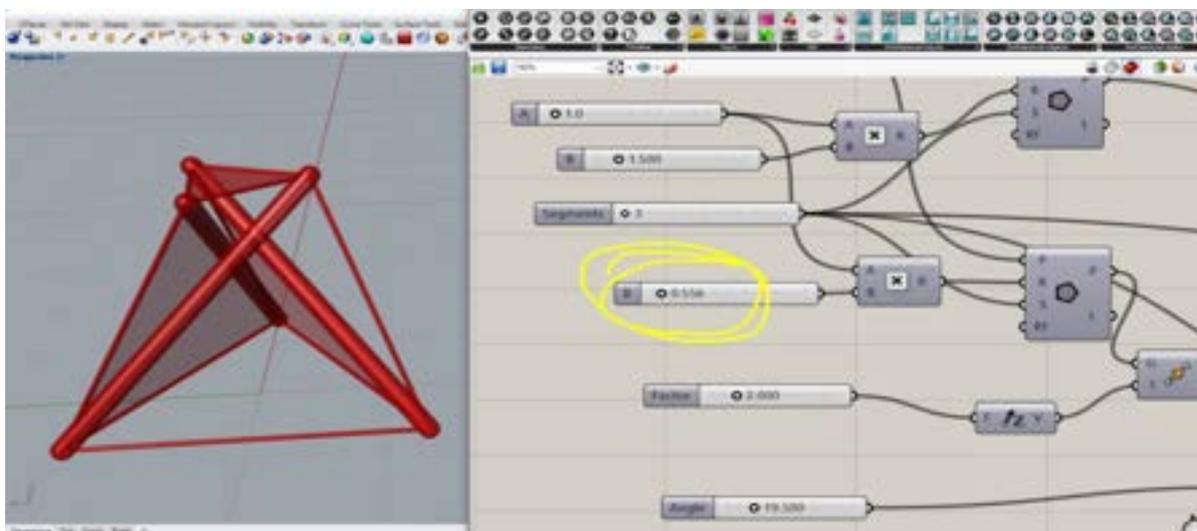
As práticas digitais têm o potencial de estreitar a lacuna entre a representação e a construção, proporcionando uma conexão hipoteticamente perfeita entre o *design* e a execução. Como em qualquer processo de *design*, no entanto, existem invariavelmente lacunas entre os modos de fazer. E, como acontece com todas as ferramentas de produção, as próprias técnicas que abrem essas investigações têm seus próprios conjuntos de restrições e articulam formas particulares de trabalhar (Iwamoto, 2009, p. 04, tradução nossa⁹).

Partindo destes princípios, passaremos a exemplificar alguns processos digitais a partir de modelagens paramétricas que se aproximam das questões acima tratadas.

⁹ **Do original em Inglês:** Digital practices have the potential to narrow the gap between representation and building, affording a hypothetically seamless connection between design and making. As with any design process, however, there are invariably gaps among the modes of making. And, as with all tools of production, the very techniques that open these investigations have their own sets of constraints and gear particular ways of working.

As imagens abaixo (Figura 13; Figura 14) ilustram, por exemplo, a mudança do valor de uma variável (área da cobertura) que foi estipulada como um dos inputs a serem testados e avaliados.

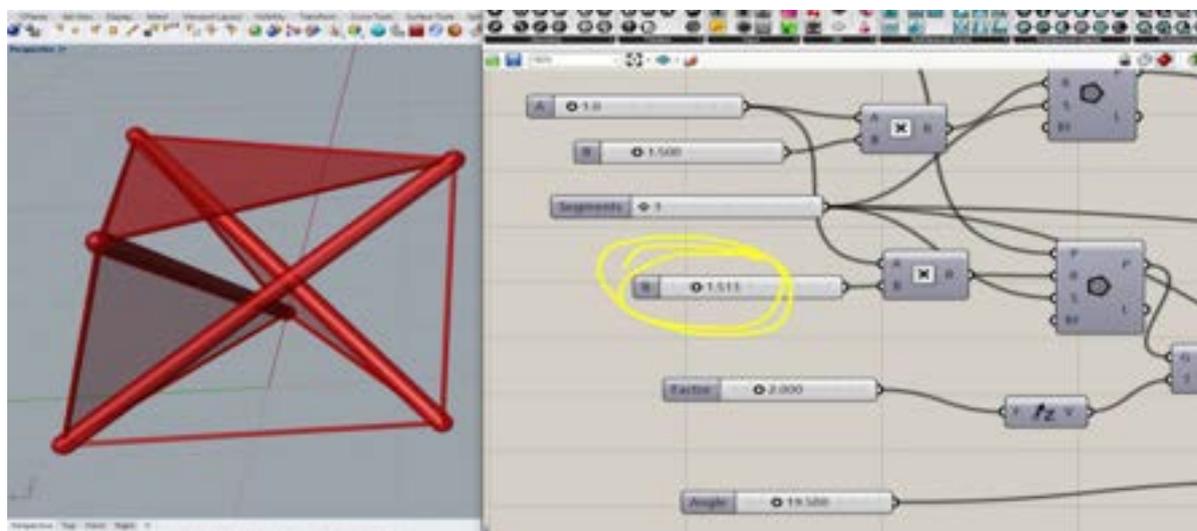
Figura 13 - Ajuste de parâmetros de um mesmo modelo



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Na modelagem paramétrica define-se uma família de possibilidades cujos valores numéricos dos parâmetros podem ser alterados facilmente e em tempo real, a partir da entrada de valores numéricos dinâmicos.

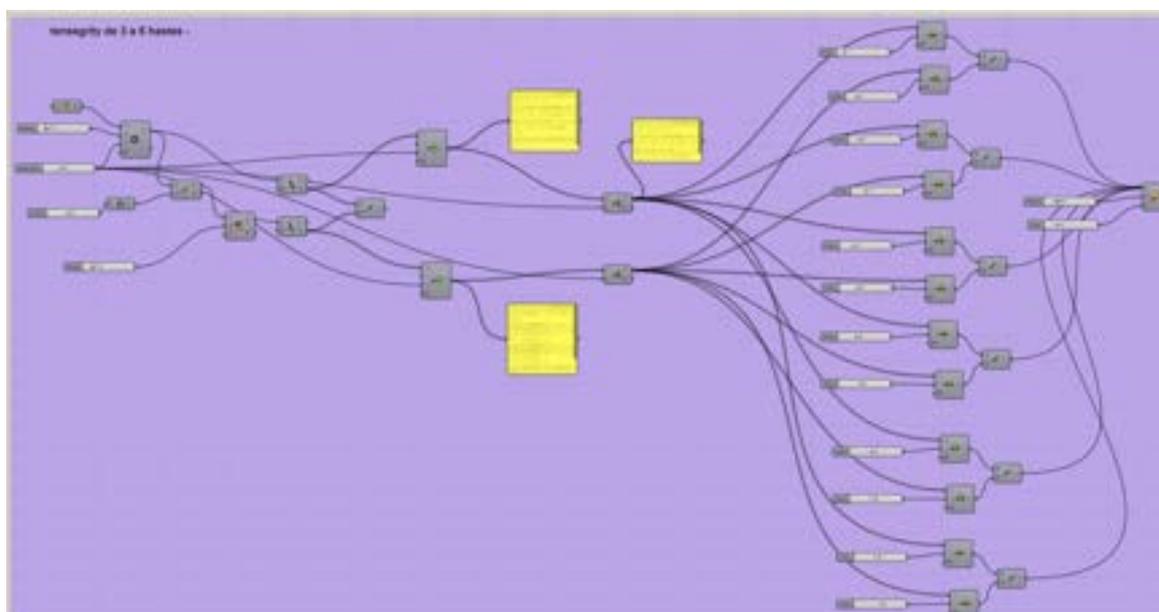
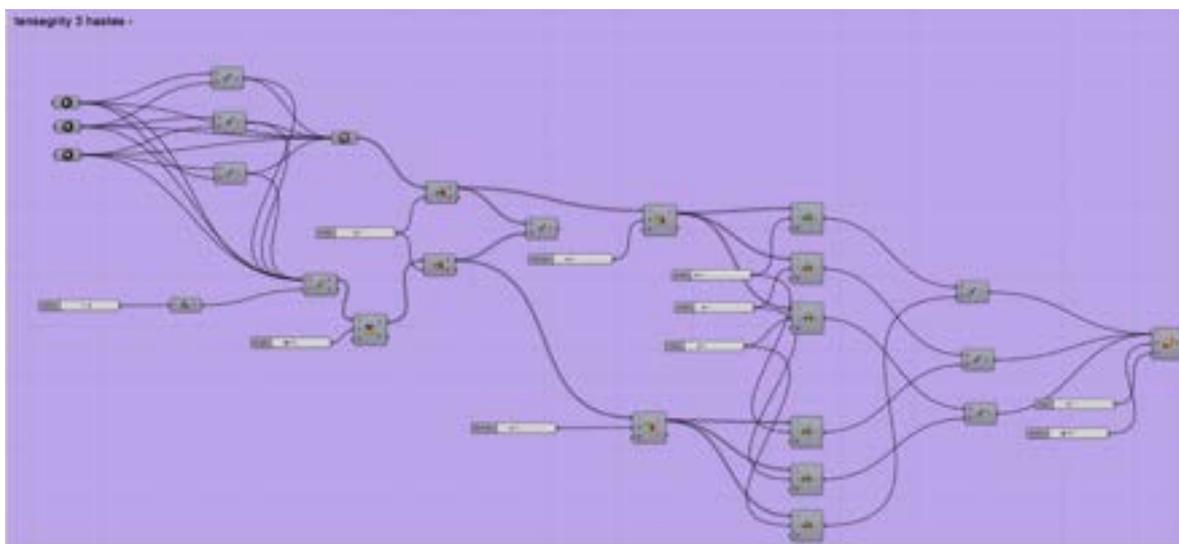
Figura 14 - Ajuste de parâmetros de um mesmo modelo

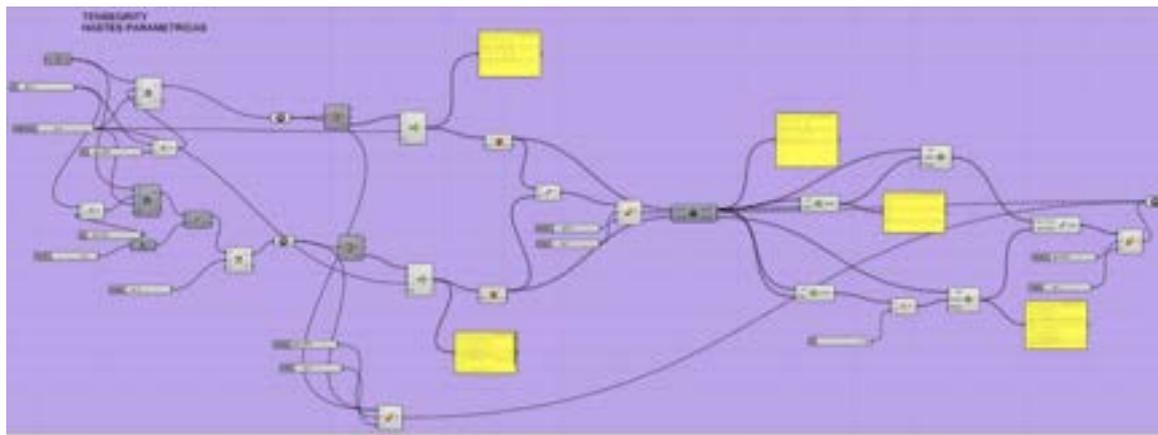


Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

A próxima imagem mostra três *scripts* que foram aperfeiçoados durante a concepção de um determinado *design* (Figura 15). Isso ilustra que, por ser um processo que lida com inteligências integradas (homem x máquina), não significa que seja menos trabalhoso, porém é sem dúvidas um processo mais assertivo nas tomadas de decisões e, portanto, permite investigações em propostas mais complexas e ousadas, amplificando conseqüentemente o potencial criativo do arquiteto e *designer*. A seqüência de imagens ilustra blocos de *scripts* dentro de cada bloco estão comandos, algoritmos, que constroem um modelo digital por parâmetros definidos nestes *scripts*.

Figura 15 - Evolução de um *script* no Grasshopper





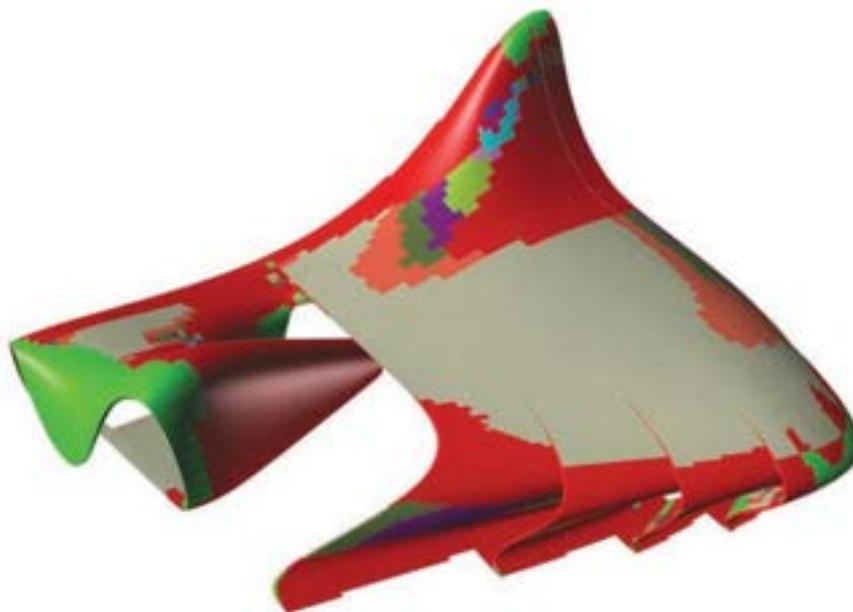
Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Cada bloco, como dito antes, foi aperfeiçoado, conforme as análises do projetista, podendo ficar registrado os caminhos desse processo, como mostra a figura. Esses scripts são informações com parâmetros que geram a estrutura, então, mesmo que seja um processo demorado, investigativo e contínuo de aprimoramento e adaptações, é, também, um modo de projetar que gera bibliotecas de scripts que podem ser reutilizadas e retroalimentadas.

A imagem (Figura 16) abaixo mostra a análise de desempenho (em *software* digital) dos painéis de revestimento externo para o **Centro Cultural Heydar Aliyev**, Baku, por Zaha Hadid¹⁰. Segundo a matéria no *ArchDaily* (no site <https://www.archdaily.com.br/br/01-154169/centro-heydar-aliyev-zaha-hadid->), um dos maiores desafios do projeto foi o desenvolvimento dessa pele, que só foi conseguida por meio diferentes lógicas e sistemas de construção que foram regulados pela computação gráfica avançada que permitiu a comunicação desses elementos complexos do projeto.

¹⁰ **Zaha Mohammad Hadid**, DBE (Bagdá, 31 de outubro de 1950 – Miami, 31 de março de 2016) foi uma arquiteta e designer iraquiano-britânica, reconhecida com uma das maiores arquitetas do final do século XX e começo do século XXI. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Zaha_Hadid. Acesso em: 16 jul. 2023.

Figura 16 - Centro Cultural Heydar Aliyev



Fonte: *Digital Fabrication in Architecture*, p.21.

A arquitetura contemporânea deve estar atenta ao seu tempo, e estamos em tempos de escassez de recursos naturais, de grandes desgastes e problemas ambientais e vivendo o que muitos indicam como o final do antropocentrismo, isto é, a visão de que o ser humano é não só apartado do conceito de natureza, como achasse um ser superior aos demais. Logo, não utilizar a tecnologia disponível para avaliar, testar, e retroalimentar o processo de projeto seria cegar-se diante da seriedade que o assunto aborda. A tecnologia deve ser uma aliada, já que a mente humana não é capaz de superar o processamento de dados massivamente, assim como proceder de cálculos de geometrias complexas e simular o comportamento de estruturas, por exemplo, com a eficiência de um algoritmo ou *script* bem definido.

É inconcebível hoje imaginar projetar edifícios sem o uso de computadores. Eles são usados em todas as etapas do processo arquitetônico, desde o projeto conceitual até a construção. Modelagem e visualização tridimensional, descoberta de forma generativa, sistemas de modulação com script, análises estruturais e térmicas, gerenciamento e coordenação de projetos e produção de arquivo para a fábrica são apenas algumas das práticas digitais empregadas por arquitetos e consultores de construção (Iwamoto, 2009, p. 05, tradução nossa¹¹).

¹¹ **Do original em Inglês:** It is inconceivable today to imagine designing buildings without the use of computers. They are used at every step of the architectural process, from conceptual design to construction. Threedimensional modeling and visualization, generative form finding, scripted modulation systems, structural and thermal analyses, project management and coordination, and file-to-factory production are just some of the digital practices employed by architects and building consultants.

De modo complementar a Iwamoto (2009), Dunn (2012) afirma que o avanço tecnológico e o desenvolvimento de *softwares* e processos ocorreram a partir de projetos específicos, ou seja, as novas ideias no design impulsionam inovações. O autor traz como exemplo a Gehry¹² & Associates, cujo projeto com geometrias complexas precisou desenvolver ferramentas digitais capazes de realizar a ideia proposta, no caso, *o Disney Concert Hall*. De acordo com o autor, o projeto usou modelagem física e depois um digitalizador 3D para escanear o modelo físico e alimentar os dados no computador e assim ajustar o modelo por meio da tecnologia digital, configurando assim, um processo híbrido de *design*.

Esse desenvolvimento é transformador à medida que evoluímos para fora da era da informação, em que a tecnologia digital impulsionou as possibilidades de criatividade, para uma situação em que nossas ideias estão ultrapassando os limites de tais tecnologias, facilitando mais inovação e exploração (Dunn, 2012, p. 32, tradução nossa¹³).

Para Iwamoto (2009) o projeto da *Gehry Partners* e *Gehry Technologies* expandiu o pensamento do processo de concepção de projeto e reestruturou o processo de construção - a integração com a tecnologia digital era fundamental devido ao desafio proposto por geometrias altamente complexas. Inicialmente foram usados processos de modelagem CAD/CAM para depois testar a possibilidade de sua execução, então o processo foi construído de forma não linear, passando de físicos para digitais.

Afirma ainda Iwamoto (2009), que de forma simplificada o modelo digital serviu para a produção física do projeto, usando uma máquina na qual esculpiam a forma cortando o material, e esse método mostrou que essas complexidades da geometria e do processo de fabricação digital não afetaram significativamente o custo da produção. É a partir dessa percepção que surge o interesse maior pela ideia de fabricação customizada, que tem o mesmo esforço e custo de uma fabricação serial em massa.

Vários projetos inovadores ajudaram a instigar esta avenida de pesquisa de design e moldar uma nova geração de arquitetos. Dentro de um período de cerca de cinco anos começando em meados da década de 1990, surgiu uma

¹² **Frank Owen Gehry**, nascido Ephraim Owen Goldberg (Toronto, 28 de fevereiro de 1929), é um arquiteto canadense com nacionalidade estadunidense. É o ganhador do Prêmio Pritzker de 1989, com o projeto Walt Disney Concert Hall em Los Angeles, Estados Unidos da América. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Frank_Gehry. Acesso em: 16 jul. 2023.

¹³ **Do original em inglês:** This development is transformative as we evolve out of the information age, in which digital technology drove the possibilities for creativity, to a situation wherein our ideas are pushing the boundaries of such technologies, facilitating further innovation and exploration.

série de projetos que demonstrou claramente os méritos estéticos de usar aparelhos digitais (Iwamoto, 2009, p. 06, tradução nossa¹⁴).

Logo, Iwamoto (2009) partilha da ideia que o pensamento de projeto por meio da tecnologia digital é de característica investigativa, integrativa e não linear, onde partes dos processos podem ser aperfeiçoadas e testadas infinitamente por meio digital e protótipos físicos em escala real. Isso torna o processo de projeto mais científico e experimental, pois cada projeto mediado por tecnologias atuais traz descobertas e impulsiona o desenvolvimento científico e tecnológico para buscas de novas soluções, como num sistema vivo que se retroalimenta. Poderia se afirmar que a arquitetura e as tecnologias digitais são simbióticas entre si.

Já Alves (2014) argumenta que de acordo com a teoria Cibernética há retroalimentação para manter a ordem e o equilíbrio dos sistemas em questão. Para o autor, esses sistemas levantam questões importantes como a observação dos fenômenos e a amplificação de possibilidades de soluções mais complexas que acompanham as atualizações dos processos digitais de projeto.

De modo complementar, Dunn (2014) aponta alguns pontos podem ser elencados, como forma de sistematizar um ponto de partida para o pensamento de concepção digital:

- Saber as tecnologias disponíveis e quais as acessíveis e indicadas para o projeto;
- Saber conceitos básicos da bioinspiração e biônica;
- Como observar as coisas e trazer essa relação para o desenho e as formas geométricas;
- Entender as geometrias e como funciona o pensamento de modelagem 3D, passar do desenho riscado para malhas ou objetos que são modificados numa realidade tridimensional, pois é uma outra maneira de concepção, menos determinista e mais experimental;
- Aplicar as ferramentas digitais e prototipagem rápida no processo de projeto, desde a concepção da ideia;
- Analisar a performance e refinar o modelo, tentando assim várias escalas antes do tamanho real;

¹⁴ Do original em inglês: Several groundbreaking projects helped instigate this avenue of design research and shape a new generation of architects. Within a span of about five years beginning in the mid-1990s, a host of projects appeared that clearly demonstrated the aesthetic merits of using digital devices.

- Definir o papel ativo da tecnologia digital no processo de projeto;
- Encontrar estratégias que podem ser empregadas de modo experimental e exploratório, a fim de abrir outras soluções para o problema.

No entanto, Iwamoto (2009) enxerga o processo digital como uma forma investigativa de *design*, e com isso o trabalho pode variar em técnicas emergente e modos de fazer. Já que a experimentação traz isso no seu conceito, então como podemos propor um modelo ou *framework* para um processo de pensamento de projeto totalmente fluido, inovador e experimental?

Alves (2014) responde, em princípio, o questionamento, propondo uma metodologia com fluxo mais fluido entre as etapas, sendo que para o autor, na produção da arquitetura atual com mediação da tecnologia digital, o que mais importa não é a análise somente do produto e forma de produção, mas a compreensão de como os processos podem ser melhorados e também quais são seus desdobramentos sociais e econômicos.

Passaremos a seguir a discutir as possibilidades envolvendo a produção de geometrias complexas a partir da mediação digital e quais sua repercussão nas expressões formais e estruturais, principalmente.

3.2 Geometrias Complexas x Digital

O termo CAD (*Computer Aided Design*) abrange uma variedade de *softwares* no campo do *design*, arquitetura, engenharias, indústria de entretenimento e afins, e podem ser, desde programas de representação bidimensional, até programas capazes de realizar modelagem tridimensional com animações e renderizações de alto nível.

Usualmente, os programas de modelagem, de acordo com Dunn (2012), utilizam a geometria topológica de curvas e superfícies para construir as formas NURBS¹⁵.

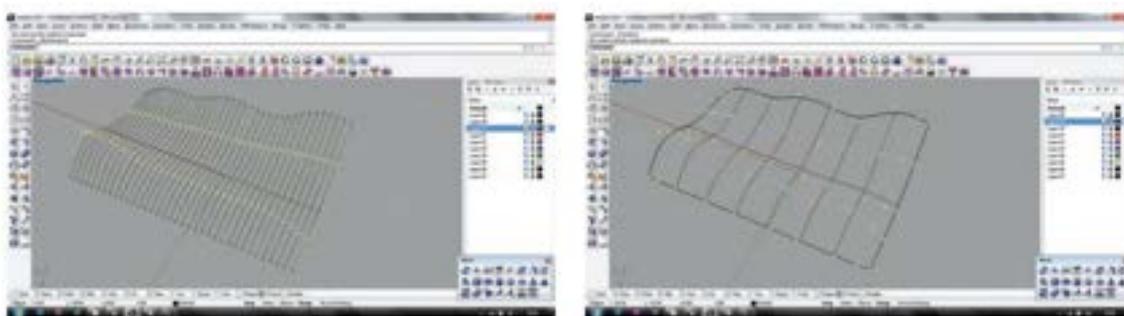
Existem duas maneiras básicas de criar formas tridimensionais digitalmente: *Non-Uniform Rational B-Splines (NURBS)* e malhas. A principal diferença entre eles é que o NURBS facilita superfícies e curvas suaves, enquanto as

¹⁵ NURBS, *Non-Uniform Rational B-Splines*, são representações matemáticas da geometria 3D que podem descrever com precisão qualquer forma, desde uma simples linha 2D, círculo, arco ou curva até a mais complexa superfície ou sólido orgânico de forma livre 3D. Devido à sua flexibilidade e precisão, os modelos NURBS podem ser usados em qualquer processo, desde a ilustração e animação até a fabricação. Disponível em: <https://www.rhino3d.com/features/nurbs/>. Acesso em: 16 jul. 2023.

malhas aproximam esses elementos formais por meio de polígonos e subdivisões. Os projetos podem normalmente exigir que os *designs* sejam definidos em ambos os formatos, dependendo do estágio do processo de design junto com os aplicativos de *software* (Dunn, 2012, p. 35, tradução nossa¹⁶).

As curvas feitas por NURBS¹⁷ têm um alto grau de precisão nos pontos de controle da forma, oferecendo ampla variedade de modelagem de formas e sólidos (Figura 17; Figura 18).

Figura 17 - Modelagem de pontos de controle em um software CAD, onde uma superfície é gerada por NURBS



Fonte: *Digital Fabrication in Architecture*, p.43

Figura 18 - Imagem do Projeto da West 8 para a Ponte Cascara



Fonte: *Digital Fabrication in Architecture*, p.43

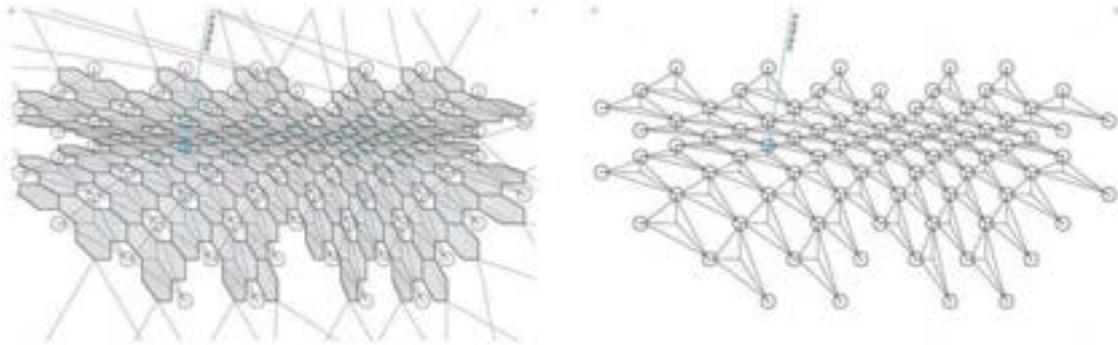
Outra forma usual de gerar geometrias é por meio de MALHAS que são formadas por polígonos ou poliedros formando triângulos ou quadriláteros (Figura 19).

¹⁶ **Do original em Inglês:** There are two basic ways of making three-dimensional forms digitally: Non-Uniform Rational B-Splines (NURBS) and meshes. The key difference between them is that NURBS facilitate smooth surfaces and curves, whereas meshes approximate these formal elements via polygons and subdivisions. Projects may typically require designs to be defined in both formats, depending on the stage of the design process alongside software applications.

¹⁷ O desenvolvimento do NURBS (*Non Uniform Rational Basis Spline*) começou na década de 50 por engenheiros que precisavam de uma representação matemática para superfícies livres como as que são usadas nos chassis dos automóveis, que poderiam ser reproduzidas quando se quisesse. Representações anteriores desse tipo de superfícies apenas existiam como um modelo único criado por um designer. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/NURBS>. Acesso em: 16 jul. 2023.

As malhas normalmente são mais utilizadas para simulação física digital, segundo o autor (Dunn, 2012).

Figura 19 - Projeto Aurora por *Future Cities Lab*



Fonte: *Digital Fabrication in Architecture*, p.45.

Portanto, a modelagem digital trouxe aos projetistas a possibilidade de explorar geometrias mais complexas, e as curvas que antes eram mais complicadas de serem projetadas e construídas, com o advento da tecnologia CAD/CAM e a fabricação digital, foram totalmente possíveis e rapidamente absorvidas pelos *designers* que agora estão mais próximos do que nunca do processo de fabricação.

Houve maior exploração e especulação da forma, e esses caminhos mais investigativos criam novas possibilidades e alavancam a tecnologia, para que o projeto agora modelado e visualizado possa ser de fato construído, logo, há uma retroalimentação entre criação e avanço tecnológico.

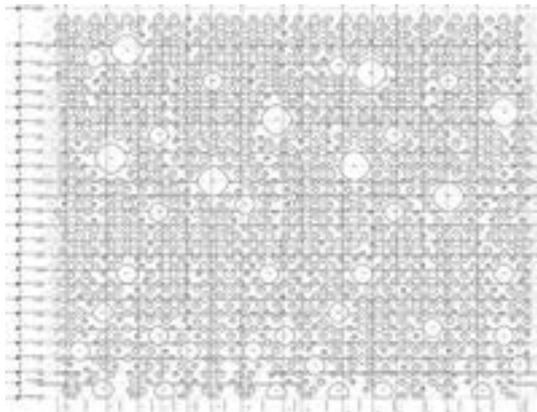
Há diversos estudos de fachadas com peles curvilíneas, e responsivas, por exemplo. Com a maior experimentação, inovação e integração dos processos, os projetistas estão no controle de todas as etapas, desde a concepção, fabricação e montagem.

A complexidade das formações curvilíneas fez com que vários arquitetos voltassem a se envolver altamente no processo de fabricação para garantir que a intenção do projeto fosse realizada (Dunn, 2012, p. 49, tradução nossa¹⁸).

¹⁸ **Do original em Inglês:** The complexity of curvilinear formations has meant that numerous architects have returned to being highly engaged in the fabrication process to ensure the design intent is carried through into the making.

A pele do edifício, segundo Dunn (2012), trabalha como um exoesqueleto, o que deixa livre os núcleos estruturais, usuais em estruturas de torres, e com isso traz uma edificação sem colunas (Figura 20). Nota-se que muito além da mera questão formal, tecnologia e fabricação digital possibilita aos projetistas explorarem novas formas de solução estrutural, melhores performances e tudo isso sem deixar a estética da forma de lado. Percebe-se que há uma inegável integração entre os processos e decisões.

Figura 20 - Exoesqueleto - Torre O-14 em Dubai, projeto da Reiser + Umemoto



Fonte: *Digital Fabrication in Architecture*, p.50.

Pawlyn (2016) destaca a relação que as estruturas de exoesqueleto têm com a natureza, segundo ele, esses esqueletos externos podem ser fonte de ensinamento para criar estruturas que exibem grande potencial de eficiência e expressividade na construção.

3.3 Design paramétrico e arquitetura algorítmica

Segundo Dunn (2012), podemos definir o *design* paramétrico como uma forma de se projetar na qual o *designer* pode definir as relações, os elementos que se conectam e os parâmetros que são fixos e/ou variáveis no projeto. Geralmente são feitos em programas voltados para a modelagem de objetos a partir de dados, e nessa forma de criar, uma superfície por exemplo, o projetista estabelece o controle sobre as variáveis que podem ser ou não alteradas, com uma visualização em tempo real

da alteração. Isso torna o processo mais dinâmico e possibilita testes, análises e comparações mais ágeis e eficazes.

Para Alves (2014) o Processo de Projeto Paramétrico é aplicado em várias áreas da arquitetura e do *design*, sendo que, na prática de concepção de projeto, a tecnologia digital amplifica a capacidade de relacionar-se com sistemas complexos, articulando dessa forma outros campos de saberes e os mais variados *inputs*, dados, que são pertinentes ao projeto.

Poderíamos descrever o Processo de Projeto Paramétrico como sendo um método fundamentado em técnicas de criação e modelagem digital, a partir de sistemas de programação que antecipam a tomada de decisões para uma etapa bastante inicial do processo de projeto - a fase de definição dos parâmetros (*inputs*). Um parâmetro pode ser entendido como o valor de uma variável que, ao mudar, fornece uma característica diferente ao componente, mas mantém uma relação tipológica indicial com este componente em seu estado original (Alves, 2014, p. 32).

Afirma Dunn (2012), que nos processos de informação as ideias já existem na mente do *designer* e são transferidas diretamente para o computador, atuando diretamente na representação do objeto, logicamente com possibilidades de mudanças e aperfeiçoamentos. Já na arquitetura algorítmica os projetistas utilizam linguagens de programação para conceber a ideia com a mediação do computador, e os programas passam a contribuir com certos níveis de coautoria.

Novos softwares de *design* permitem a escrita de *scripts* e códigos que, quando acoplados a simulações de cargas estruturais e ambientais dinâmicas, têm o potencial de estender os processos de *design* desde o desenvolvimento e fabricação de um artefato estético singular ou construção até famílias de formas variantes que podem responder a condições variáveis. (Hensel *et al.*, 2010, p. 11).

É importante apontar o conceito BIM¹⁹, que também é paramétrico, como aliado para o processo de produção em arquitetura e engenharias. O BIM possibilita a simulação do projeto antes de ser executado, prevendo gastos e possíveis ajustes de erros em projetos, pois é possível fazer a análise do ciclo de vida, como também da eficiência energética e ambiental, desempenho estrutural, econômico, entre outros.

¹⁹ **BIM** (Modelagem de Informação da Construção) é o processo holístico de criação e gerenciamento de informações para um recurso construído. Com base em um modelo inteligente e habilitada por uma plataforma na nuvem, a BIM integra dados estruturados e multidisciplinares para produzir uma representação digital de um recurso em todo seu ciclo de vida, desde o planejamento e o projeto até a construção e as operações. Disponível em: <https://www.autodesk.com.br/solutions/bim>. Acesso em: 16 jul. 2023.

O BIM não é simplesmente CAD 3D; em vez disso, é um banco de dados integrado de informações da construção, incluindo componentes de construção. A conjunção de gráficos 3D, modelagem paramétrica e dados fornecidos pelo usuário criam o modelo de projeto e construção virtual. No que tem de melhor, BIM é um banco de dados digital integrado e estruturado, constituído por objetos paramétricos com informações dos setores de arquitetura, engenharia, construção e operações (AECO) que permite interoperabilidade (Kensek, 2018, p. 10).

Trabalhar com banco de dados torna-se vantajoso em um processo de projeto, pois está ligado com economia de recursos, seja material, seja financeiro ou mesmo força de trabalho (mão de obra otimizada). Logo, poderíamos aplicar o conceito BIM no pensamento da concepção e modelagem do projeto desta pesquisa, por exemplo, documentando todo o processo, armazenando os dados obtidos em experimentos para sistematizar um modelo de Tensegriedade, criando uma família específica para esse tipo de estrutura. Porém esse não é o recorte dessa pesquisa, voltada mais para a prototipagem, tanto física como digital, no sentido da produção de um *framework* de processos. No entanto, é fundamental citar tal possibilidade em função da existência dessa tecnologia.

3.4 Prototipagem e fabricação digital

A prototipagem é parte indissociável do processo de fabricação digital, e conforme Dunn (2012), existem 4 (quatro) tipos de categorias: corte, subtração, adição e formação. O autor argumenta que esses processos são parecidos tanto na construção de um modelo tridimensional quanto na fabricação de um protótipo em escala real.

Na Arquitetura, há a possibilidade amplamente desenvolvida da representação tridimensional a partir de modelos reduzidos ou maquetes. Os modelos cumprem a importante função de fornecer uma representação do projeto que em muito se assemelha à própria obra arquitetônica a ser realizada no futuro, com aspectos de materialidade que permitem esta visualização prévia do objeto, a partir de um signo muito coerente para o cérebro humano (Alves, 2014, p. 41).

Deste modo, acredita-se que o protótipo nada mais é que a representação real do projeto, com a finalidade de avaliação e refinamento do *design*. A tecnologia digital trouxe com a prototipagem rápida, por exemplo, a facilidade de imprimir partes do design ou todo o projeto para verificações e melhorias.

O processo aditivo mais conhecido na fabricação digital é a prototipagem rápida, que facilita a produção rápida de objetos a partir de uma variedade de materiais, dependendo de fatores de tempo, custo e aplicação. "Prototipagem rápida" é muitas vezes usado erroneamente como abreviação para um tipo específico de fabricação aditiva, mas é um termo genérico dentro do qual uma família de métodos diferentes está relacionada (Dunn, 2012, p. 102, tradução nossa²⁰).

Logo, conforme dito por Dunn (2012), vamos aderir ao termo prototipagem rápida para as várias formas de produção de um protótipo, que vão de objetos industrializados - como papel, palitos, elásticos, cabos, molas, entre outros, até processos de impressão digital 3D.

Passaremos, a seguir, a tratar dos tipos de prototipagem exemplificando a partir dos modelos produzidos durante o processo de pesquisa.

3.4.1 Prototipagem Física – Poliedro (Icosaedro)

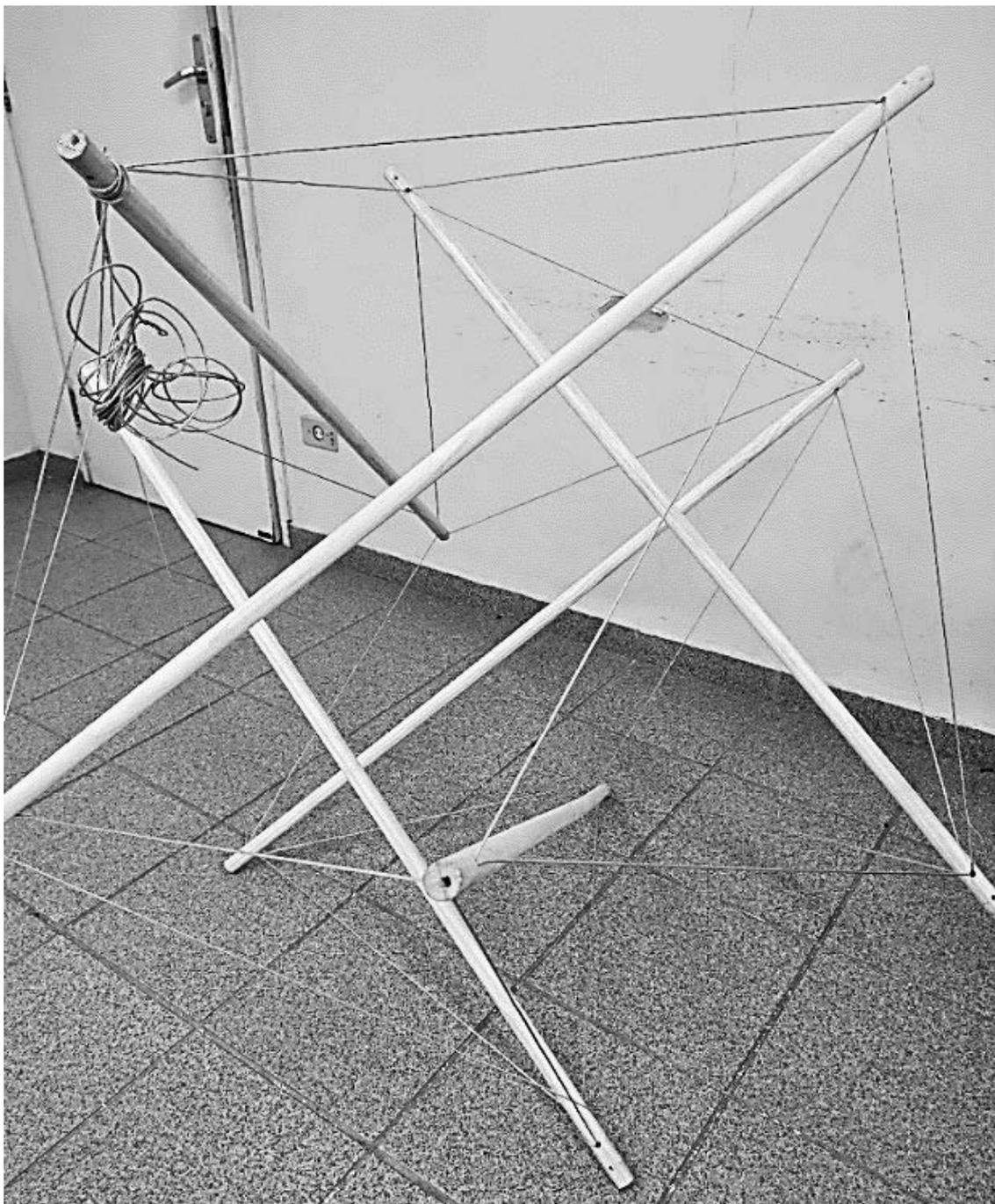
Na disciplina Técnicas Experimentais, do PPGEES, ministrada pelo Prof. Dr. Andrés Cheung, foi desenvolvido durante a pesquisa um modelo do poliedro icosaedro na escala 1:3 (Figura 21) visando aferir características estruturais para verificar a tensão sofrida nos diferentes nós da estrutura.

O Icosaedro representa um Sistema *Tensegrity* de Ordem 1, segundo Verschleisser (2008), e isso acontece quando duas ou mais hastes de compressão estão no mesmo plano. Esses sistemas espaciais fechados apresentam as hastes se cruzando sem se tocar, e estão dentro do sólido que é formado pelas arestas, que são os cabos da estrutura.

Este primeiro modelo quantitativo foi montado para testes das cargas suportadas nos cabos da estrutura, com dados de deformação das hastes e dos cabos. Usamos hastes de madeira e cabos de aço para o primeiro teste de cargas em laboratório, localizado na UFMS.

²⁰ **Do original em Inglês:** The best-known additive process in digital fabrication is rapid prototyping, which facilitates the quick production of objects from a range of materials depending on factors of time, cost and application. 'Rapid prototyping' is often mistakenly used as shorthand for a specific type of additive fabrication, but is a generic term within which a family of different methods are related.

Figura 21 - Sistema Tensegrity de Ordem 1



Fonte: Acervo da autora, 2023.

Antes de desenvolver o modelo na escala 1:3, a montagem foi testada num protótipo menor com hastes de palito de algodão doce, unidos em dupla por fixadores do tipo “enforca gato”, como demonstra a figura abaixo (Figura 22). Tal estratégia foi utilizada para diminuir a fragilidade do material e ao mesmo tempo criar um espaço

onde o cabo (fio de barbante) pudesse passar, já que como a haste é muito fina, criar furos para passar o cabo quebraria o material e tornaria o procedimento experimental e rápido mais complicado. A intenção dessa prototipagem foi verificar as dificuldades na montagem com cabo único, já que os ajustes da tensão, que é o que torna a estrutura em pé, fica mais desafiador. Pensamos, então, na montagem visualizando a estrutura em pé, tridimensional. Mais à frente iremos testar protótipos em que a lógica de montagem foi diferente, com um pensamento de malha, ou seja, planificada.

Figura 22 - Hastes duplas com palitos unidos por “enforca gato”



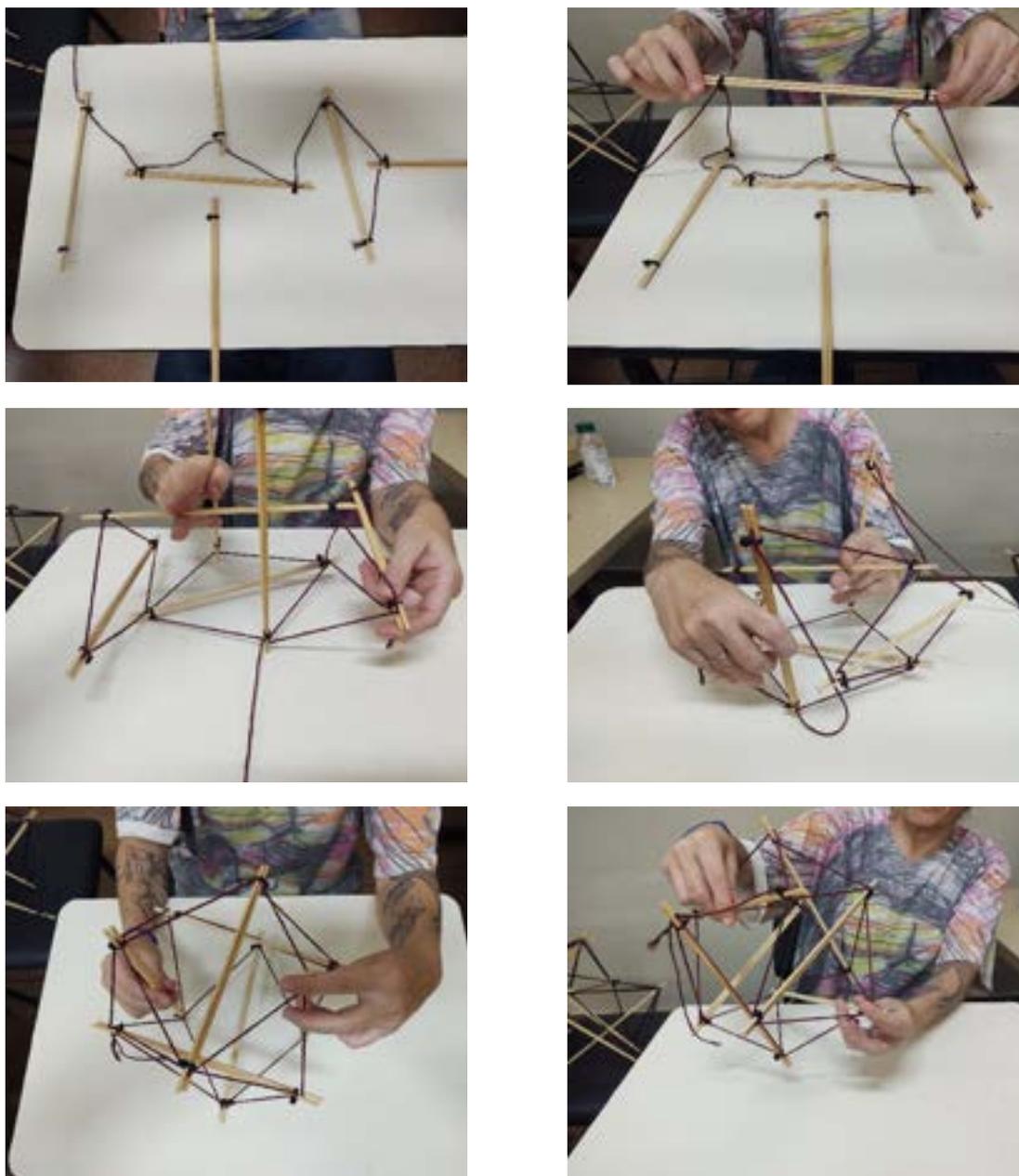
Fonte: Acervo da autora, 2023.

Quando estamos tratando de estruturas do tipo *Tensegrity*, é importante explorar novas formas de montagem, porque aí se encontra a sua maior complexidade e por isso a dificuldade de uso desse tipo de estrutura. Acreditamos que na ciência devemos esgotar as possibilidades para oferecer caminhos que funcionem, e assim facilitar o uso desse tipo de estrutura.

Conforme Liapi (2001), os protótipos físicos representam o melhor meio de observar e estudar as formas geométricas das *Tensegrity*, e assim analisar características e explorar novas possibilidades. A autora (Liapi, 2001) ressalta que esse processo metodológico de prototipagem pode ser bastante exaustivo, pois as estruturas de tensegridade podem apresentar resultados imprecisos se houver alguns erros nas medidas e comprimentos dos cabos e hastes, além de afetar sua rigidez.

Na sequência abaixo, ilustrada pelas imagens que formam a Figura 23, verifica-se um protótipo de menor escala, com a materialidade que responde de forma semelhante ao modelo testado.

Figura 23 - Protótipos em escala reduzida: sequência de montagem



Fonte: Acervo da autora, 2023.

As imagens reunidas na Figura 24 mostram o procedimento, elaborado antes da montagem da estrutura, para ver o deslocamento das hastes de madeira que foram expostas a cargas em três pontos, sendo colocados três pesos: um peso para acomodação do material, segundo peso e terceiro peso sucessivamente, para anotar

o deslocamento conforme o aumento de cargas e assim calcular o módulo de elasticidade do material.

Figura 24 - Testes com diferentes cargas



1- Posicionamento e apoio das hastes



2- Carga colocada no meio da haste

Fonte: Acervo da autora, 2023.

Na sequência, a partir das imagens reunidas na Figura 25, mostraremos os procedimentos realizados e que envolveram os materiais utilizados e o primeiro processo de preparo na construção desse modelo que buscou atender a necessidade de cumprir medidas mais próximas possíveis da estrutura em escala 1:1; e o teste de carga realizado para verificar a tensão sofrida em três pontos - vértices - no meio da estrutura.

Figura 25 - Procedimentos de montagem



1- Materiais utilizados (kit)



2- Início do procedimento.



3- Fragilidade do material nas extremidades.



4- Medidas foram marcadas em três pontos para teste de carga. As hastes de madeira variam de tamanho entre 190 cm a 120 cm, com diâmetro de uma polegada aproximadamente.



5- Por observar que a estrutura mostraria o rompimento ou fragilidade dos nós com teste de carga, decidimos antes do teste montar o modelo em cabo único, que além de eliminar os elementos de conexão (hastes e cabos), diminui a fragilidade nos nós.



6 – Estrutura de tensegridade do tipo de sistema fechado de ordem 1, baseado no sólido de um Icosaedro.



7- Estrutura instrumentada para receber as cargas.

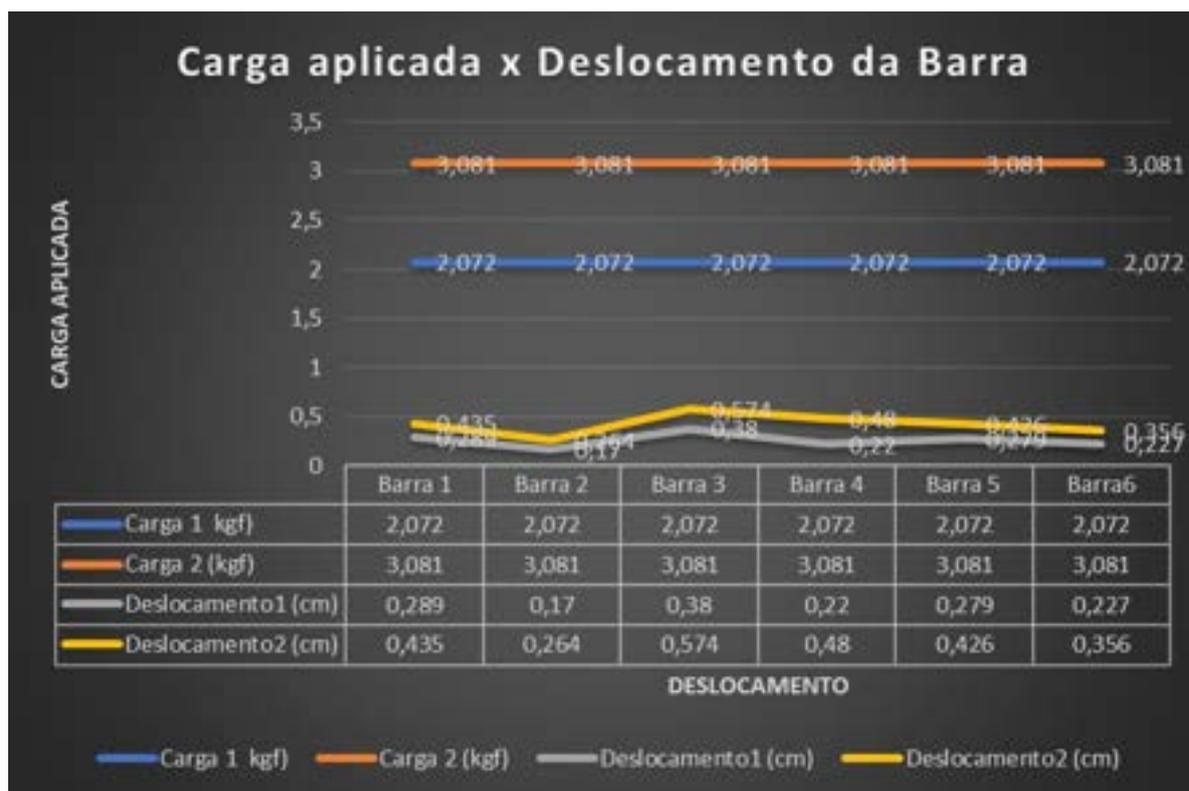


8- Pesos pendurados nos nós.

Para aferir os dados de tensão sofridos pela estrutura durante o teste com cargas, os instrumentos utilizados foram: relógio comparador para medição de deslocamentos lineares (ponta cônica), base magnética para o apoio do relógio comparador, alongamento mecânico, paquímetro e trena.

No gráfico a seguir foram colocados os valores dos pesos e dos deslocamentos sofridos a cada carga submetida (Figura 26):

Figura 26 - Gráfico Carga x Deslocamento



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Percebe-se que houve uma considerável variação no deslocamento das barras, mesmo sendo de madeira pré-fabricada e possuindo as mesmas medidas, pois como a haste é de madeira, sofre maior variação de valores na resistência elástica do material. Observe os deslocamentos sofridos pela Barra 2 e Barra 3 como são diferentes.

No próximo gráfico (Figura 27) a variação elástica entre cada barra fica mais evidente através da comparação da variação do deslocamento entre elas quando

submetidas a mesma variação de carga – as barras têm quase a mesma medida e materialidade (hastes cilíndricas de madeira com aproximadamente 1,20 m).

Figura 27 - Variação do Deslocamento das barras x Variação de 1,009 kgf



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

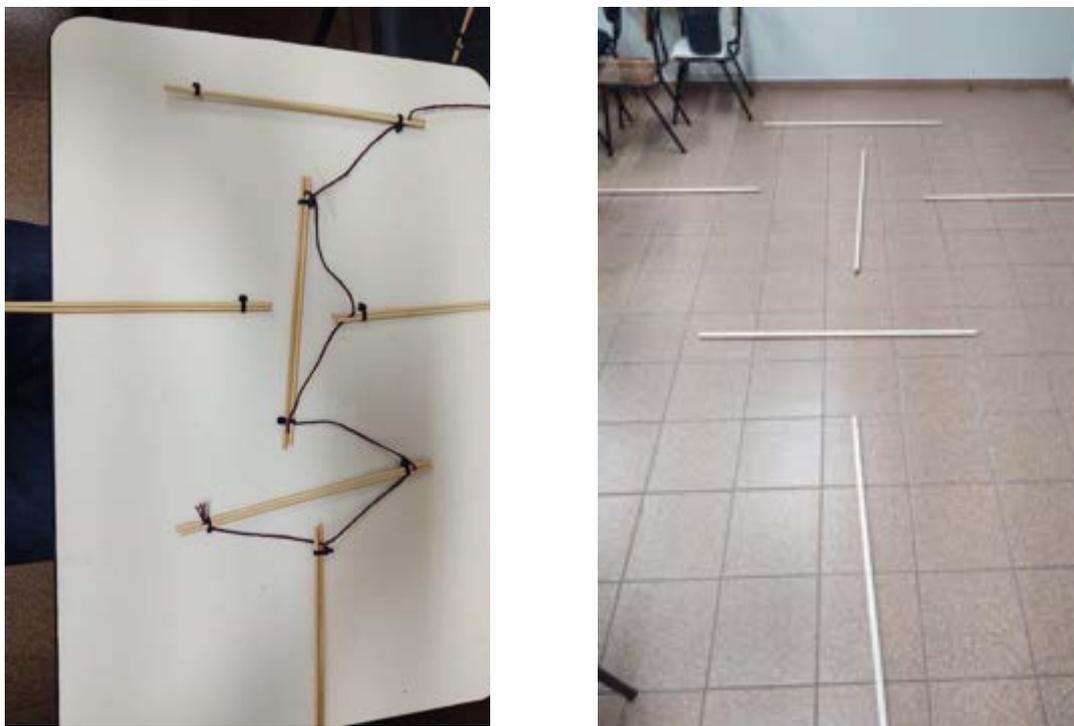
Isso mostra que a opção de trabalhar com a madeira, que por ter um impacto negativo no meio ambiente menor que o aço, por exemplo, traz esses desafios. Cada haste de madeira tem uma resposta ao esforço bem mais variável que uma barra de aço, que possui uma variação mínima por ser artificial e totalmente fabricado.

Como os dados obtidos estavam imprecisos, tornando duvidoso o resultado final, então decidiu-se retomar a montagem do protótipo e revisar esse início de montagem. Com isso o processo foi reiniciado 3 vezes, e mesmo assim as distâncias das arestas (cabos) não ficaram exatas interferindo nos testes de carga, já que o protótipo não está com as medidas proporcionais ao modelo digital 3D.

Foi verificado dificuldades na montagem do sistema de cabo único quando mudamos para uma escala maior. Essa dificuldade se mostra no ajuste de tensão dos cabos, pois se não estiver na medida certa, as hastes se movimentam e a estrutura

perde sua configuração de forma, ficando muito mais difícil arrumar quando a escala é maior (Figura 28).

Figura 28 - Lógica de montagem e passagem dos fios



Fonte: Acervo da autora, 2023.

Em relação à haste (madeira), por ser de um material natural e, portanto, possuir grande variação no módulo de elasticidade, seria necessário minimizar esses problemas para ter um padrão viável para os testes, sendo primordial a exatidão do modelo físico em relação ao digital, para que possam ser comparados e considerados os dados como válidos.

Logo, optamos por trabalhar com simulação digital, pois averiguar o estado das estruturas a nível de concepção e respostas a tensões sofridas seria mais eficiente e mais sustentável para a pesquisa. A arquitetura desenvolvida é simulada por *scripts* que buscam a melhor performance e podem ser testadas inúmeras formas e valores. Isso deixa o processo mais rico de informação e mais rápido, porém, evidentemente, exige uma dedicação maior nos estudos de novas linguagens e *softwares*, mas é justamente nessa busca de abrir a analisar outros caminhos que a pesquisa se apoia.

Figura 29 - Dificuldade de montagem com cabo único



Fonte: Acervo da autora, 2023

A imagem acima (Figura 29) ilustra a dificuldade de estruturar o protótipo (cabo único) em escala maior sem pré-esforço nos cabos, pois facilmente a estrutura perde sua forma e assim o processo precisa ser reiniciado. Isso mostra a importância da prototipagem e o envolvimento do projetista em todas as etapas do processo, de modo que o fazer arquitetura com tecnologia digital, ao contrário do que se possa imaginar, devolve aos projetistas o “mão na massa” a partir do processo de prototipagem. Além de enriquecedora, essa estratégia torna o procedimento mais claro e assertivo já que esse *looping* de correção de erros ajuda a refinar o projeto, retroalimentando teoria e prática, conforme os preceitos da Cibernética.

3.4.2 Prototipagem Física – Prisma Triangular

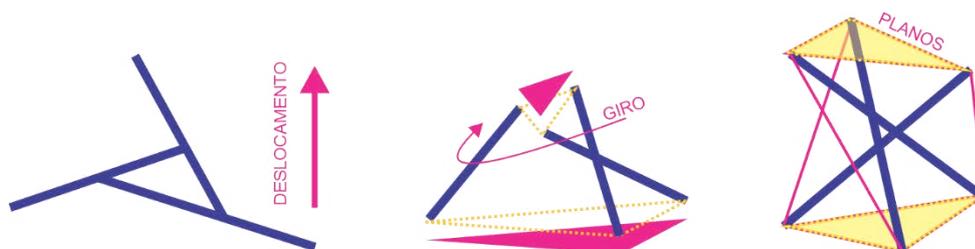
Foi realizado um segundo processo de prototipagem com o intuito de testar hastes de bambu com cabos de aço. Nesse processo decidimos executar a *Tensegrity* de 3 hastes de Ordem 2, sistema em que a hastes de compressão estão uma a uma em planos distintos (Verschleisser, 2008).

Afirma Verschleisser (2008), que esse tipo de *Tensegrity* é constituído por dois planos (base e topo do polígono) deslocados verticalmente e torcidos. Esses planos são formados pelos cabos (arestas do poliedro) e as hastes que são os elementos que sofrem compressão, estão em ordem giratória, de modo que nunca estão no mesmo plano. As hastes podem variar em números e os planos desses corpos prismáticos podem ter tamanhos variados, formando prismas ou pirâmides.

Quando se rotaciona os dois polígonos (topo e base) existe um ponto único em que os cabos que conectam os vértices dos mesmos atingem a sua dimensão mínima. Nesta posição o elemento em *Tensegrity* estará todo igualmente tensionado e, portanto, estável (Verschleisser, 2012, p. 142).

Com essa lógica de pensamento montamos essa estrutura. A imagem abaixo (Figura 30) ilustra o processo que foi desenvolvido para montagem desse protótipo, que utilizou o bambu como materialidade das hastes. Outra particularidade a ser destacada é que o número de hastes determina o número de arestas dos polígonos que são formados na base dos poliedros: triângulos, quadrados, pentágonos e demais.

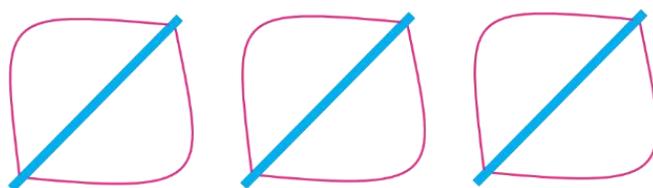
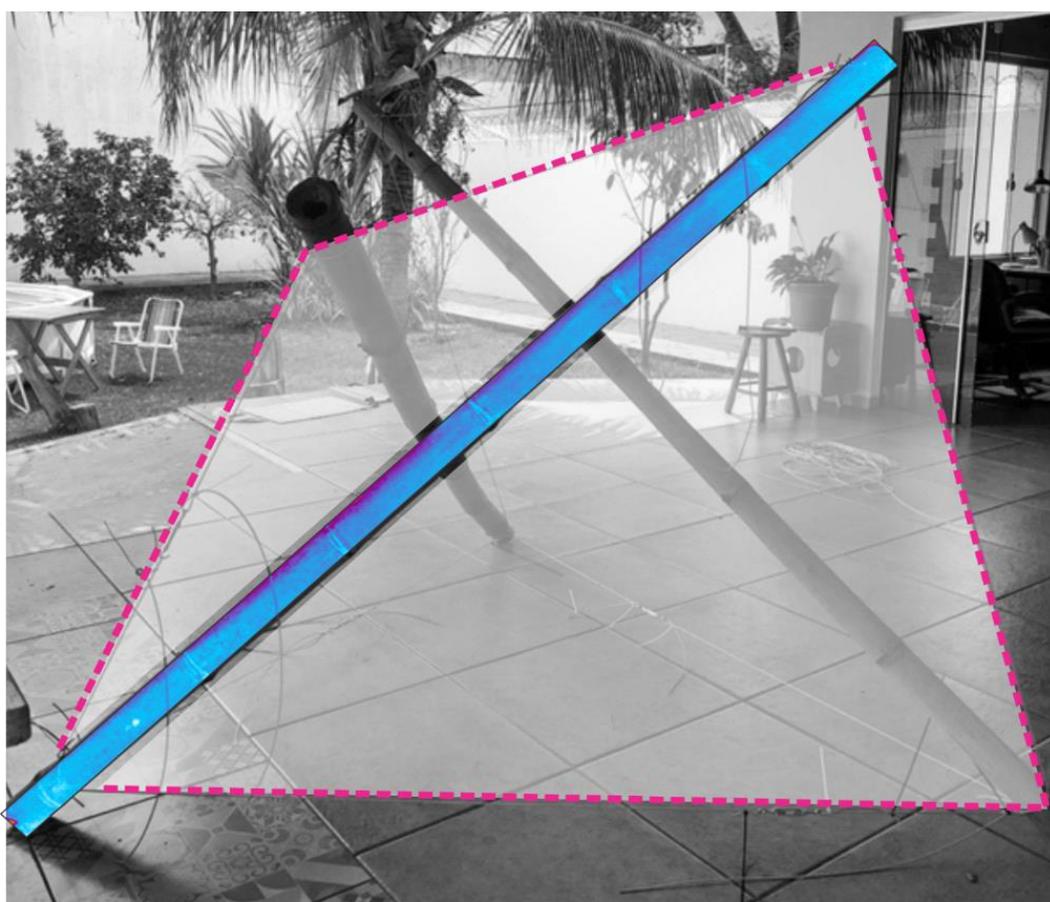
Figura 30 - Processo de montagem do protótipo



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Quanto aos cabos, desta vez, utilizamos unidades, como “flechas” e não cabo único, para testar outra possibilidade de montagem, já que as hastes de bambu são em escala maior que a do primeiro estudo de prototipagem com o icosaedro de haste de madeira, então procuramos testar se esse tipo de montagem é mais fácil de replicar (Figura 31).

Figura 31 - Protótipo em bambu, em escala maior



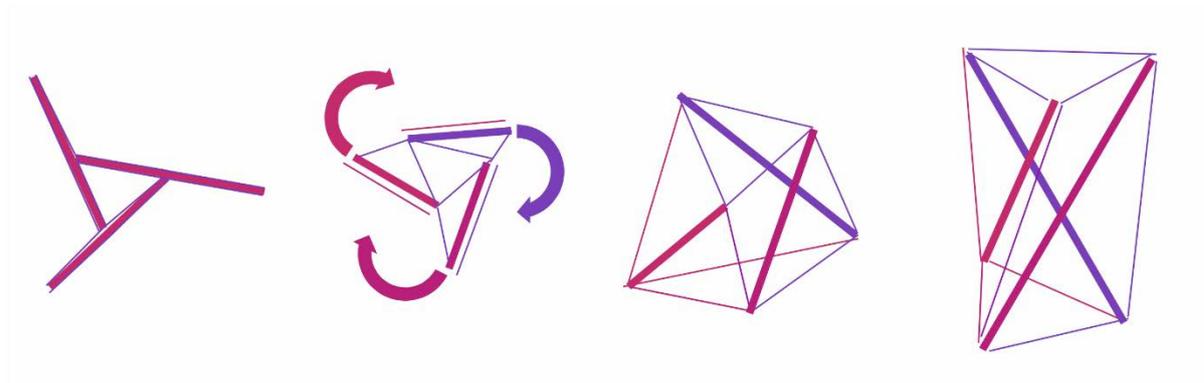
3 unidades
(flechas)

Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Na imagem abaixo (Figura 32), colocamos a sequência de imagens, e como foram conectados conforme indicado pelas flechas. Cada ponta encaixa no centro do

cabo seguinte, com essa costura a estrutura se levanta e consegue atingir a estabilidade com os ajustes dos cabos.

Figura 32 - Representação da sequência de montagem



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Então, iniciamos o processo como na ilustração (Figura 33), formando esse triângulo com as hastes.

Figura 33 - Início da montagem



Fonte: Acervo da autora, 2023.

A seguir a Figura 34 ilustra os tipos de conexões entre cabo e haste nesse tipo de *Tensegrity*.

Figura 34 - Tipos de conexões entre cabo e haste



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Para o ajuste da tensão utilizamos esticador gancho, e abraçadeira de plástico “enforca gato”, para formar arco para enganchar esse conector entre os cabos (Figura 35).

Figura 35 - Conexão cabo – cabo



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Para conectarmos o cabo a haste de bambu fizemos um furo no material, passamos o cabo e fixamos com grampos de aço, nas duas pontas de cada haste. Como ilustram as imagens abaixo (Figura 36; Figura 37).

Figura 36 - Conexão haste – cabo



Fonte: Acervo da autora, 2023.

Figura 37 - Conexão



Fonte: Acervo da autora, 2023.

Conectamos as hastes com os cabos, como nos esquemas ilustrados acima e o resultado foi satisfatório, porém verificamos que as conexões precisam ser mais estudadas, especialmente no caso do bambu, por não ter um padrão pré-fabricado, com dimensões e peso mais padronizados. Em relação à montagem (Figura 38), foi

mais facilitada por conter unidades separadas, a lógica ficou mais simples de ser enxergada durante o processo, diferentemente do caso do cabo único, no qual, por vezes, perdíamos a configuração da estrutura e os ajustes de tensão para a estrutura ficar rígida foi mais complicado de realizar.

Figura 38 - A estrutura montada



Fonte: Acervo da autora, 2023.

Portanto, esse protótipo contribuiu para a verificação de outro material, no caso as hastes de bambu, e outro sistema de engate entre as fechas, (Figura 35) conexão cabo – cabo, com o esticador gancho. Esse conector (esticador gancho) tornou mais eficiente o ajuste das tensões, e estendendo para uma análise maior, vimos que é possível a realização de *Tensegrity* com hastes de bambu. Então, por exemplo, numa situação emergencial, onde o bambu é recorrente, a construção de abrigos temporários é perfeitamente possível e rápida.

3.4.3 Prototipagem Digital

3.4.3.1 Bioinspiração aplicada em projeto

Esse trabalho foi inicialmente desenvolvido na disciplina de *Design Paramétrico e Bio Inspiração Digital* ministrada pelo professor doutor Gilfranco Alves no PPGEES/UFMS, na qual foi realizado um trabalho com aplicação direta da metodologia da Biomimética para processo de projeto em arquitetura. De acordo com a bibliografia sugerida, foram analisadas algumas geometrias configuradas em algumas frutas e/ou sementes selecionadas (envoltório e corte), e nos encaixes e disposição das sementes, mais detalhadamente a parte interna das sementes.

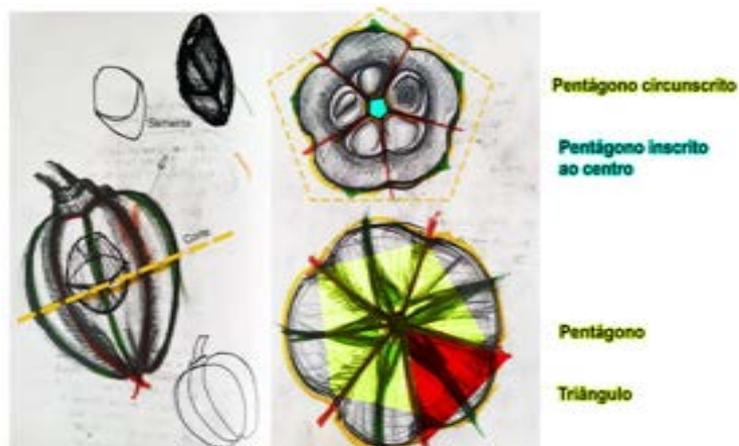
Desenvolveu-se a estrutura do ponto de ônibus solicitado, baseado nas formas e performances naturais. A estrutura externa e sua geometria foi o partido do pensamento do projeto, já que também possuem relação direta com as *Tensegrity*, estrutura em estudo, sendo direcionada a pesquisa para uma aplicação projetual arquitetônica.

Seguindo a metodologia proposta por Tai Hsuan-An, no livro *Sementes do Cerrado e Design Contemporâneo*, após a escolha do modelo biológico, foram feitos desenhos esquemáticos e especulativos, a fim de livremente observar os padrões e os fenômenos envolvidos e que despertam interesse na concepção do projeto. O objeto escolhido foi o fruto Munguba, também conhecido como “cacau falso”.

A metodologia só é bem aplicada quando consegue garantir a liberdade, a flexibilidade, a fluidez e a coerência da atividade. Em todo o processo o aluno deve ser encorajado e motivado para enfrentar o desafio. Portanto, a motivação é a verdadeira força motriz do trabalho (Hsuan-An, 2002, p. 15).

Com o corte no diâmetro maior do fruto, observou-se a disposição das sementes em torno do eixo central, e fazendo conexão com conhecimentos geométricos foi-se associando a forma com o poliedro regular pentágono. Pôde-se analisar pelo croqui, feito pela autora dessa pesquisa (Figura 39), algumas reflexões pontuadas abaixo. Observa-se que o modelo seccionado circunscribe em um pentágono, e que as divisões que separam as sementes se tornam vértices de outro pentágono que está inscrito no fruto.

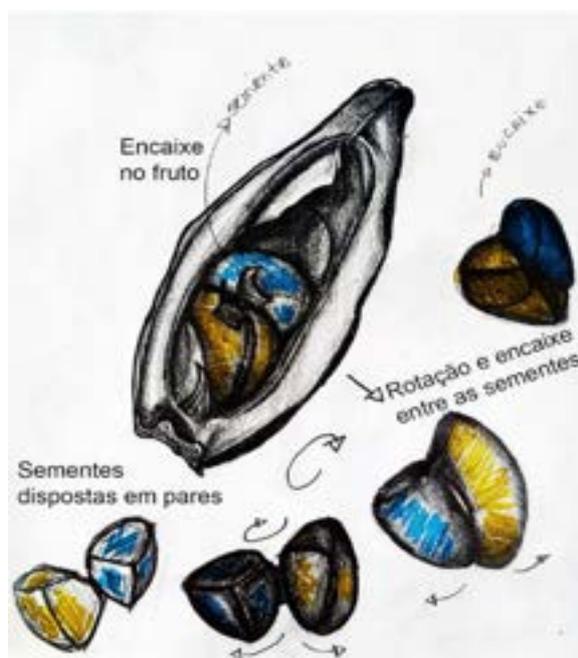
Figura 39 - Croquis das estruturas que conformam os frutos



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Abrindo outra fruta, agora na seção transversal (Figura 40), conseguiu-se verificar como as sementes se agrupam, e elas são dispostas em pares e presas por uma película frágil, mas que permite um giro de 90 graus para cada lado, como uma janela de duas abas que se abre.

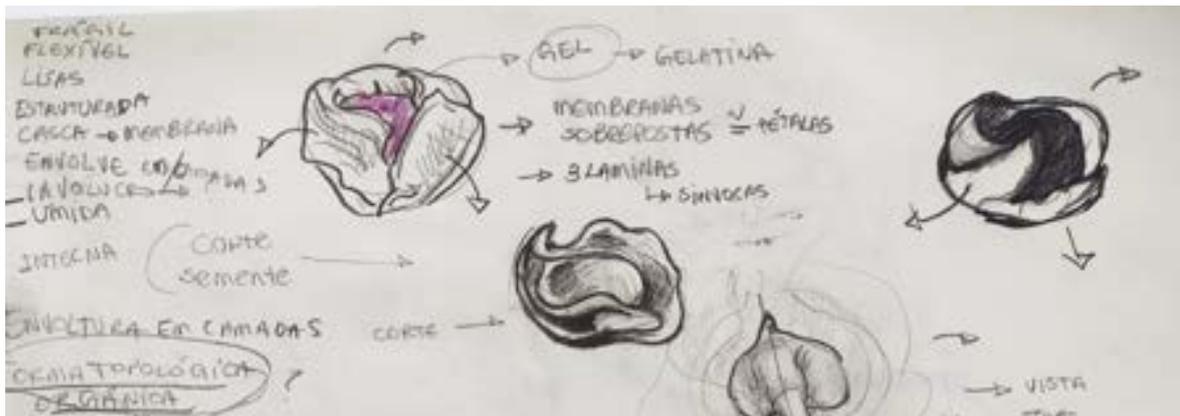
Figura 40 - Secção transversal



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Explorando ainda mais o material, separou-se as sementes para descascá-las e desmembrar as partes, a fim de apreender e anotar mais características do fruto (Figura 41):

Figura 41 - Esquema da topologia do fruto analisado



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

- Forma topológica: orgânica – curva;
- Frágil, flexível, textura lisa (contém uma espécie de gel) e úmida;
- A casca que cobre a semente são camadas de membranas sobrepostas, como pétalas (3 lâminas).

Removendo essas camadas, como pétalas, chega-se a uma estrutura autoportante, flexível e simétrica (Figura 42), quase similar a cartilagem humana, porém mais sensível.

Figura 42 - Estrutura autoportante

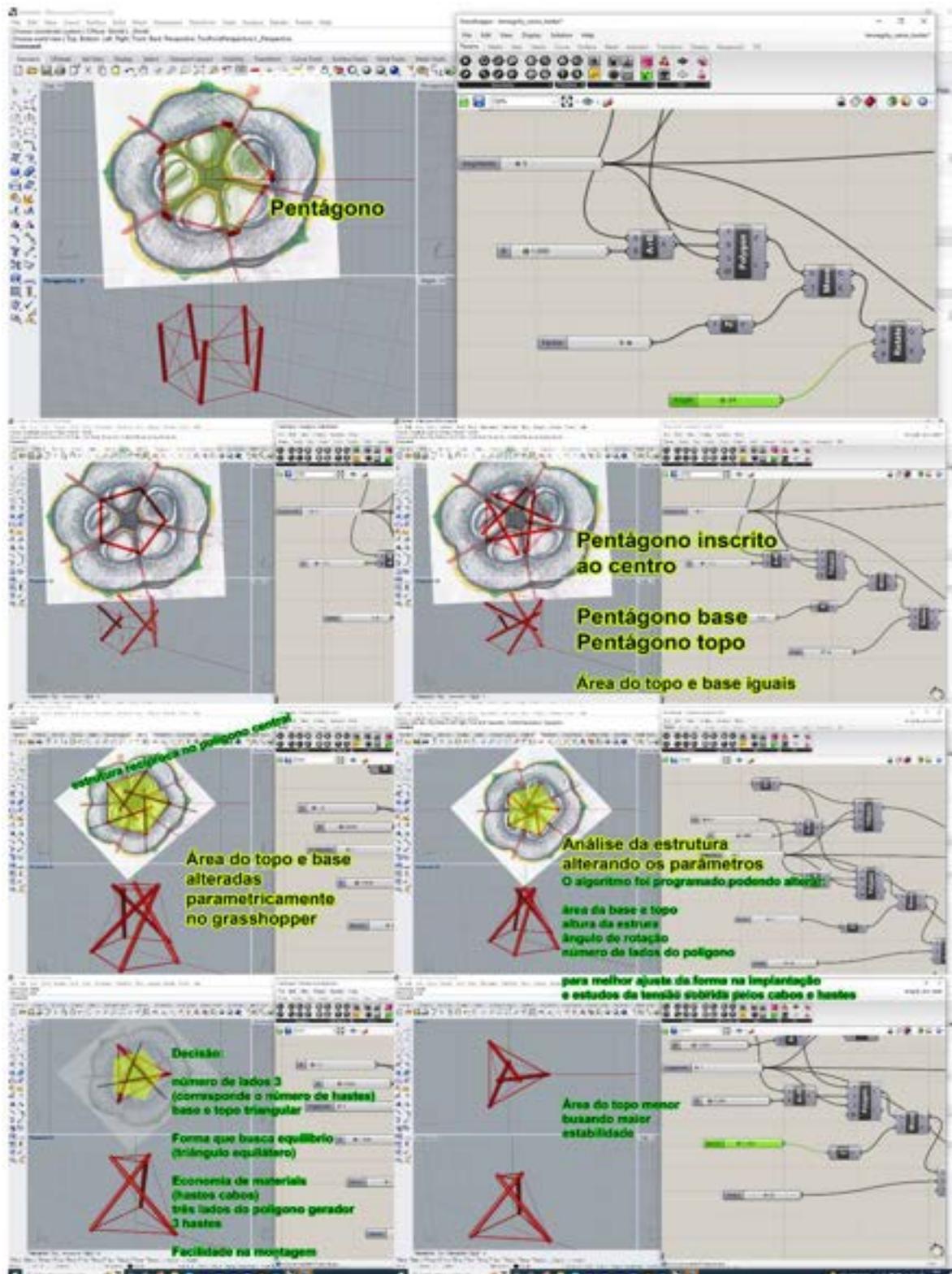


Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Depois das análises feitas, observou-se o que se poderia usar para o trabalho proposto, as observações das características não devem ter uma restrição, e é justamente por isso que se elencou algumas para desenvolver o trabalho proposto.

Então, a opção de partido foi a casca com corte central, onde se verifica relações diretas com pentágonos, que por sua vez é a geometria de partido inicial de muitas estruturas em *Tensegrity*. A Figura 43 mostra passo a passo o desenvolvimento da estrutura.

Figura 43 - Utilização da geometria do fruto como ponto de partida para a concepção da estrutura e da forma do projeto

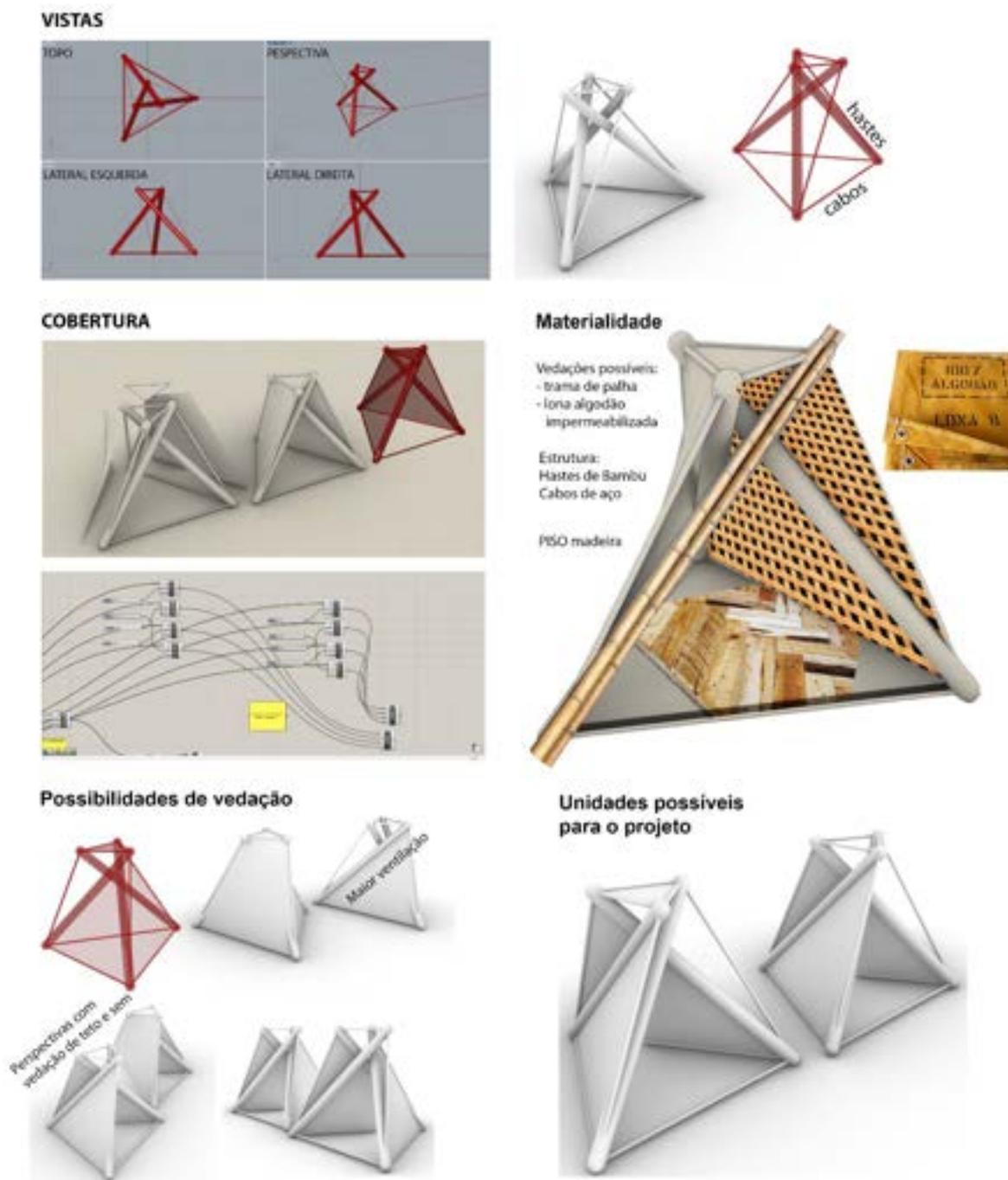


Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

O desenho (*croquis*) gerado foi inserido no software *Rhinoceros* e com o plugin *Grasshopper* elaborou-se um *script* paramétrico no qual a forma foi ajustada levando em consideração (Figura 44):

- Economia de materiais
- Estabilidade da estrutura
- Ventilação e sombreamento
- Material
- Facilidade de montagem, já que um dos empecilhos do uso da *Tensegrity* é a complexidade da sua estrutura.

Figura 44 - Vistas, sugestões de coberturas e materialidade do modelo



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Do ponto de vista da funcionalidade, esse ponto de ônibus foi projetado levando em consideração alguns princípios da concepção regenerativa, segundo Littmann (2009):

1. Análise do lugar, percebendo o conjunto de sistemas que o envolvem e se conectam;
2. Observar a integração dos sistemas envolvidos: um organismo deve executar mais de uma função no sistema: multiplicidade;
3. Não existe apenas uma solução para o funcionamento de um sistema: redundância;
4. Considerar a paisagem local: integrar a paisagem e a edificação: unidade;
5. Respeitar a eficiência dos materiais e sua performance na construção;
6. Implantar sistemas ecológicos – multiplicidade e regeneração – para garantir uma produção positiva com o meio.

O que pode ser constatado a partir da solução de implantação (Figura 45), abaixo ilustrada.

Figura 45 - Solução de implantação

IMPLANTAÇÃO

hastes de bambu
plântio rápido, possibilita reuso (volta ao ciclo)

leveza e comunicação visual com o local

palha - material que comunica
visualmente com o local

ventilado - trama

MÓDULOS

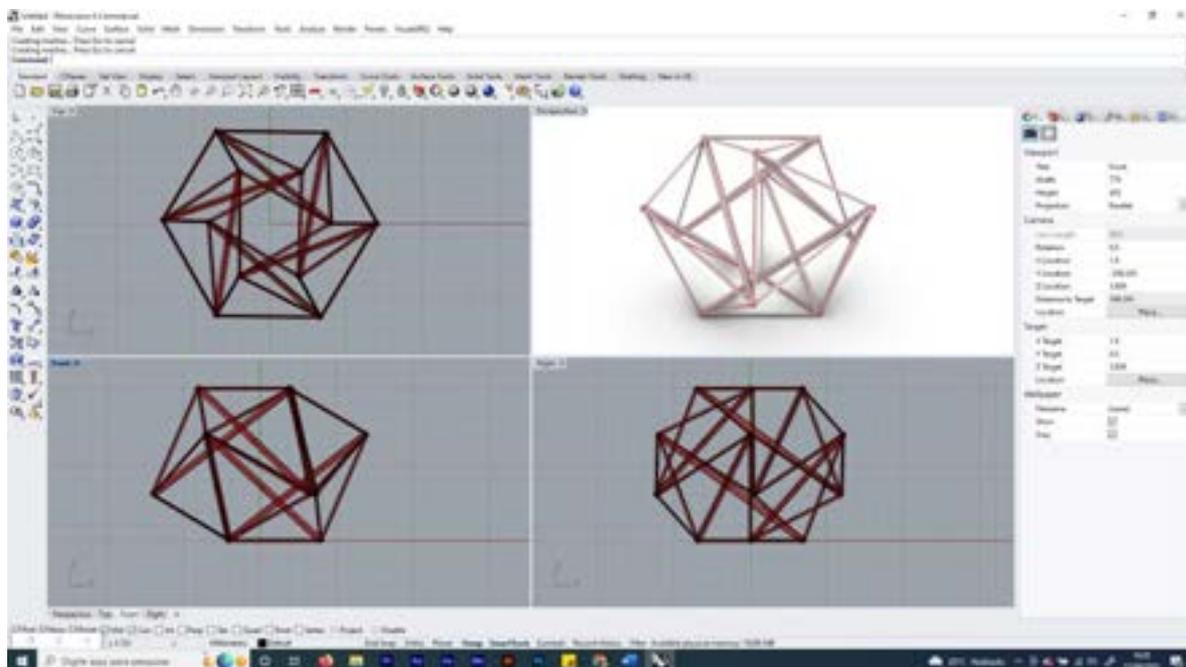


Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

3.4.3.2 Modelagem e Simulação em *software*

Dentro de um *software* de modelagem tridimensional Rhinoceros 6.0 com o *plugin Grasshopper*, foram desenvolvidos vários *scripts* da estrutura a que essa pesquisa se dedica, a *Tensegrity*. A partir de um primeiro entendimento, novas programações foram feitas e parametrizadas ao ponto de termos a capacidade de testar e simular fisicamente o comportamento real da forma através do *plugin Kangaroo* que trata do conceito *form finding*, ou seja, buscar a melhor forma possível, de acordo com os parâmetros estimados pelo *designer* que são pertinentes ao projeto, e não uma forma arbitrariamente estipulada pelo projetista (Figura 46).

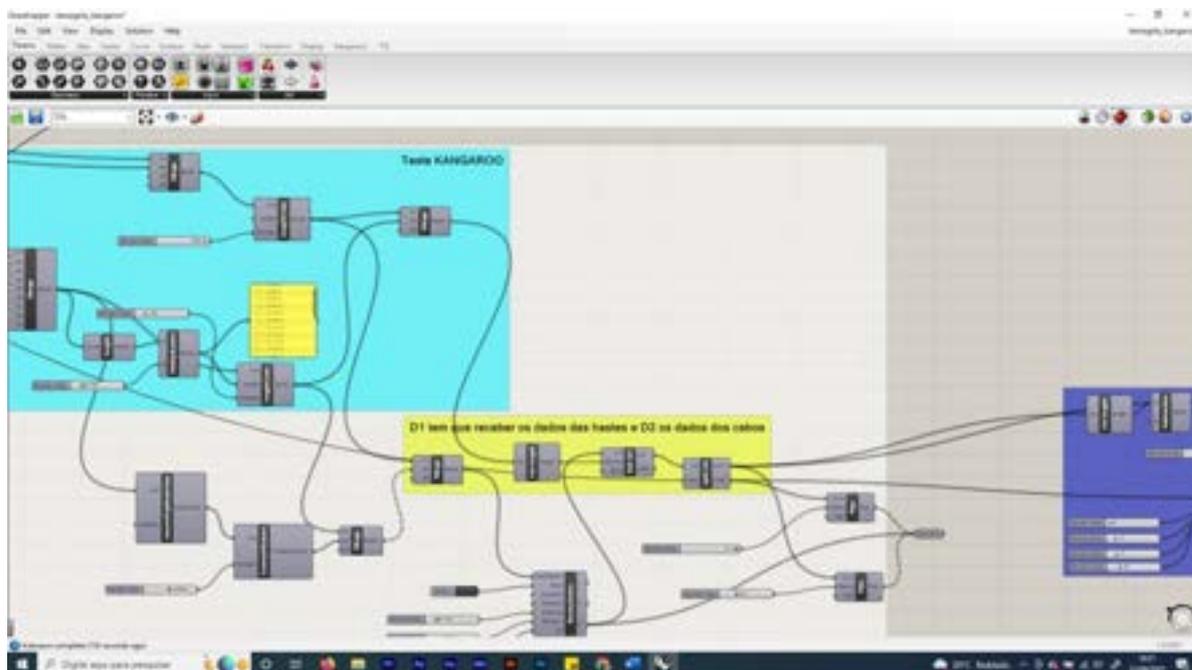
Figura 46 - Modelagem do tensegrity no Rhino (via Grasshopper)



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Um modelo paramétrico foi desenvolvido no *software Rhino* através do *script* feito em *Grasshopper* (Figura 47), e a simulação das cargas no *plugin Kangaroo Physics*, que realiza testes com aplicação de cargas, lei da gravidade, e outros condicionantes em direção da simulação da realidade.

Figura 47 - Montagem do script no Grasshopper

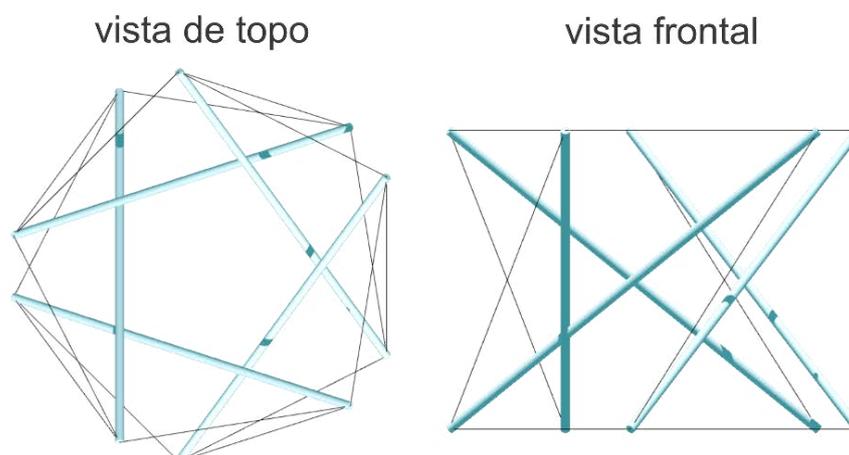


Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

É importante destacar que seguindo a metodologia, esse processo é dinâmico entre as etapas, e nele ocorrem *feedback loops*, nos quais a modelagem é reajustada, e dentro desse processo está a prototipagem, que foi vastamente explorada nesta pesquisa, e que deu suporte para variações na forma de pensar os algoritmos. Ora foram montados em módulos, ora em cabos contínuos, como se fossem um grande tecido de crochê de hastes e fios, então, o que queremos mostrar é a fluidez do processo e como uma etapa está altamente relacionada com a outra, sendo muitas vezes difícil de percebê-las de forma distinta.

A figura abaixo (Figura 48) mostra a geometria de um prisma do tipo *Tensegrity* de base hexagonal modelada através de um *script* programado no *Grasshopper*.

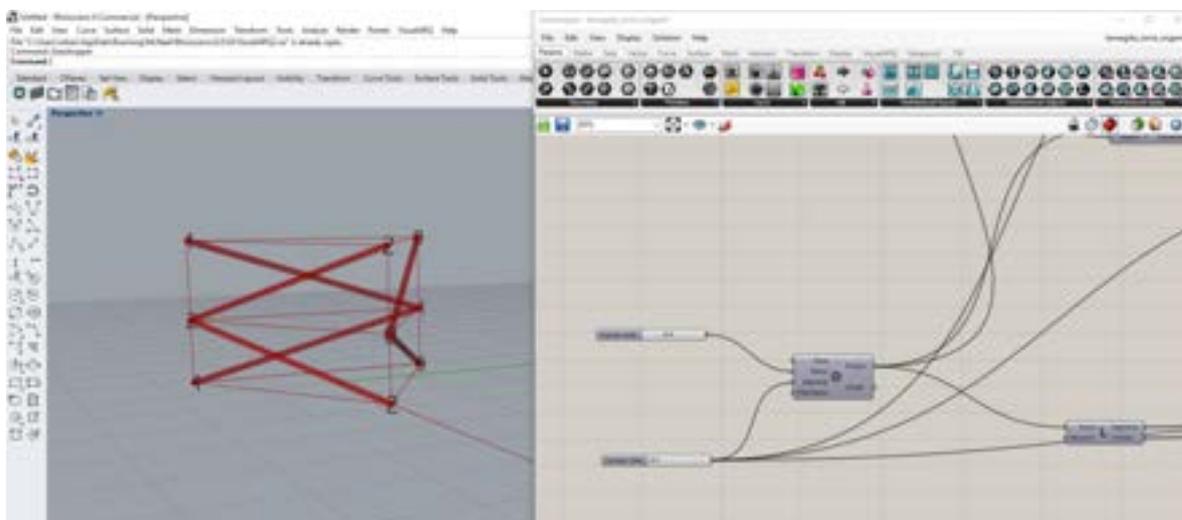
Figura 48 - Prisma do tipo *Tensegrity*



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Nas imagens seguintes, mostraremos um *script* de torre de um prisma de base triangular (Figura 49). Depois de modelarmos a estrutura pela lógica de *script*, aplicou-se simultaneamente um outro *script* que trata do comportamento físico da forma quando sobre os esforços reais da natureza da estrutura (tração e compressão), o qual se chama *Kangaroo*.

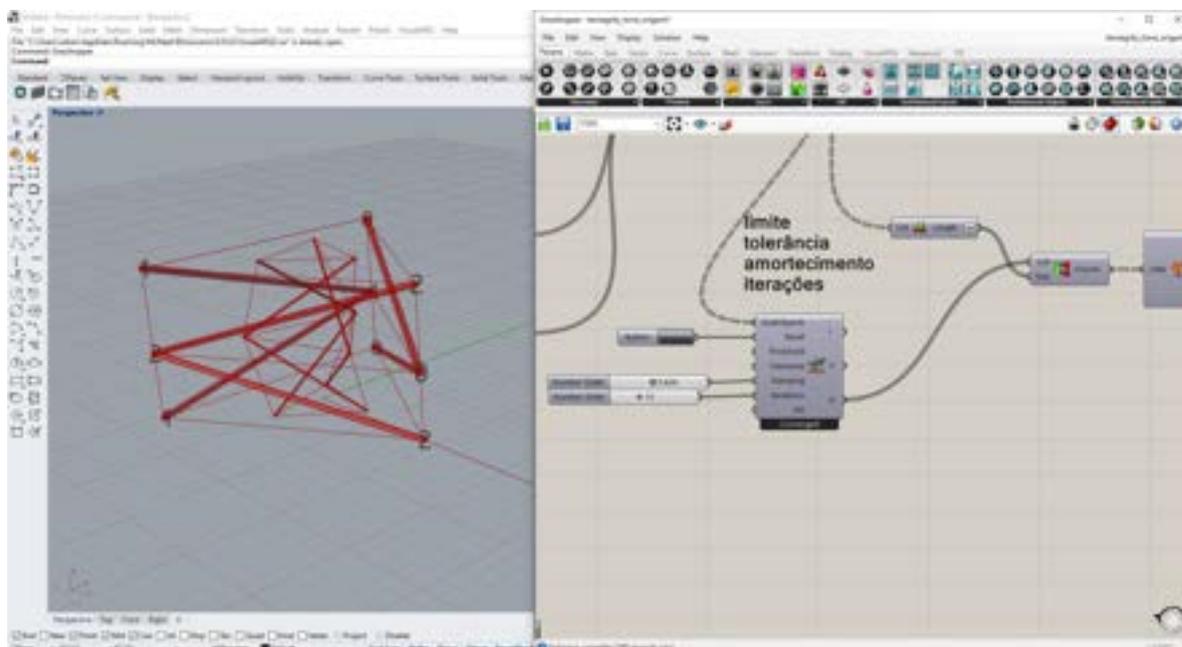
Figura 49 - Prisma de base triangular



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Percebe-se ao centro da primeira geometria construída, a forma simulada com os esforços reais e assim sua configuração estética modifica-se em tempo real (Figura 50).

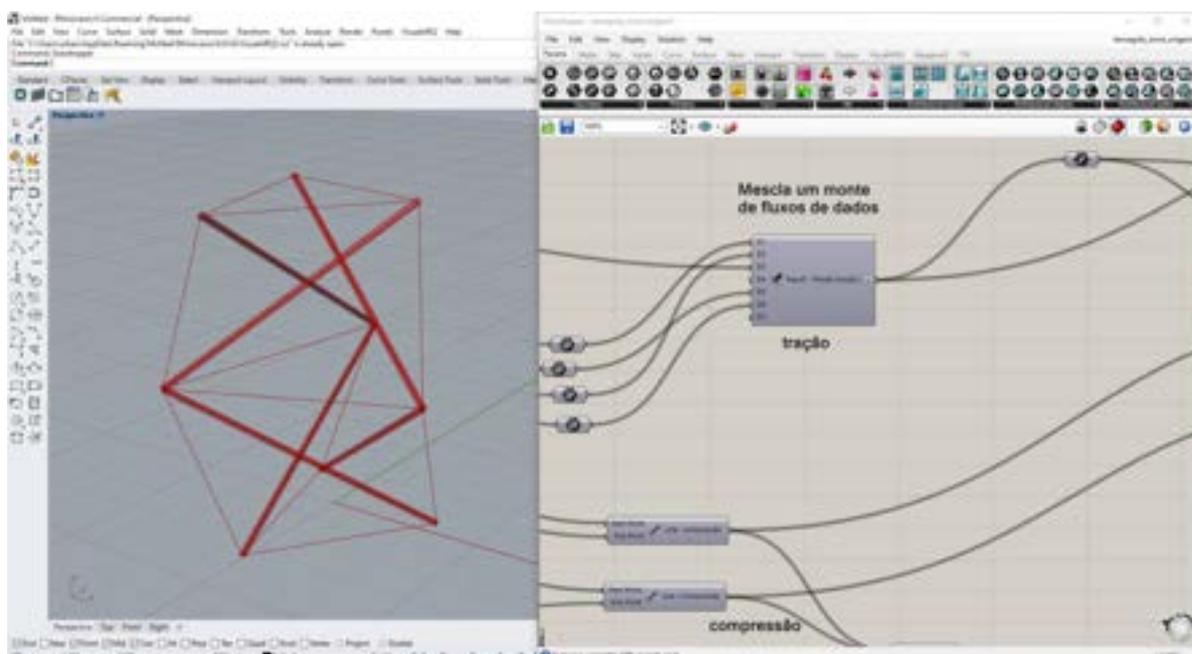
Figura 50 - Alterações dos parâmetros em tempo real



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Deste modo, esta *Tensegrity* de torre, que possui dois andares e seis hastes, sofre deformação na direção Z, alterando os comprimentos de hastes e cabos (Figura 51).

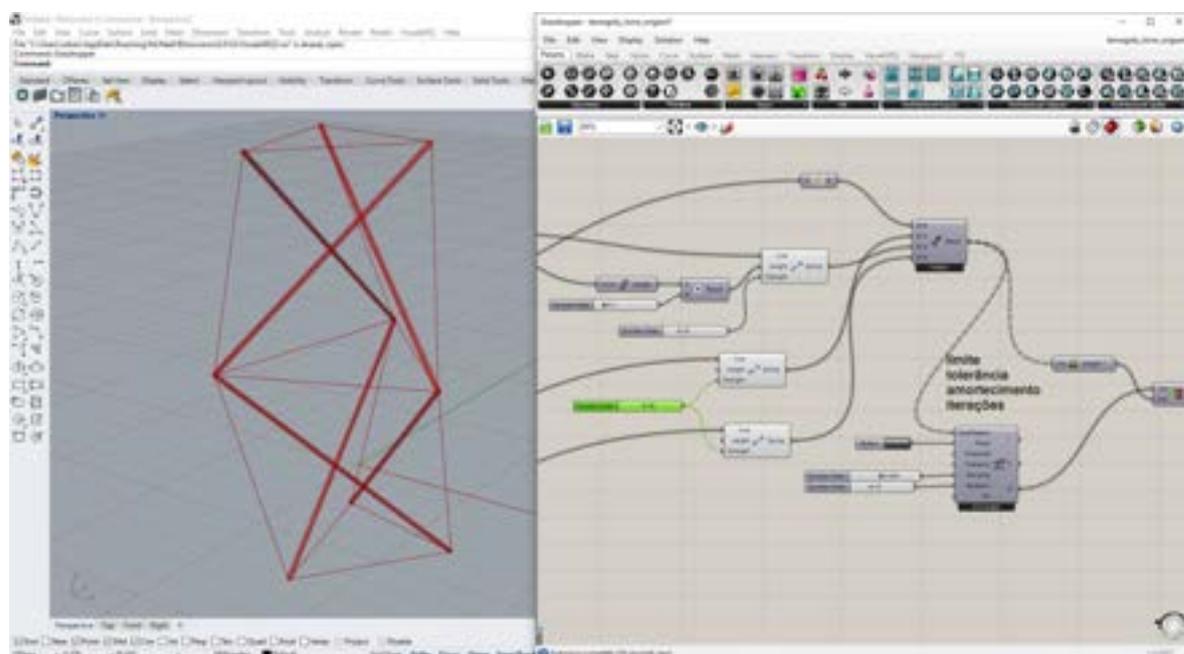
Figura 51 - Tensegrity de torre



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Na imagem abaixo (Figura 52) observa-se em destaque verde a caixa (*number slider*) que permite a variação de valores (parâmetros) na simulação digital.

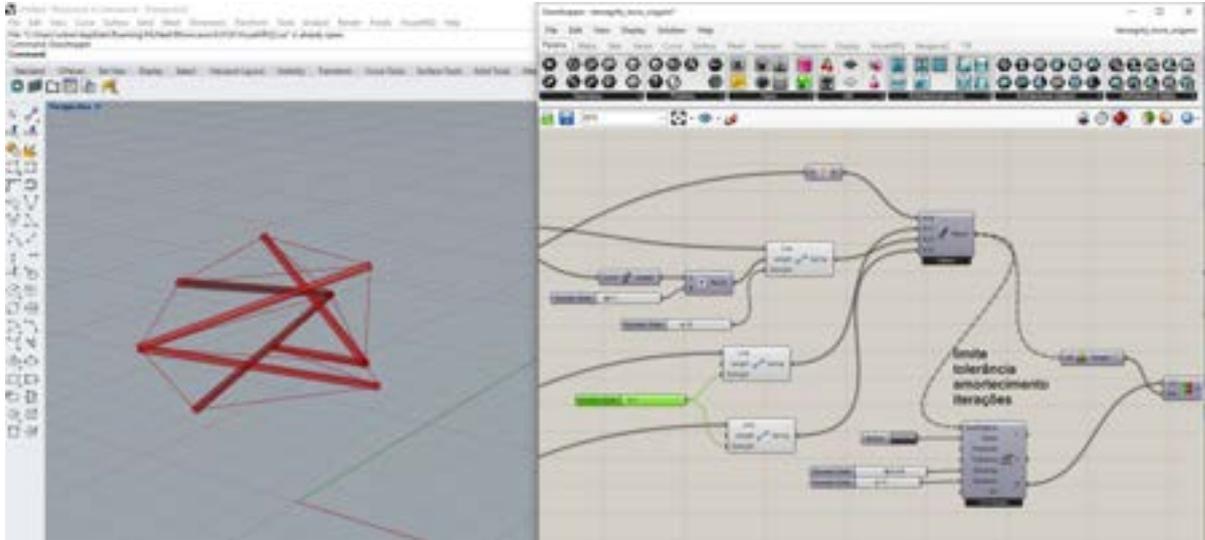
Figura 52 - Alteração dos valores via number slider



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Então alteramos a força de tração sofrida pelos cabos e o resultado pode-se observar na Figura 52 e na Figura 53, sucessivamente.

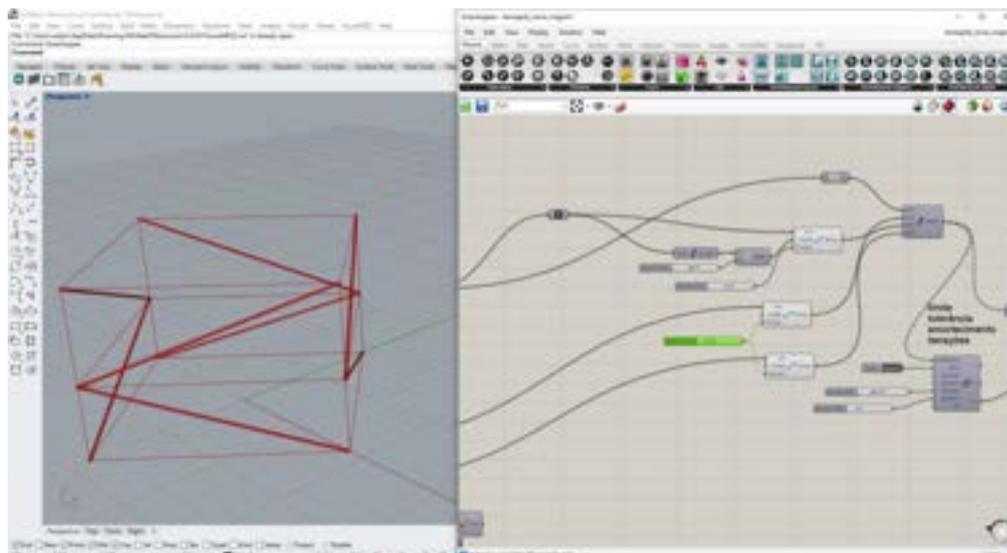
Figura 53 - Alteração das forças de tração e consequente deformação



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

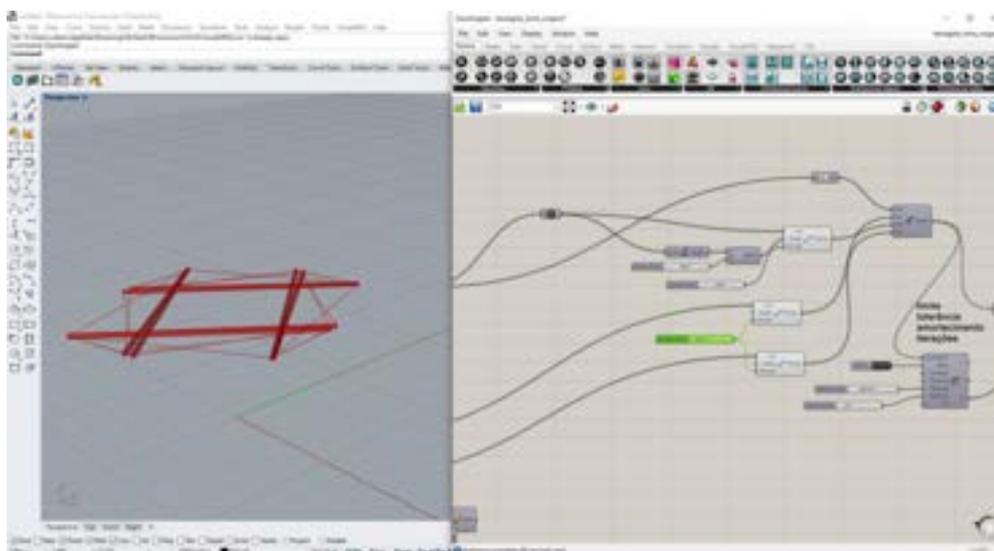
Outro teste de análise foi feito na estrutura: nos parâmetros iniciais da construção da geometria aumentamos mais uma haste. Verifica-se que sem aplicação dos esforços a geometria é rapidamente resolvida, porém quando acionamos o plugin *Kangaroo*, a realidade muda, e a estrutura fica achatada (Figura 54; Figura 55), então uma nova revisão deve ser feita, passando pela prototipagem para verificar essa possibilidade e encontrar o que deve ser refinado. Muito provavelmente o *script* deva ser melhorado, pois devido aos inúmeros protótipos já construídos, acreditamos na possibilidade dessa estrutura conseguir ser ajustada.

Figura 54 - Achatamento da estrutura



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Figura 55 - Achatamento da estrutura



Fonte: autora, 2023

Dunn (2012) aponta para a interatividade do processo a partir dos *feedbacks loopings* que devem permitir ajustes e correções de rumo em função das análises dos protótipos gerados:

As relações são posteriormente editadas à medida que o designer observa os efeitos das revisões, à medida que o sistema de elementos conectados evolui e os resultados desejados são escolhidos com base em critérios “performativos” e estéticos relevantes. Além disso, conjuntos complexos de

elementos podem ser agrupados ou “recolhidos” para formar um novo elemento personalizado definido pelo designer (Dunn, 2012, p. 54).

Portanto, depois de uma revisão no *script*, ajustamos alguns parâmetros da construção da geometria e após a simulação a estrutura se alongou. Organizamos esse passo a passo para ilustrar o processo de *feedback loop* e refinamento que essa forma de concepção de projeto traz em si, além de enfrentar desafios, como aprender linguagens de programação, *softwares* e inúmeros *plugins*, que por sua vez estabelecem outros modos de se projetar, a partir da programação dos *scripts*. O projetista transita o tempo todo por todas as partes do processo e participa ativamente da organização da fabricação.

Como acontece com qualquer ferramenta de projeto, há aspectos positivos e negativos no projeto paramétrico. A principal vantagem é dupla: uma vez estabelecidas as relações, o sistema pode rodar autonomamente dentro de seus parâmetros e explorar novas soluções que podem não ser aparentes para o projetista; e, como o projeto é sempre mantido consistente com esses parâmetros, o designer tem maior oportunidade de explorá-los sem retrabalhos demorados (Dunn, 2012, p. 54).

O que Dunn (2012) afirma acima foi experimentado na prática com esse estudo de caso realizado dentro da pesquisa. A experiência de ter montado vários protótipos nos levou a conclusão de que o *script* deveria ser revisto, e assim foi feito e o resultado foi satisfatório. Bastaram alguns ajustes no *script* e nos parâmetros para que as forças na simulação atuassem corretamente, e só percebemos isso porque na prototipagem física é necessária essa torção, uma vez que a *Tensegrity* precisa de pré-esforço para ser erguido - sendo essa uma característica primordial das *tensegrities* - e por esse motivo essa estrutura traz um desafio maior na sua montagem.

4 WORKSHOP

4.1 Introdução

Discutiremos aqui os resultados do *workshop* realizado em 2022, junto ao evento internacional DIGITAL FUTURES²¹.

Nos encontramos, atualmente, segundo os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), no período da mitigação dos danos causados ao planeta pela humanidade. Então, nos resta gerenciar os impactos e planejar como vamos reduzir a velocidade da entropia. No que se refere a tecnologia, as ODS, trazem uma diretriz para o desenvolvimento de produtos que buscam por meio da inovação tecnológica um desenvolvimento mais sustentável. De acordo com o *site* oficial (*Sustainable Development Goals*²²), ainda estamos distantes desse ideal, porém, a academia e a ciência têm a responsabilidade de promover pesquisas e alavancar estudos nessa direção.

Logo, consideramos pertinente a estratégia de entender os conceitos de bioinspiração e mediação digital em processos colaborativos, ou seja, no caso específico do *workshop* realizado, buscou-se estimular o compartilhamento destes saberes e sua relevância entre os participantes.

O *workshop* teve como objetivo geral projetar estruturas do tipo *Tensegrity*, explorando seu potencial estrutural e de otimização. Inicialmente, procuramos estudar brevemente a história e os principais conceitos envolvendo estruturas do tipo *Tensegrity*; na sequência, buscamos promover uma aproximação metodológica dos processos digitais de projeto, envolvendo especialmente o *design* paramétrico. Estrategicamente, procuramos retroalimentar os processos digitais com protótipos físicos; e por fim, mas não menos importante, foi proposto analisar as vantagens da utilização de estruturas do tipo *Tensegrity* relacionadas às produções menos impactantes. Além da aplicação do método de prototipagem e *design* paramétrico como formas de conceber e discutir projetos, o *workshop* se preocupou com as discussões relevantes que a própria estrutura traz em seu conceito primordial, como a Bioinspiração. Estruturas do tipo *Tensegrity* têm várias relações com o corpo

²¹ **Workshop no Digital Futures 2022:** [Tensegrity: Parametrização e Prototipagem – DigitalFUTURES](#)

²² Disponível em: <https://www.undp.org/sustainable-development-goals>.

humano, Verschleisser (2008) e Victor *et al.* (2018), já que o momento traz à tona questionamentos de como podemos conceber projetos e arquitetura mais integradas à natureza, mas também considerando a própria humanidade com fazendo parte da natureza.

A natureza faz uso econômico dos materiais, alcançado pela engenhosidade evoluída da forma. Usando dobras, abóbodas, esqueletos, infláveis e outros meios, organismos naturais têm criado formas efetivas que demonstram eficiência surpreendente (Pawlyn, 2011, p. 09, tradução nossa²³). O autor nos convida a observar a natureza e dela extrair soluções ricas e abundantes que os organismos e sistemas vivos possuem, tais como ossos, estrutura de um caule, penas etc. Segundo o autor, o princípio para arquitetura que emerge da observação é: menos material, mais *design* (Pawlyn, 2011, p. 09, tradução nossa²⁴).

Pensando nesse paradigma proposto por Pawlyn (2011), encontramos em Hsuan-An (2002) e Pires e Pereira (2017), formas sistematizadas de observação dos sistemas naturais, pois para eles, o bom *design*²⁵ vem do processo de aguçar o olhar para extrair da natureza não somente a forma, mas os padrões e fenômenos envolvidos e assim desenvolver *designs* eficientes integrados com o meio, interagindo como um organismo natural e buscando o equilíbrio dos sistemas. Seria fundamental, hoje em dia, implantar um *design* que garanta uma produção positiva, com regeneração e reaproveitamento, onde quase nada é desperdício - isso seria o ideal do *design* contemporâneo.

Pawlyn (2011) também afirma que as estruturas transformáveis, sendo a *Tensegrity* uma delas, possuem uma característica adaptativa e isso se relaciona com a biomimética, pois faz com que as edificações adquiram um comportamento físico semelhante ao dos organismos vivos, ou seja, se modificam conforme a resposta do meio em que estão. “*As estruturas implantáveis podem se mover, expandir ou contrair alterando suas propriedades geométricas, materiais ou mecânicas*” (Pawlyn, 2011, p. 35, tradução nossa²⁶).

Verschleisser (2008) argumenta que Buckminster Fuller define *Tensegrity* como um oceano de tensão com ilhas de compressão, e argumenta também que Snelson sintetiza essa ideia com a definição de Compressão Flutuante. De acordo com

²³ **Do original em inglês:** Nature makes extremely economical use of materials, often achieved through evolved ingenuity of form. Using folding, vaulting, ribs, inflation and other means, natural organisms have created effective forms that demonstrate astonishing efficiency.

²⁴ **Do original em inglês:** The principle for architecture that emerges from observing is: less materials, more design.

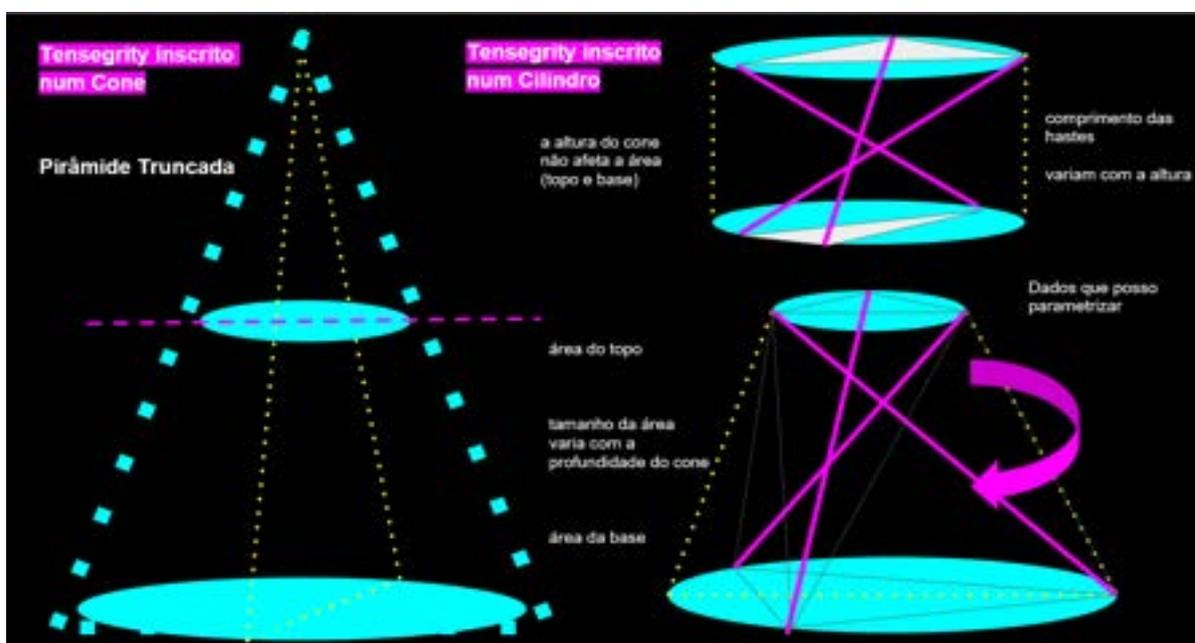
²⁵ Entendemos o conceito de design enquanto processo de projeto, a despeito de várias interpretações e traduções para o termo advindo da língua Inglesa.

²⁶ **Do original em inglês:** Deployable structures can move, expand or contract by changing their geometric, material or mechanical properties.

Verschleisser (2008), as *Tensegrities*, baseadas em poliedros e em prismas ou pirâmides, formam um sistema fechado de forças, e por isso dispensam fundações, uma vez que as tensões atuam no sistema e isso causa um auto equilíbrio. Isso significa que as *Tensegrities* não dependem da gravidade para manter sua estabilidade; ele necessita de pré-esforço, Ohsaki e Zhang (2015).

A partir destas características, tomamos a *Tensegrity* como objeto de exploração no *workshop* ministrado no *Digital Futures 2022*. Fizemos algumas relações visuais, para que os participantes aguçassem o olhar para verificar geometrias e relações que pudessem ser exploradas na prototipagem física e nos desenvolvimentos dos *scripts*.

Figura 56 - O desenho mostra como observar padrões e relações da Tensegrity com geometrias e volumes já conhecidos



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

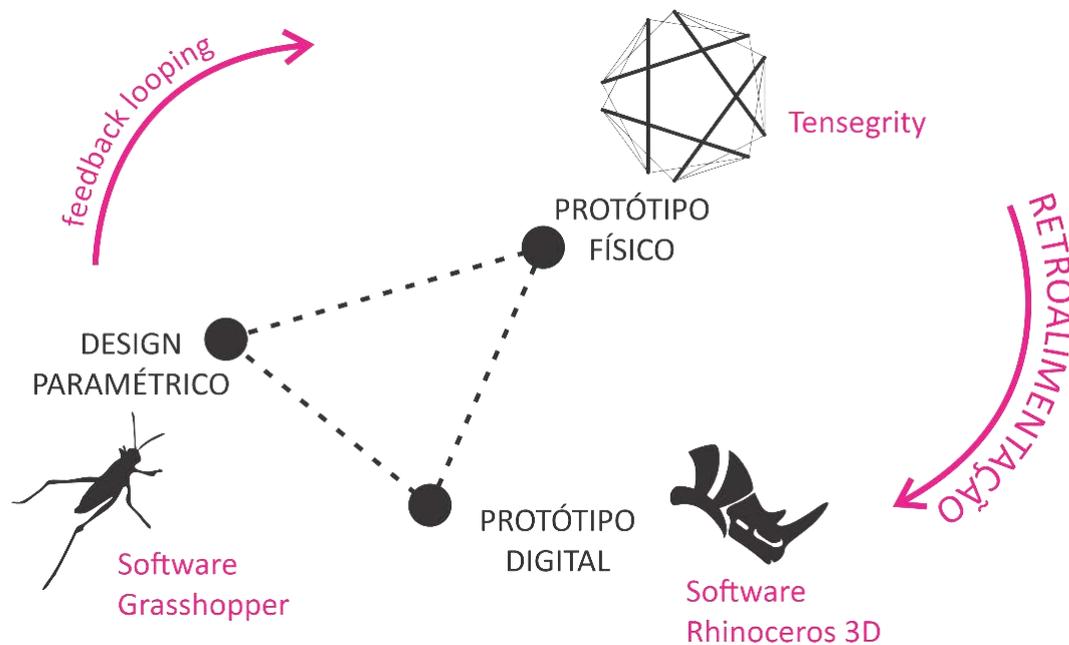
Logo, a prototipagem física foi a opção escolhida antes da prototipagem digital, pois entendemos que a montagem na prática facilitaria a modelagem do *script*. A figura acima (Figura 56) mostra algumas relações apontadas na *Tensegrity* prismática, inscritas num cilindro e num cone. Esse processo facilita o desenvolvimento do pensamento algorítmico a ser implementado, e introduz os princípios metodológicos que serão apresentados a seguir.

4.2 Metodologia aplicada no *workshop*

A Cibernética de Segunda Ordem trata do controle da informação e do equilíbrio dos sistemas observados, enquanto a Semiótica de Peirce propõe estratégias para observar e entender o significado das coisas. Essas duas ciências estão interligadas pelas tecnologias de informação e comunicação, segundo Alves (2014), e isso concebe a base da Cibersemiótica. A mediação digital relaciona as instâncias físicas e digitais, e coloca essas realidades num diálogo mais estreito, com capacidade de explorar melhores soluções de projeto, e quando falamos isso, atualmente, falamos de projetos mais sustentáveis em vários aspectos.

Esse *workshop*, por meio de princípios cibersemióticos, buscou a produção sequencial de protótipos físicos e protótipos digitais, permitindo a exploração de *feedback loops* de modo que cada protótipo pudesse corrigir os rumos do *design* produzido de maneira evolutiva. O diagrama abaixo, Figura 57, ilustra a dinâmica do método proposto pela Cibernética de Segunda Ordem aplicado para o *workshop*, o qual foi realizado *online*.

Figura 57 - Diagrama ilustrando o *feedback looping*, conforme proposto pela Cibernética de Segunda Ordem, nas etapas realizadas no *workshop*



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Com a parametrização de dados em linguagem de programação (no caso o *software* a ser explorado foi o *Rhino 3D* e seu *plug-in Grasshopper*), buscamos desenvolver geometrias complexas e processos interativos. A possibilidade de simular dados físicos no ambiente digital intensifica a participação do arquiteto no projeto - que determina os *inputs* a serem testados -, colocando o saber fazer de forma muito ativa na produção. Deste modo, a aplicação da tecnologia digital estimula a prática física, ou ainda em outras palavras, a fabricação digital e prototipagem, diminuem a distância entre o projeto, o produto e o *designer*.

O *workshop* propôs alguns objetivos iniciais aos participantes:

- Observar tipos de estrutura fazendo analogias com elementos da natureza e objetos do cotidiano (Figura 58);
- Aguçar o olhar para perceber certos padrões da natureza;
- Explorar esse conhecimento imaginando possibilidades na nossa vida;
- Vislumbrar geometrias e o comportamento de estruturas que possuem inteligências mais elaboradas: mobilidade, modularidade, reutilização, otimização de materiais;

- Experimentar materialidades diferentes;
- Entender que a exploração e a experimentação são bases fundamentais que retroalimentam a dinâmica da pesquisa.
-

Figura 58 - Analogia de estruturas naturais (colmeia) com as estruturas de tensegridade



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Para efetivar as dinâmicas de estudo e aplicação do processo de projeto híbrido, ou seja, tanto na instância física quanto digital, o cronograma estabelecido foi:

- Primeiro dia – aporte teórico, bibliografia, revisão de precedentes etc.;
- Segundo dia – montagem de protótipos físicos em escala reduzida;
- Terceiro dia – treinamento *rhino/grasshopper* com estudo de *scripts*;
- Quarto dia – orientações e desenvolvimento de projetos;
- Quinto dia – orientações e desenvolvimento de projetos;
- Sexto dia – apresentação dos resultados e discussões.

Deste modo iniciamos o *workshop*, exibindo estruturas, indicando e discutindo os padrões, a geometria, o movimento, dentre outros fundamentos teóricos.

Começamos os processos de aproximação em relação às estruturas do tipo *Tensegrity* pela exploração dos protótipos físicos. É importante destacar que a mudança no modo de se pensar Arquitetura e produzir projetos é o primeiro passo a ser observado a partir do método proposto, então separamos o *workshop* em 3 momentos marcados pelo método aplicado:

Primeira Etapa: Aula Expositiva e Prototipagem.

Nesta etapa, discutimos e apresentamos por meio imagens, diagramas e vídeos, os conceitos fundamentais que abordam a temática, depois adentramos na fundamentação das estruturas do tipo *Tensegrity*, explicando como funcionam fisicamente as estruturas e os sistemas fechados que escolhemos trabalhar, como também revisando alguns precedentes históricos e aplicações na Engenharia, Robótica e Biologia. Num segundo momento começamos a prototipagem com os participantes e depois num terceiro foi explicado sobre produção de *scripts* no *Grasshopper* para nível iniciante, já que não foi exigido esse pré-requisito no *workshop*. Deste modo, para acelerar o aprendizado, depois de explicarmos as noções básicas da lógica usada no software, compartilhamos alguns scripts básicos e deixamos que os participantes os implementassem mais. Esta etapa descrita foi distribuída ao longo dos três primeiros dias, e o método foi mesclado, ora com aula expositiva, ora com prototipagens (abordagem “mão na massa”), ora o estudo investigativo que o *design paramétrico* provoca quando se trata de linguagem de programação.

Segunda Etapa: Cibernética de Segunda Ordem.

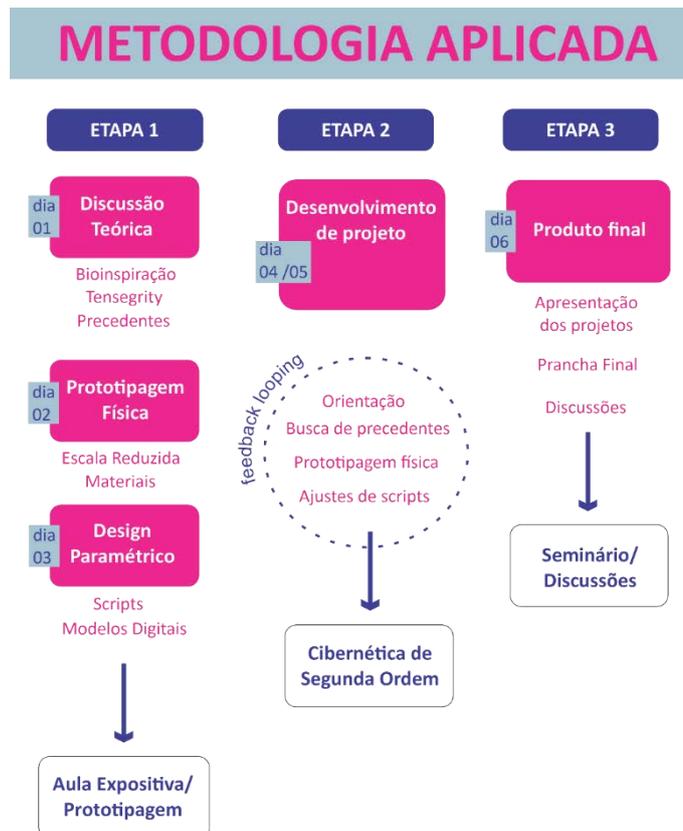
No quarto dia laçamos duas propostas de projeto para serem desenvolvidas por dois grupos. O processo de produção com orientação ocorreu durante dois dias e foi nesta etapa que de fato se consolidou a aplicação do método proposto pela Cibernética de Segunda Ordem, onde pudemos acompanhar as pesquisas, assim como os desenvolvimentos retroalimentados pela prática dos protótipos nos *scripts* que foram desenvolvidos. Os alunos fizeram novos protótipos, um grupo criou o próprio *script*, o outro evoluiu um *script* fornecido e assim ambos passaram pelas etapas de

prototipagem, programação e análise, produzindo refinamento e evolução, num ciclo que só termina quando se chega no *goal* esperado, ou no objetivo possível de ser alcançado, conforme o tempo que tínhamos disponível para a realização do *workshop*, a saber, cinco dias.

Terceira Etapa: Seminário.

No último dia os grupos apresentaram suas propostas, explicando referências e os projetos desenvolvidos. Os resultados foram entregues em uma prancha final, de acordo com o *template* padrão do *workshop* além de um vídeo resumo explicando o que foi desenvolvido nesses dias. Após as apresentações abrimos uma roda de conversa na qual discutimos as questões levantadas durante o *workshop* e a experiência de cada um no processo. O diagrama a seguir, Figura 59, sintetiza o fluxo do processo metodológico aplicado:

Figura 59 - Diagrama da metodologia aplicada



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

4.2 Desenvolvimento

4.2.1 Prototipagem Física

A partir das premissas e fundamentos estabelecidos no primeiro encontro, no segundo dia, para os exercícios de prototipagem foram utilizados palitos de madeira (do tipo de algodão doce ou de espetinho), elástico, borrachinha de dinheiro, canetinha, tesoura, régua e lápis, portanto, materiais básicos e acessíveis.

Começamos com a prototipagem de uma *Tensegrity* de 3 hastes, do tipo prismático (Figura 60), também classificado por *Tensegrity* de Ordem 2, onde cada haste, não coplanar, se encontra torcida em relação a base, que é um triângulo.

O pensamento de montagem do protótipo físico desse tipo de *Tensegrity* foi análogo ao das estruturas recíprocas, porém há uma costura entre cabos e hastes. Alguns participantes apresentaram dificuldades na montagem, pois estas estruturas precisam estar tensionadas para se estabilizarem, então usamos elástico para facilitar o ajuste final (pois ele apresenta mais elasticidade que um barbante).

Figura 60 - Os 3 tipos de Tensegrity que foram desenvolvidos pelos participantes



Fonte: Acervo da autora, 2023.

A imagem acima (Figura 60) ilustra os três tipos de modelos produzidos por um dos participantes. Após essa etapa, começaram as simulações e modelagens digitais.

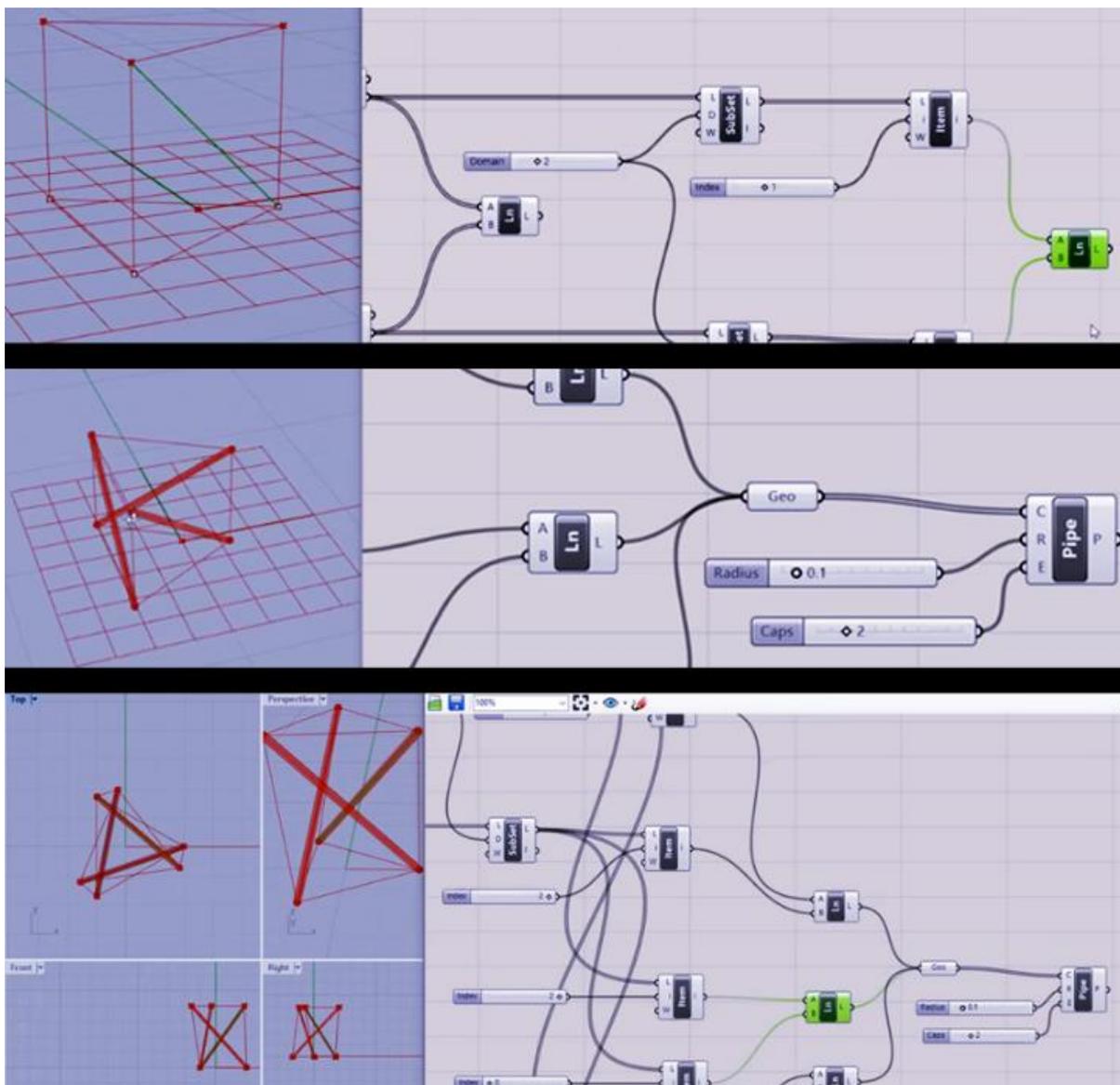
4.2.2 Prototipagem Digital

No terceiro dia iniciamos o treinamento do *Rhino 3D* com estudos de *scripts* em *Grasshopper*. Foram ensinados e produzidos conjuntamente os *scripts* dos protótipos físicos, sendo evidenciada a todo momento essa transposição da lógica de montagem para a construção do *script*. Incentivamos os alunos a explorarem novas soluções, e apresentamos *scripts* básicos como ponto de partida ou referencial. Posteriormente fomos evoluindo o desenvolvimento da linguagem, sempre observando o protótipo físico e suas relações para serem aplicadas na modelagem paramétrica, definindo mais *inputs* ou parâmetros de ajustes, tornando, desse modo, o *script* mais inteligente e responsivo.

Antes de desenvolver cada *script* foi explicada a lógica do pensamento que tinha como partido os antiprismas regulares. A partir do volume construído só por linhas, observamos que as hastes de uma *Tensegrity* de ordem 2 são as diagonais de cada face de um antiprisma (as faces são sempre retangulares).

Abaixo (Figura 61) as imagens ilustram em sequência o desenvolvimento do *script* até a formação da *Tensegrity*, finalizando com a rotação do topo (triângulo), pois é esse giro que dá tensão para a estrutura *Tensegrity* do tipo prismática.

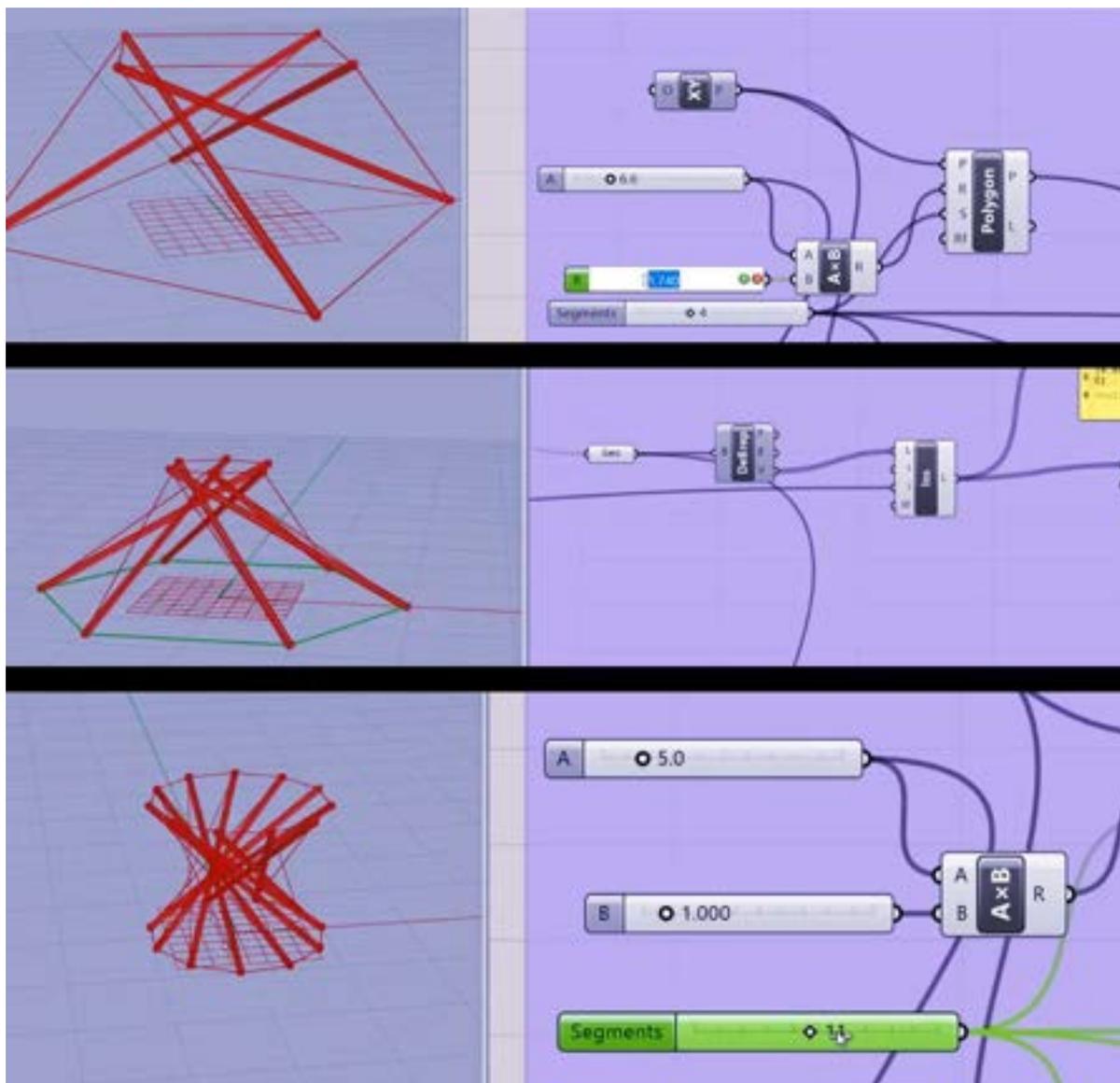
Figura 61 - Desenvolvimento do script no Grasshopper por meio das relações com as figuras prismáticas



Fonte: Elaborado por diversos autores durante o seminário, 2023.

A próxima sequência de imagens (Figura 62) mostra as alterações com os refinamentos feito no primeiro *script*, e assim a parametrização nos números de hastes, altura, e área de topo e base desta *Tensegrity*.

Figura 62 - Com o *script* mais desenvolvido, as imagens ilustram a facilidade de alteração do design depois do ajuste das parametrizações



Fonte: Elaborado por diversos autores durante o seminário, 2023.

A partir da conclusão dos *scripts*, a retroalimentação entre teoria e prática, e também entre os protótipos físicos e digitais, percebeu-se que foi proporcionado aos participantes a compreensão de possibilidades de aplicação das estruturas do tipo *Tensegrity*. A seguir foi lançado um desafio projetivo, cujos resultados serão apresentados a seguir:

4.3 Resultados do *workshop*

Os participantes foram divididos em dois grupos e foram lançados dois desafios projetivos. O primeiro deles, seria desenvolvido no Pantanal Sul Mato Grossense, levando em consideração a fragilidade do bioma e possíveis necessidades de pesquisadores, observadores da fauna e da flora, além da possibilidade de uso por parte das comunidades ribeirinhas, em geral. Ao segundo grupo, caberia o desenvolvimento de uma espacialidade a ser construída no planeta Marte, em função das explorações e especulações que vêm ocorrendo, e levando em consideração a facilidade de transporte e de montagem desse tipo de estrutura.

O grupo que desenvolveu o projeto para Marte propôs uma estufa (Figura 63), na qual a ideia principal consistia em produzir uma espacialidade/dispositivo que possibilitasse o cultivo de alimentos orgânicos para colonizadores do planeta. O grupo argumentou que o projeto foi pensado sob ótica da vegetação, com foco na produção de alimentos, e não na habitação humana, como um suporte para suprir, justamente, a escassez de alimentos. A estufa, segundo a proposta do grupo, seria protegida com um envoltório capaz de criar condições adequadas para a criação de espécies vegetais, resguardando-os da alta radiação do planeta e possíveis intempéries. Usando como referência o filme *Perdido em Marte*, o grupo idealizou o projeto pensando em ambientes extremos e agressivos para a permanência humana.

O projeto optou pelo desenvolvimento de uma estrutura *Tensegrity* de 6 hastes, com base no Icosaedro, no qual as próprias hastes serviriam de suporte para a plantação. Essas espacialidades seriam implantadas em vários módulos. O grupo encontrou uma solução mais amigável, não desprezando a vida na Terra, mas utilizando Marte como um possível suporte de produção de alimentos, imaginando que o excedente pudesse também ser destinado aos habitantes da Terra.

Figura 63 - Estufa em Marte, projeto proposto pela equipe 1



Fonte: Elaborado por diversos autores, 2023.

Já o grupo que fez o projeto para o Pantanal propôs uma base avançada para observação da vida natural. A equipe pesquisou sobre as características desse grande e frágil bioma e percebeu que o Pantanal abriga diversas comunidades biológicas, dentro de nichos com características únicas. Nesse sentido, buscaram facilitar a relação entre homem e meio-ambiente, criando uma estrutura em cúpula, que pode ser articulada e adaptada para múltiplas finalidades, desde um centro de pesquisa até um lugar contemplativo. O projeto foi desenvolvido num contexto ecológico a partir do qual os sistemas se relacionam como rizomas, estabelecendo relações entre humanos e não humanos e com o objeto construído, ou seja, com coexistências afins e contraditórias que constituem a Natureza, de acordo com a análise dos participantes.

O grupo desenvolveu um protótipo de uma cúpula, construída com a costura das estruturas recíprocas – tecelagens - transferidas para a *Tensegrity*, desenvolvendo o próprio *script*, fazendo a transposição, assim, do físico para o digital (Figura 64). Snelson (2012), em seu livro *Tensegrity, Weaving and The Binary World*, argumenta que as tecelagens têm conexões familiares com as estruturas de tensegridade.

Figura 64 - Desenvolvimento da modelagem paramétrica mediada pela prototipagem, realizado pela equipe que propôs o projeto para o Pantanal



Fonte: Elaborado por diversos autores, 2023.

Essa equipe buscou ampliar as experimentações ensinadas e compartilhadas no *workshop*, expandindo a solução de projeto para uma necessidade real, não só em termos de estrutura, mas também de forma e funcionalidade (Figura 65).

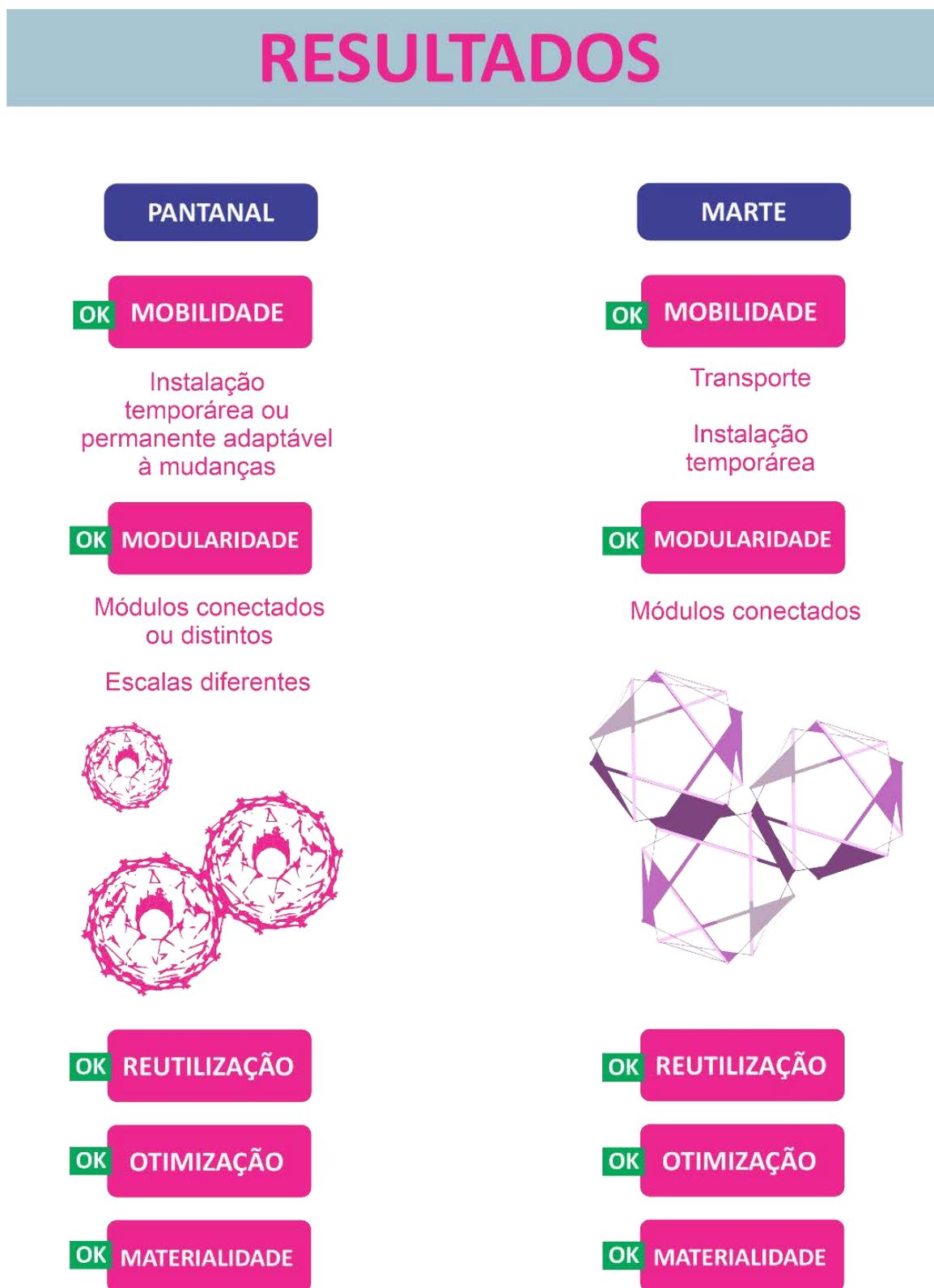
Figura 65 - Arquitetura e Coexistência, fotomontagem da equipe que propôs o projeto para o Pantanal



Fonte: Elaborado por diversos autores, 2023.

O diagrama, (Figura 66), e as Tabela 1 e Tabela 2 na sequência abaixo ilustram o resultado obtido pelos grupos em relação aos objetivos estipulados: mobilidade, modularidade, reutilização, otimização, materialidade.

Figura 66 - Diagrama dos resultados obtidos



Fonte: Elaborado por diversos autores, 2023.

Tabela 1 - Grupo Pantanal

Grupo Pantanal	
Mobilidade	Possibilidades de mudança na implantação ou instalação provisória.
Modularidade	Estrutura modular que contempla escalas distintas. O grupo propôs vários módulos que podem ser implantados separadamente ou conectados em si.
Reutilização	A estrutura projetada pode ser reutilizada tanto em questão da estrutura em si como em partes ou peças isoladas que podem ser substituídas, tanto para manutenção como para mudança na escala do projeto, pois ela pode ser alterada.
Otimização	A estrutura proposta pela equipe é uma cúpula (estrutura recíproca) formada por pentágonos e triângulos que em si traz a otimização de material na sua forma.
Materialidade	Bambu (as hastes da estrutura), conexões em aço e plataforma flutuante em madeira. Nem as conexões nem a plataforma foram detalhadas.

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 2 - Grupo Marte

Grupo Marte	
Mobilidade	A equipe propôs um icosaedro em <i>Tensegrity</i> e essa estrutura tem a possibilidade de montagem e desmontagem, tornando possível o transporte para implantação inclusive num local tão distante e crítico. Dentre as estruturas de sistemas fechados em <i>Tensegrity</i> , o Icosaedro apresenta, dentre eles, uma montagem mais fácil, por ser uma estrutura mais estável e por apresentar ao menos duas formas de montagem, podendo inclusive ir pré-montando (costurado) e só se estruturar no local. Foi escolhido um sistema fechado por não precisar da gravidade em si para se estabilizar enquanto estrutura, funcionando como uma “barraca” mais elaborada.

Modularidade	A equipe propôs um protótipo que serve como módulo que pode ser reproduzido na quantidade necessária e conectados entre si pela cobertura.
Reutilização	A estrutura projetada pode ser reutilizada tanto em questão da estrutura em si como em partes ou peças isoladas que podem ser substituídas, tanto para manutenção como para mudança na escala do projeto, pois ela pode ser alterada.
Otimização	A <i>Tensegrity</i> Icosaedro é uma forma otimizável de estrutura, além sua própria natureza ser econômica em relação a materiais, a equipe propôs utilizar as próprias hastes como suporte de plantação, trazendo a otimização do espaço cultivado e facilitando inclusive o transporte sem prejudicar a plantação.
Materialidade	A estufa terá uma cobertura feita de um material plástico com capacidade de proteção a alta radiação e intempéries (não foram específicos quanto as características do material). Quanto as hastes o grupo deixou em aberto para aço, madeira ou plástico.

Fonte: Elaborado pela autora

4.4 Discussão e considerações finais

Durante o *workshop* foram utilizados, Pawlyn (2011), Hsuan-An (2002), Dunn (2012), Hensel, Menges e Weinstock (2010), e Iwamoto (2009), dentre outros autores que vêm contribuindo com a ciência investigando processos tecnológicos e métodos mais eficientes de soluções de projeto, sem tirar o foco na busca de melhorias para nossa permanência no planeta Terra. Vemos, por vezes, a tecnologia se encaminhar para um destino repetitivo e predatório, o que nos levou à condição atual de escassez de recursos, ameaças de catástrofes ambientais recorrentes, pandemias, desigualdades sociais etc.

No intuito de discutir a responsabilidade da arquitetura em relação às tecnologias digitais e seus processos de fabricação, lançamos dois desafios de projeto no *workshop* realizado no *Digital Futures 2023*: um a ser proposto no Pantanal Sul Mato Grossense e outro no planeta Marte. A proposta se justifica, no primeiro caso, em função de um bioma extremamente frágil e que possui um regime de cheias e vazantes no qual estruturas efêmeras poderiam auxiliar comunidades ribeirinhas de pescadores e pesquisadores; e no segundo caso, em função das estruturas

funcionarem independentemente da ação da gravidade, assim como pela facilidade de transporte em espaçonaves pelo pouco espaço que ocupam.

Muito além de só estudar ferramentas computacionais, tratamos aqui, a partir da pesquisa de mestrado em desenvolvimento, de uma abordagem de concepção de projeto mediada pela fabricação digital, na qual os pensamentos foram retroalimentados pela experimentação e decisões foram tomadas de forma colaborativa. A Cibersemiótica forneceu as bases metodológicas a partir das quais algumas estratégias, como *feedback looping*, permitiram a retroalimentação entre os modelos físicos e digitais, assim como entre teoria e prática.

Deste modo, a prototipagem, tanto física quanto digital, demonstrou ser uma estratégia bastante efetiva no sentido da organização e planejamento das ações e proposições de projeto. As decisões foram discutidas entre as equipes, além das orientações dos professores/tutores, desenvolvendo um pensamento crítico sobre a arquitetura atualizada pela tecnologia e a realidade global atual. A busca por projetos que se aproximassem da noção de natureza (a qual compreende também os seres humanos) a partir de estratégias e metáforas que consideram a bioinspiração, conduziram os processos de concepção para possibilidades bastante viáveis e pertinentes, em relação ao desafio proposto.

Portanto, o trabalho final entregue pelas equipes mostrou uma curva rápida de aprendizado, com soluções satisfatórias para o tempo e para o desafio proposto pelo *workshop*.

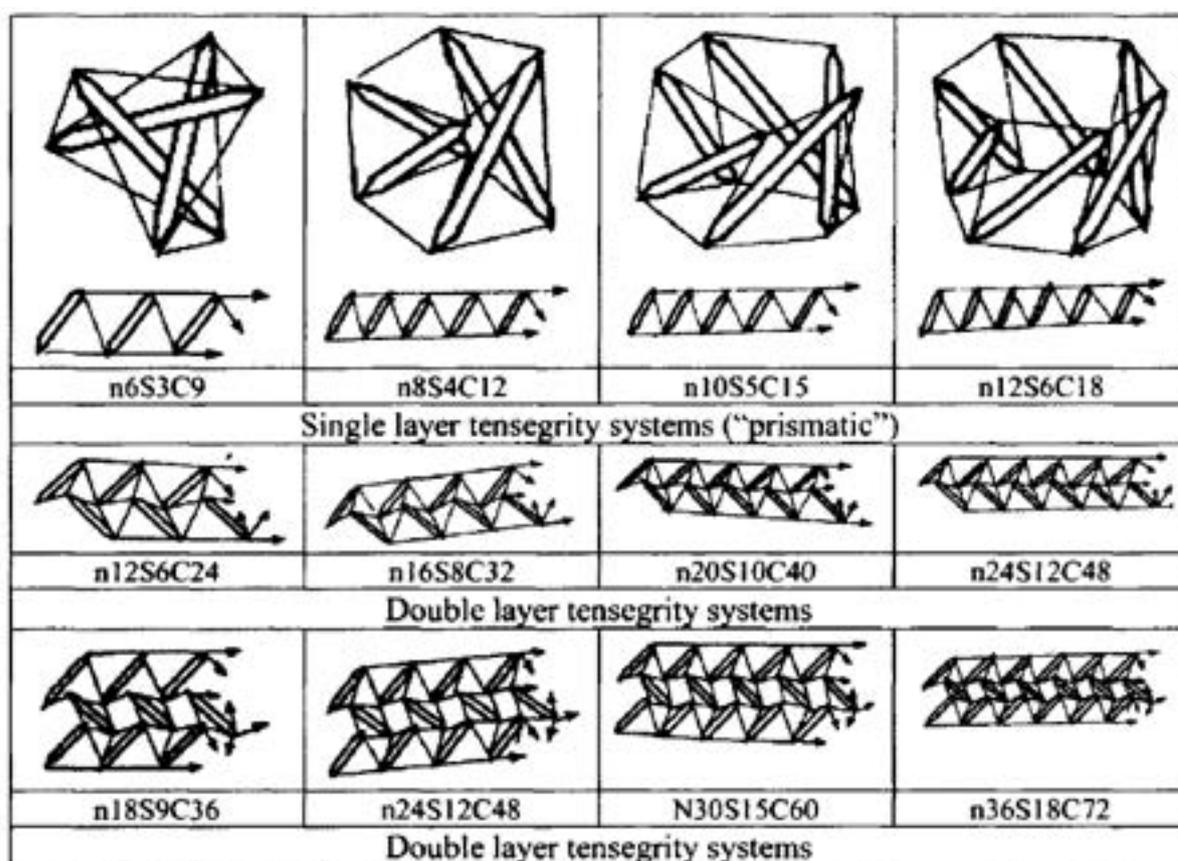
Quanto às dificuldades enfrentadas, podemos destacar o fato de o *workshop* ser *online*, pois no processo de prototipagem que é uma etapa manual e de experimentação cognitiva, portanto, aprender e ensinar via *internet* foi um desafio que demandou mais tempo que o esperado, porém conseguimos ajustar o conteúdo durante a semana do evento, cumprindo o cronograma proposto. Outra questão importante que tornou maior o desafio, foi a dificuldade de montagem que esse tipo de estrutura traz. Logo, é preciso mão de obra treinada e especializada para que isso ocorra na prática da construção, e essa verificação é possível pois a prototipagem traz a possibilidade de testar e experimentar em modelos sucessivos e em várias escalas, e essa retroalimentação oferece a maior contribuição desse método para a concepção de projeto atualmente.

5 CATÁLOGO: COMO PRODUZIR ESTRUTURAS DO TIPO TENSEGRITY?

5.1 Introdução

A pesquisa se propõe a organizar os tipos de *Tensegrity* em um catálogo, que sirva como um manual de montagem, mas também de pesquisa, descrevendo os processos de modelagem digital, prototipagem física e aspectos observados nas experimentações e nas revisões bibliográficas abordadas pelo trabalho (Figura 67). Partimos da classificação dos tipos de *Tensegrities*, conforme imagem abaixo, segundo Motro (2003):

Figura 67 - Tipos de Tensegrity



Fonte: Figura retirada do livro *Tensegrity – Structural Systems for the Future*.

A princípio iremos organizar os sistemas de Tensegridade fechados e regulares, dentro desse sistema temos dois tipos básicos que são os de ordem 1 e de

ordem 2, e os sistemas em malha. Então, explicaremos as *Tensegrity* de acordo com: classificação, montagem - protótipo físico, scripts, protótipo digital, aplicações.

Na Classificação indicaremos o tipo conforme a bibliografia, se antiprisma, ou se poliedro etc. Na montagem, descreveremos passo a passo, criaremos estratégias gráficas para melhor entendimento visual da estrutura, já que verificamos certa dificuldade de obter explicações detalhadas sobre como montar a estrutura de forma não complicada, já que no campo da arquitetura, nos interessa muito a concepção das formas e o entendimento da lógica para que possamos avançar em novas possibilidades em *design*.

O processo de montagem dos protótipos físicos está intrinsicamente ligado a evolução e desenvolvimento dos scripts e da modelagem digital, então esses processos serão relatados e os algoritmos desenvolvidos e/ou adaptados foram disponibilizados via *QR Code* por meio de um site onde o usuário poderá fazer o download do respectivo modelo.

Acreditamos, com isso, facilitar o caminho para quem se aventurar na pesquisa do *Tensegrities*, fazendo um mapeamento dos autores dentro do recorte estabelecido neste trabalho.

Relataremos em etapas o processo de criação do catálogo:

Etapa 01 – Montagem dos protótipos

Nessa etapa definimos os materiais a serem usados que foram:

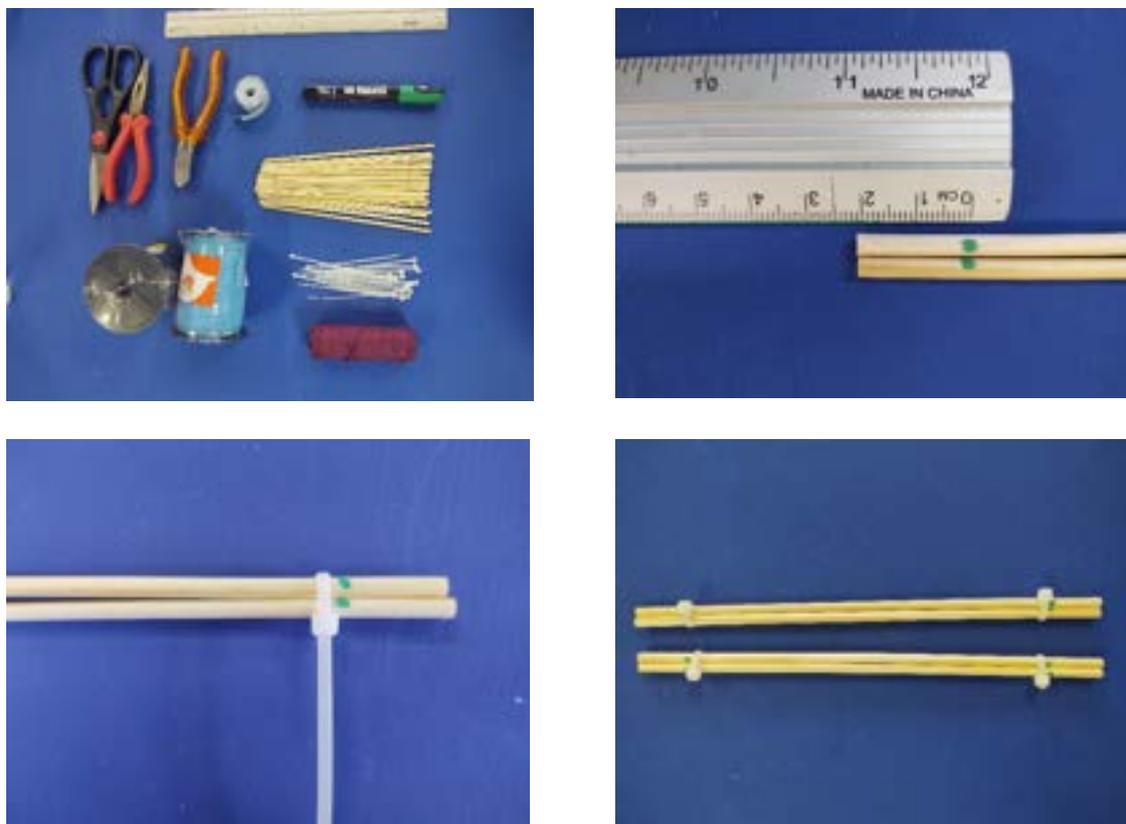
1. Palito de algodão doce 18 cm (quando menor a haste mais fácil o manuseio, então indicamos essa medida por ser mais fácil, porém pode ser executada com um de maior medida)
2. Borrachinha ou tiras de lacrar “enforca gato”
3. Tesoura e alicate de corte
4. Régua
5. Rola de elástico e de rolo de barbante

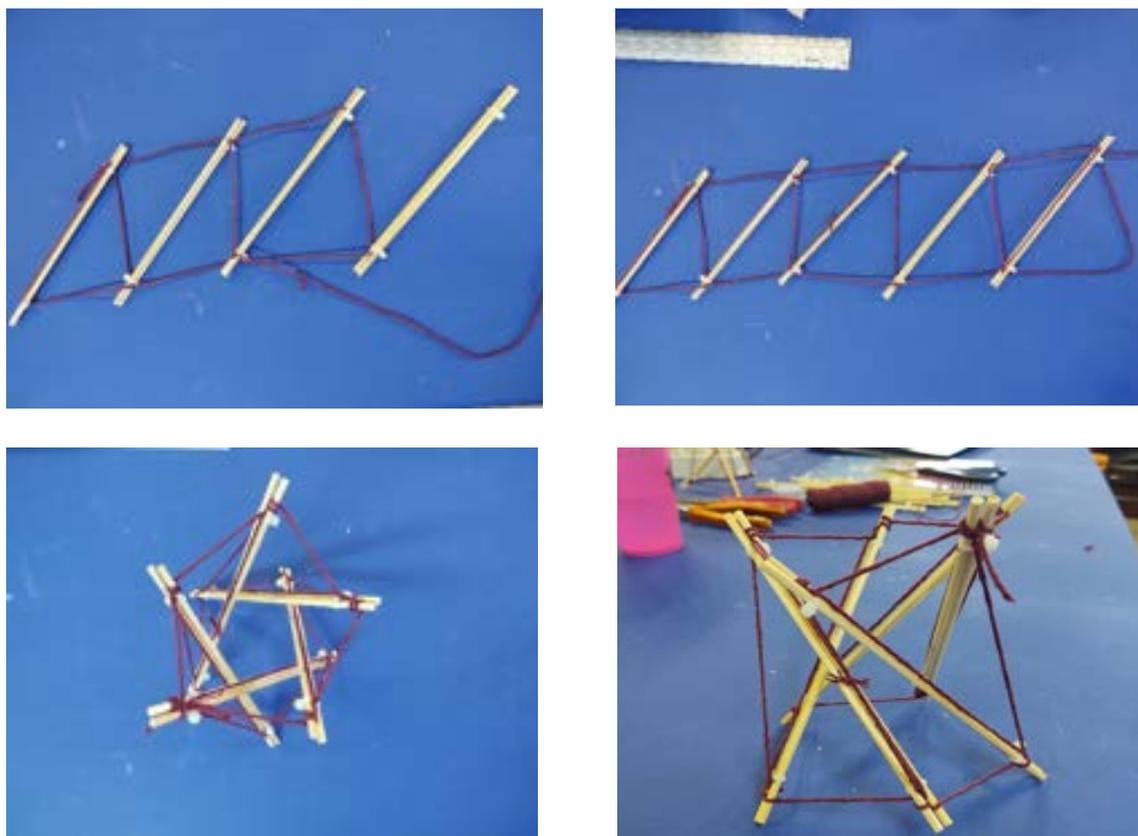
Optamos pela montagem em padrão de malha por verificar maior facilidade de entendimento sem um instrutor, pensamos que com os desenhos gráficos mais intuitivos, o usuário consiga montar.

Escolhemos 8 tipos de *Tensegrities* a serem prototipados (anti prismas, poliedros, torre e geodésica) a partir de um esquema gráfico exibido por Motro (2003), a fim de tornar o desenho mais claro e com indicações de conexão, além dos seus análogos em *script*, contendo assim um modo físico e um digital de cada tipo de Tensegrity.

Durante o processo fomos registrando o passo a passo por fotografias, conforme ilustra a sequência de imagens abaixo, para depois disso, gerar o desenho esquemático da montagem (Figura 68).

Figura 68 - Processo de prototipagem de antiprisma de 5 hastes



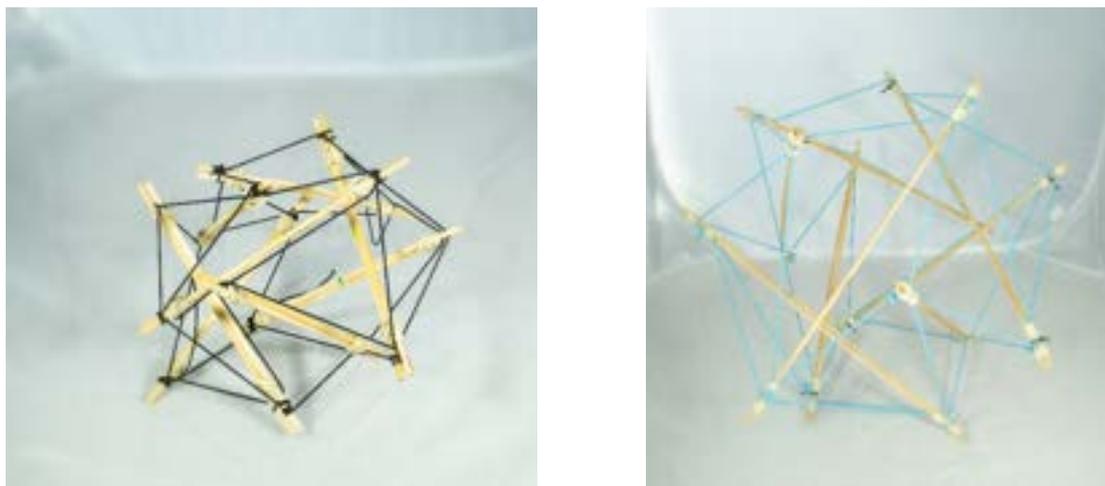


Fonte: Acervo da autora.

Etapa 02 – Fotografia dos protótipos

Registramos em fotografias de alta resolução todos os protótipos prontos, uns feitos com cabos de barbante, outros com cabos de elástico, para mostrar a variação de material que pode acontecer, desde a conexão como os cabos e hastes (Figura 69).

Figura 69 - Protótipos

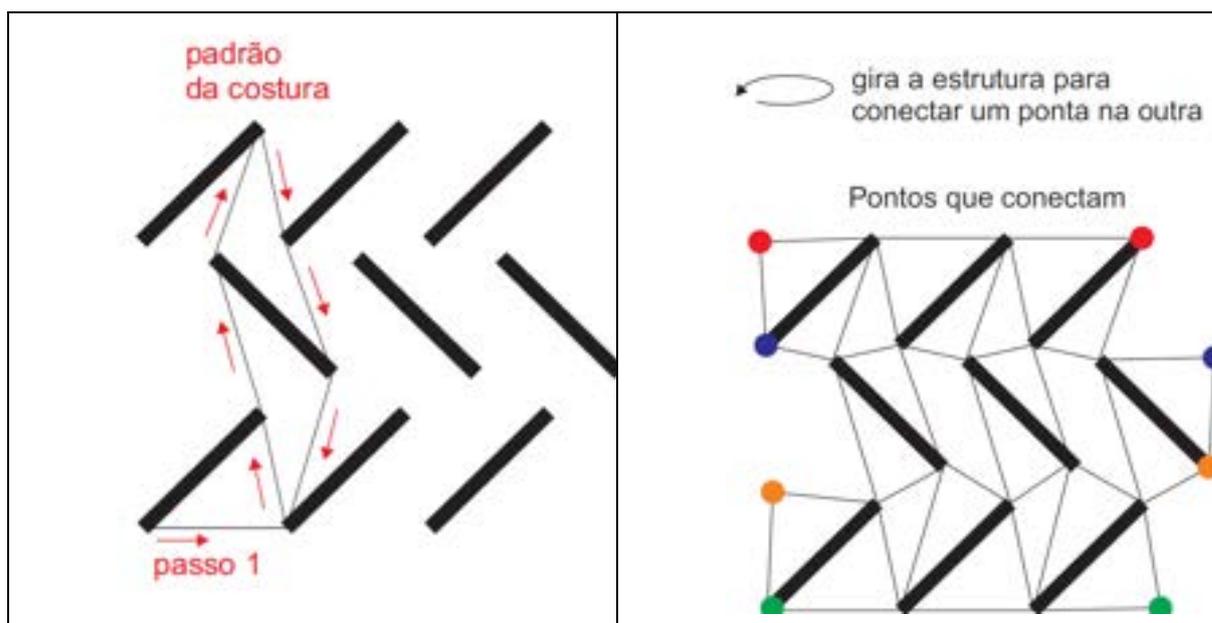


Fonte: Acervo da autora.

Etapa 03 – Desenho do esquema de montagem

De acordo com aprendizados adquiridos com a bibliografia mais a experimentação prática da prototipagem, dos experimentos variados incluindo um workshop internacional ministrado, adquiriu-se habilidade para melhor representar graficamente os desenhos com intuito de facilitar o processo de montagem dos protótipos sem um tutor, apenas com o manual ou desenho esquemático.

Figura 70 - Desenho esquemático



Fonte: Elaborado pela autora.

No desenho indicamos o caminho em que os cabos devem ser costurados, ou passados, mostramos o padrão de costura feito em cada tipo de Tensegrity, e indicamos por pontos coloridos as pontas que se juntam, sempre haste-cabo. É necessário ajustar os cabos no final, pois é a tensão que estrutura a Tensegrity (Figura 70).

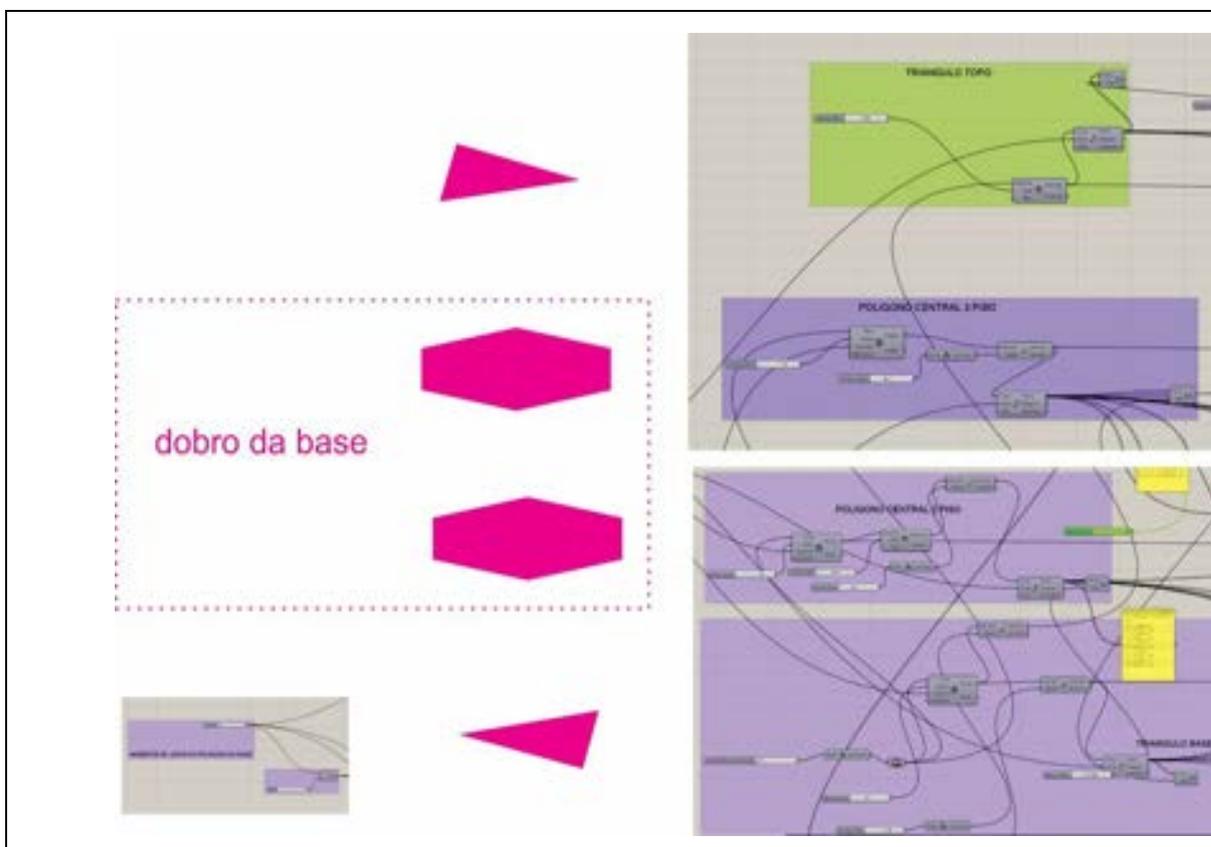
Etapa 04 – Script

Durante todo processo da pesquisa foram implementados, adaptados e aprimorados os scripts correspondentes as *Tensegrities* que foram prototipado, por meio da metodologia *feedback looping*, esse processo está em constante desenvolvimento. Dentre os 9 scripts disponíveis, um merece destaque a ser explicado pois conta também com o *plugin Kangaroo* que simula o comportamento físico real da forma, *form finding*, e com isso temos a noção de como a estrutura se comporta fisicamente em relação a sua forma de acordo com as forças atuantes. No caso das *Tensegrities*, tração contínua nos cabos e compressão isolada nas hastes, conforme explicado no capítulo 2.

Na figura abaixo descreveremos o processo do icosaedro – poliedro de 6 hastes – com o *plugin Kangaroo* (Figura 71). A lógica do algoritmo foi pensada em erguer

tridimensionalmente o poliedro começando pelas bases e topo que são triângulos, e as bases centrais são hexágonos (sempre o dobro da base).

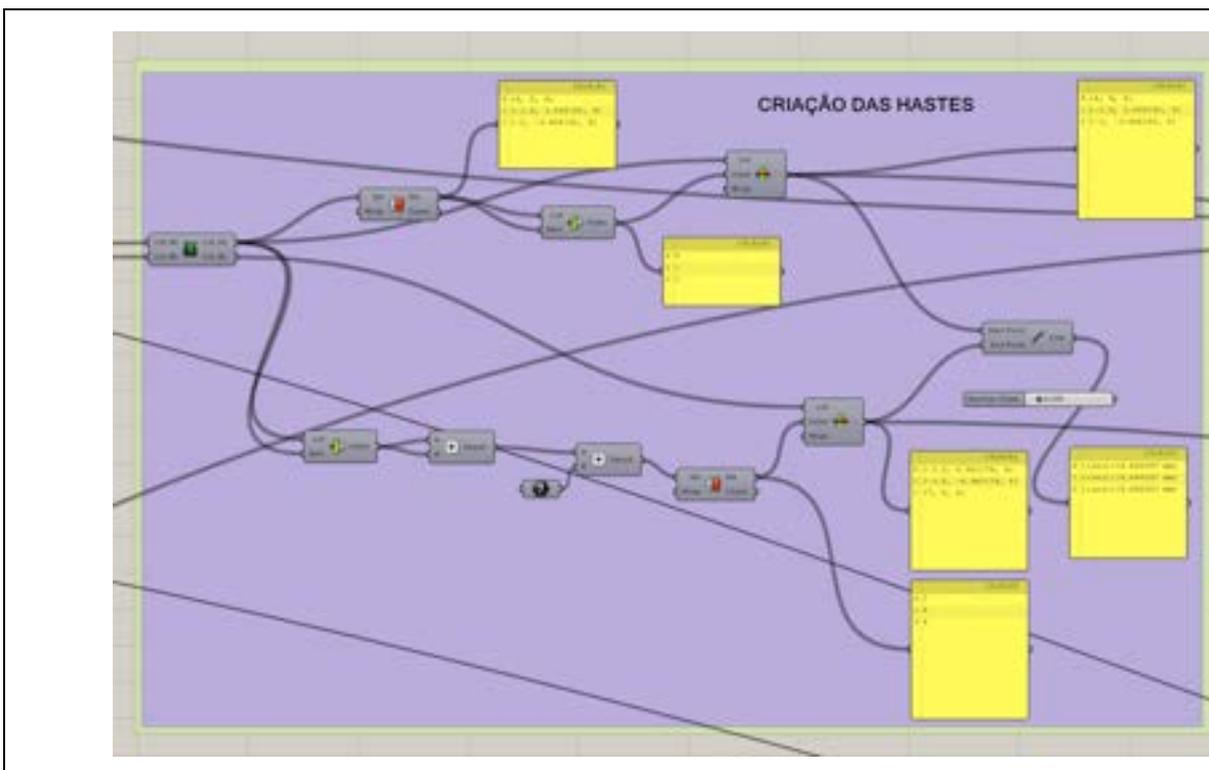
Figura 71 - Lógica da construção algorítmica



Fonte: Elaborado pela autora.

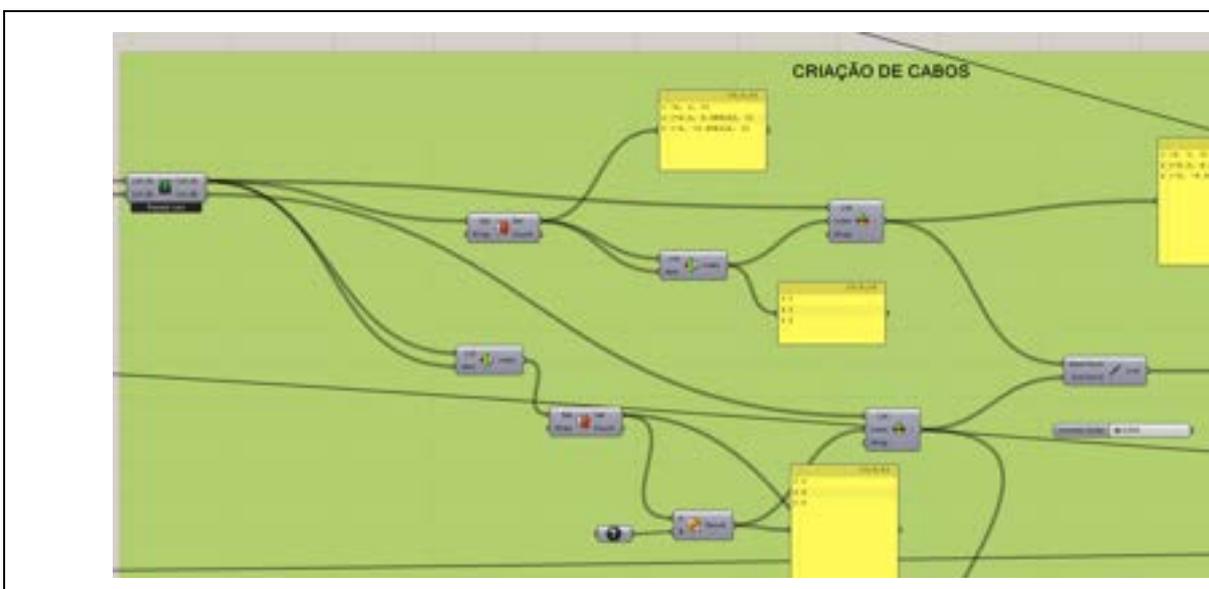
Nas figuras abaixo, Figura 72 e Figura 73, mostramos a criação de cabos e hastes. Depois desse processo aplicamos o plugin *Kangaroo*.

Figura 72 - Script grasshopper



Fonte: Elaborado pela autora.

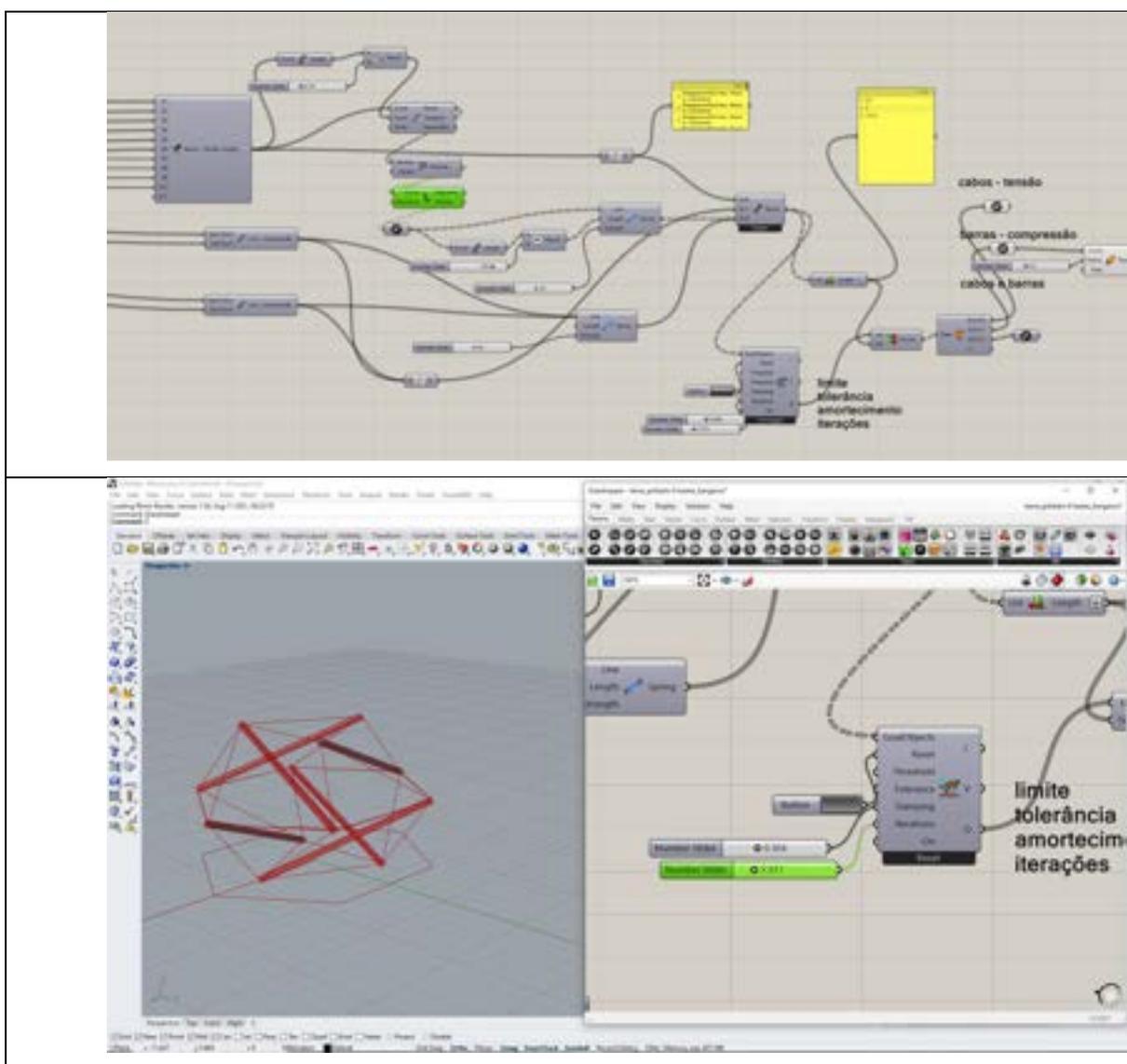
Figura 73 - Script grasshopper



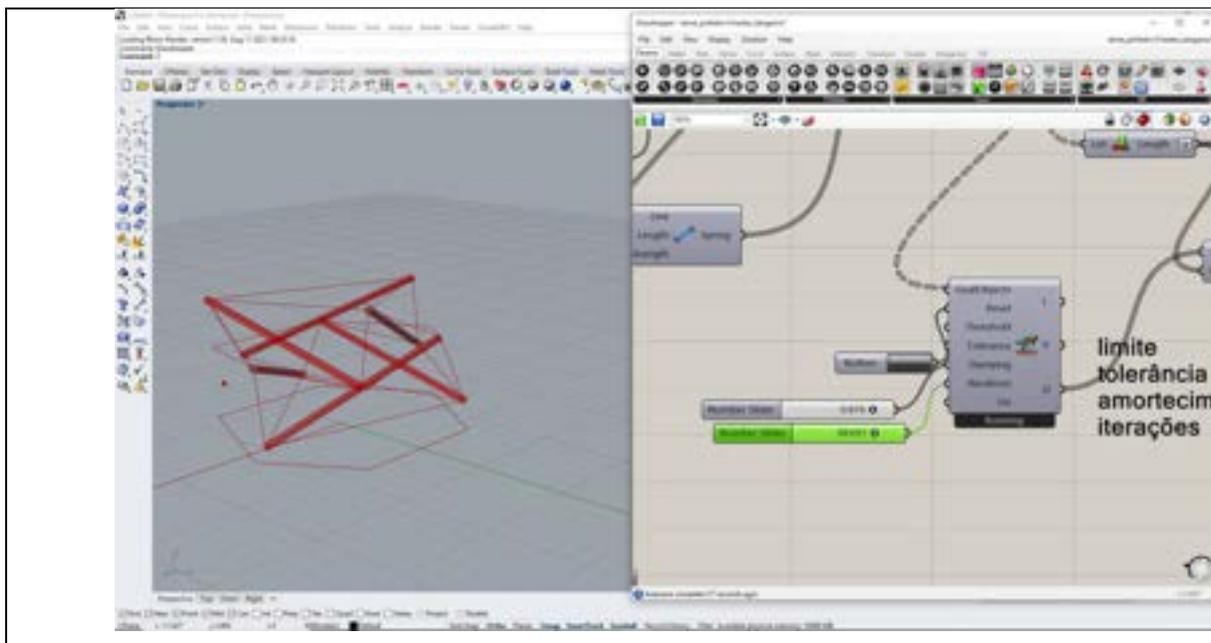
Fonte: Elaborado pela autora.

No componente *Result* entram os cabos (tração) e logo abaixo são criadas duas linhas (hastes) que representam as forças de compressão e desenvolvemos o script de forma que quando apertamos o botão a forma encontra sua forma real conforme as forças aplicadas – *form finding* -, como indica a sequência de figuras a seguir²⁷ (Figura 74).

Figura 74 - Script grasshopper



²⁷ Obs.: os scripts serão disponibilizados no endereço <https://sites.google.com/view/tensegrity-mediacaodigital/in%C3%ADcio>



Fonte: Elaborado pela autora.

5.2 Aplicações

Nesta seção apresentaremos exemplos de aplicações da prototipagem em projetos. Começando por um trabalho cursado na disciplina de *Design Paramétrico e Bio Inspiração Digital* onde usou o diretamente a metodologia da Bioinspiração com prototipagem para desenvolvimento de projetos em arquitetura.

Na sequência exibimos o resultado do *Workshop Internacional Digital Futures* onde foram desenvolvidas duas propostas de projeto com soluções fundamentada na prototipagem e mediação digital. Na produção protótipos físicos e protótipos digitais, permitiu a experimentação de *feedback loops* de modo que cada protótipo pudesse ser um modelo melhorado do primeiro – modo evolutivo de design.

Por últimos apresentamos experimentos práticos e reais do *Tensegrity* em construção civil e pesquisas (biomedicina e robótica).

5.3 Conclusão sobre o catálogo

Para elaboração desse Catálogo como um produto, houve uma extensa pesquisa bibliográfica juntamente com a realização de inúmeros protótipos que foram produzidos em diferentes escalas, materiais e modos, a fim de testar as melhores

condições e técnicas para aprendizado dentro da metodologia proposta por essa pesquisa. Além dos modelos físicos foram desenvolvidos *scripts* para melhor representá-los de forma digital, tendo assim seu análogo para experimentações em outras escalas podendo sofrer modificações de parâmetros e simulação de forças (*Kangaroo*) para verificar o comportamento da forma a partir das forças sofridas pela estrutura.

Logo, esse processo buscou compreender o funcionamento dessas estruturas, com a produção, verificação e ajustes constantes até a melhoria do protótipo, tanto físico como digital, além de testar o método no *Workshop* Internacional *Digital Futures* e ter resultados satisfatórios. Todo processo culminou no amadurecimento das informações que abastecem essa pesquisa na forma de uma Dissertação, mas também no Catálogo, que foi elaborado visando auxiliar e incentivar o uso dessas estruturas para o ensino de projeto e experimentações daqueles que desejam se aventurar a aprender sobre estruturas do tipo Tensegrity e suas possíveis aplicações. Entende-se que aqui está reunido o básico para o início do aprendizado, com o suporte da mediação digital.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse trabalho é resultado de uma metodologia baseada em conceitos da Cibernética de Segunda Ordem, que visa o aprimoramento e retroalimentação do projeto. Assim sendo, o processo de investigação mediado pela tecnologia digital e pela prototipagem foram abrindo caminhos e vislumbrando o produto final, a Dissertação e o Catálogo, como resultados da retroalimentação entre teoria e prática;

ou seja, foi no final do processo da pesquisa que coletamos dados, aprimoramos processos, tanto físicos quanto digitais, e tivemos respostas criativas, como o *Workshop Digital Futures*, que ofereceu a possibilidade mais efetiva de se testar metodologias envolvendo o processos de montagem, os modelos digitais produzidos por meio de *scripts* e possibilidades de aplicação de estruturas do tipo *Tensegrity*.

De acordo com a Cibernética de Segunda Ordem e a metodologia de *feedback looping* discutida por Alves (2014), esta pesquisa buscou estudar e se aproximar do objeto de estudo (*Tensegrity*) explorando modos de montagem, materialidades, desenvolvendo *scripts* e simulações digitais, e assim, oferecer uma abordagem mais transparente em relação à esse tipo de processo de projeto, sistematizando etapas de montagem e relatando os experimentos, afim de contribuir com a ciência sob a ótica de uma arquiteta.

Nesta pesquisa de mestrado buscou-se conceituar as estruturas do tipo *Tensegrity*, fazendo um paralelo com a bioinspiração, pois esse conceito está intrinsecamente conectado a natureza da estrutura, mostrando estudos que comprovam essa relação, a partir de autores como Fuller (1975) e Snelson (2012), pioneiros do *Tensegrity*, que afirmam ser este uma estrutura que está presente em muitas as coisas da natureza, do macro ao micro-organismo.

Durante as etapas desta pesquisa, vimos validar na prática questões abordas pelos autores, como Iwamoto (2009) e Dunn (2012) no que diz respeito ao uso da prototipagem física e digital como potentes ferramentas de concepção e desenvolvimento de projeto, já que estimulam a exploração de soluções que podemos testar, avaliar e aprimorar, retroalimentando o processo. Assim fomos prosseguindo, realizando *feedback loopings* onde processos foram refeitos e revistos para aperfeiçoamento e assim, avançando passo a passo.

O primeiro protótipo já mostrou a necessidade de criar modelos físicos de cabos únicos e modelos digitais para testes. A razão da utilização do cabo único deu-se pela facilidade de representação para a perfeita leitura gráfica, pois como esse Catálogo funcionará como um pequeno manual, o usuário deverá conseguir montar um protótipo sem o auxílio de um tutor. Logo, a leitura gráfica é um ponto muito importante, já que a dificuldade maior sempre está na montagem dos *Tensegrities*, como afirma Liapi (2001). Assim, a lógica de malha como Motro (2003) explana bem, é mais fácil de entender o desenho, porém ainda não diminui o desafio da montagem,

por ser uma estrutura que precisa estar pré-tensionada para se obter e se perceber a forma.

Foram necessárias várias idas e vindas ao modelo digital, o *script*, para refiná-lo e entender melhor o comportamento das *Tensegrities* e verificar que a lógica da montagem em malha no *script* é muito complexa. Assim, como a pesquisa visa facilitar o processo, abandonamos a ideia de malha nos *scripts* e a adotamos somente para os protótipos físicos, pois sendo assim, o usuário terá várias frentes de pensamento e um passo inicial para se aventurar nas prototipagens digitais.

Portanto, acredita-se que a mediação digital aproximou as duas realidades de um processo de construção, a física e a digital, deixando esse intervalo mais fluido e conectado, e assim podemos encontrar e explorar soluções mais eficientes e otimizáveis. Logo, a tecnologia pode ser vista como um facilitador, um meio que intensificou a atuação dos pesquisadores na experimentação, potencializando a criatividade e o método de investigação. Esperamos contribuir com futuros pesquisadores oferecendo uma catalogação das principais estruturas do tipo *Tensegrity*, de suas possibilidades de produção e prototipagem física e seus correspondentes digitais, além da bibliografia utilizada, do *workshop* ministrado e das experimentações descritas neste trabalho.

REFERÊNCIAS

ALVES, Gilfranco Medeiros. **Cibersemiótica e processos de projeto**: metodologia em revisão. 2014. Tese (Doutorado em Teoria e História da Arquitetura e do Urbanismo) - Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

BERTOL, D. **Form Geometry Structure**: from nature to design. Exton: Bentley Institute Press, 2011.

BURKHARDT, R. W. A Practical Guide to *Tensegrity* Design. 2. ed. Cambridge, 2008.

DUNN, N. (2012). **Digital Fabrication in Architecture**. London: Laurence King Publishing Ltd, 2012.

FULLER, R. B. Synergetics: Explorations in the Geometry of Thinking. Londres: The MacMillan Press Ltd, 1975.

HENSEL, M., MENGES, A., WEINSTOCK, M. (2010). **Emergent Technologies and Design**. New York: Routledge, 2010.

HSUAN-AN, T. **Sementes do cerrado e design contemporâneo**. Goiânia: Ed. UCG, 2016.

IWAMOTO, L. (2009). **Digital fabrications: architectural and material techniques**. New York: Princeton Architectural Press, 2009.

KENSEK, Karen. Building information modeling – BIM: fundamentos e aplicações. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018. 304 p.

LIAPI, K. A. (2001). **Geometric Configuration and Graphical Representation of Spherical Tensegrity Networks**. University of Texas at Austin, USA. Disponível em: <http://papers.cumincad.org/>
<http://papers.cumincad.org/data/works/att/625d.content.pdf>. Acesso em: 01 jun. 2022.

LIAPI, K. A. **Tensegrity Structures for the Hellenic Maritime Museum**. Greece: University of Patras, 2009.

LITTMAN, J. A. 68 f. 2009. **Regenerative Architecture: A Pathway Beyond Sustainability**. *Dissertação (Mestrado)* - University of Massachusetts – Amherst. 2009. Disponível em: <http://scholarworks.umass.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1389&context=theses>. Acesso em: 01 jun. 2022.

MOTRO R. Tensegrity – Structural Systems for the Future. Kogan Page Science. Londres: Butterworth-Heinemann, 2003. 280 p.

PAWLYN, M. (2016). **Biomimicry in Architecture**. 2. ed. Grã-Bretanha: RIBA Enterprises Ltd, 2016.

PIRES, J. F., PEREIRA, A. T. C. **Modelagem Paramétrica da Geometria Complexa de Estruturas Regenerativas na Arquitetura**. 2017. *In: SIGraDi 2017, XXI Congreso de la Sociedad Ibero-americana de Gráfica Digital 22 – 24 Noviembre, 2017 – Concepción, Chile*. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263822316304640>. Acesso em: 25 maio 2022.

SNELSON, K. The Nature of Structure: **Tensegrity Weaving** and the **Binary World**. 2012. Disponível em: http://kennethsnelson.net/Tensegrity_and_Weaving.pdf. Acesso em: 25 maio 2022.

TACHI, T. (2012). Projeto de Infinitesimamente e Finitamente Flexível Origami Baseado em Figuras Recíprocas. **Journal for Geometry and Graphics**, p. 01-13, 2012. Disponível em: <https://tsg.ne.jp/TT/cg/RigidOrigamiReciprocalTachi2012JGG.pdf>. Acesso em: 06 jun. 2022.

VERSCHLEISSER, R. Aplicação de Estruturas de Bambu no Design de objetos: como construir objetos leves, resistentes, ecológicos e de baixo custo. 229 f. 2008. Tese (Doutorado em Artes e Design) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

VICTOR, Georgia; SEIXAS, Mario; RIPPER, José Luís Mendes. Estruturas Autoportantes Biotensegrity Aplicando Materiais Naturais. p. 152 -171. *In*: ARRUDA, A. J. V. (Org). **Métodos e Processos em Biônica e Biomimética: a Revolução Tecnológica pela Natureza**. São Paulo: Blucher, 2018.

ZHANG J. Y.; OHSAKI M. **Tensegrity Structures - Form, Stability, and Symmetry**. Springer Japan, 2015.

APÊNDICE A - CATÁLOGO



TENSEGRITY

Configurações geométricas, scripts e prototipagem
MEDIAÇÃO DIGITAL



Este Catálogo faz parte de uma dissertação de mestrado como produto final, e que pretende auxiliar possíveis interessados em experimentar, projetar e construir protótipos físicos e digitais de estruturas do tipo Tensegrity.

Propomos organizar os sistemas de Tensegridade fechados e regulares, e dentro desse sistema temos dois tipos básicos que são os de ordem 1 e de ordem 2, e os sistemas em malha. Então, apresentaremos as *Tensegrity* de acordo com: classificação, montagem - protótipo físico, scripts, protótipo digital, aplicações.

Na Classificação indicaremos o tipo conforme a revisão bibliográfica utilizada - se antiprisma, ou se poliedro, etc. Na montagem, descreveremos passo a passo, criaremos estratégias gráficas para melhor entendimento visual da estrutura, já que verificamos certa dificuldade de se obter explicações detalhadas sobre como montar a estrutura de forma não complicada. No campo da arquitetura, nos interessa muito a concepção das formas e o entendimento da lógica construtiva para que possamos avançar em novas possibilidades em *design*.

O processo de montagem dos protótipos físicos está intrinsicamente ligado a evolução e desenvolvimento dos scripts e da modelagem digital, então esses processos serão relatados e os *scripts* desenvolvidos e/ou adaptados serão disponibilizados via QR Code por meio de um site onde o usuário poderá fazer o *download* do respectivo modelo.

TENSEGRITY

Configurações geométricas, scripts e prototipagem
MEDIÇÃO DIGITAL

TENSEGRITY

Configurações geométricas, scripts e prototipagem
MEDIÇÃO DIGITAL

SUMÁRIO

TENSEGRITY – SISTEMA DE FORÇAS	01
CLASSIFICAÇÃO	02
MATERIAIS	03
MONTAGEM	04
Anti Prisma 3 Hastes	05
Anti Prisma 4 Hastes	07
Anti Prisma 5 Hastes	09
Poliedro 6 Hastes	11
Poliedro 8 Hastes	13
Poliedro 10 Hastes	15
Torre 9 Hastes	17
Geodésica 30 Hastes	19
APLICAÇÕES	22
Munguba	22
Estufa em Marte	27
Projeto Pantanal: Arquitetura e Coexistência	31
Projetos e Pesquisa	35
BIBLIOGRAFIA	38
CONCLUSÃO	38

TENSEGRITY

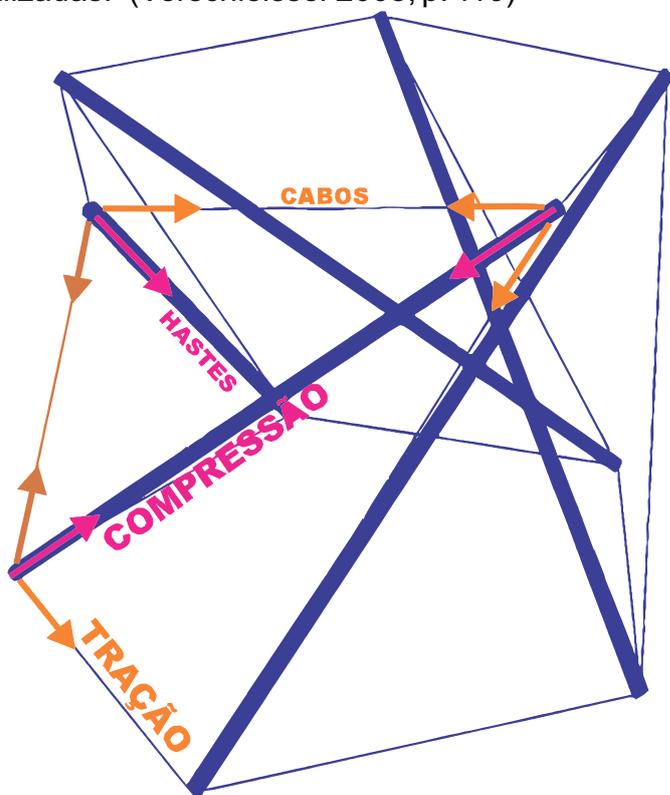
Configurações geométricas, scripts e prototipagem
MEDIÇÃO DIGITAL

TENSEGRITY SISTEMA DE FORÇAS

De acordo com Kenner (1976 citado por Valentim, 2005 p.43 apud Verschleisser 2008, p. 116) nas estruturas Tensegrity há um sistema de esforços omnidirecionais equilibrados. Na verdade são auto equilibradas e pré-tensionadas e não dependem das forças gravitacionais para seu equilíbrio.

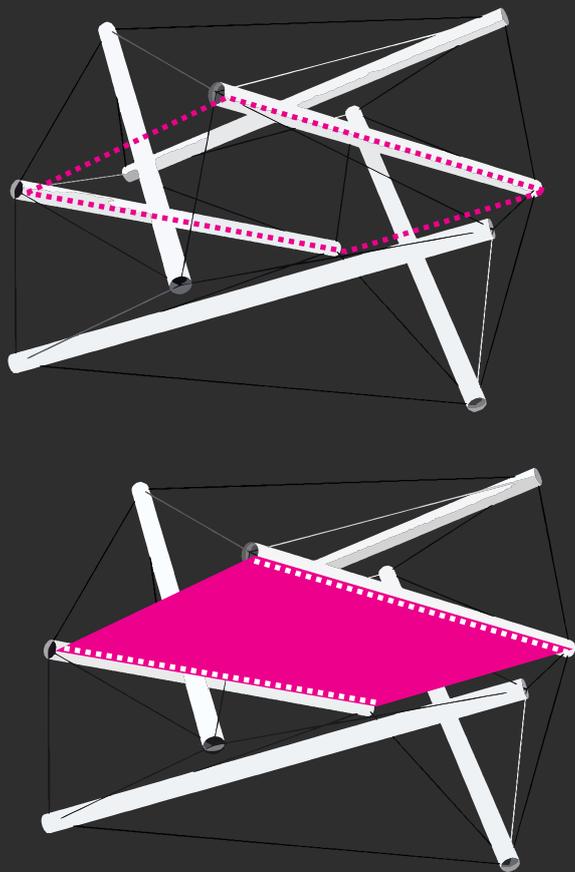
Segundo Fuller Tensegrity descreve um princípio de relação estrutural no qual a forma da estrutura é garantida por um sistema abrangente, contínuo e fechado, de comportamentos tensionais e não pelos comportamentos descontínuos e exclusivamente localizados de elementos comprimidos. (citado por Verschleisser 2008, p. 116)

Conforme Fuller, então podemos dizer que a tensão do sistema de cabos que mantém a estrutura e não a ação de compressão sofrida pelas hastes. Uma Tensegrity precisa estar pré tensionada para se estruturar, isso é fácil de verificar na montagem, onde a estrutura só se forma com os ajustes da tensão nos cabos. “A integridade de toda estrutura está fundamentada numa rede fechada e finita, de abrangência tensional e, de compressões em ilhas localizadas.” (Verschleisser 2008, p. 116)

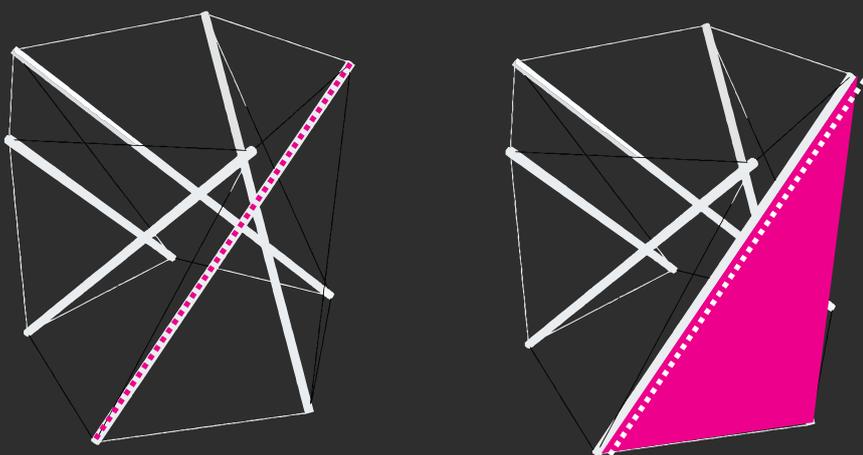


Uma estrutura auto tensionada é autoportante o que quer dizer que não precisa de fundações para existir e realizar seu trabalho. Ela é universal na natureza apresentando características de resistência, leveza, economia de

Duas ou mais hastes estão num mesmo plano.
(Verschleisser 2008)



As hastes localizam-se em planos diferentes
(Verschleisser 2008)



TENSEGRITY

PRIMEIRA ORDEM

TENSEGRITY

SEGUNDA ORDEM

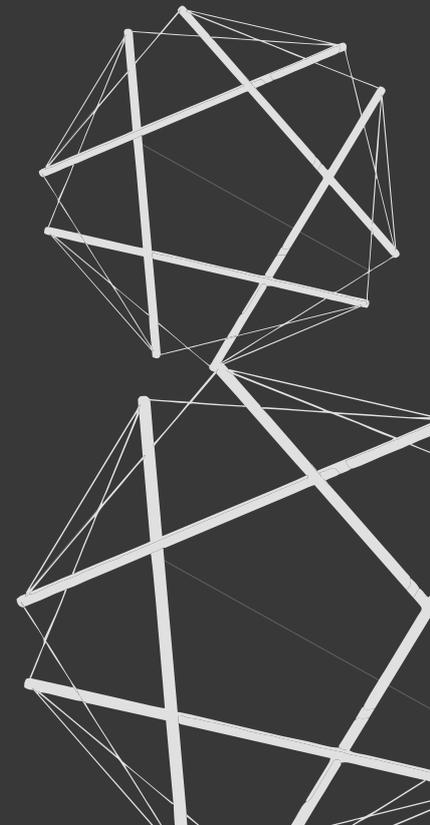
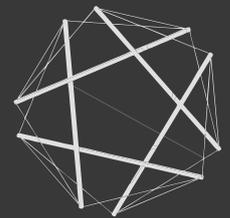
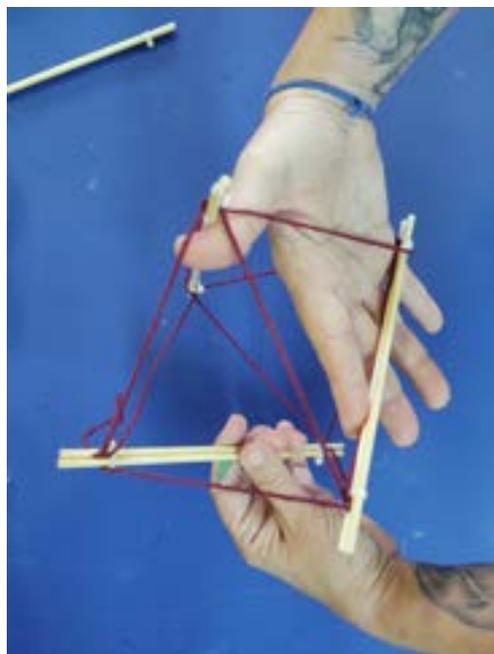
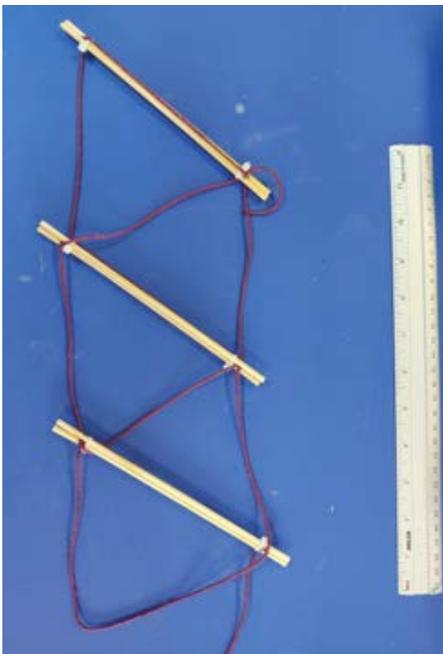
CLASSIFICAÇÃO

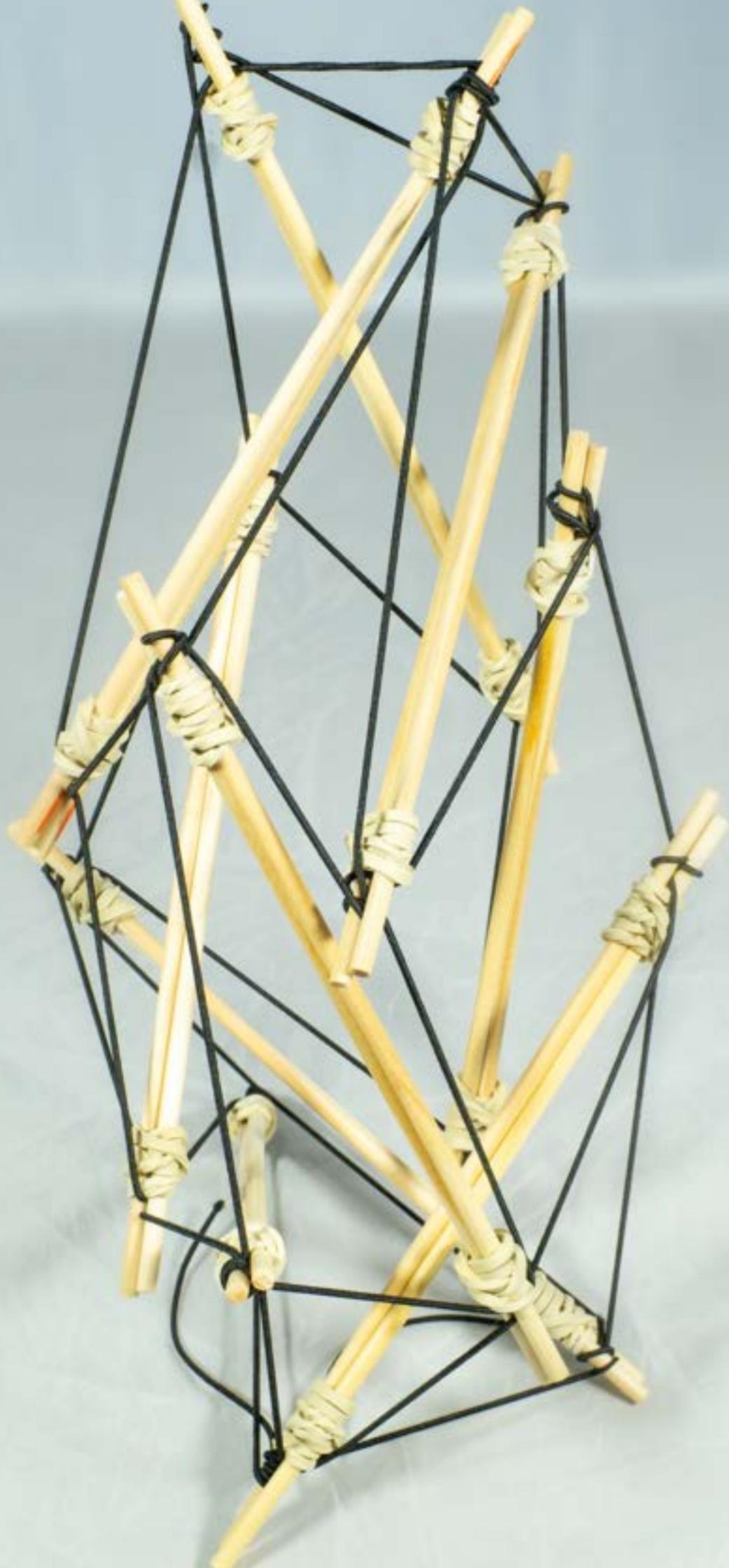


MATERIAIS

UTILIZADOS NOS EXPERIMENTOS

1. Palito de algodão doce 18 cm
2. Borrachinha ou tiras de lacrar 'enforca gato'
3. Tesoura e/ou alicate de corte
4. Régua
5. Rolo de elástico
6. Barbante



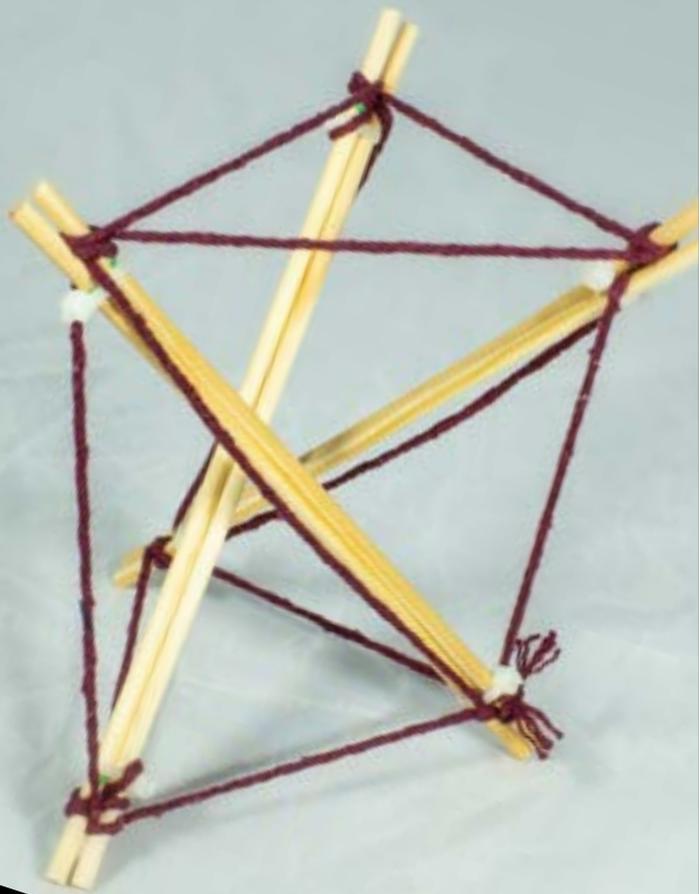


PROTÓTIPOS

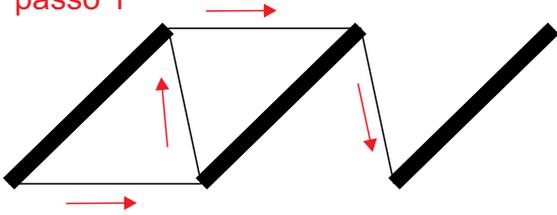
MONTAGEM

ANTI PRISMA 3 HASTES

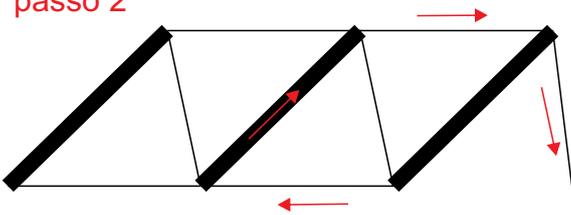
MONTAGEM POR MALHA



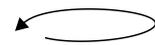
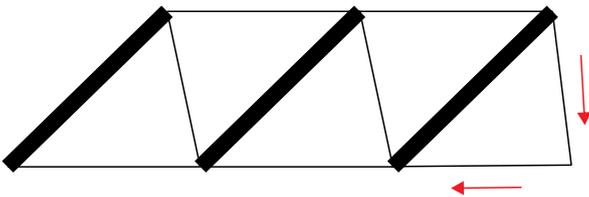
passo 1



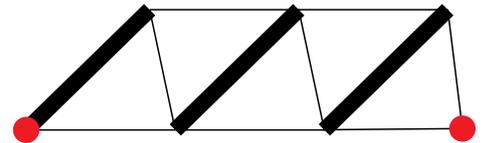
passo 2



passo 3

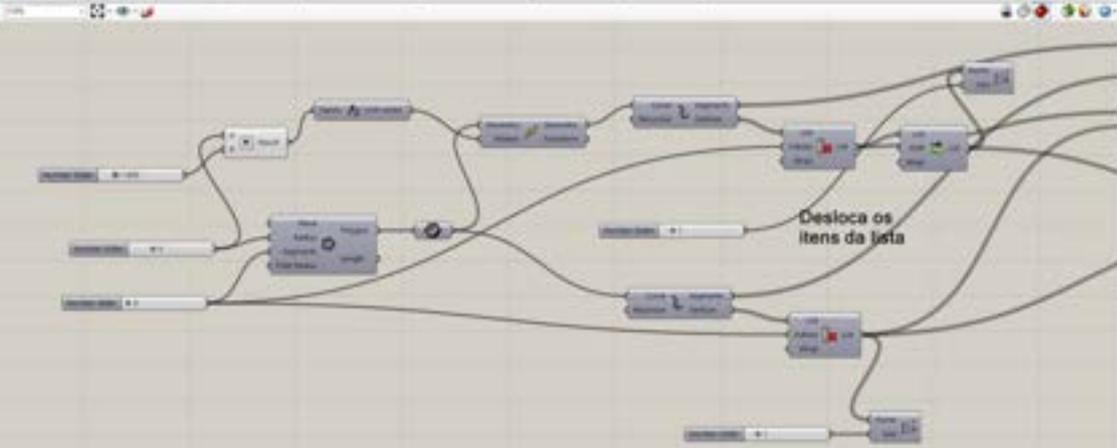
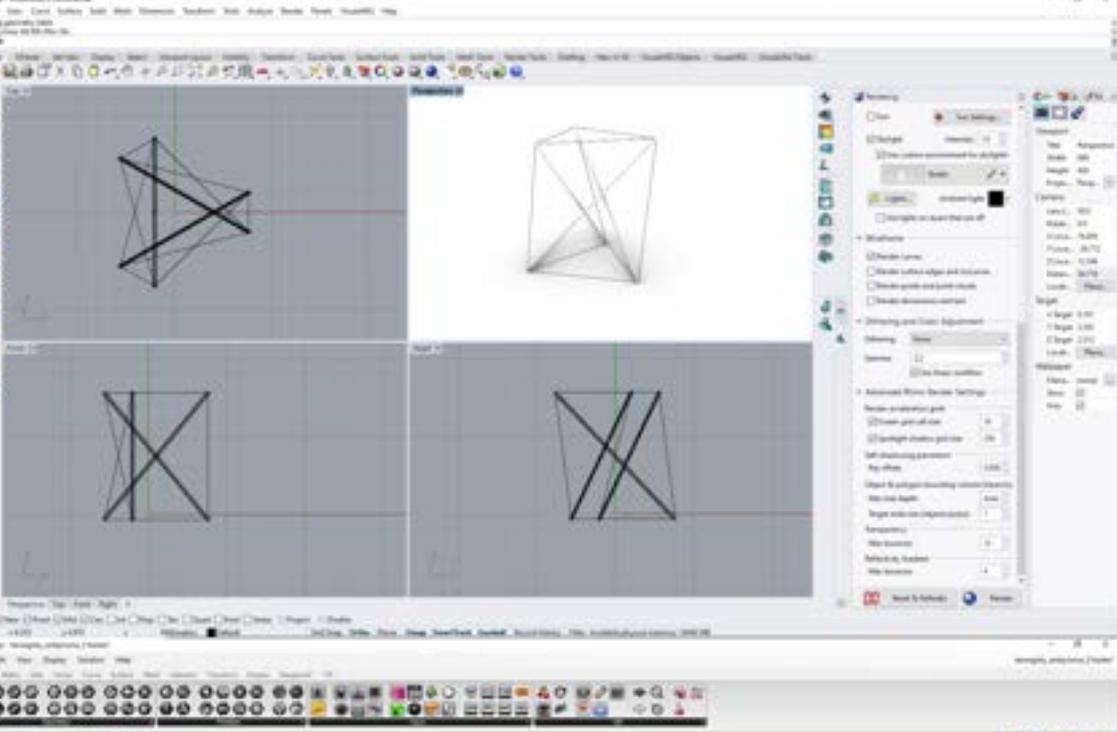
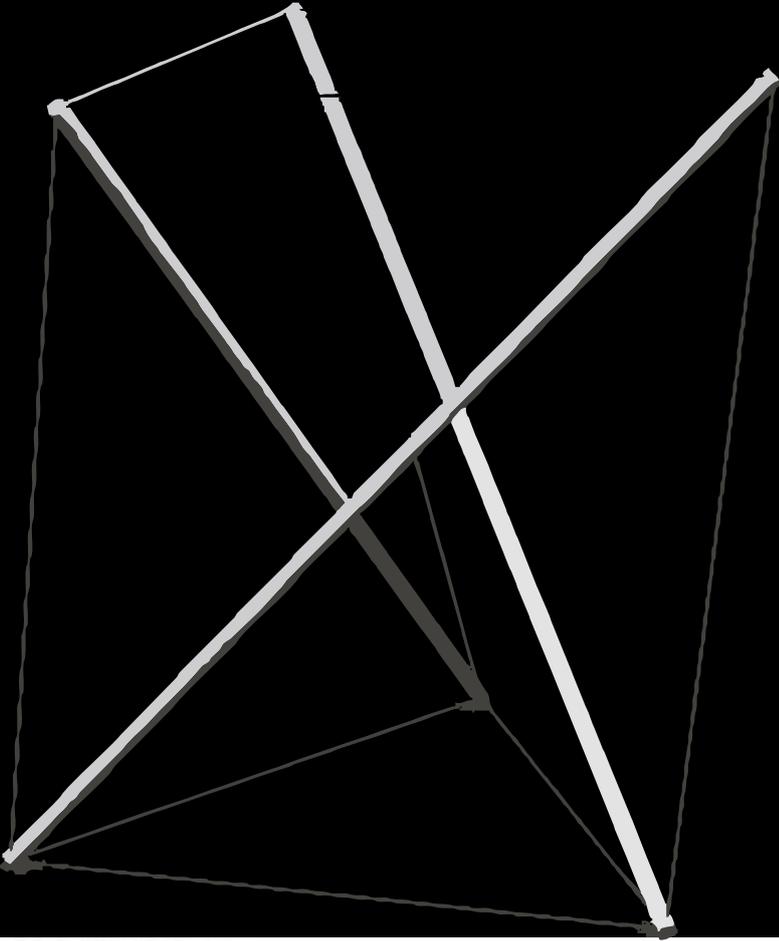


gira a estrutura para
conectar um ponta na outra



Pontos que conectam

SCRIPT

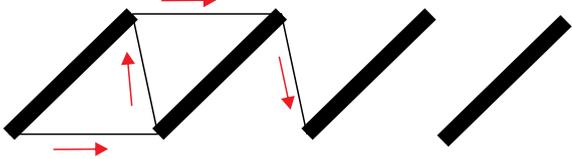


ANTI PRISMA 4 HASTES

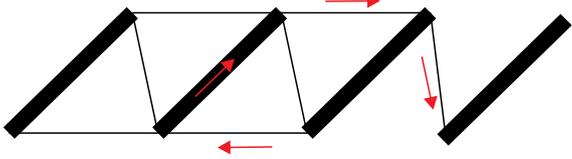
MONTAGEM POR MALHA



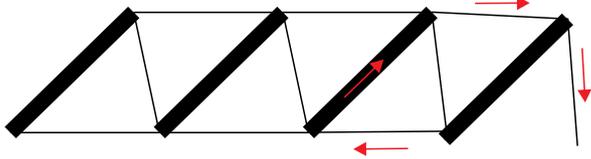
passo 1



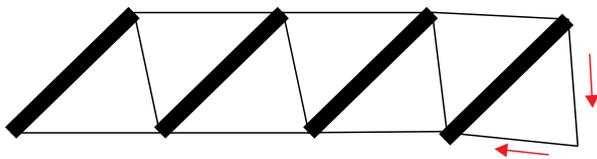
passo 2



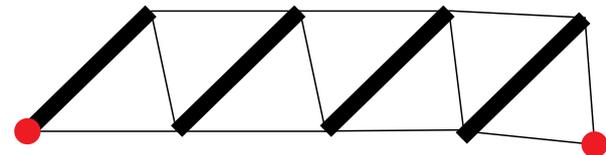
passo 3



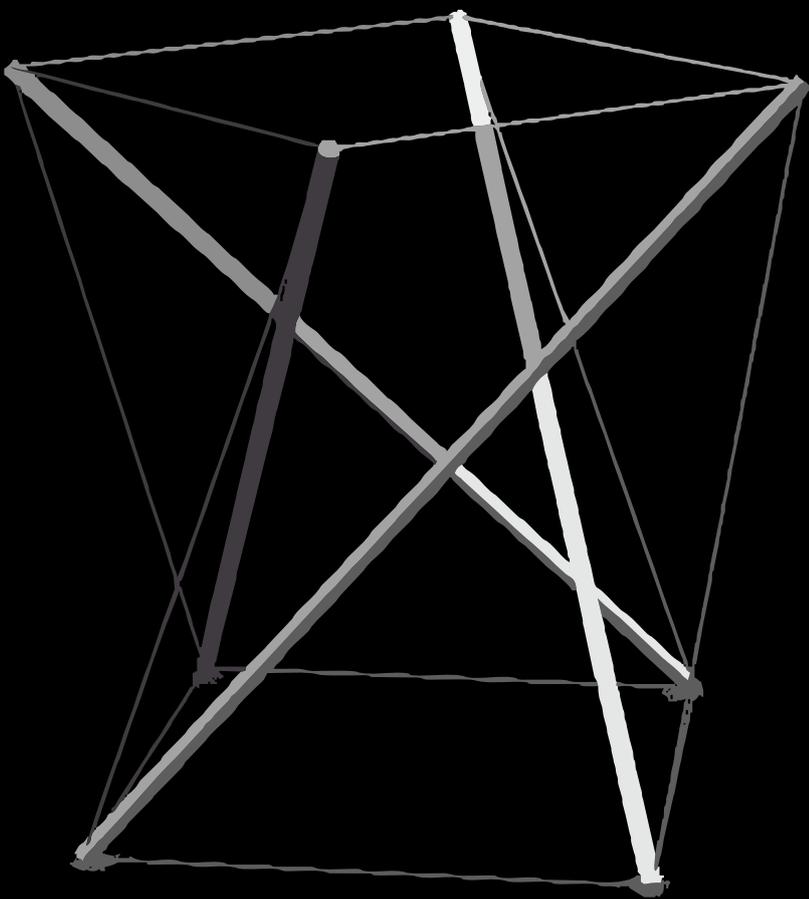
passo 4



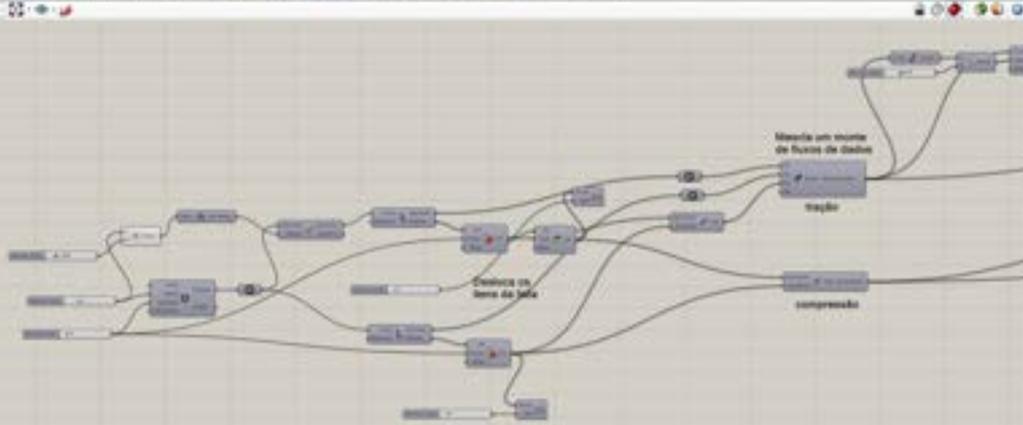
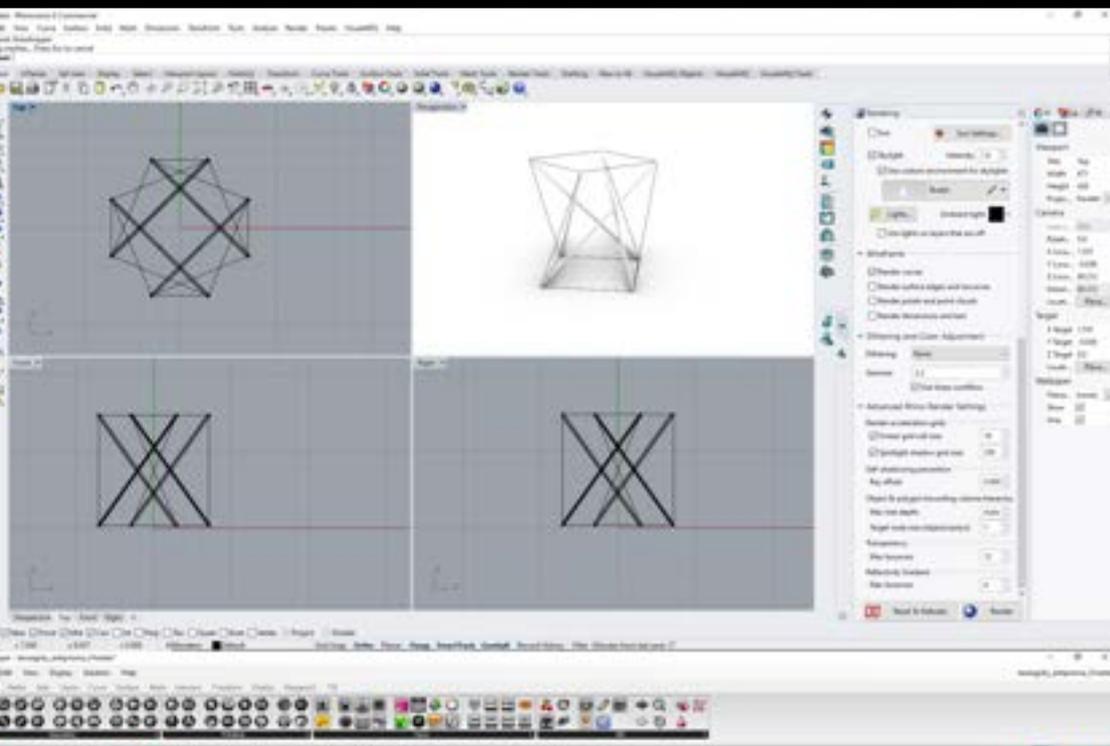
gira a estrutura para
conectar um ponta na outra



Pontos que conectam

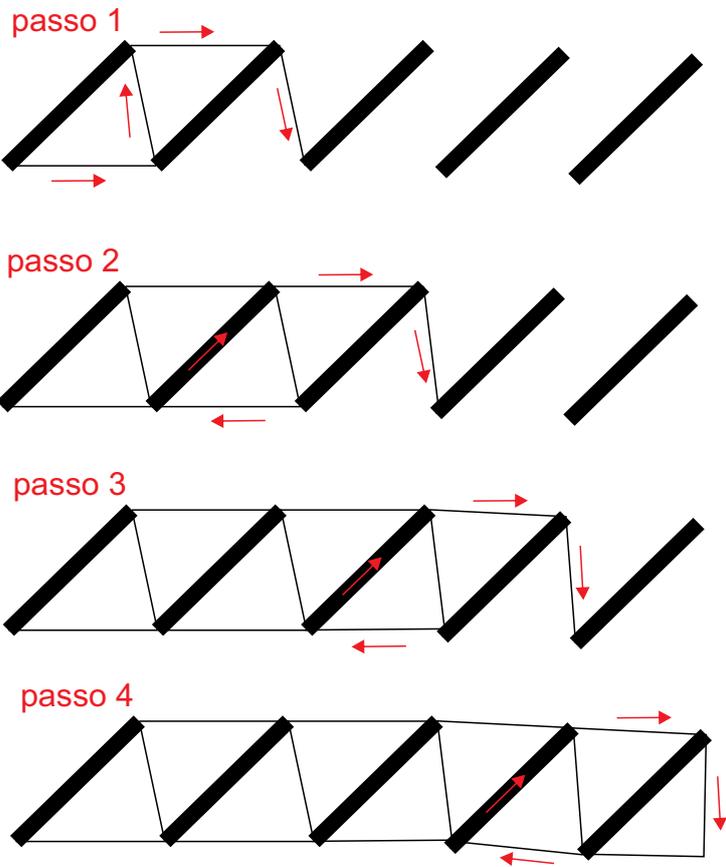
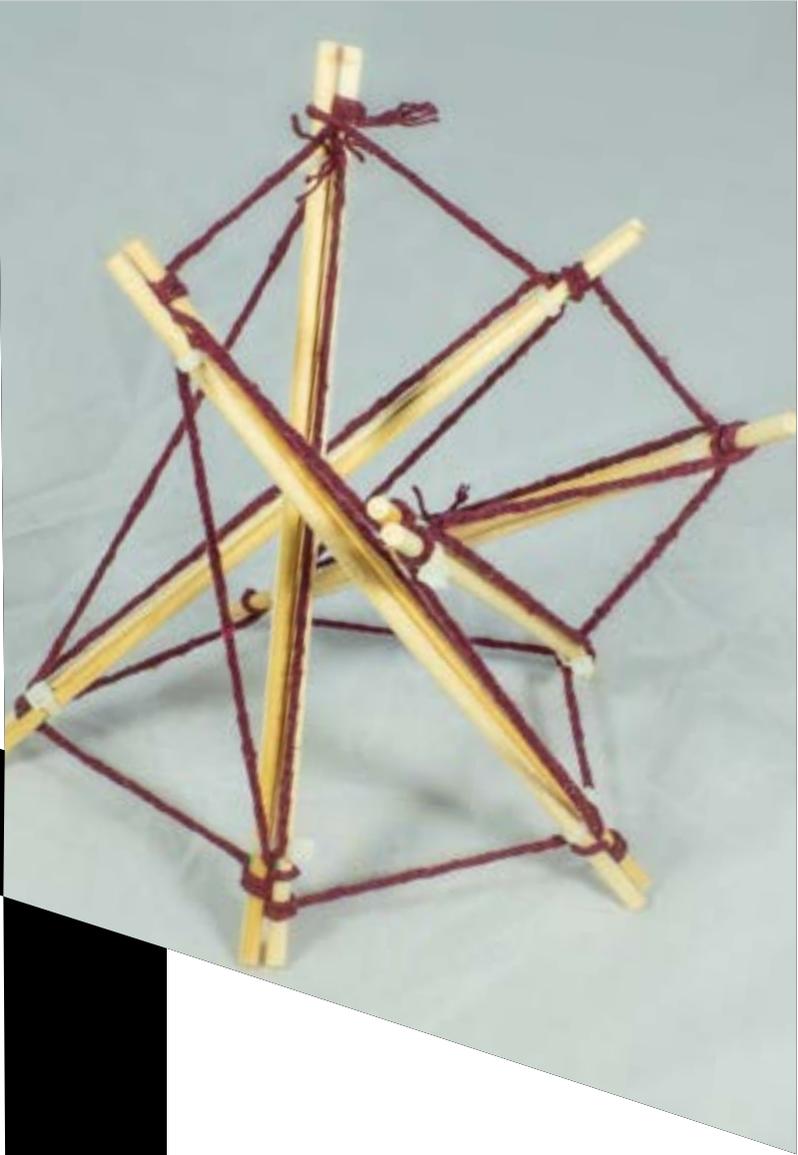


SCRIPT

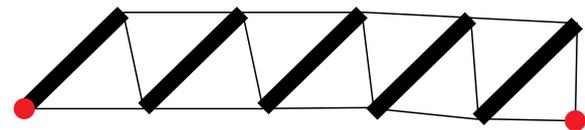


ANTI PRISMA 5 HASTES

MONTAGEM POR MALHA



gira a estrutura para
conectar um ponta na outra

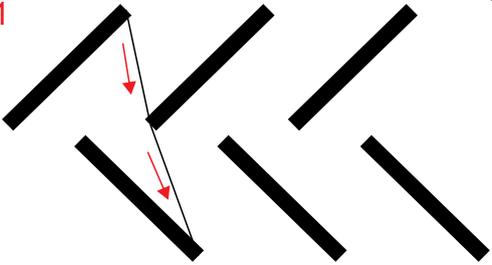


Pontos que conectam

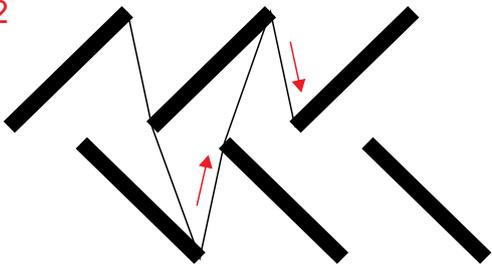
POLIEDRO 6 HASTES

MONTAGEM POR MALHA

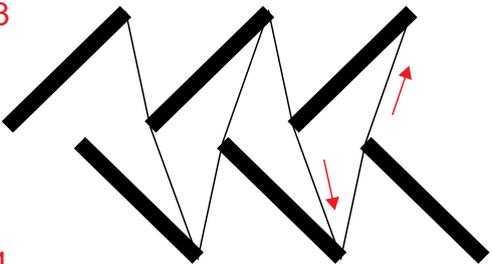
passo 1



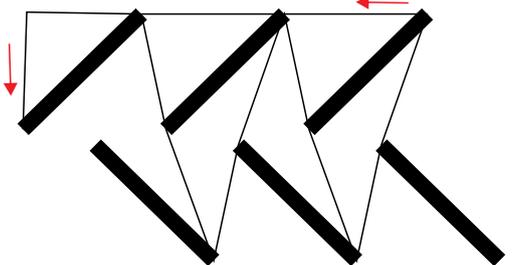
passo 2



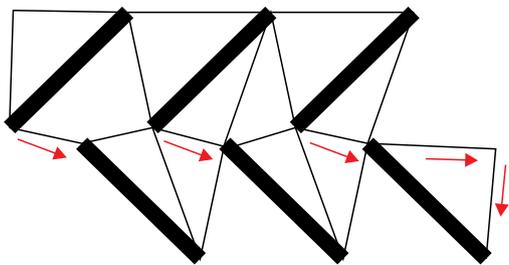
passo 3



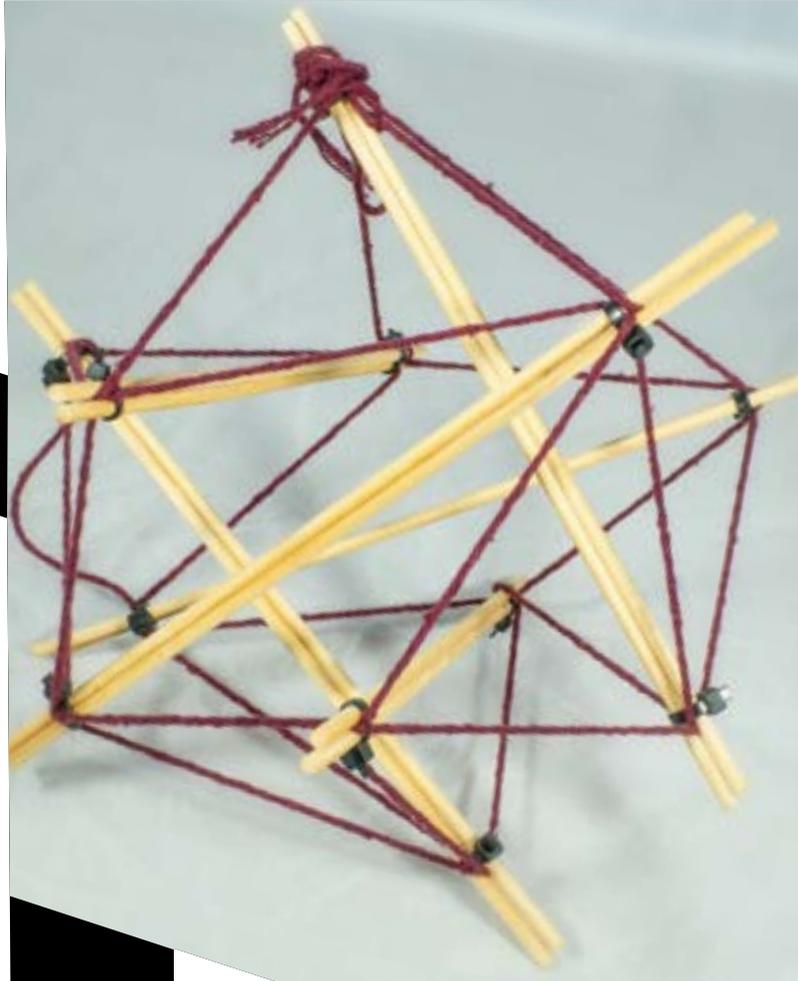
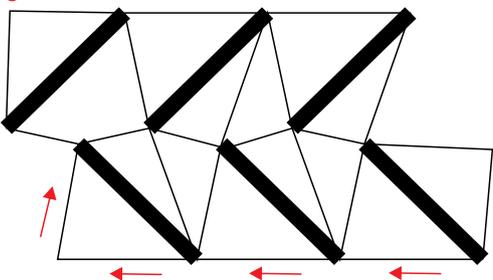
passo 4



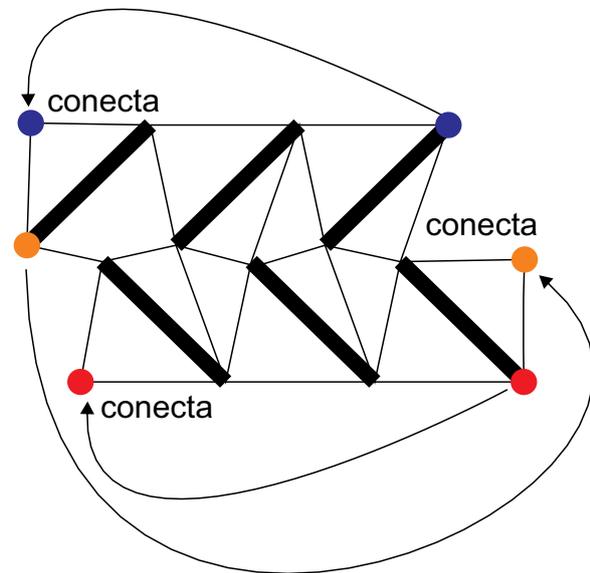
passo 5



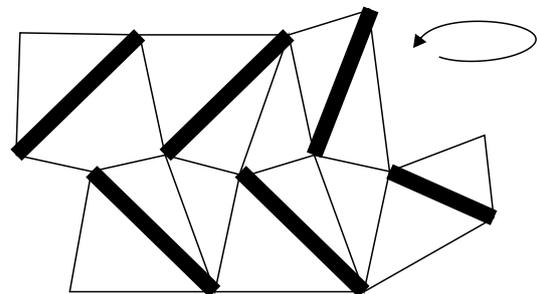
passo 6

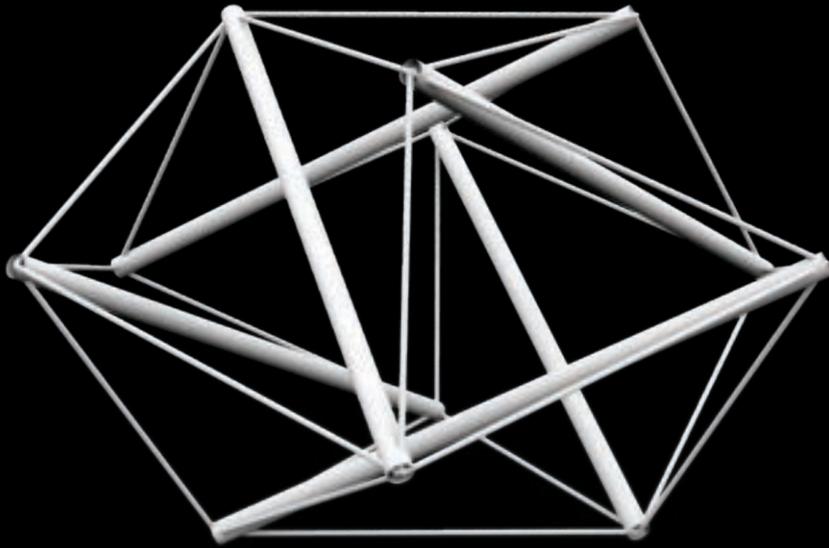


pontos que conectam

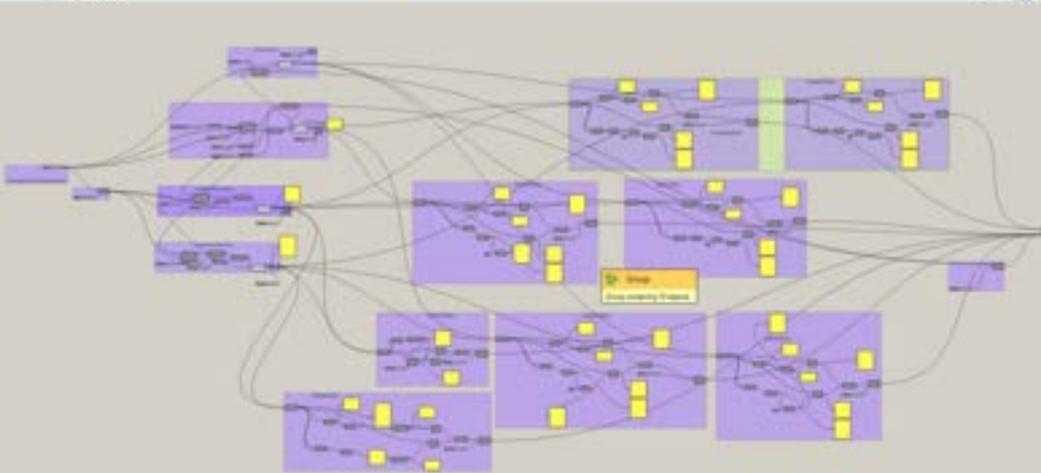
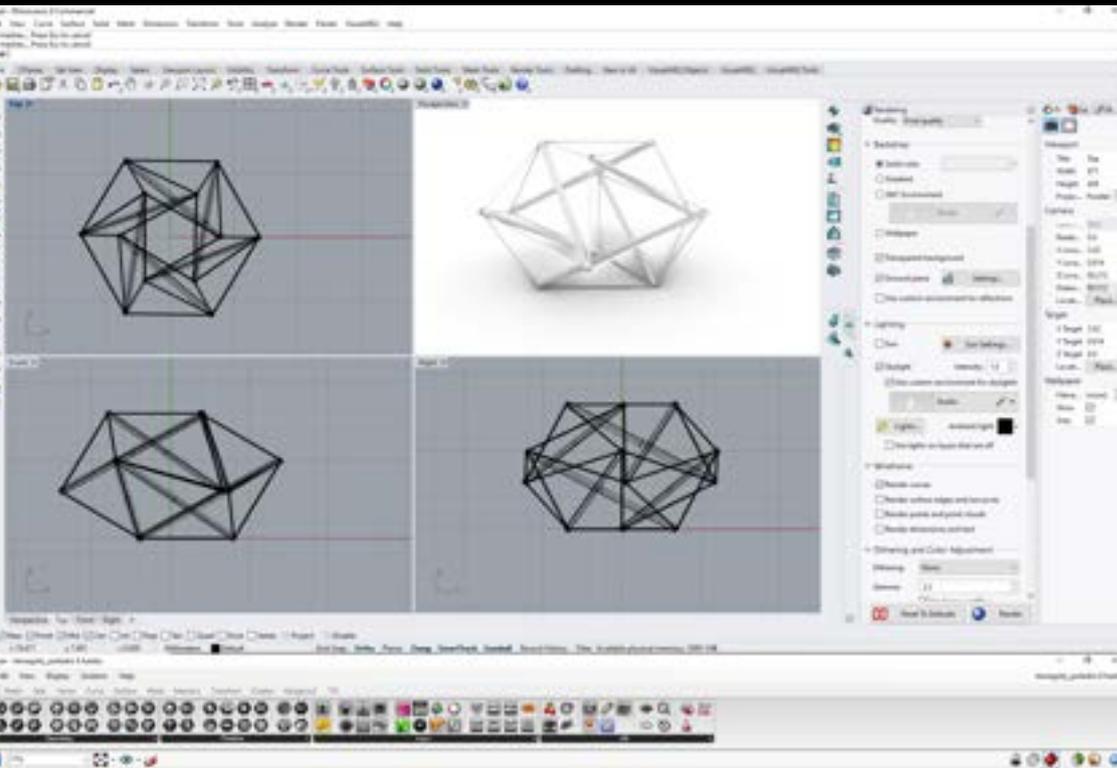


gira a estrutura para
conectar um ponta na outra





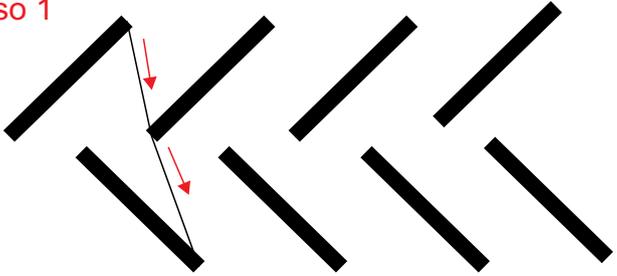
SCRIPT



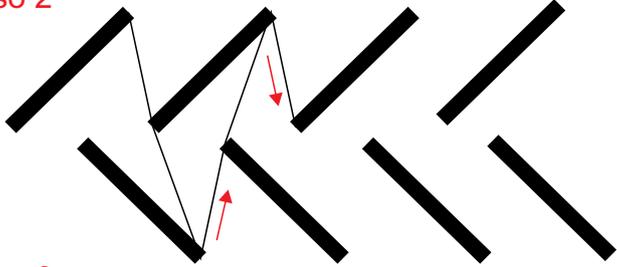
POLIEDRO 8 HASTES

MONTAGEM POR MALHA

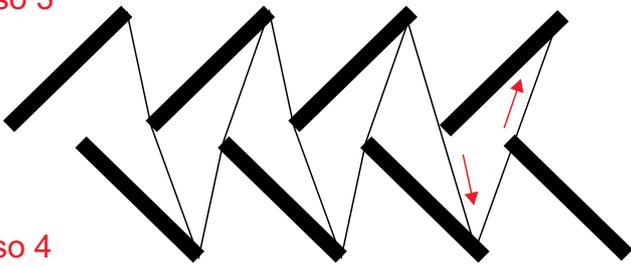
passo 1



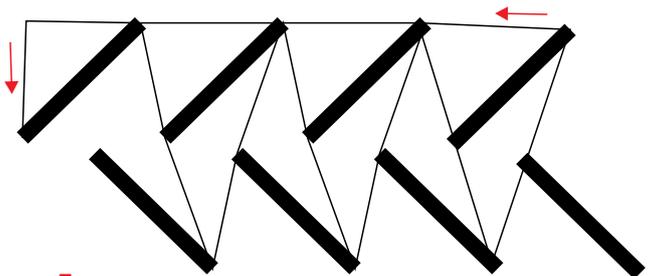
passo 2



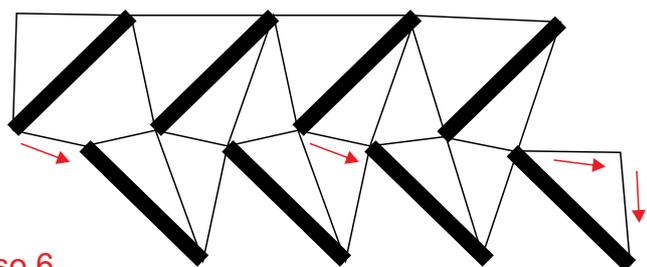
passo 3



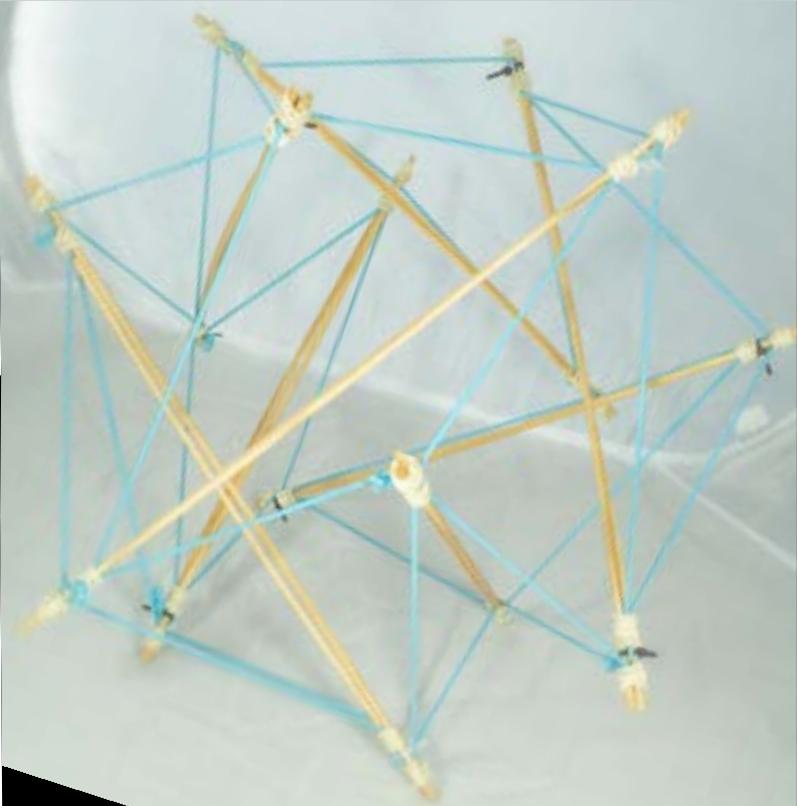
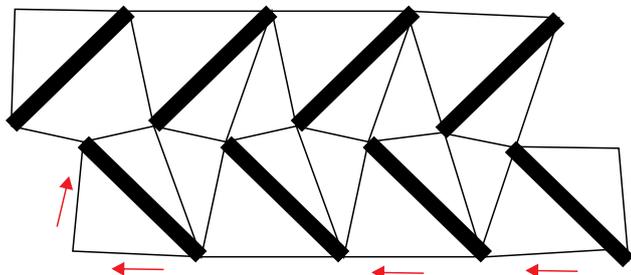
passo 4



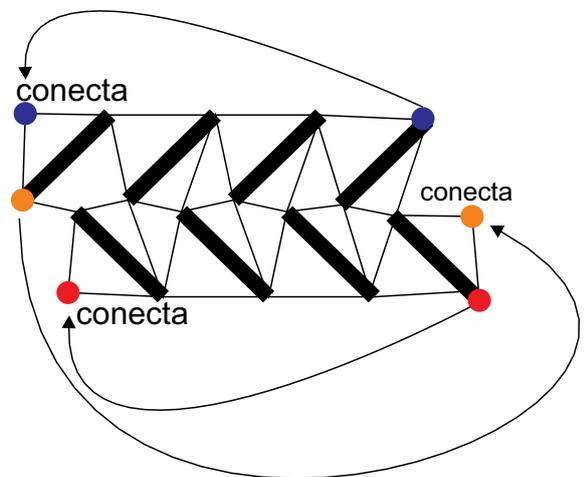
passo 5



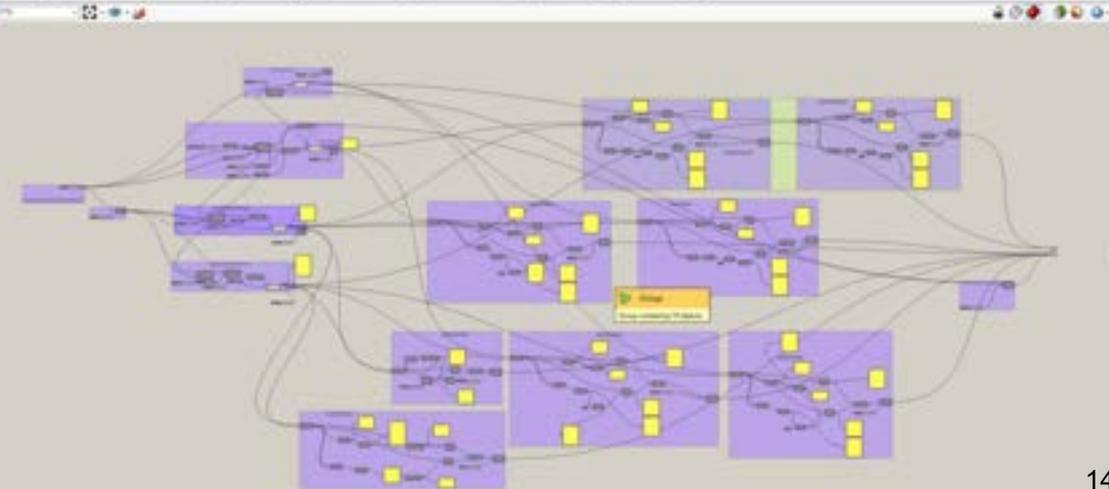
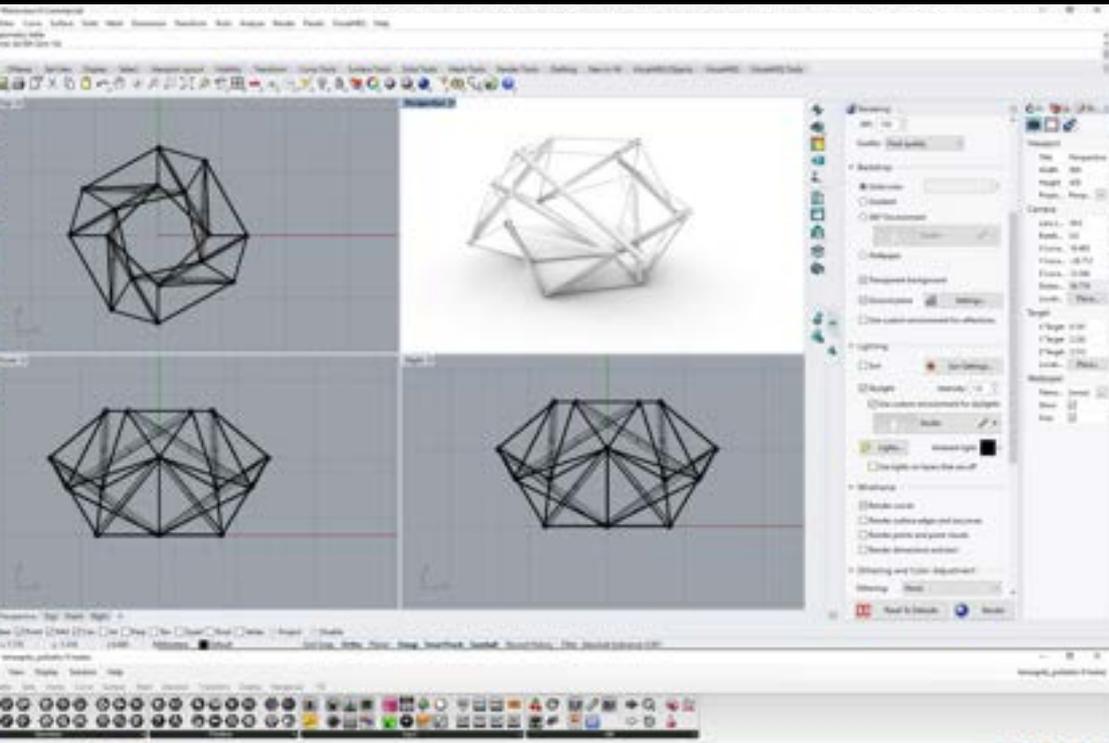
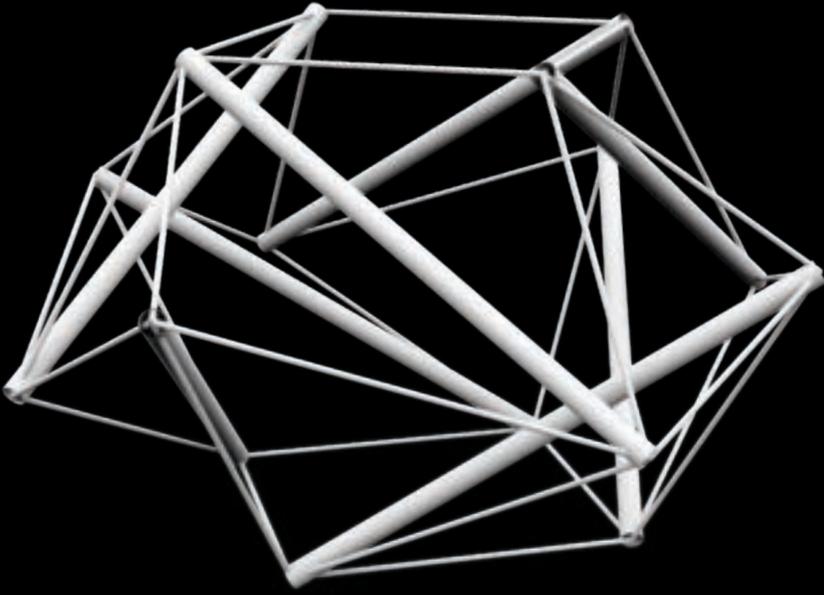
passo 6



gira a estrutura para
conectar um ponta na outra

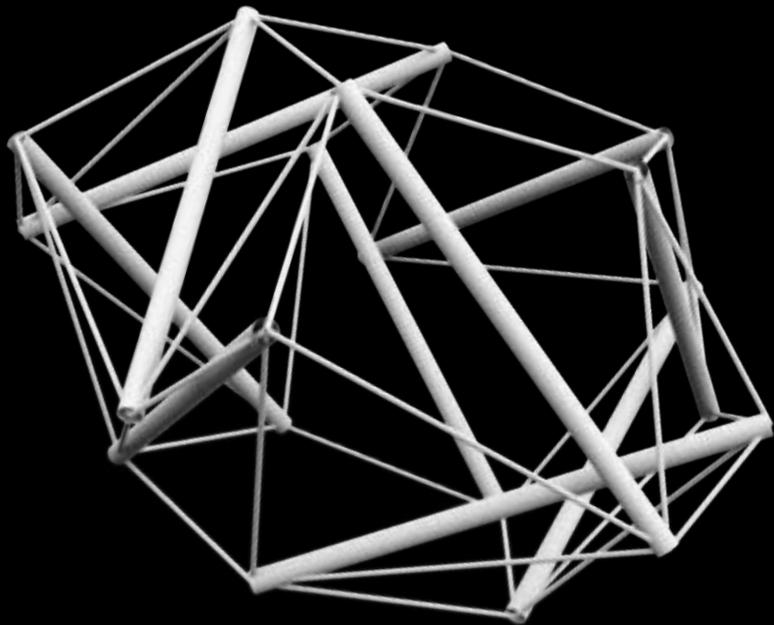


SCRIPT

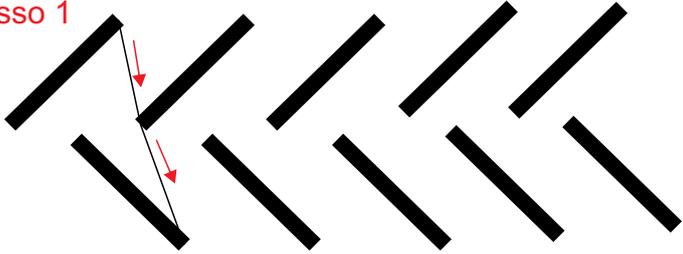


POLIEDRO 10 HASTES

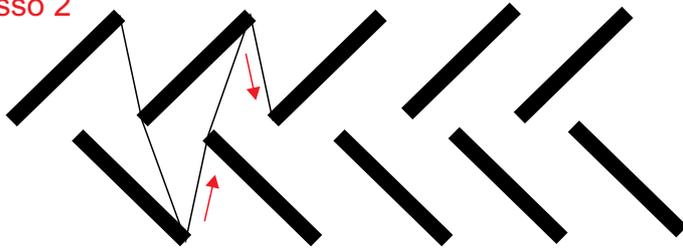
MONTAGEM POR MALHA



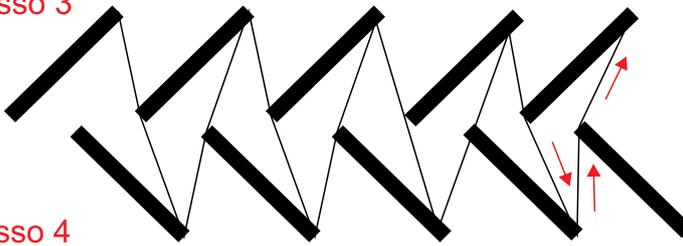
passo 1



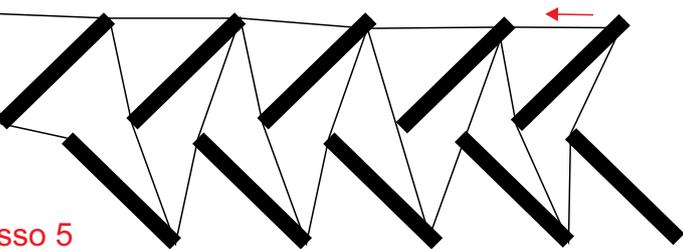
passo 2



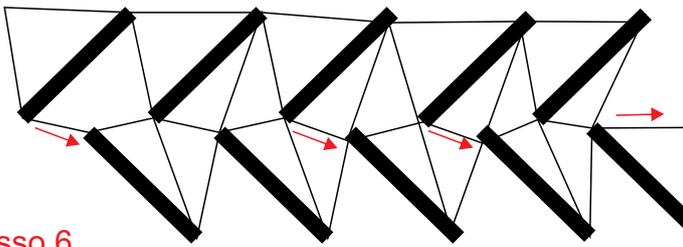
passo 3



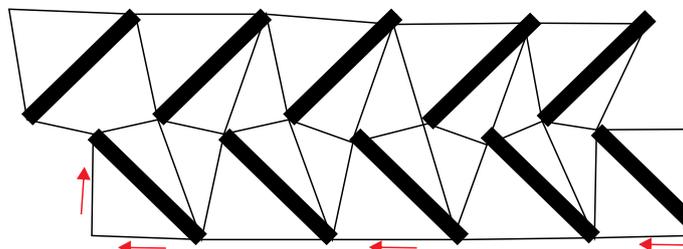
passo 4



passo 5



passo 6



gira a estrutura para
conectar um ponta na outra

conecta



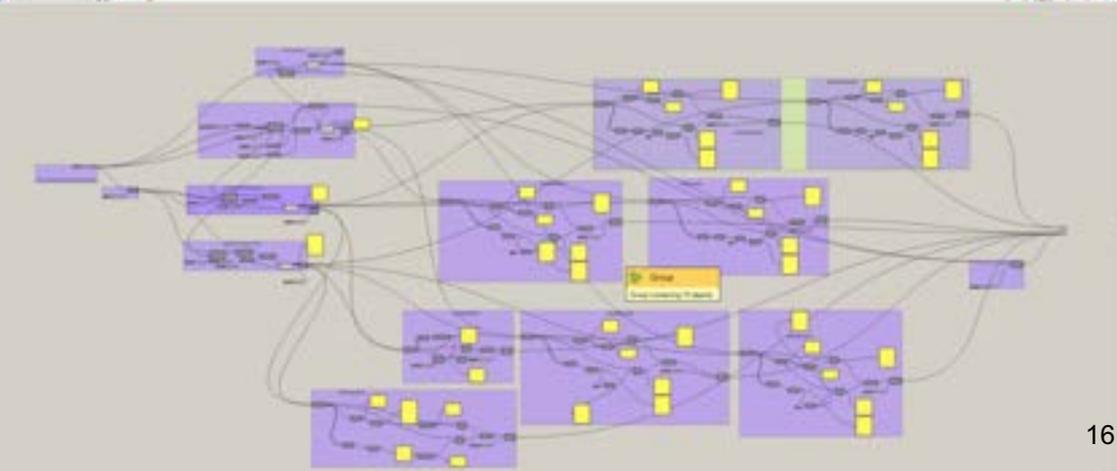
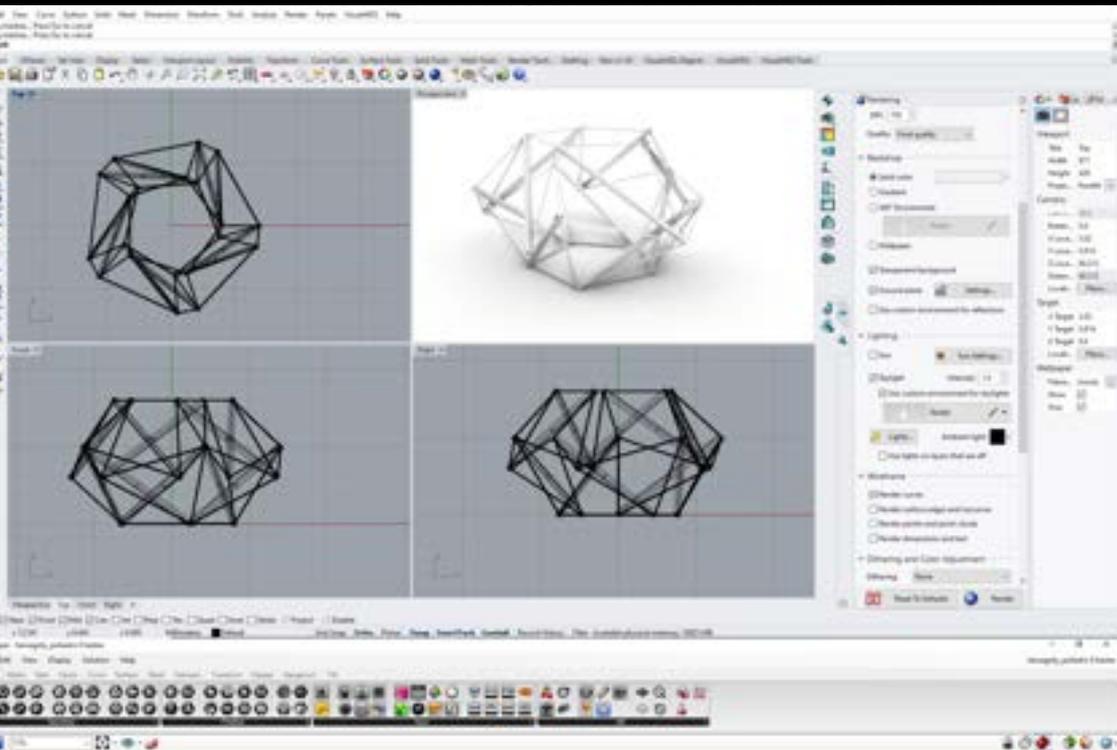
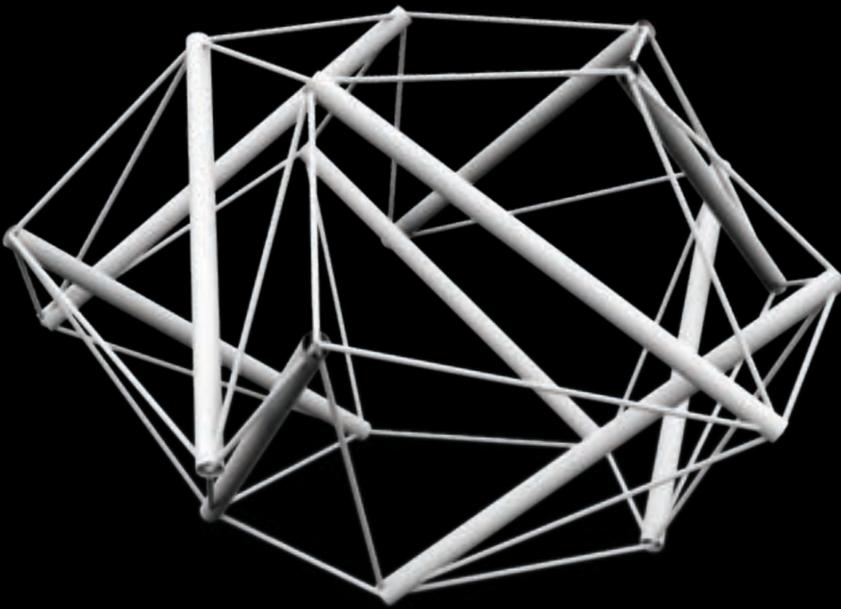
conecta



conecta



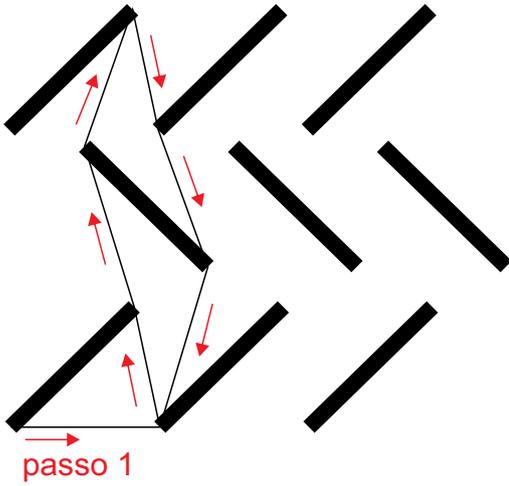
SCRIPT



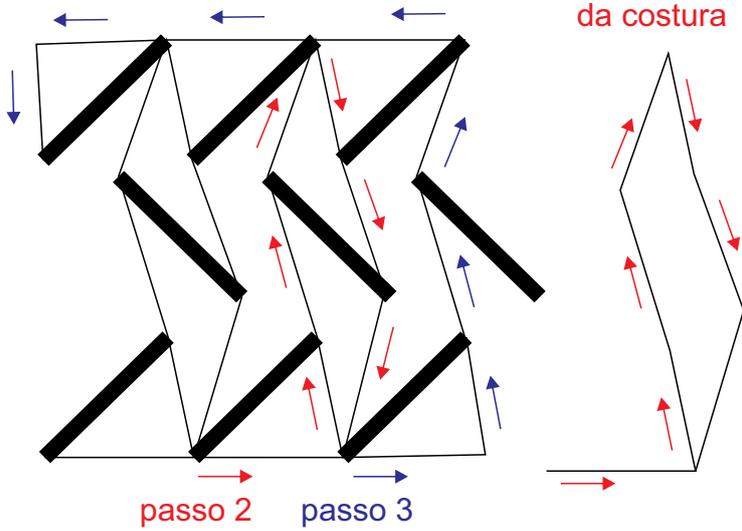
TORRE 9 HASTES

MONTAGEM POR MALHA

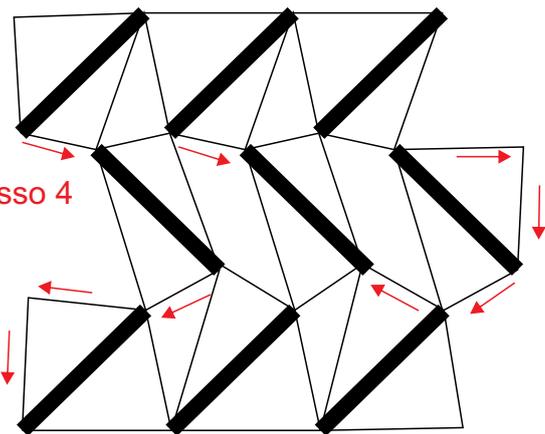
padrão da costura



repete padrão da costura

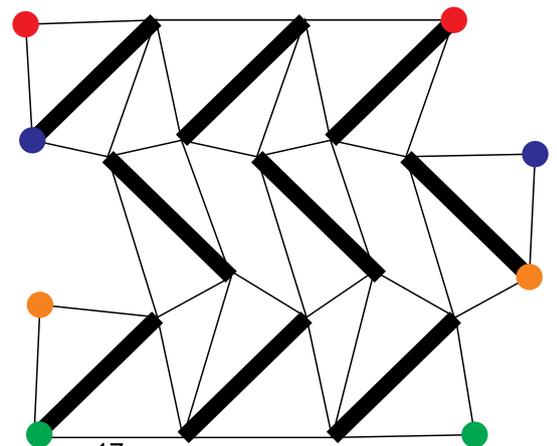


passo 4

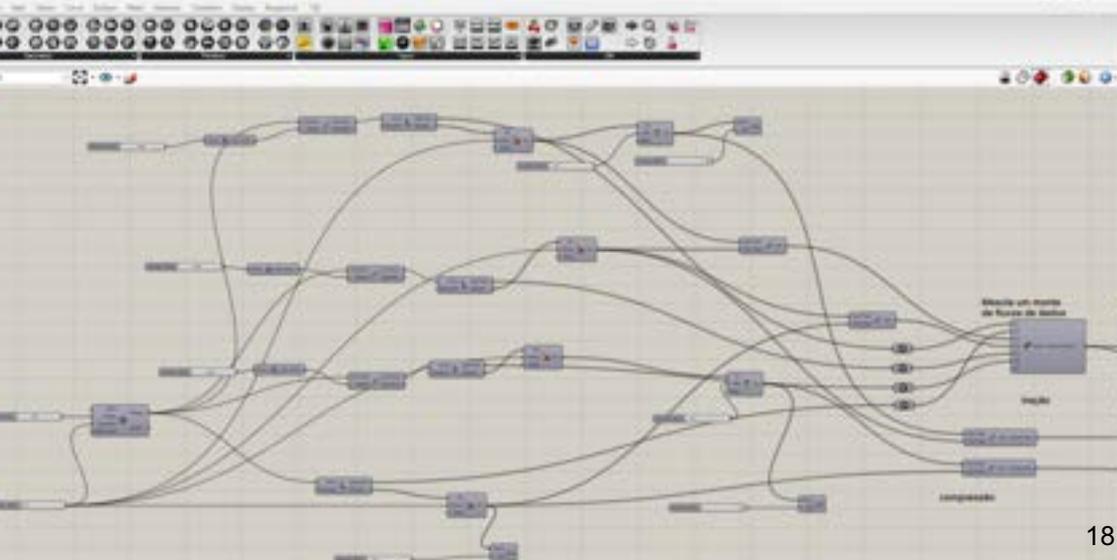
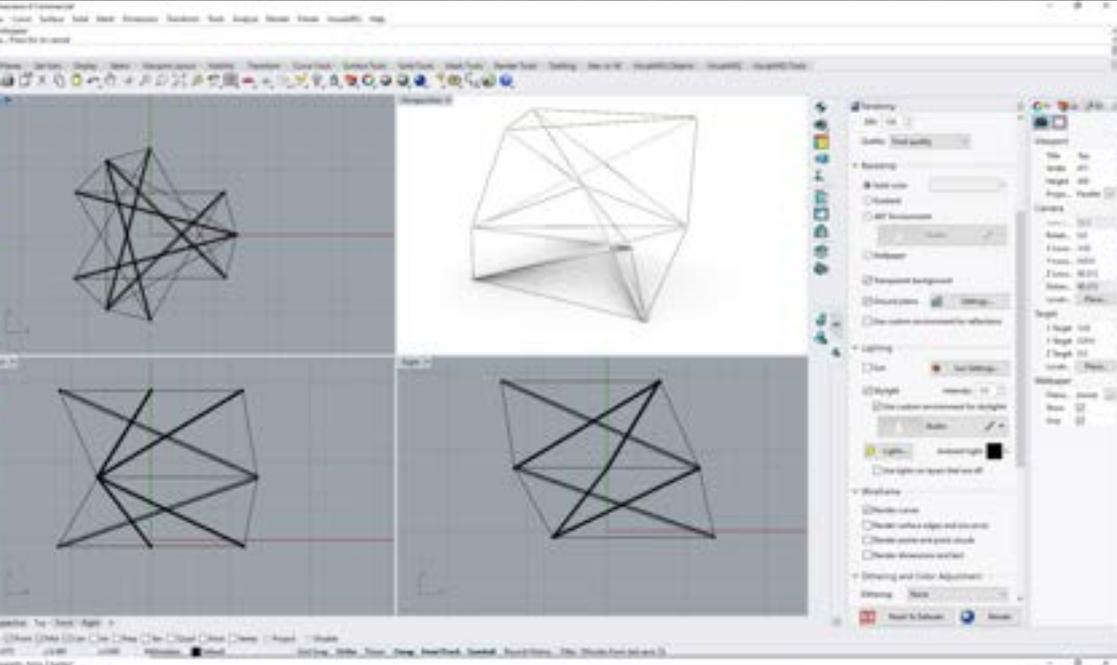
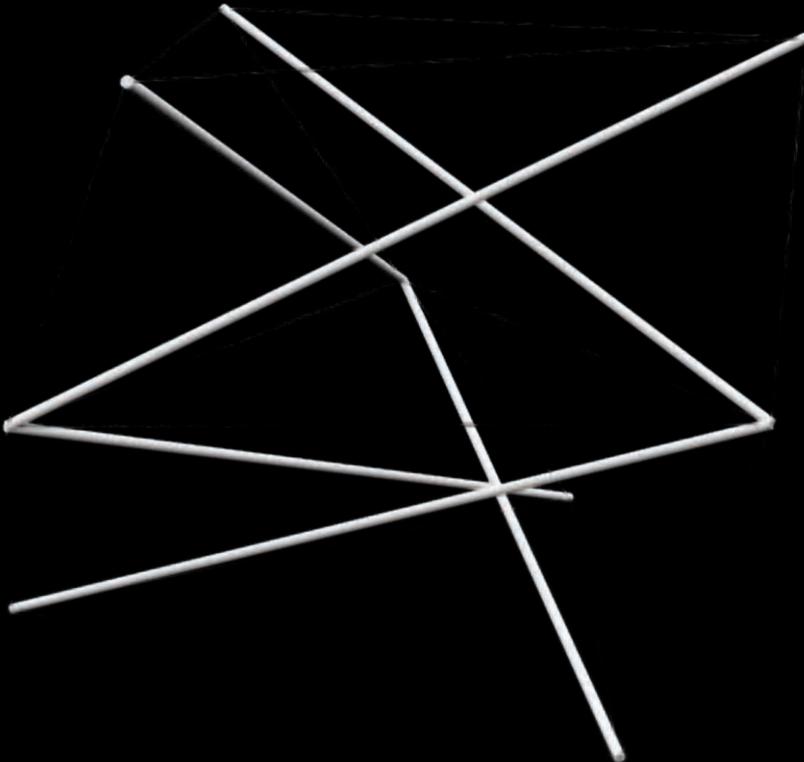


gira a estrutura para conectar um ponta na outra

Pontos que conectam



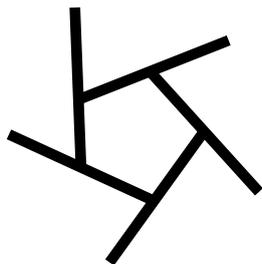
SCRIPT



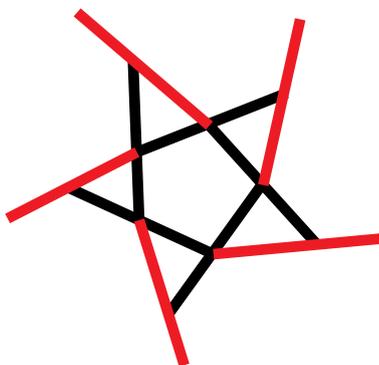
GEODÉSICA 30 HASTES

MONTAGEM POR MALHA

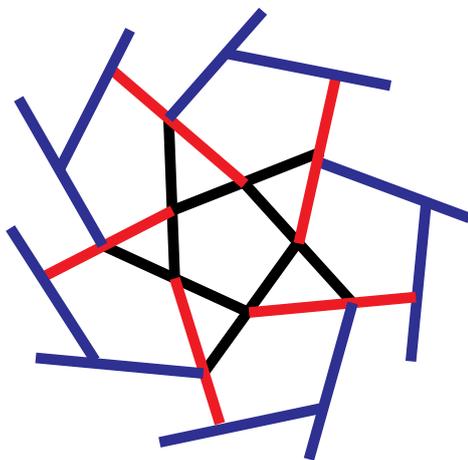
Pentágono - raio de bicicleta



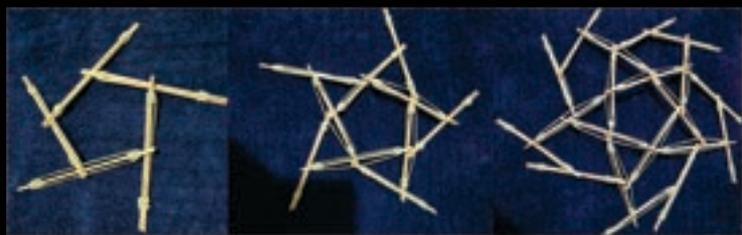
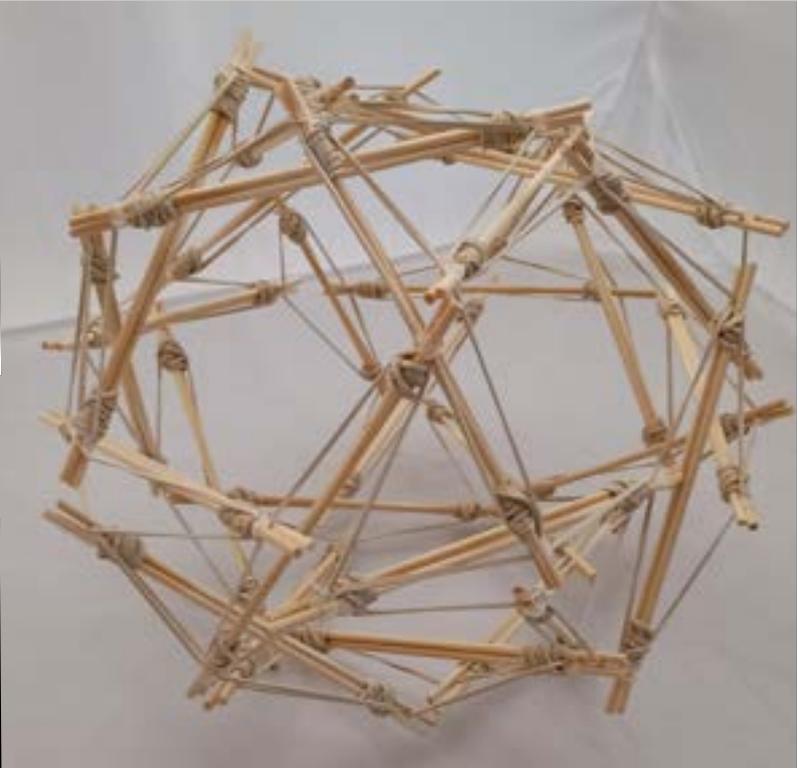
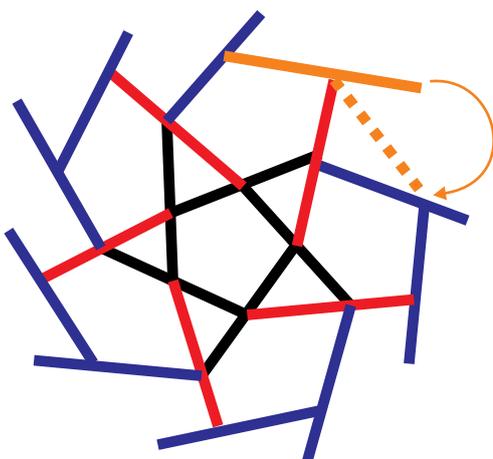
Triângulos



Pentágonos

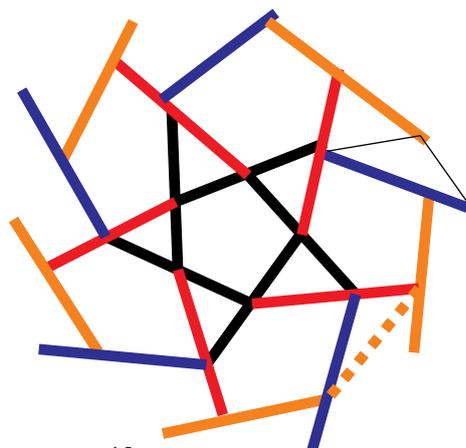


Triângulos

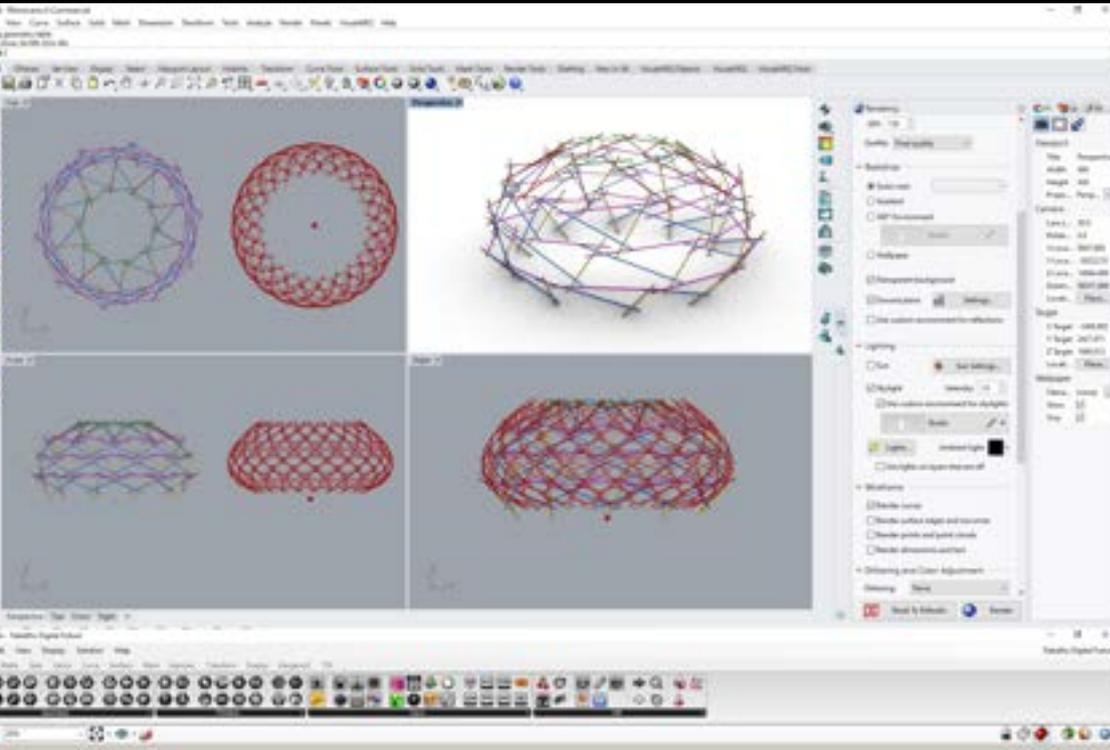
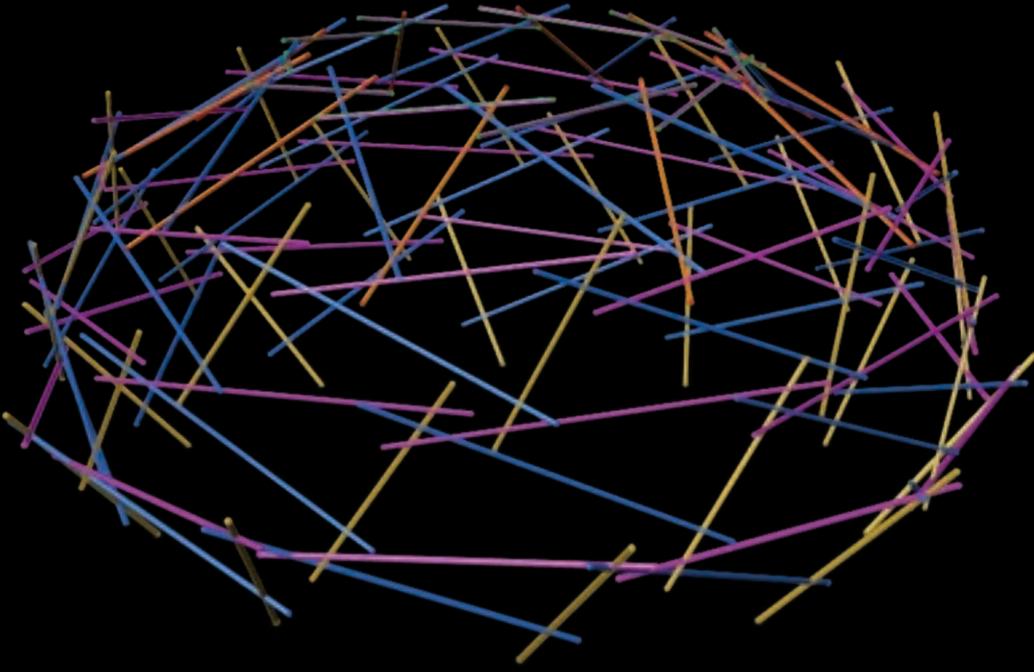


os Pentágonos e Triângulos fazem a malha girar e começa a formar com a tensão um arco, como se fosse uma cesta ou metade de uma bola

Continua o processo alternando pentágonos e triângulos, conforme ilustrado, até fechar a geodésica.



SCRIPT

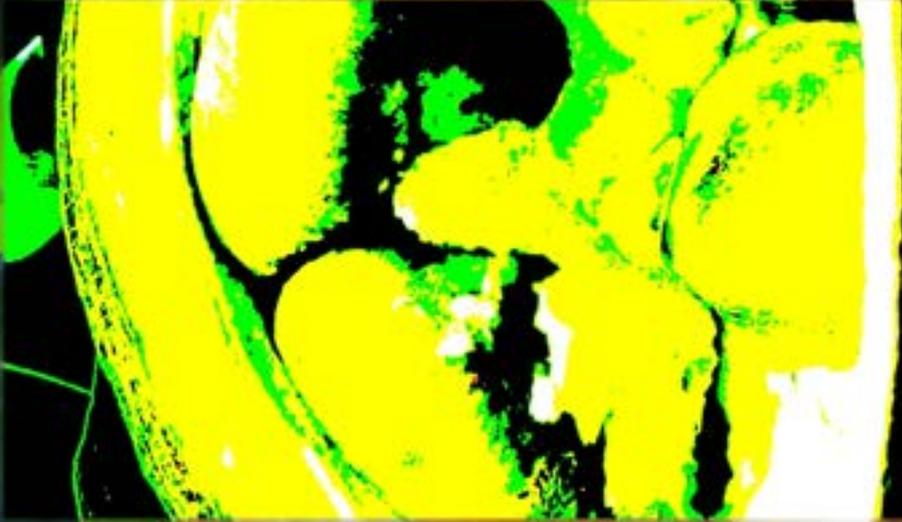


Nesta seção apresentaremos exemplos de aplicações da prototipagem em projetos. Começaremos por um trabalho cursado na disciplina de *Design Paramétrico e Bio Inspiração Digital* o qual utilizou diretamente a metodologia da Bioinspiração com prototipagem para desenvolvimento de projetos em arquitetura.

Na sequência exibimos o resultado do Workshop Internacional Digital Futures onde foram desenvolvidas duas propostas de projeto com soluções fundamentadas na prototipagem e mediação digital. Na produção protótipos físicos e protótipos digitais, permitiram a experimentação de *feedback looping* de modo que cada protótipo pudesse ser um modelo melhorado do primeiro – modo evolutivo de *design*.

Por último, apresentamos experimentos práticos e executados de estruturas do tipo Tensegrity em construção civil e pesquisas (biomedicina e robótica).

MUNGUBA



APLICAÇÕES

Observação da geometria do fruto (corte central) na vista de topo para a concepção da estrutura e da forma do projeto

Pentágono

Pentágono inscrito ao centro

Pentágono base
Pentágono topo
Área do topo e base iguais

estrutura recíproca no polígono central

Área do topo e base alteradas parametricamente no grasshopper

Análise da estrutura alterando os parâmetros
O algoritmo foi programado podendo alterar:
área da base e topo
altura da estrutura
ângulo de rotação
número de lados do polígono

para melhor ajuste da forma na implantação e estudos da tensão sobrida pelos cabos e hastes

Decisão:
número de lados 3 (corresponde o número de hastes)
base e topo triangular

Forma que busca equilíbrio (triângulo equilátero)

Economia de materiais (hastes cabos)
três lados do polígono gerador 3 hastes

Facilidade na montagem

Área do topo menor buscando maior estabilidade

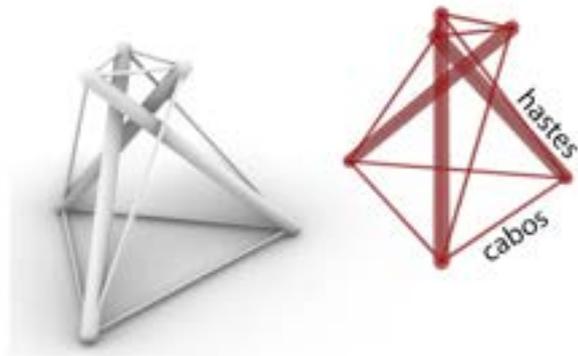
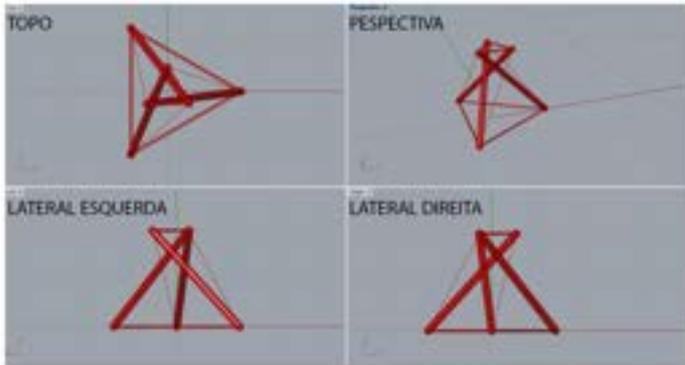
Projeto Ponto de Ônibus

Estrutura Tensegrity

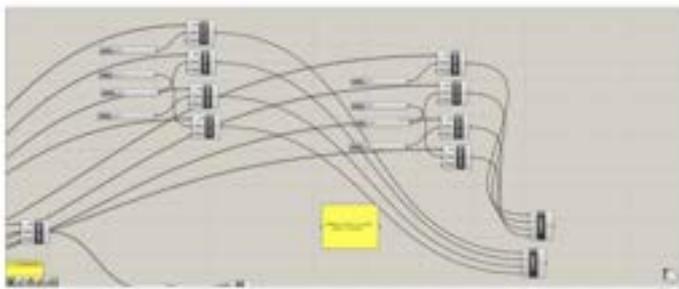
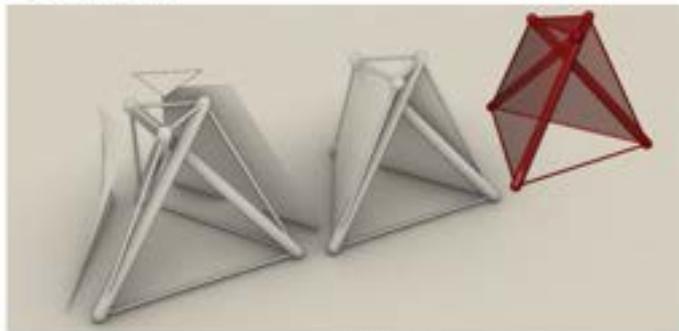
A estrutura escolhida é do tipo implementáveis - Tensegrity - por ter um caráter adaptável, modular, móvel, reutilizável em materiais, ter pouca materialidade estrutural, leveza estética e alta performance de resistencia e estabilidade da estrutura.

Um importante conceito geométrico, segundo Pires e Pereira (2017), e que é muito recorrente na natureza: os triângulos e os hexágonos. São figuras que trazem o equilíbrio e a economia de energia (recursos e materiais) na sua forma. Buckminster Fuller, na arquitetura, fez vários estudos e aplicações através dessas geometrias. O hexágono tem como característica utilizar o mínimo de área das superfícies, e essa é uma propriedade que ocorre com as superfícies mínimas – o padrão das colmeias que são hexágonos minimizam a quantidade de energia e material (cera) que as abelhas usam para construí-las.

VISTAS



COBERTURA



Materialidade

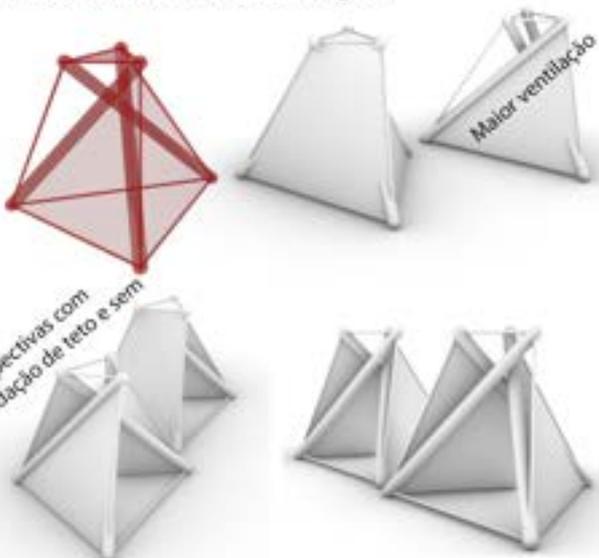
Vedações possíveis:
 - trama de palha
 - lona algodão impermeabilizada

Estrutura:
 Hastes de Bambu
 Cabos de aço

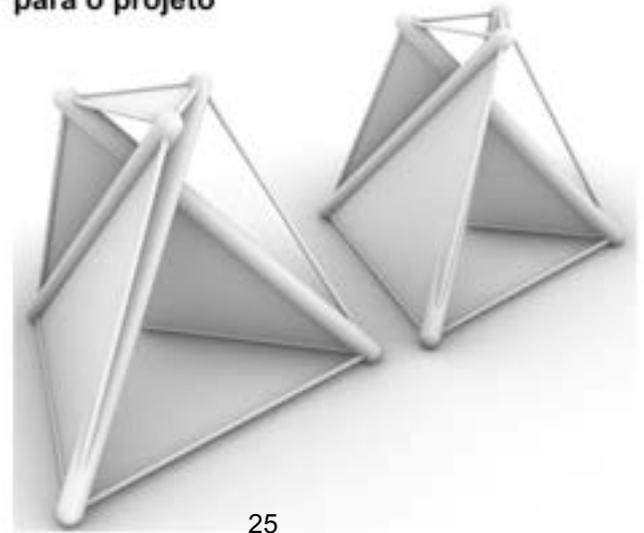
PISO madeira



Possibilidades de vedação



Unidades possíveis para o projeto



IMPLANTAÇÃO

hastes de bambu
plantio rápido, possibilita reuso (volta ao ciclo)

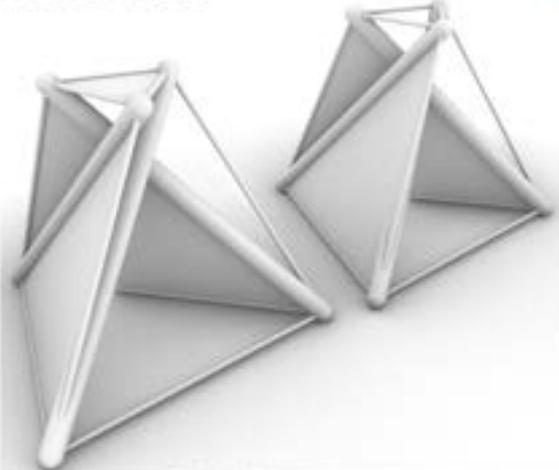
leveza e comunicação visual com o local

palha - material que comunica visualmente com o local

ventilado - trama



MÓDULOS





Digital Futures 2022

TENSEGRITY: PARAMETRIZAÇÃO E PROTOTIPAGEM

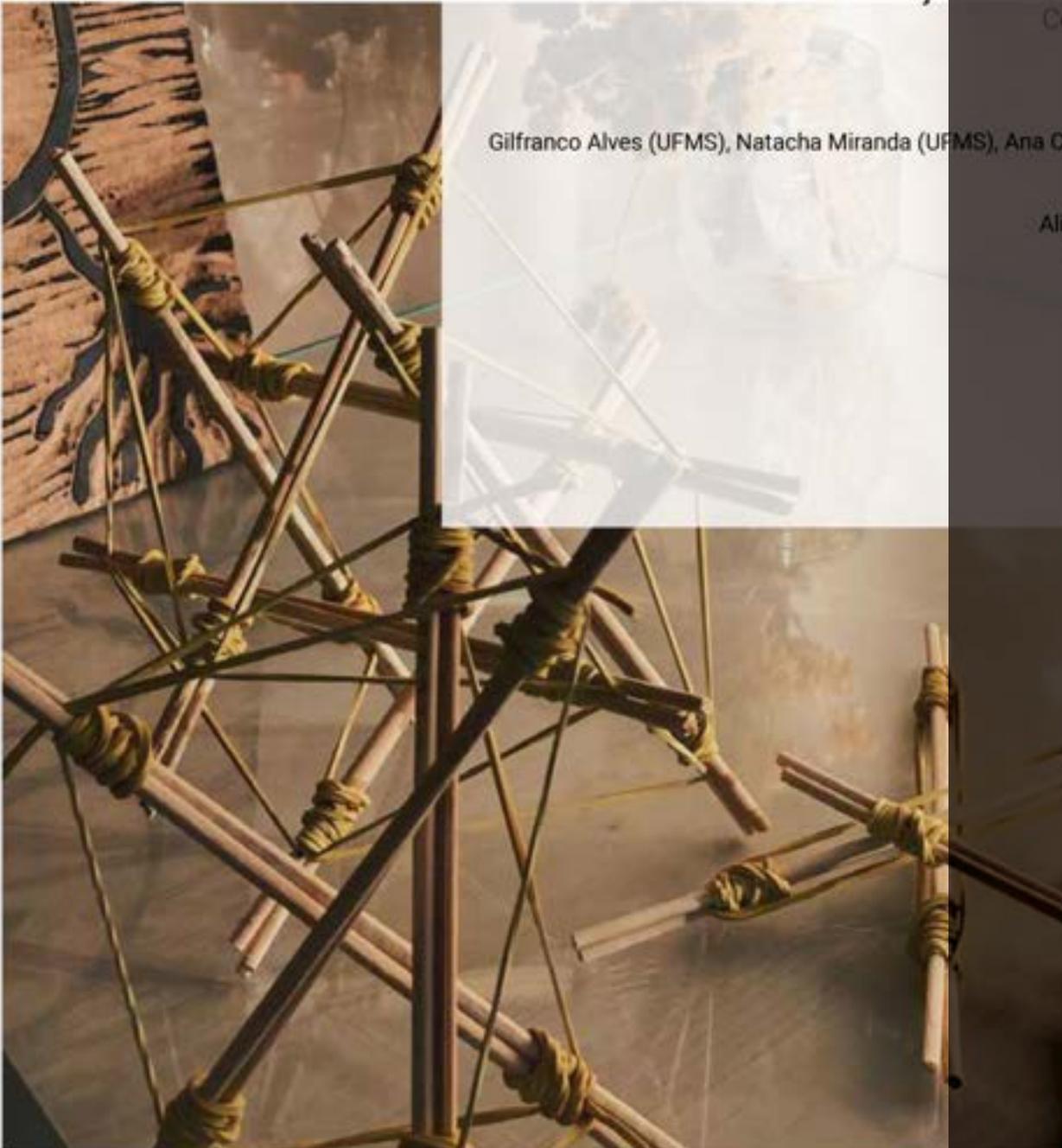
Computational Design
Português

Instructors:

Gilfranco Alves (UFMS), Natacha Miranda (UFMS), Ana Caroline Santana (UFMS)

Participants:

Aline Thaís S. Nascimento
Ana Carolina S. Vicente
Lídia Mendes Reges
Luíse Belochio Decimo



ESTUFA EM MARTE



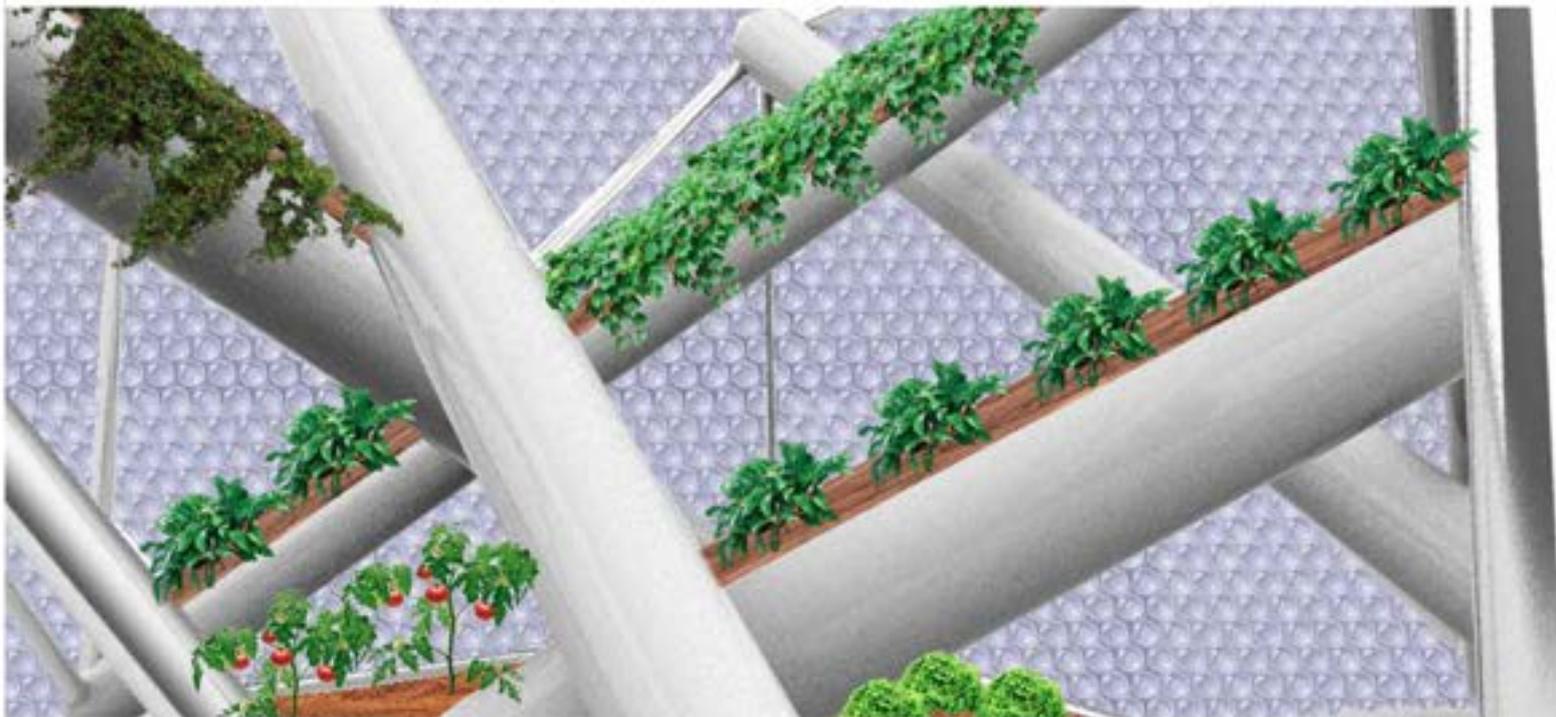
INTRODUÇÃO



O projeto da Estufa Marciana consiste em levar para Marte um equipamento que possibilite o cultivo de alimentos naturais para a população, possibilitando espaços de plantação dentro de uma estrutura Tensegrity. Além da possibilidade de transporte em naves espaciais pela pouca materialidade e possibilidade de montagem e desmontagem.

A proposta então é pensada a partir de uma perspectiva da própria vegetação, sem que a presença humana seja necessária no local. Assim, a estufa é protegida com um material capaz de criar condições adequadas para o crescimento e desenvolvimento desses alimentos, protegendo da alta radiação de Marte e intempéries. O protótipo serve como um módulo que pode ser reproduzido na quantidade necessária e conectado entre si através da cobertura.

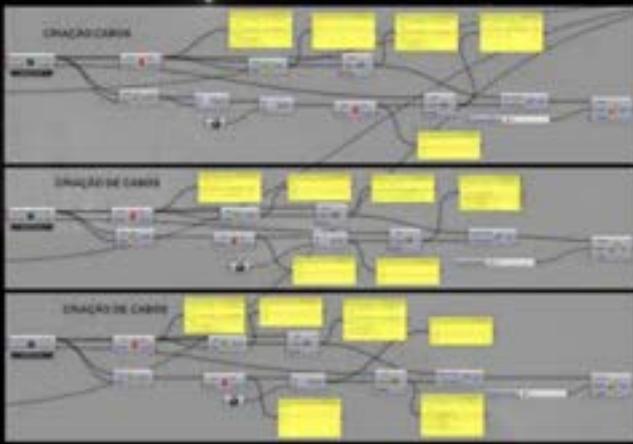
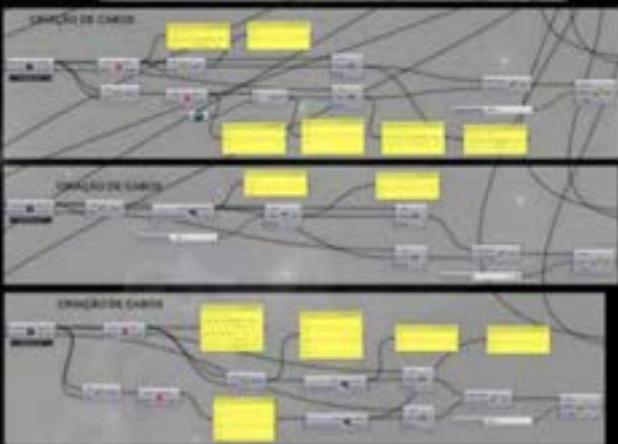
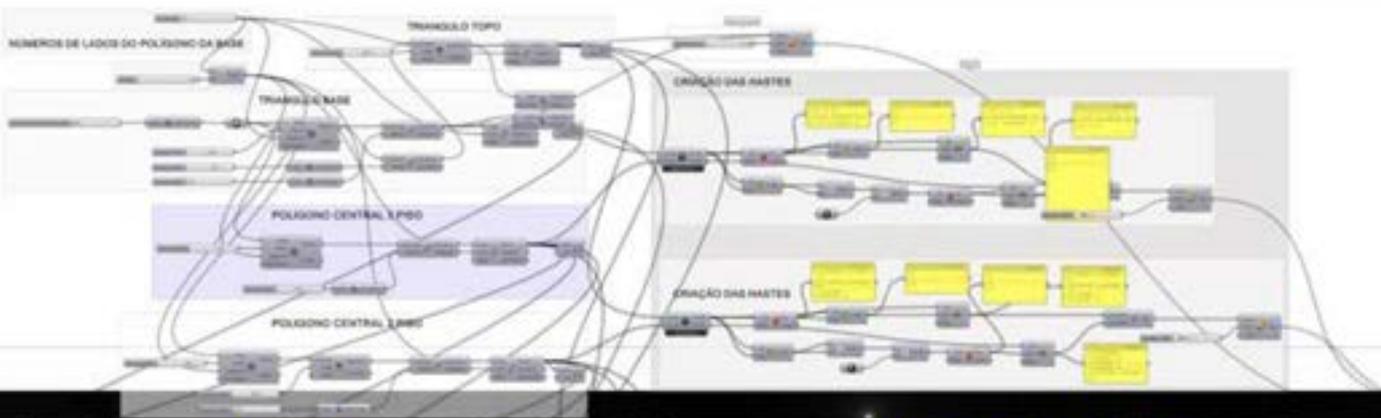
O filme Perdido em Marte foi uma das referências utilizadas para a idealização do projeto, devido a necessidade de sobrevivência em ambientes extremos. Assim como o tensegrity de 6 hastes, icosaedro, em que as suas variadas hastes serviriam de apoio para a plantação.

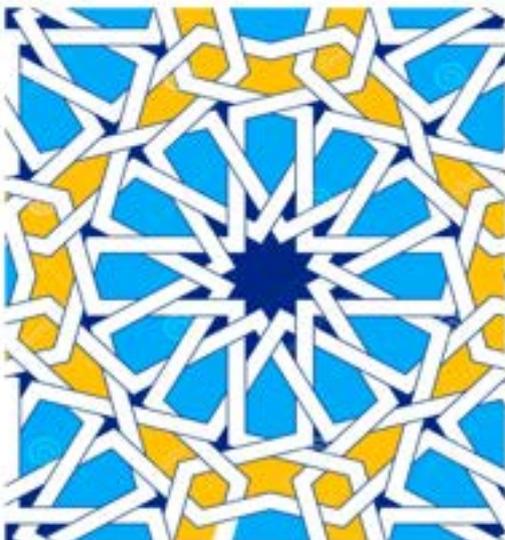
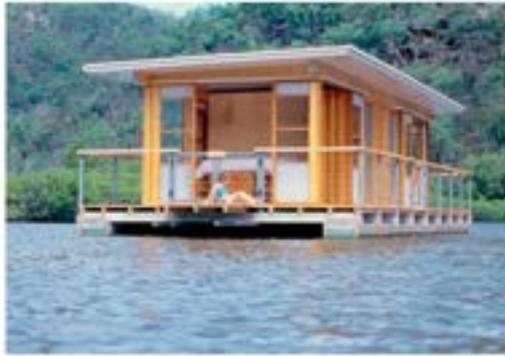
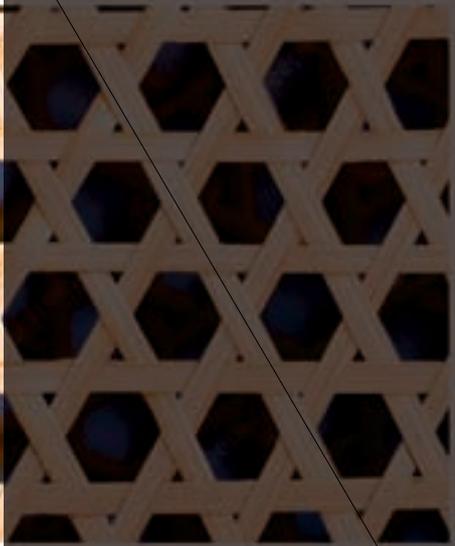




ESTUFA EM MARTE







TENSEGRITY: PARAMETRIZAÇÃO E PROTOTIPAGEM

Computational Design
Português

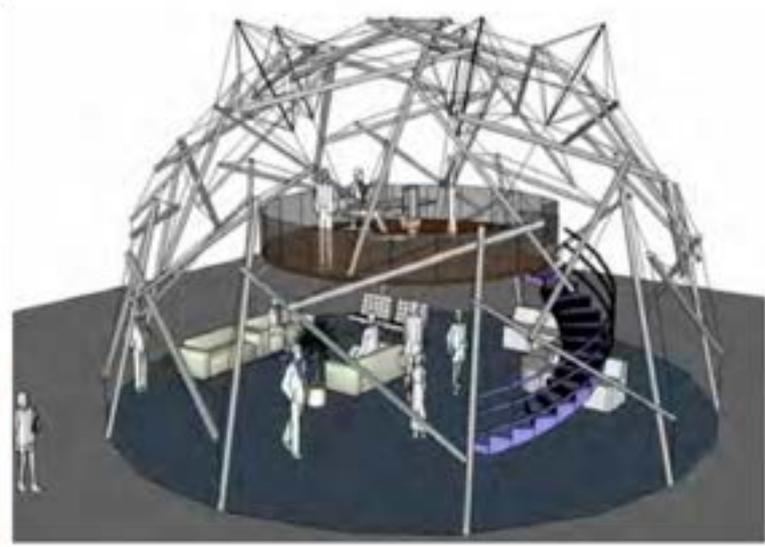
Instructors:
Gilfranco Alves (UFMS), Natácha Figueiredo Miranda (UFMS),
Ana Caroline Santana (UFMS)

Participants:
Euler José de Oliveira Morais - emorais@usp.br
Mariel Selingardi Espindola - mariel_selingardi@ufms.br
Maurish Melián Moreno - maurishmelian@gmail.com

Imagens retiradas da internet

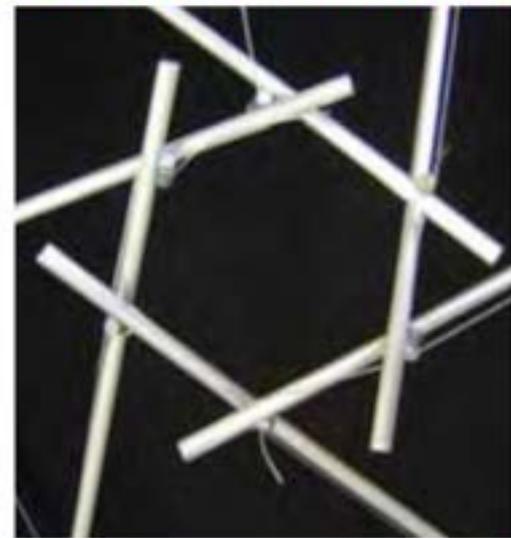


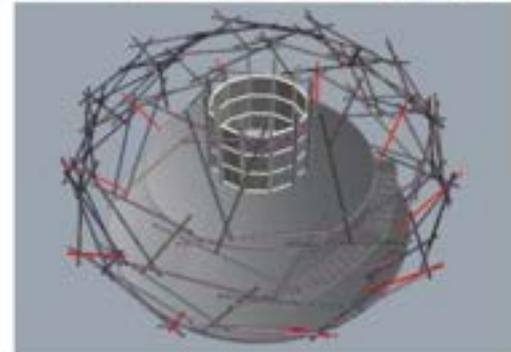
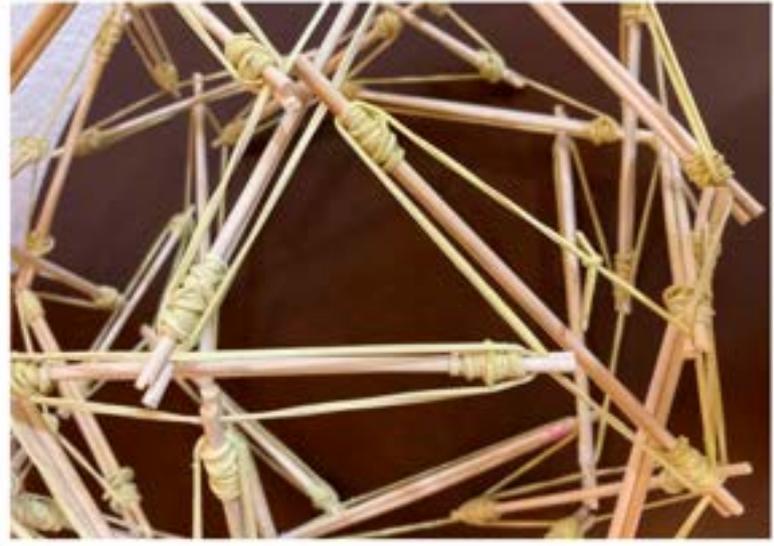
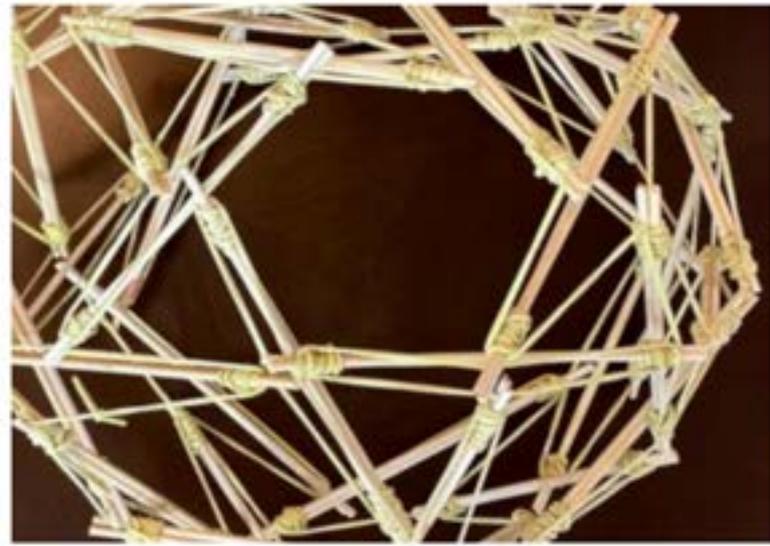
PROJETO PANTANAL: ARQUITETURA E COEXISTÊNCIA



O Complexo Pantanal, ou simplesmente Pantanal, são territórios dentro de territórios com características únicas, onde um bioma, um grande ecossistema, com suas comunidades biológicas estão estabelecidas em uma savana estépica, alagada em sua maior parte. A proposta do Projeto Pantanal é a instalação de uma base avançada para observação da vida animal e vegetal. Uma estrutura modular que contempla escalas distintas e diferentes interconexões entre tais escalas, podendo ser adaptada e articulada para múltiplas finalidades e funcionalidades. Tendo como foco a relação entre humanos e não humanos, pensado como cotidiano, no nível das relações que desenvolvemos com nossos pares e com outros seres e o objeto construído, e que envolve coexistências afins e contraditórias.

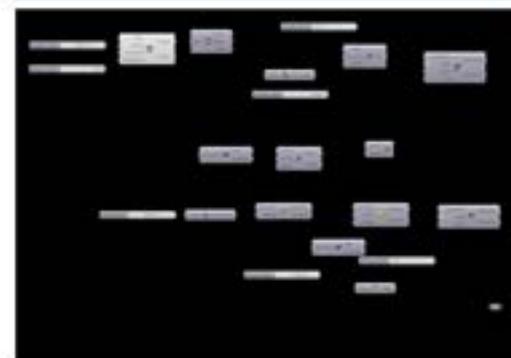
Projeto pensado num contexto ecológico onde, artefatos, sistemas, seres, pensados criticamente numa relação rizomática, enquanto unidades diferenciadas nas bordas do imediato e do interescalar, estão inseridos na lógica e nas políticas de concepção projetual, enquanto unidades diferenciadas.

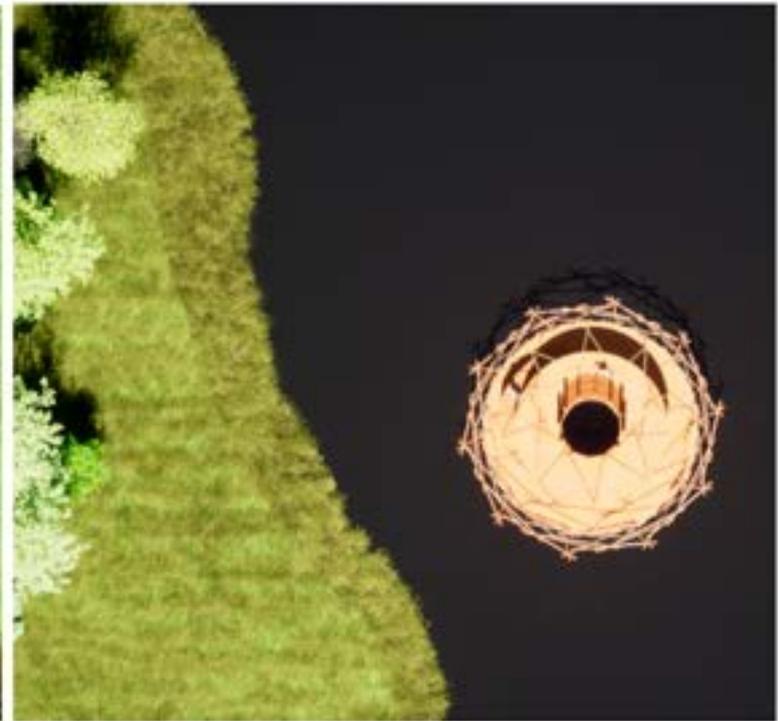




TENSEGRITY: PARAMETRIZAÇÃO E PROTOTIPAGEM

Projeto Pantanal: Arquitetura e Coexistência





De acordo com Ohsaki e Zhang (2015), as estruturas de tensegridade surgiram nas artes, mas tem seu campo aumentado devido à universalidade que traz esse tipo de estrutura. As suas aplicações vão tanto em áreas de microescala como em estudos de biologia a macro escala como em aplicações nas engenharias, por exemplo.

Conforme Ohsaki e Zhang (2015), na engenharia e arquitetura temos como exemplo a instalação experimental em Chiba, Japão, em 2001, Figura 01. A estrutura é semelhante ao antiprisma de 3 hastes de Tensegrity, que suporta o telhado – uma membrana.

Figura 01: Estrutura experimental em Chiba, Japão



Fonte: Figura retirada do livro Tensegrity Structures Form, Stability, and Symmetry. pag. 01:

Os autores Ripper, Seixas e Victor (2018), trazem uma pesquisa que aborda o sistema estrutural de tensegridade em construção de protótipos para construção de modelos didáticos do corpo humano, usando estudos da biomimética e biomateriais para simular comportamento físico próximo a fisiologia dos animais vertebrados e do corpo humano – o que eles chamam de sistema biotensegrity. Figura 02 abaixo.

Figura 02: Modelo da espinha vertebral conectada ao modelo da cintura escapular em Tensegrity .



Fonte: Figura retirada de Métodos e Processos em Biônica e Biomimética: a Revolução Tecnológica pela Natureza. pag. 167

Liapi (2009) traz em seu artigo o uso do conceito de tensegridade para o projeto das estruturas leves do Museu Marítimo Helênico, sendo que dois tipos de formas geométricas de Tensegrity foram estudadas. Em um primeiro momento uma geometria configuração conhecida, prismática, e depois outras configurações foram estudadas no projeto com ajuda de modelos físicos de pequena escala e isso conduziu as duas novas estruturas de tensegridade. Figura 03.

Figura 03: Duas simétricas e irregulares estruturas de Tensegrity – protótipo físico.



Fonte: Figura retirada do artigo Tensegrity Structures for the Hellenic Maritime Museum Katherine A. LIAPI

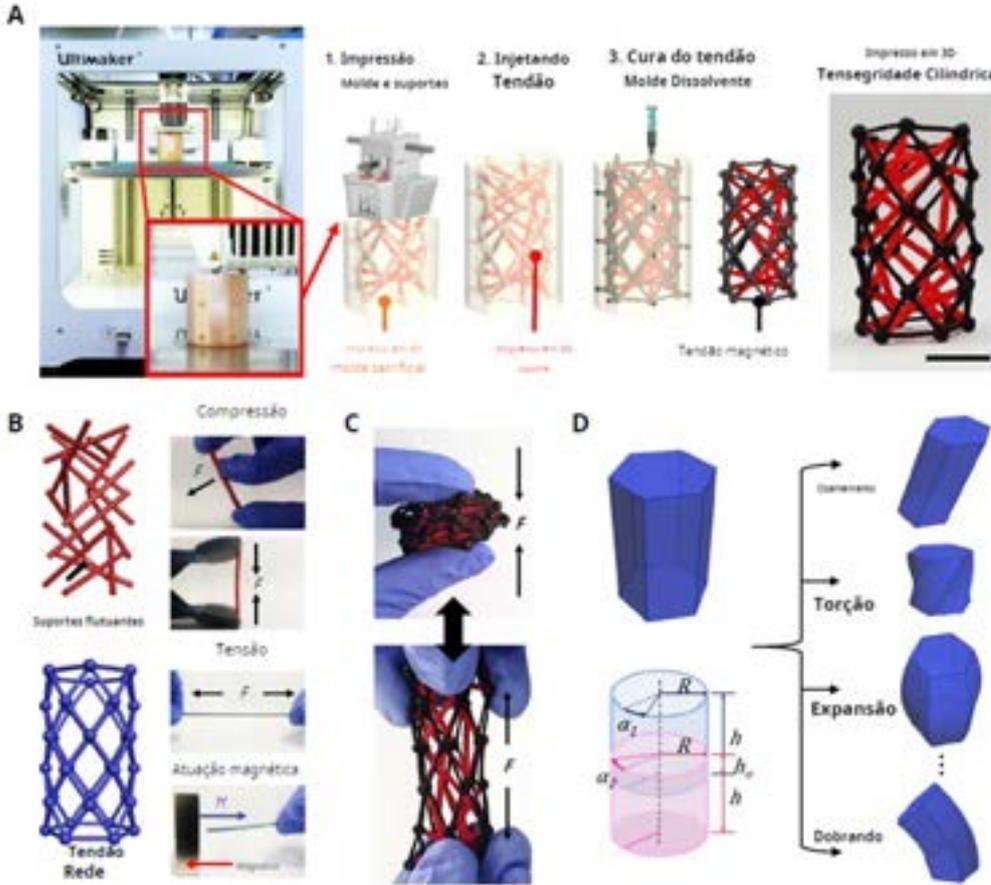
Figura 04: Dois Tensegrities anti prismas de 3 hastes - protótipo físico.



Fonte: autora, 2024.

Lee et al. (2020) utiliza materiais inteligentes para montar protótipos de tensegrity impressos 3D buscando um melhorar as propriedades existentes na robótica, robôs leves inteligentes por sistemas flexíveis - redes de Tendões monolíticos baseadas em materiais inteligentes. Segundo os autores, ao imprimir a tensegridade com elementos suaves rígidos, podemos utilizar parâmetros de projeto, como geometria, densidade, topologia, etc., para programar um sistema de estrutura suave.

Figura 05: Processo de fabricação da estrutura de tensegridade e características mecânicas de seus elementos



Fonte: Figura 05 retirada da Revista Robótica da Ciência - Tensegridade programável impressa em 3D para robótica suave.

Para elaboração desse Catálogo como produto final, houve uma extensa pesquisa bibliográfica juntamente com a realização de inúmeros protótipos que foram produzidos em diferentes escalas, materiais e procedimentos, a fim de testar as melhores condições e técnicas para aprendizado dentro da metodologia proposta por essa pesquisa. Além dos modelos físicos foram desenvolvidos *scripts* para melhor representá-los de forma digital, tendo assim seu análogo para experimentações em outras escalas podendo sofrer modificações de parâmetros e simulação de forças (*Kangaroo*) para verificar o comportamento da forma com as forças sofridas pela estrutura.

Logo, esse processo buscou compreender o funcionamento dessas estruturas, com a produção, verificação e ajustes constantes até a melhoria do protótipo, tanto físico como digital, além de testar o método em no *Workshop Internacional Digital Futures* e obter resultados satisfatórios. Todo processo culminou com o amadurecimento das informações que abastecem essa pesquisa.

Portanto, o Catálogo, que foi elaborado visando auxiliar e incentivar o uso dessas estruturas para o ensino de projeto e experimentações de quem se aventurar a aprender sobre Tensegrity. Aqui está reunido o básico para o início do aprendizado com o suporte da mediação digital.

REFERÊNCIAS

- LIAPI, K. A. (2009). **Tensegrity Structures for the Hellenic Maritime Museum**. University of Patras, Greece.
- MOTRO, R. (2003). **Tensegrity – Structural Systems for the Future**. Kogan Page Science. ISBN 1 9039 9637 6.
- SNELSON, K. (2012). **The Nature of Structure: Tensegrity Weaving and the. Binary World**.
- VERSCHLEISSER, R. (2008). **Aplicação de Estruturas de Bambu no Design**. Rio de Janeiro : s.n., 2008.
- VICTOR, Georgia; SEIXAS, Mario; RIPPER, José Luís Mendes; "Estruturas Autoportantes Biotensegrity Aplicando Materiais Naturais", p. 152 -171. In: **Métodos e Processos em Biônica e Biomimética: a Revolução Tecnológica pela Natureza**. São Paulo: Blucher, 2018. ISBN: 9788580393491, DOI 10.5151/9788580393491-10
- ZHANG J. Y., OHSAKI M. (2015). **Tensegrity Structures - Form, Stability, and Symmetry**. Springer Japan 2015. DOI 10.1007/978-4-431-54813-3