

**TENSEGRITY E BIOINSPIRAÇÃO:  
DIGITAL FUTURES 2022****TENSEGRITY AND BIOINSPIRATION: DIGITAL FUTURES 2022****TENSEGRITY Y BIOINSPIRACIÓN: DIGITAL FUTURES 2022**Natacha Figueiredo Miranda<sup>1</sup>Gilfranco Medeiros Alves<sup>2</sup>DOI: [10.5752/P.2316-1752.2024v31n45p149-168](https://doi.org/10.5752/P.2316-1752.2024v31n45p149-168)**Resumo**

Pretende-se relatar e analisar o processo e os resultados do workshop “Tensegrity: Parametrização e Prototipagem”, realizado no Digital Futures 2022. Foram elaboradas aulas baseadas em métodos de prototipagem, modelagem paramétrica e bioinspiração, a fim de aproximar os processos digitais para o desenvolvimento de projetos, retroalimentando modelos usados na prática, analisando dificuldades de montagem e discutindo vantagens da Tensegrity quanto aos impactos na natureza. Este artigo discute métodos, estratégias e conceitos dos projetos desenvolvidos.

**Palavras-chave:** Tensegrity; biomimética; design paramétrico; protótipo; prototipagem.

**Abstract**

The aim is to report and analyze the design process and the results of the “Tensegrity: Parameterization and Prototyping” workshop, held at Digital Futures 2022. Classes were developed based on prototyping methods, parametric modeling and bioinspiration, aiming to bring digital processes closer to project development, feeding back the models experienced in practice, analyzing assembly difficulties and discussing the advantages of Tensegrity on reducing impacts on nature. This paper discusses methods, strategies and concepts of the developed projects.

**Keywords:** Tensegrity; biomimicry; parametric design; prototype; prototyping.

**Resumen**

Se busca informar y analizar el proceso de diseño y los resultados del taller “Tensegrity: Parametrización y Prototipaje”, realizado en el Digital Futures 2022. Fueran desarrolladas clases basadas en métodos de prototipado, modelado paramétrico y bioinspiración, para acercar los procesos digitales al desarrollo de proyectos, retroalimentando los modelos experimentados en la

---

<sup>1</sup> Mestranda em Sustentabilidade na Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS). Pós-graduada em Animação e Cenário 3D pelo Centro Universitário Belas Artes de São Paulo. Graduada em Webdesign e em Tecnologia e Desenvolvimento de Sistemas Web pela Universidade Católica Dom Bosco (UCDB) e em Arquitetura e Urbanismo pela UFMS.

<sup>2</sup> Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (USP). Mestre em Estudos de Linguagens pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS). Especialista em Design de Interiores pela Anhanguera-UNIDERP e graduado em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade Federal de Pelotas (UFPEL). Durante o doutoramento, foi pesquisador do Nomads.USP, em período sanduíche na TU Delft, com o Hyperbody. É, atualmente, coordenador do grupo de pesquisa algo+ritmo UFMS e Professor Associado na mesma universidade.

prática, analisando las dificultades de montaje y discutiendo las ventajas de la Tensegrity en la reducción de impactos en la naturaleza. El artículo discute métodos, estrategias y conceptos de los proyectos desarrollados.

**Palabras clave:** Tensegrity; biomímesis; diseño paramétrico; prototipo; protipaje.

## INTRODUÇÃO

O presente artigo baseia-se na pesquisa de mestrado realizada no programa (omitido para revisão) da Universidade (omitido para revisão) e apresenta resultados de um workshop ocorrido em 2022, no evento internacional Digital Futures (site omitido para revisão). A escolha da Tensegrity como objeto de estudo fundamenta-se na potencialidade que essa estrutura traz ao desenvolvimento de projetos com inteligências de sistemas orgânicos e que performam de forma mais eficiente com o meio natural, já que a arquitetura atual não deve ser vista como algo estagnado, e sim a partir de estratégias de mobilidade e reutilização. A natureza nos ensina, conforme Pawlyn (2011), por meio de seu refinamento de milhões de anos, como atuar de forma mais integrada com o meio do qual fazemos parte.

De que maneira podemos reverter processos, alterando modos de produção para algo mais inteligente e mais integrado com a natureza? Esse é um dos desafios da atualidade: buscar trabalhar com materiais menos impactantes e minimizar desperdícios, à medida que a escassez de recursos naturais se intensifica no planeta.

Conforme Pawlyn (2011), para permanecermos por mais tempo usufruindo do planeta, é necessário realizarmos mudanças no comportamento. E, como projetistas, necessitamos aumentar a eficiência dos recursos naturais, migrar de economia fóssil para economia solar e transformar a prática da economia linear, que esbanja recursos para economia de modelo de loop fechado, em que os recursos são reutilizados em sistemas de ciclo, reduzindo o desperdício a zero.

Embora muito do design sustentável tenha sido baseado na mitigação de negativos, a biomimética aponta o caminho para um novo paradigma baseado na otimização positiva e na entrega de soluções regenerativas (Pawlyn, 2011, p. 6, tradução nossa<sup>3</sup>).

A noção de bioinspiração nos leva a uma produção focada na melhor performance, ou seja, observar as inteligências e os padrões da natureza, aplicando-os em projeto, assim como analisar de que

---

<sup>3</sup> "While much sustainable design has been based on mitigating negatives, biomimicry points the way to a new paradigm based on optimising positives and delivering regenerative solutions".

modo as construções atuam na relação com os sistemas naturais; logo, necessitamos mudar a forma de conceber e construir uma proposta.

Acreditamos que a produção deve ser modificada, e, assim, destacamos processos como a parametrização, prototipagem e fabricação digital e customização em série. Autores como Dunn (2012) e Iwamoto (2009) discutem processos de fabricação digital, nos quais, por meio de modelagem 3D e parametrização, podemos desenvolver projetos de melhor desempenho, já que os computadores, por meio da programação e dos diversos softwares 3D, permitem simulações e prototipagem em diferentes escalas, inclusive na escala real. Isso viabiliza que estudemos e melhoremos os projetos antes de eles serem construídos.

Encontramo-nos, atualmente, segundo os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), no período da mitigação dos danos causados ao planeta pela humanidade. Então, resta-nos gerenciar os impactos e planejar como reduziremos a velocidade da entropia. No que se refere à tecnologia, as ODS trazem uma diretriz para o desenvolvimento de produtos que buscam, por meio da inovação tecnológica, um desenvolvimento mais sustentável. Conforme o site oficial (Sustainable Development Goals ), 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. No caso específico do workshop realizado, buscou-se estimular o compartilhamento destes saberes e a sua relevância entre os participantes.

O workshop teve como objetivo geral projetar estruturas do tipo Tensegrity, explorando seu potencial estrutural e de otimização. Inicialmente, visamos estudar, de maneira breve, 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 e, estrategicamente, procuramos retroalimentar os processos digitais com protótipos físicos; por fim, mas não menos importante, foi proposto analisar as vantagens da utilização de estruturas do tipo Tensegrity relacionada às produções menos impactantes. Além da aplicação do método de prototipagem e o design paramétrico como formas de conceber e discutir projetos, o workshop se preocupou com as discussões relevantes que própria estrutura traz em seu conceito primordial, como a Bioinspiração. Estruturas do tipo Tensegrity têm várias relações com o corpo humano, como apontam Verschleisser (2008) e Victor, Seixas e Ripper (2018), e o momento traz à tona questionamentos de como podemos conceber projetos e arquitetura mais integrados à natureza, também considerando a própria humanidade como parte dela.

## TENSEGRITY E BIOMIMÉTICA: COMO PODEMOS CONSTRUIR ESTRUTURAS MAIS EFICIENTES?

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. 9, tradução própria<sup>4</sup>).

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. 9, tradução própria<sup>5</sup>).

Considerando o paradigma proposto por Pawlyn (2011), encontramos em Hsuan-An (2002) e Pires e Pereira (2017), formas sistematizadas de observação dos sistemas naturais. Para estes autores, o bom *design*<sup>6</sup> vem do processo de aguçar o olhar para extrair da natureza não somente a forma, mas também 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, em que quase nada é desperdiçado - este seria o ideal do *design* contemporâneo.

Para Littmann (2009), a concepção regenerativa é alcançada pela observação da integração dos sistemas envolvidos, da verificação de padrões (interdependência dos fenômenos), da noção de que não existe apenas uma solução e da busca pela implantação de sistemas ecológicos.

Pawlyn (2011) acrescenta que as estruturas transformáveis, sendo a *Tensegrity* uma delas, detém uma característica adaptativa, e isso se relaciona com a biomimética, pois esta faz com que as edificações adquiram um comportamento físico semelhante ao dos organismos vivos, ou seja, modifica-se conforme a resposta do meio em que estão.

---

<sup>4</sup> “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”.

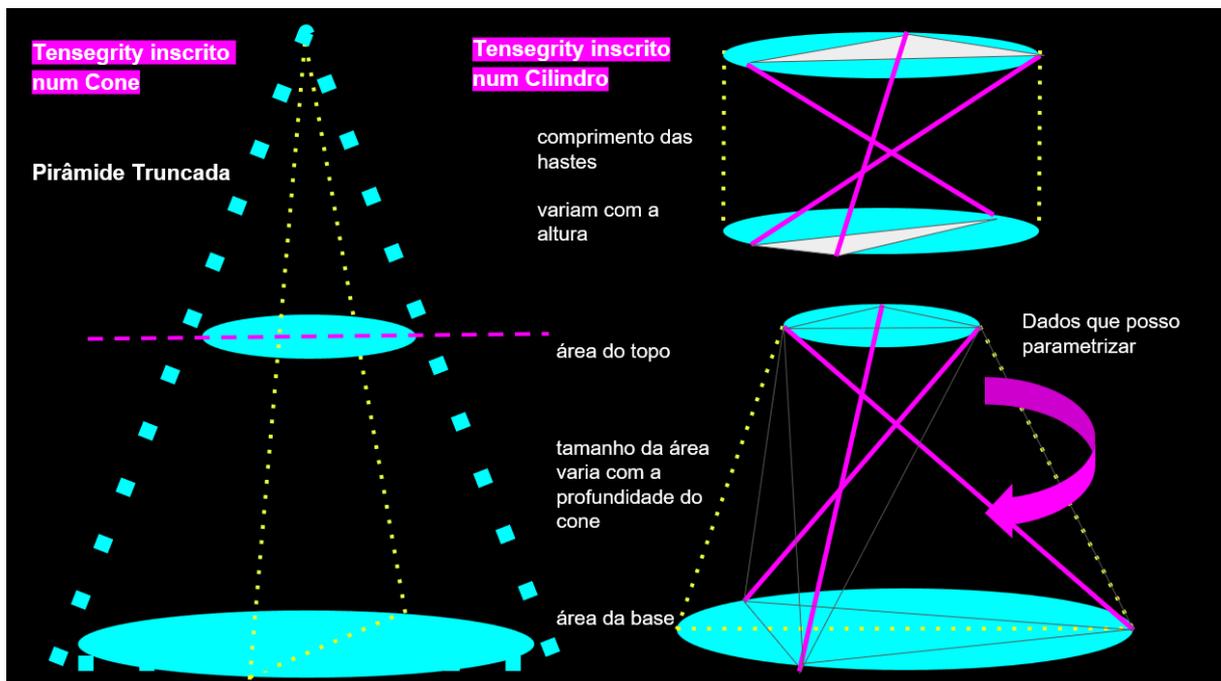
<sup>5</sup> “The principle for architecture that emerges from observing is: less materials, more design”.

<sup>6</sup> Entendemos o conceito de design enquanto processo de projeto, a despeito de várias interpretações e traduções para o termo advindo da língua inglesa.

As estruturas implementáveis podem se mover, expandir ou contrair ao alterarem suas propriedades geométricas, materiais ou mecânicas (Pawlyn, 2011, p. 35, tradução nossa<sup>7</sup>).

Verschleisser (2008) argumenta que Buckminster Fuller define *Tensegrity* como um oceano de tensão com ilhas de compressão e pondera, também, que Snelson (2012) sintetiza essa ideia com a definição de Compressão Flutuante. De acordo com 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, o que causa um autoequilíbrio. Isso significa que as *Tensegrities* não dependem da gravidade para manter sua estabilidade; elas necessitam de pré-esforço, como apontam 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 1:** O desenho mostra como observar padrões e relações da Tensegrity com geometrias e volumes já conhecidos.

**Fonte:** Do autor, 2022.

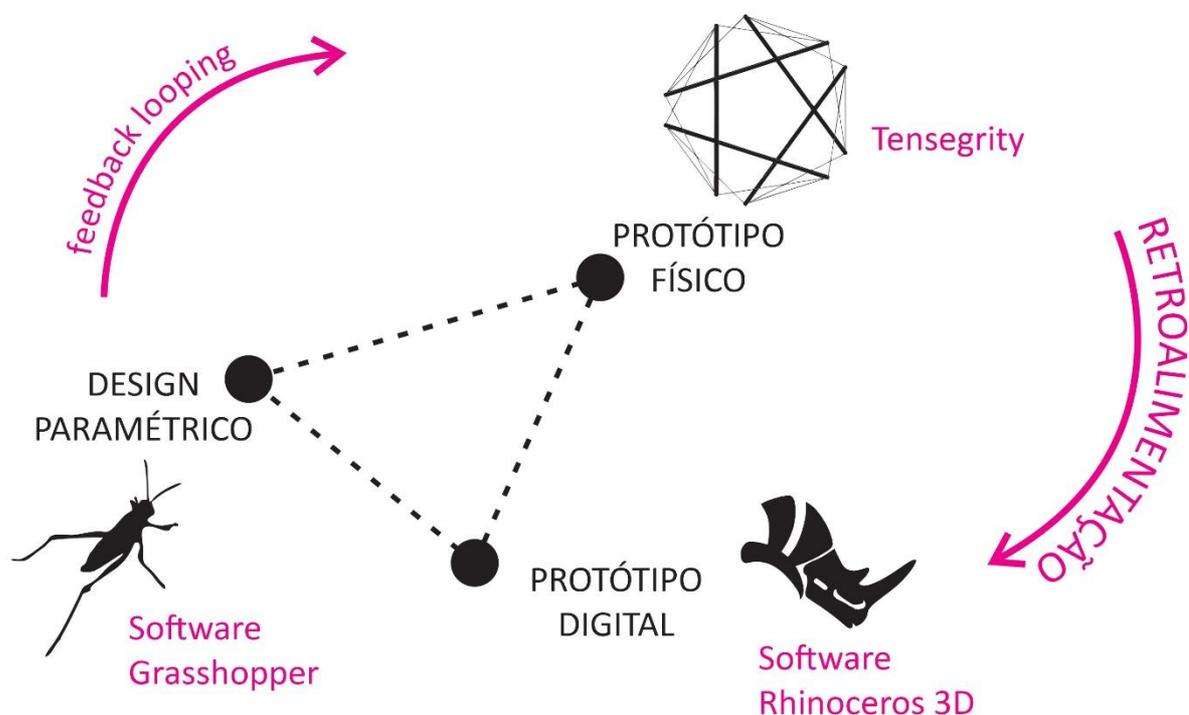
<sup>7</sup> "Deployable structures can move, expand or contract by changing their geometric, material or mechanical properties".

Assim, 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 1) 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.

## **METODOLOGIA**

A Cibernética de Segunda Ordem se concentra no 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, possibilitando a exploração de *feedback loops*, onde cada protótipo poderia corrigir os rumos do *design* produzido evolutivamente. O diagrama da Figura 2 ilustra a dinâmica do método proposto pela Cibernética de Segunda Ordem, aplicado para o *workshop*, o qual foi realizado *online*.

## CIBERNÉTICA DE SEGUNDA ORDEM



**Figura 2:** Diagrama ilustrando o feedback looping, conforme proposto pela Cibernética de Segunda Ordem, nas etapas realizadas no workshop.

**Fonte:** Do autor, 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), visamos 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 a 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 3);
- Aguçar o olhar para perceber certos padrões da natureza;
- Explorar esse conhecimento imaginando possibilidades em nossas vidas;
- Vislumbrar geometrias e o comportamento de estruturas que dispõem de inteligências mais elaboradas, como mobilidade, modularidade, reutilização e otimização de materiais;
- Experimentar materialidades diferentes;

Entender que a exploração e a experimentação são bases fundamentais que retroalimentam a dinâmica da pesquisa.



**Figura 3:** Analogia de estruturas naturais (colmeia) com as estruturas de tensegridade.  
**Fonte:** Do autor, 2023.

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

- 1º dia: aporte teórico, bibliografia, revisão de precedentes etc.;
- 2º dia: montagem de protótipos físicos em escala reduzida;
- 3º dia: treinamento *rhino/grasshopper* com estudo de *scripts*;
- 4º dia: orientações e desenvolvimento de projetos;
- 5º dia: orientações e desenvolvimento de projetos;
- 6º dia: apresentação dos resultados e discussões.

Deste modo iniciamos o *workshop*, exibindo estruturas, indicando e discutindo os padrões, a geometria, o movimento, entre 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 pensar Arquitetura e de produzir projetos é o primeiro passo a ser observado a partir da metodologia proposta, 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 as aplicações na engenharia, robótica e biologia. Num segundo momento, começamos a prototipagem com os participantes e, depois, num terceiro, foi dada a explicação 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. Essa 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.

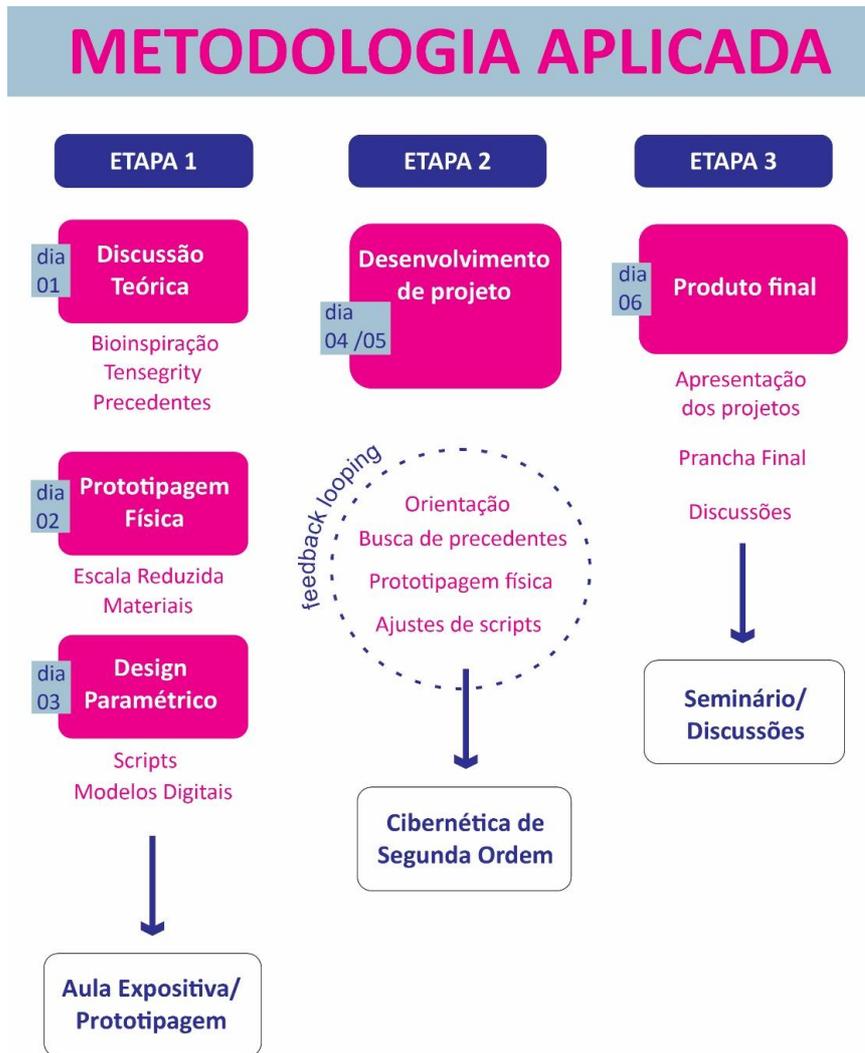
### **SEGUNDA ETAPA: CIBERNÉTICA DE SEGUNDA ORDEM**

No quarto dia, lançamos 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, em que pudemos acompanhar as pesquisas, assim como os desenvolvimentos retroalimentados pela prática dos protótipos nos *scripts* que foram desenvolvidos. Os alunos desenvolveram novos protótipos: um grupo criou seu próprio script, enquanto o outro aprimorou um script fornecido. Assim, ambos passaram pelas etapas de prototipagem, programação e análise, produzindo refinamentos e evoluções em um ciclo que só se encerra quando se atinge o objetivo esperado ou o que é possível alcançar, conforme o tempo disponível para a realização do *workshop*, que foi de cinco dias.

### TERCEIRA ETAPA: SEMINÁRIO

No último dia, os grupos apresentaram suas propostas, explicando as referências e os projetos desenvolvidos. Os resultados foram entregues em uma prancha final, conforme 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 da Figura 4 sintetiza o fluxo do processo metodológico aplicado:



**Figura 4:** Diagrama da metodologia aplicada.

**Fonte:** Do autor, 2023.

## DESENVOLVIMENTO

### Prototipagem Física

A partir das premissas e dos 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 5), também classificado por *Tensegrity* de Ordem 2, em que cada haste, não coplanar, encontra-se torcida em relação à base, a qual 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 essas estruturas precisam estar tensionadas para se estabilizarem; então, usamos elástico para facilitar o ajuste final (pois ele apresenta mais elasticidade que um barbante).



**Figura 5:** Os 3 tipos de *Tensegrity* que foram desenvolvidos pelos participantes

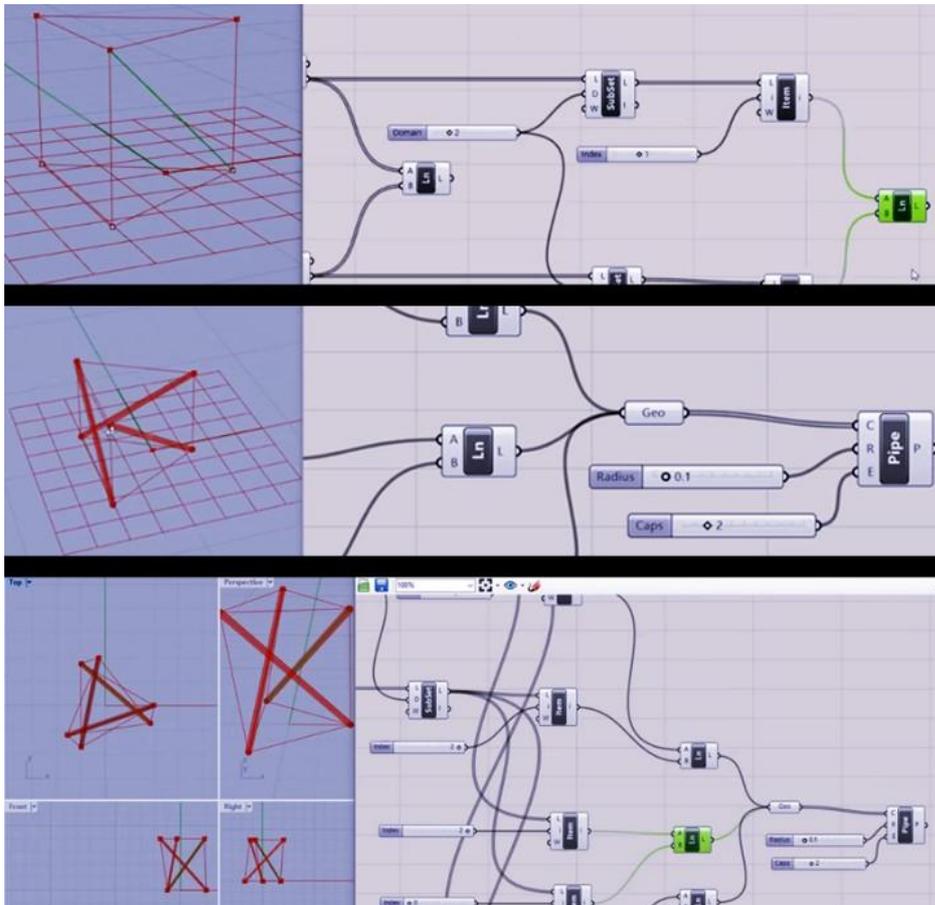
**Fonte:** Do autor, 2023.

A Figura 5 ilustra os três tipos de modelos produzidos por um dos participantes. Após essa etapa, começaram as simulações e modelagens digitais.

## 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, 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 partida 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). A seguir (Figura 6), 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.



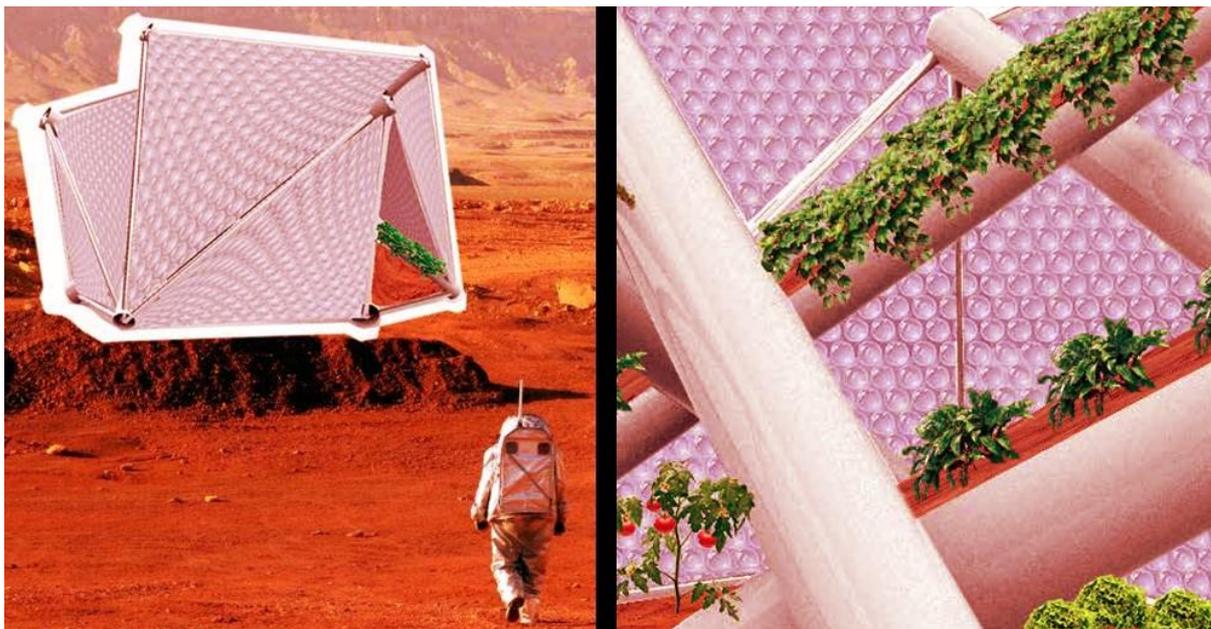
**Figura 6:** Desenvolvimento do *script* no *Grasshopper*, por meio das relações com as figuras prismáticas  
**Fonte:** Do autor, 2023.

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

Os participantes foram divididos em dois grupos e lançados dois desafios projetivos. O primeiro deles seria desenvolvido no Pantanal sul-mato-grossense, considerando-se a fragilidade do bioma e as 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 em Marte, em função das explorações que vêm ocorrendo e as facilidades de transporte e de montagem desse tipo de estrutura.

O grupo que desenvolveu o projeto para Marte propôs uma estufa (Figura 8), cujo objetivo principal consiste em produzir uma espacialidade/um dispositivo que possibilitasse o cultivo de alimentos orgânicos para colonizadores do planeta. O grupo argumentou que o projeto foi pensado sob a 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, será 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* composta por 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 8:** Estufa Marciana, projeto proposto pela equipe.

**Fonte:** Do autor, 2023.

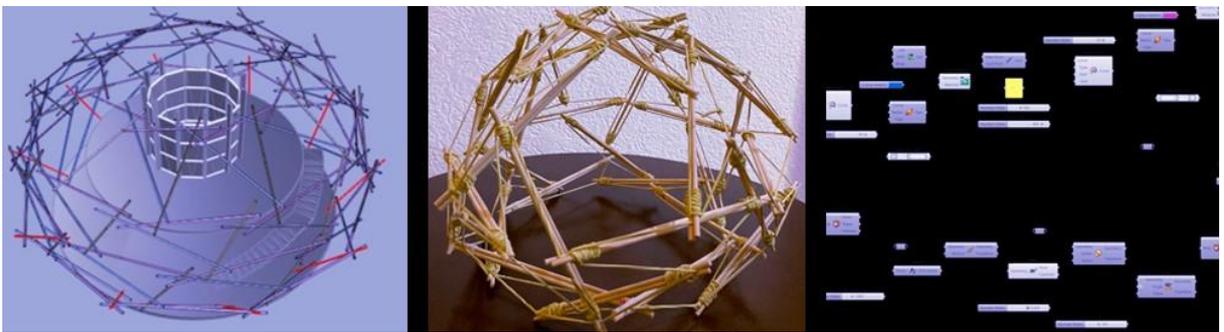
Já o grupo que fez o projeto para o Pantanal propôs uma base avançada para observação da vida natural. A equipe pesquisou sobre as características desse grande e frágil bioma e percebeu que o Pantanal abriga diversas comunidades biológicas, em nichos com características únicas. Nesse sentido, buscaram 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, conforme 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 9). Snelson (2012), em seu livro *Tensegrity, Weaving and the Binary World*, argumenta que as tecelagens têm conexões familiares com as estruturas de tensegridade. Essa equipe ampliou 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 10).



**Figura 9:** Desenvolvimento da modelagem paramétrica mediada pela prototipagem, realizado pela equipe que propôs o projeto para o Pantanal

**Fonte:** Do autor, 2023.

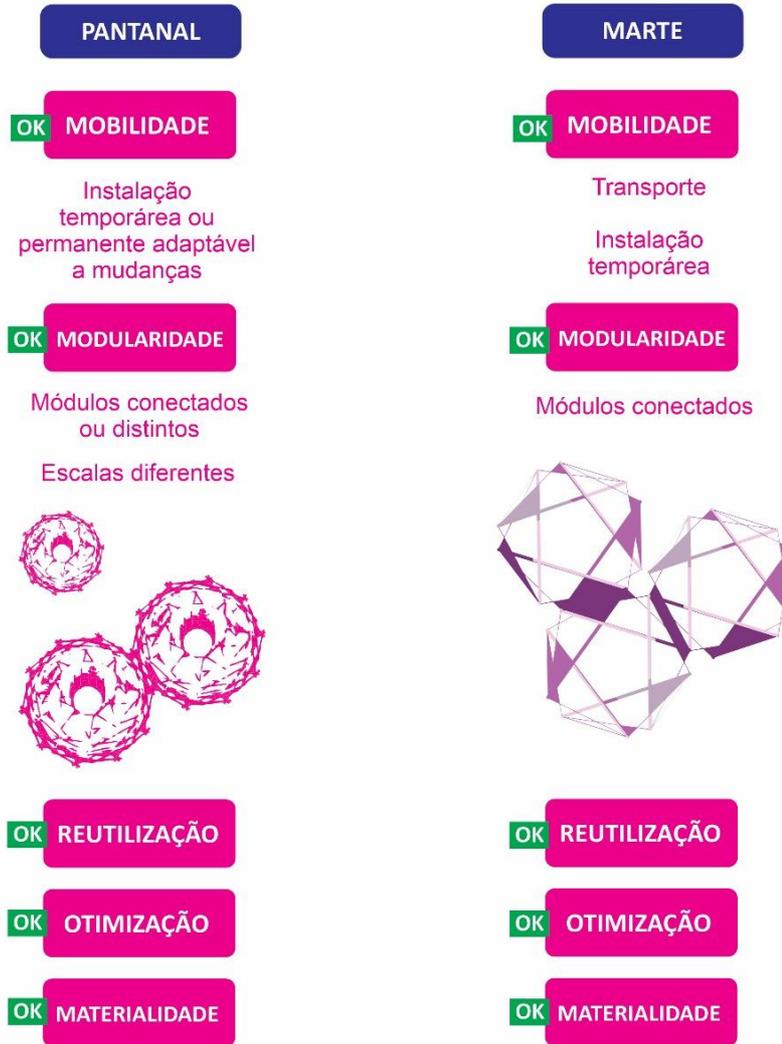


**Figura 10:** Arquitetura e coexistência, fotomontagem da equipe que propôs o projeto para o Pantanal

**Fonte:** Do autor, 2023.

O diagrama (Figura 11) e as Tabelas 1 e 2, na sequência, ilustram o resultado obtido pelos grupos em relação aos objetivos estipulados: mobilidade, modularidade, reutilização, otimização, materialidade.

# RESULTADOS



**Figura 11:** Diagrama dos resultados obtidos.

**Fonte:** Do autor, 2023

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

**Tabela 1:** Grupo Pantanal.

**Fonte:** Do autor, 2023.

<b>GRUPO MARTE</b>	
<b>Mobilidade</b>	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 como Marte. Dentre as estruturas de sistemas fechados em <i>Tensegrity</i> , o Icosaedro apresenta uma montagem mais fácil, por ser uma estrutura mais estável e por apresentar ao menos duas formas de montagem, podendo até mesmo ir pré-montado (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.
<b>Modularidade</b>	A equipe propôs um protótipo que serve como módulo, o qual pode ser reproduzido na quantidade necessária, conectando-se entre si, pela cobertura.
<b>Reutilização</b>	A estrutura projetada pode ser reutilizada tanto em questão da estrutura em si como em partes ou peças isoladas que podem ser substituídas, seja para manutenção, seja para mudança na escala do projeto, pois ela pode ser alterada.
<b>Otimização</b>	A <i>Tensegrity</i> Icosaedro é uma forma otimizável de estrutura. Além de 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.
<b>Materialidade</b>	A estufa terá uma cobertura feita de um material plástico com capacidade de proteção à alta radiação e a intempéries (não foram específicos quanto às características do material). Quanto às hastes, o grupo deixou em aberto para aço, madeira ou plástico.

**Tabela 2:** Grupo Marte.

**Fonte:** Do autor, 2023.

## DISCUSSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Se, por um lado, temos 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 e as 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 em Marte. A proposta se justifica, no primeiro caso, em função de um bioma extremamente frágil, 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 de as estruturas funcionarem independentemente da ação da gravidade e pela facilidade de transporte em espaçonaves, pelo pouco espaço que ocupam.

Muito além de somente aprender 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 colaborativamente. 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 do 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, conduziu 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, aprender e ensinar 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 torna maior o desafio é 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. 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.

## REFERÊNCIAS

- ALVES, G. M. **Cibersemiótica e processos de projeto**: metodologia em revisão. 2014. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, 2014.
- DUNN, N. **Digital Fabrication in Architecture**. London: Laurence King Publishing, 2012.
- HENSEL, M.; MENGES, A.; WEINSTOCK, M. **Emergent technologies and design**. New York: Routledge, 2010.
- HSUAN-AN, T. **Sementes do cerrado e design contemporâneo**. Goiânia: Editora UCG, 2002.
- IWAMOTO, L. **Digital fabrications: architectural and material techniques**. New York: Princeton Architectural Press, 2009.
- LITTMAN, J. A. **Regenerative Architecture**: a pathway beyond sustainability. 2009. 68p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e História da Arte) - Universidade de Massachusetts, Amherst, 2009.
- PAWLYN, M. **Biomimicry in Architecture**. London: RIBA Publishing, 2011.
- PIRES, J. F.; PEREIRA, A. T. C. **Modelagem Paramétrica da Geometria Complexa de Estruturas Regenerativas na Arquitetura**. In: CONGRESO DE LA SOCIEDAD IBERO-AMERICANA DE GRÁFICA DIGITAL, 21., 2017, Concepción. *Anais [...]*. Concepción: SIGraDi, 2017.
- SNELSON, K. **Tensegrity, weaving and the binary world**: Newton's third law and the duality of forces. [s.l.]: 2012. *E-book*.
- VERSCHLEISSER, R. **Aplicação de Estruturas de Bambu no Design de objetos**: como construir objetos leves, resistentes, ecológicos e de baixo custo. 2008. Tese (Doutorado em Artes e Design) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC), Rio de Janeiro, 2008.
- VICTOR, G.; SEIXAS, M.; RIPPER, J. L. M. **Estruturas autoportantes biotensegrity aplicando materiais Naturais**. In: ARRUDA, A. J. V. (Org.). *Métodos e processos em Biônica e Biomimética: a revolução tecnológica pela natureza*. São Paulo: Blucher, 2018. p. 152-71.
- ZHANG, J. Y.; OHSAKI, M. **Tensegrity structures**: Form, Stability, and Symmetry. Tokyo: Springer Japan, 2015.