

10

Tensegridade e cruzamentos –
princípios do design da natureza

Recebido em: 05/12/2023

Aprovado em: 26/12/2023

TENSEGRIDADE E CRUZAMENTOS – PRINCÍPIOS DO DESIGN DA NATUREZA

TENSEGRITY AND CROSSINGS – NATURE DESIGN PRINCIPLES

Christine Ribeiro da Rocha Alves

christinealves123@gmail.com – Universidade de Brasília (UnB)

Anésio de Leles Ferreira Filho

leles@ene.unb.br – Universidade de Brasília (UnB)

Resumo: Trata-se de um relato de parte de uma investigação sobre o design da natureza cujo conteúdo completo faz parte do projeto Curva Omnidirecional. Em tal projeto buscou-se identificar princípios norteadores do design da natureza, por meio de uma metodologia iniciada pela observação das estruturas naturais seguida por fundamentação teórica de caráter multidisciplinar e experimentos visando comprovar qualidades estruturais relacionadas ao princípio estudado. A tensegridade é um desses princípios. Ele será abordado em detalhes nesse artigo. Ele se refere ao equilíbrio das forças contrárias que atuam dentro de qualquer sistema e ou estrutura natural, sendo responsável por conferir, tanto às obras da natureza quanto às construções humanas os seguintes atributos: resistência, economia e leveza e estabilidade. Tais qualidades, bem como outras exclusivas das nossas estruturas, foram verificadas em nossos experimentos, comprovando o quão profícuo tal abordagem bioinspirada pode ser para o ideal da projeção sustentável.

Palavra-chave: bioinspiração, sustentabilidade, design da natureza, engenharia.

Abstract: *In this work, we report part of an investigation about the design of nature, whose complete content is part of the Omnidirectional Curve project. In this project, we sought to identify guiding principles of natural design, through a methodology initiated by the observation of natural structures followed by theoretical foundations of multidisciplinary nature and experiments aimed at proving structural qualities related to the principle studied. Tensegrity is one of these principles, which we will discuss in more detail in this article. It refers to the balance of opposing forces that act within any natural system and/or structure, being responsible for giving both to the works of nature and to human constructions the following attributes: resistance, economy, lightness and stability. Such qualities were verified in our experiments, proving how useful such a bio-inspired approach can be for the ideal of the sustainable design.*

Keywords: *bioinspiration, sustainability, design from nature, engineering.*

1. Introdução

A gênese do projeto Curva Omnidirecional assenta-se num antigo e persistente interesse pelas estruturas naturais. Ancorada por uma motivação artística e pelas experiências estéticas que os padrões da natureza evocam, costumava desenhá-los. Há cerca de 30 anos, deparei-me com um girassol na plenitude de sua forma. Aquelas espirais cruzadas repletas de minúsculos botões que constituem o miolo dessas flores, fisgaram-me a atenção de tal modo que cheguei a ouvir algo assim: “Aqui mora uma ‘verdade’”.

Desde então passei a considerar que tal “verdade” habitava os padrões naturais cujas curvas hipnóticas daquele miolo seriam um bom ponto de partida para quem quisesse conhecê-la. Como de costume, tentei reproduzir aquelas intrincadas curvas usando régua e compasso. Não demorou para que eu percebesse que, instrumentos e geometria básicos não dariam conta de tamanha complexidade. Foi natural que em seguida surgissem as perguntas: “Como são configuradas estas curvas?” “Por que elas são assim e não de outra forma?” Desde então, tais indagações se tornaram comuns diante de qualquer padrão natural os quais, por sua vez, indicavam que haviam princípios norteadores dessas formas.

Na medida em que se revelava a intrincada relação forma e função das estruturas sobre as quais me debruçava, ficava mais clara a ideia de que a natureza tem os segredos para o design sustentável, uma vez que ela combina os seus diversos repertórios formais para tornar suas funções o mais eficiente e otimizável possível.

Foi assim que este estudo começou a se sistematizar por meio de uma metodologia que inclui observação da natureza, identificação de princípios, fundamentação teórica na literatura atinente e experimentação ou concretização de estruturas. Por fim, o nome Curva Omnidirecional foi escolhido em referência às curvas do miolo do girassol que apontam sempre uma nova direção *ad infinitum*. Essa imagem passou a constituir um símbolo adequado ao grande desafio que consiste na busca por compreender o design da natureza. Um caminho complexo e cheio de cruzamentos surpreendentes.

Na primeira parte desse investimento pudemos identificar cinco princípios, a saber: proporção áurea, conservação/ continuidade, alternância, tensegriedade e curvas/ ondas. Começamos nosso relato apresentando brevemente tais princípios, na segunda seção. Na terceira, descrevo a metodologia empregada neste estudo. Na quarta seção, apresentamos o conceito de tensegriedade, sua história, suas aplicações na engenharia de acordo com a literatura atinente. Na quinta, discutimos sobre o caminho que nos levou a identificação desse princípio. Na sexta seção apresentamos os resultados principais dessa empreitada.

2. Cinco princípios

1. **Proporção áurea:** princípio identificado pela observação do miolo do girassol, cuja ordenação das inflorescências, segundo pesquisas recentes, tem por trás o ângulo de ouro.
2. **Continuidade/ Conservação:** princípio identificado a partir da observação do mundo vegetal onde as partes das plantas são diferenciações de uma única fonte: a semente. As partes das plantas não são coladas, soldadas ou aparafusadas. A semente conserva

em si todo o material necessário para formar o vegetal por completo de forma contínua. Esse princípio é bastante frequente na natureza, como observou Lavoisier no mundo atômico: “Na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma.” Podemos verificar a relação desse princípio com os atributos de resistência e economia.

3. **Alternância:** identificado pela observação das ramificações alternadas muito frequentes nos vegetais como também em órgãos e sistemas do corpo humano como o sistema circulatório e respiratório, este princípio está relacionado à otimização da distribuição das estruturas que as possuem, dentre outras qualidades estruturais.
4. **Tensegridade:** sobre este princípio, falaremos detalhadamente a partir da quarta seção.
5. **Curvas e Ondas:** princípio identificado por sua abundante presença no mundo natural e por sua manifestação frequente nos construtos experimentais do nosso projeto.

3. Metodologia

Etapas da metodologia empregada no projeto Curva Omnidirecional:

1. **Observação:** Os padrões são formas que se repetem. São indícios de que aquela forma fora “aprovada” no processo de evolução por ter se mostrado eficiente e por isso, se perpetua indefinidamente. A sua observação é o ponto de partida dessa metodologia.
2. **Identificação do princípio:** Os princípios estão por trás dos padrões que verificamos na natureza. A frequência com que aparecem nos leva a identificá-los como tal.
3. **Fundamentação teórica:** Busca-se respaldo ou refutação do princípio identificado, por meio de pesquisa multidisciplinar.
4. **Experimentação:** Construção de estruturas a partir dos princípios identificados onde busca-se averiguar qualidades estruturais inicialmente atribuídas a eles.
5. **Análise de resultados:** Levantamento de atributos relacionados ao princípio identificado nos construtos feitos na quarta etapa.

3.1. Informações complementares sobre a metodologia

3.1.1. Sobre a primeira etapa

A maioria dos princípios foram identificados pela observação da natureza. Entretanto, alguns foram sugeridos pelos próprios experimentos, como veremos na quarta seção.

3.1.2. Sobre a quarta etapa

Para garantir que o princípio identificado revelasse as qualidades estruturais supostamente relacionadas a ele, foram impostas regras de construção muito rígidas, com as quais acreditamos ter obtido resultados confiáveis. Tais regras podem ser resumidas em dois pontos principais.

- Em primeiro lugar, não é feito nenhum tipo de esboço prévio da estrutura, de modo que o resultado sempre fora imprevisto.
- Todos os elementos da construção, como técnicas e materiais, foram subordinados ao emprego dos princípios. Tudo isso fez dessa etapa da metodologia algo constantemente desafiador; mas por outro lado, proporcionou confiabilidade aos resultados além de nos obrigar a criar novas técnicas de construção que, por sua vez, foram responsáveis pelo avanço do projeto de modo geral e significativo. E, por fim, pelo caráter híbrido com o

qual iniciamos nosso projeto, os construtos derivados dessa etapa são chamados de Estrutura Artística de Experimentação (EAE).

Em seguida vamos a um breve histórico do quarto princípio: a tensegridade.

4. Tensegridade

“A palavra tensegridade, é uma invenção: é uma contração de integridade tensional.” (Fuller, 1975, tradução própria)¹. Assim, na década de 1950, o engenheiro Fuller cunhou o termo tensegridade e o aplicou em obras por meio de tecnologias próprias, além de divulgá-lo em publicações como em *Synergetics – Explorations in the Geometry of Thinking*:

A tensegridade descreve um princípio de relacionamento estrutural no qual a forma estrutural é garantida pelos comportamentos tensionais finitamente fechados e abrangentemente contínuos do sistema e não pelos comportamentos de compressão descontínuos e exclusivamente locais dos membros. A tensegridade fornece a capacidade de ceder cada vez mais sem, em última análise, quebrar ou desmoronar. (Fuller, 1975, tradução própria)¹.

A Enciclopédia livre, Wikipedia, traz a seguinte definição.

Tensegridade é a designação dada ao padrão que pode resultar de uma relação de mútuo incremento entre forças contrárias (tração e compressão). Enquanto a tração (puxar) é contínua, a compressão (empurrar) é descontínua. Em um sistema de tensegridade deste gênero, a tração e a compressão equilibram-se num círculo vetorial fechado onde os vários elementos do sistema se solidarizam com o fim de aumentar a estabilidade estrutural, mantendo-a” (Tensegridade, s.d.).

Fuller acreditava que o universo é omnitensional, ou seja, tudo na natureza se mantinha pela combinação equilibrada dessas forças que atuam em direções opostas, mas que são complementares. É interessante notar que a cooperação implícita no conceito da tensegridade reflete, também, a filosofia do engenheiro inspirado na natureza, que defendia uma visão cooperativa entre os humanos, e entre os homens e a natureza em prol do equilíbrio do todo.

4.1. Tipos de tensegridade

Embora Fuller tenha criado o termo e desenvolvido estratégias para sua obtenção, houve antes e depois dele, projetistas que chegaram a conceitos semelhantes, bem como propuseram outras maneiras de se obter tensegridade. Para destacar essas estratégias, abordaremos inicialmente, as cúpulas geodésicas de Fuller e a tensegridade inerente a esse tipo de estrutura. Em seguida, vamos relatar como Fuller e outros projetistas forjaram a tensegridade tendo como estratégia a combinação de dois materiais de propriedades distintas. Por fim, iremos destacar o papel dos cruzamentos na estabilidade tensional por meio da obra do artista letão, Karl Johansons.

¹ <http://www.rwgrayprojects.com/synergetics/s07/p0000.html>

4.1.1. Tensegridade dada pela forma

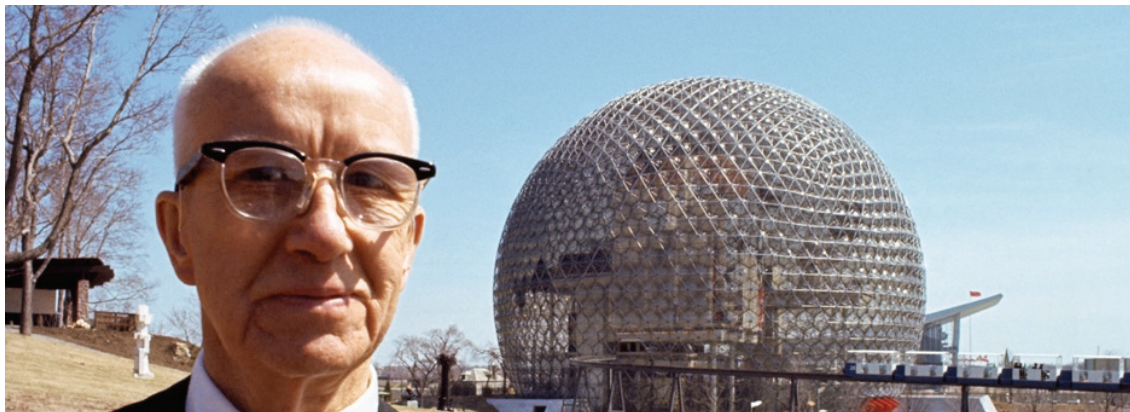


Figura 1 – Richard B. Fuller e uma de suas geodésicas. Fonte: Buckminster Fuller Institute, s.d.

Sempre observando o mundo natural, Fuller investigava um sistema de coordenadas diferentes do proposto por Descartes, algo que se aproximasse mais do mundo natural. Os frutos mais famosos desse empreendimento foram as cúpulas geodésicas ou domos geodésicos. Tais estruturas esféricas ou semiesféricas têm a superfície constituída por uma malha triangulada resultante de vários estudos para se alcançar uma combinação eficiente dos atributos de resistência, economia, leveza, estabilidade, etc. Partindo de um icosaedro, o engenheiro ensaiou diversas possibilidades de divisões até obter o resultado satisfatório e patentear sua inovação. O engenheiro americano entendia que suas invenções redondas eram obras de tensegridade.

Todos os domos geodésicos são estruturas de tensegridade, sejam ou não as diferenciações de tensão-compressão visíveis ao observador. As esferas geodésicas de tensegridade fazem o que fazem porque têm as propriedades de estruturas infladas hidraulicamente ou pneumaticamente. Estruturas pneumáticas, como bolas de futebol, proporcionam uma forma firme quando infladas porque as moléculas atmosféricas internas colidem contra a pele, esticando-a até torná-la arredondada. (Fuller, 1975, tradução própria)¹.

Apreende-se do texto que a tensegridade dessas estruturas estão relacionados à própria geometria esférica ou semiesférica, independentemente das linhas que compõem seu arcabouço ou do material que se emprega em sua construção. Certamente essas qualidades estão diretamente relacionadas à simetria omnidirecional das esferas e suas derivações. Segundo Thompson (1917), esferas são estruturas perfeitamente estáveis por sua configuração perfeitamente simétrica.

Renato Carrieri, em sua tese “Estruturas: a resistência pela forma, à luz da produção contemporânea” (2007) descreve o comportamento estrutural das cúpulas destacando suas qualidades estruturais atribuídas pela própria conformação curva. O arquiteto destaca que o seu desempenho extremamente favorável se deve, fundamentalmente, ao fato de que a flexão é reduzida pelo trabalho conjunto dos anéis horizontais, que trabalham, na verdade, como verdadeiros tirantes circulares associados aos meridianos. Ainda segundo Carrieri, tal simetria vista entre meridianos e paralelos trabalham em conjunto como agentes tensionais contrários promovendo o perfeito equilíbrio ao qual constitui o conceito de tensegridade. Suas qualidades estruturais estão diretamente relacionadas a essa característica exercida pela combinação

equilibrada de paralelos e meridianos em obras de alvenaria. Dessa forma, dispensa-se o uso de vigas e tirantes, imprescindíveis a construções feitas exclusivamente por linhas retas. Isso quer dizer que elas são autoportantes ou se sustentam pela própria geometria.

Por fim, as cúpulas geodésicas de Fuller são estruturas de tensegridade dadas pela forma. Mas o engenheiro americano encontrou um meio de forjar tal princípio em obras de formatos variados com base em dois tipos de materiais.

4.1.2. Tensegridade obtida a partir de dois tipos de materiais

Assim como Fuller acreditava na onipresença da tensegridade na natureza, inerentes a cada material, forças contrárias também atuam de modo a manter seus contornos. Alguns materiais suportam melhor as forças de compressão; outros suportam melhor as forças de tração, podem ser esticados ou tensionados. O engenheiro pensou em como combinar materiais que apresentassem propriedades tensionais diferentes: materiais rígidos e cabos flexíveis formando um todo integrado e equilibrado. Com isso em mente, projetou estruturas cujas forças contrárias, inerentes a cada material, combinam-se para, conjunta e simultaneamente, promoverem estruturas resistentes, leves e estáveis. Mas, embora o engenheiro americano tenha criado o nome desse princípio e divulgado como ninguém essa forma de construir, não foi o único a pensar nessa estratégia de unir dois materiais diferentes para concretizar estruturas a partir desse princípio. Na mesma época, na França, outro engenheiro, David Georges Emmerich, patenteou estruturas autotendentes a partir de estratégia semelhante, conforme conta Gomez-Jauregui em seu artigo, “Origens controversas da Tensegridade” (2009). Emmerich estudou de modo independente, a tensegridade ao mesmo tempo que Fuller e seu discípulo mais famoso, Snelson concretizavam suas obras de tensegridade nos Estados Unidos da América. Segundo Gomez-Jauregui, “Três homens foram considerados os inventores da tensegridade: Richard Buckminster Fuller, David Georges Emmerich e Kenneth Snelson” (Gomez-Jauregui, 2009).

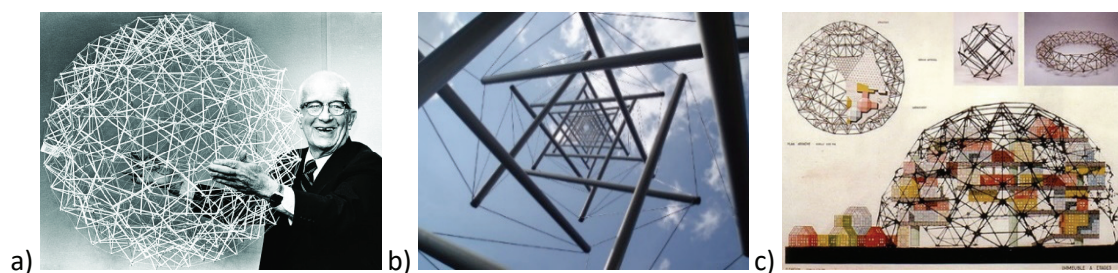


Figura 2 – a) Fuller. Fonte: Elipe, 2020; b) Kenneth Snelson, Needle Tower. Fonte: Tensegridade, s.d. c) *Urban Tensegrity* de Emmerich, 1958².

Todos esses tipos de estruturas foram pensados como um novo modo de construir, podendo ser empregado por engenheiros civis, designers industriais, arquitetos, etc. Abaixo imagens de uma

² Imagem retirada de Flap Studio, Pinterest, estruturas. Disponível em: <https://br.pinterest.com/pin/446137906836246128/>. Acesso em 10/12/2023.

obra de tensegridade na engenharia civil (Figura 3a), de um brinquedo da E Toy (Figura 3b) e uma plataforma de pouso (Figura 3c).

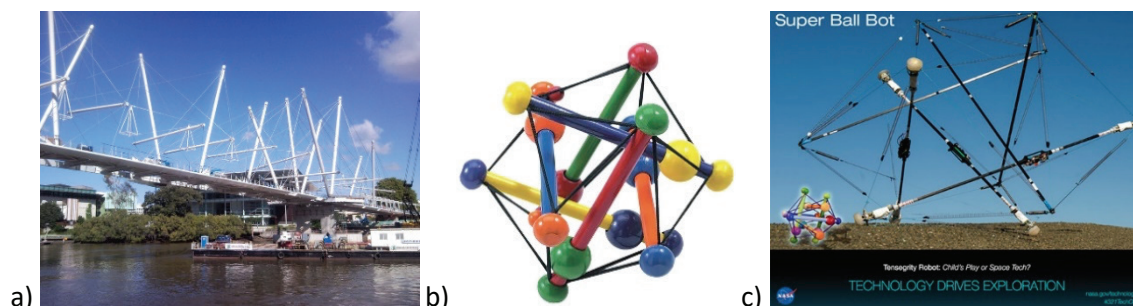


Figura 3 – a) Kurilpa Bridge, Austrália, 2009. Fonte: Kurilpa Bridge Construction, 2009. b) Brinquedo da Y Toy Fonte: Manhattan Toy, s.d. c) Super Ball Bot. Fonte: NASA, 2014.

4.1.3. Tensegridade por cruzamentos – conexões frias

Os projetistas da década de 1950 que exploraram a tensegridade a partir de dois tipos de materiais reconheceram as obras de um artista letão como precursoras de suas estratégias. Karlis Johanson, artista construtivista, participou da primeira exposição de arte Russa em Berlim no ano de 1922 com suas estruturas autoestabilizadoras. Não há muitas referências sobre o trabalho de Johanson, mas a Enciclopédia livre Wikipedia nos fornece uma noção clara do que o artista tinha em mente, no seguinte trecho:

O conceito fundamental em todo o trabalho de Johansons se relaciona a uma questão: como a estabilidade estrutural da tensão de tração ocorre quando os objetos são ligados com um simples contato sem fusão, adesivos ou reações químicas. Johansons chamou essas conexões simples de “frias” como alternativas aos rebites ou soldas “quentes”. Todas as juntas frias são cruzeiros.” Declarou Johanson, enquanto todo seu trabalho investiga interseções de materiais (Karlis Johansons, s.d., tradução nossa).

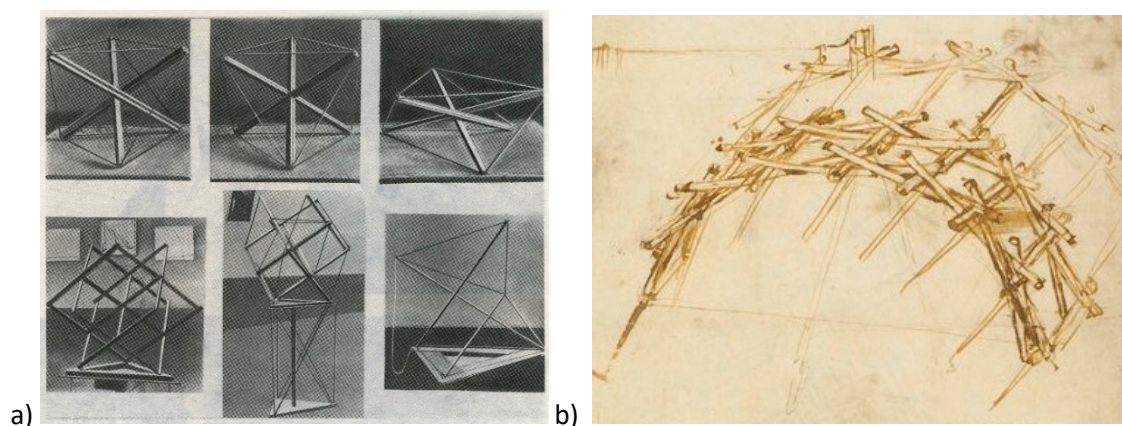


Figura 4 – a) Obras de Karlis Johansons. Fonte: Karlis Johansons, 1921. b) Ponte Militar de Leonardo da Vinci. Fonte: Engenharia e Arte, 2020

Três observações a partir da análise acima quanto ao ideal desse artista estão diretamente relacionadas ao projeto Curva Omnidirecional.

1. Johansons investigava maneiras de construir estruturas que dispensassem elementos de conexão, tais como parafusos, pregos, rebites, etc. Tal intento coincide com o princípio da conservação/ continuidade sobre o qual falamos na primeira seção desse artigo e voltaremos a falar adiante.
2. O princípio da tensegridade está implícito na sua obra quando revela o intento de obter estabilidade entre as forças de tensão e tração por meio dos cruzamentos.
3. Johanson entendia que os cruzamentos são estratégias para evitar o uso de componentes extras de conexão, ou soldas “quentes” e ao mesmo tempo, garantir a estabilidade da obra.

Podemos concluir a partir disso que, embora o artista tenha produzido suas obras três décadas antes do termo e do conceito de tensegridade de Fuller, suas obras correspondem ao mesmo princípio. Porém, Johanson foi um pouco além quando enxergou os cruzamentos como elemento estrutural importante. Não encontramos referências em que Fuller e demais projetistas de tensegridade da década de 1950 tenham dado atenção a esse ponto. Exceto, um dos mais famosos discípulos de Fuller: Kenneth Duane Snelson, escultor e fotógrafo contemporâneo que escreveu o artigo: *“Tensegrity, Weaving and the binary world”* (“Tensegridade, tecelagem e o mundo binário”), onde aponta a estreita relação entre as técnicas de tecelagem e a tensegridade: “A tecelagem e a tensegridade compartilham o princípio da alternância de direções helicoidais, da esquerda para a direita, de desvios no sentido horário e anti-horário.” (Snelson, s.d., p.16, tradução nossa).

Nota-se nessa publicação de Snelson o entendimento da estreita relação entre cruzamentos (base de qualquer tecelagem) e a sua participação na estabilidade estrutural. A técnica da tecelagem consiste em cruzar as linhas em sentidos opostos, uma puxa e a outra empurra. Esses cruzamentos se dão em espaços regulares havendo, portanto, uma simetria na distribuição desses pontos de tensão. Podemos notar isso na técnica do crochê, tricô, dentre outras similares.

Um bom exemplo de tensegridade dada por cruzamentos fica bem mais longe no tempo. A Ponte Militar de Leonardo da Vinci dispensa pregos, adesivos, ou amarras ou qualquer outra forma de conexão extra. Tudo se dá por “conexões frias”, conforme Johanson idealizava. O design dessa ponte conhecida também por ponte de emergência, possibilita a sua montagem e desmontagem de maneira rápida, preservando o material empregado nela. Sua sustentação vem do encaixe das concavidades feitas, baseadas na medida da circunferência da madeira. É esse encaixe feito por cruzamentos alternados que combina as forças de modo equilibrado e nos permite enquadrá-la na categoria de obra de tensegridade dada por cruzamentos.

Na fase da experimentação do projeto Curva Omnidirecional foram construídas muitas EAEs que são obras de tensegridade cujos cruzamentos são essenciais para suas estabilidades como o são para as obras de Karlis Johansons e como se vê na ponte de Leonardo da Vinci. No entanto, essa característica surgiu antes do entendimento do conceito de tensegridade de Fuller e de Johansons. Essas EAEs foram frutos do segundo e terceiro princípios (conforme apresentado na seção 2 desse artigo) e foi a partir da sua observação que pudemos chegar ao princípio da tensegridade. A partir da próxima seção, pretendemos relatar mais detalhadamente esse processo.

5. Jogo de tensão – como a tensegridade foi identificada

A identificação do quarto princípio: tensegridade, foi sugestionado pelas próprias EAEs, frutos da experimentação do princípio da conservação/ continuidade, e não por algo natural como o foram identificados os princípios anteriores. Abaixo a imagem de algumas dessas estruturas.

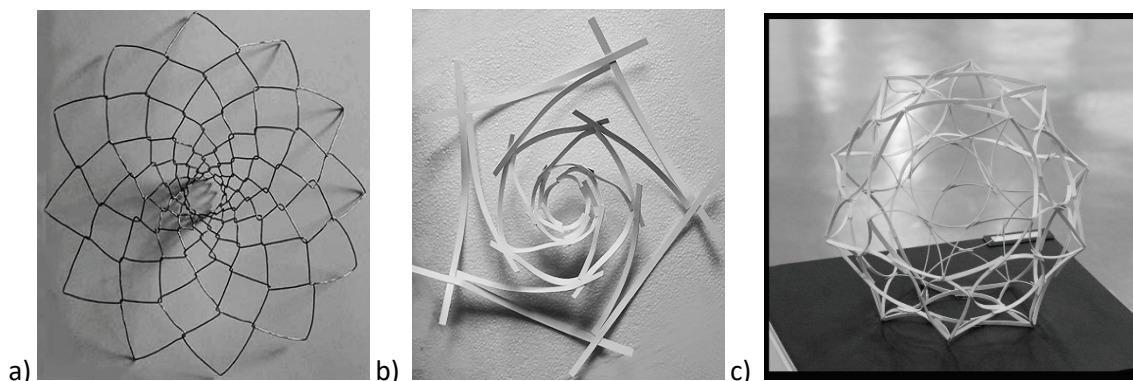


Figura 5 – a) EAE Buraco Negro. Autora: Christine Rocha. b) EAE F5. Autora: Christine Rocha. c) EAE Sólido Geométrico. Autora: Christine Rocha

Portanto, para relatar como chegamos à tensegridade, faz-se necessário detalhar um pouco mais sobre o segundo princípio. A conservação/ continuidade pode ser explicada com a famosa frase de Lavoisier: “Na natureza, nada se perde, nada se cria, tudo se transforma.” O princípio da conservação da matéria (1789) foi formulado pelo químico francês, observando o mundo subatômico. Mas a ideia de conservação também ocupou a mente de outros pesquisadores que o observaram e investigaram em outras dimensões do mundo natural. Em “A ciência de Leonardo da Vinci”, Capra escreve:

Leonardo viu essa conservação de volume como um princípio geral governando todas as mudanças e transformações das formas naturais, sejam corpos sólidos movendo-se no espaço ou corpos elásticos mudando de forma. (Capra, 2008, p.211)

Assim como o italiano e o francês, o alemão Goethe observava tal princípio nas plantas. Em 1790, o naturalista e poeta escreveu “A Metamorfose das plantas” onde expõe sua tese de que todas as estruturas botânicas são metamorfoses de um órgão basal. Observando o mundo vegetal podemos ver que tudo começa com uma pequena semente, um único pacote material que alimentada pela energia do sol e do solo dá partida a uma série de transformações que culmina na plenitude do vegetal. Parte da raiz vai virar caule, parte desse se modificará em folha e as flores serão derivadas da metamorfose de algumas folhas. “...nada se perde”. De modo geral é assim que acontece o desenvolvimento dos vegetais. Não há acréscimos de matéria, nem uso de componentes extras para colar ou soldar umas partes nas outras.

Nossos processos de criação são bem diferentes. Geralmente construímos partes e as conectamos usando algo extra adequado a cada produto. Neri Oxman, pesquisadora bioinspirada, critica a forma como construímos dizendo:

Linhas de montagem ditavam um mundo feito de partes, enquadrando a imaginação de projetistas e arquitetos que foram treinados para pensar nos seus objetos como resultado de partes com funções distintas. (...) Nossas peles faciais são finas com

grandes poros. Nossa pele das costas é mais espessa, com poros pequenos. Uma atua em especial como filtro, a outra, em especial como barreira, e ainda é a mesma pele: sem partes, sem montagens (Oxman, 00:54,2015).

A artista e cientista israelense conta com alta tecnologia no Massachusetts Institute of Technology onde atua como professora e pesquisadora, para fazer seus experimentos, e mesmo assim os desafios inerentes a essa prática são grandes.

Da nossa parte, o jeito que encontramos de construir algo com essas características, foi tramando um único fio de cobre, como um crochê, onde uma “linha” passa por cima enquanto o outro passa por baixo até que os dois se encontrem encerrando a obra com único ponto de solda. Assim emergiu uma superfície com dupla curvatura (positiva e negativa) cujo centro se afunila de modo a formar um buraco, por isso o nome “Buraco Negro” (Figura 5a). O cruzamento dos fios em pontos estratégicos dessa EAE permite que ela se sustente sem nenhum apoio extra, sem emprego de componentes de conexão para unir juntas.

A EAE Buraco Negro despertou nossa atenção pela estabilidade e por sua topologia. A pergunta que fizemos de imediato foi: “Se tivéssemos feito essa estrutura soldando seus diversos losangos, seria possível essa curvatura natural e simétrica?” “Se não tivéssemos feito cruzando fios, ela seria tão estável?” Essas questões nos fizeram enxergar o papel dos cruzamentos usados nessa peça como estratégia para criação de algo contínuo que dispensassem os já mencionados componentes de conexão. Notamos que nesses cruzamentos ocorria uma espécie de “jogo de tensão” onde, em pontos simetricamente dispostos, uma força puxa enquanto a outra empurra mantendo o todo equilibrado.

Após termos desenvolvido muitas outras estruturas, com técnicas diferentes, mas a partir dos mesmos princípios, seria hora de investigar o que chamávamos até então de “jogo de tensão”. Foi assim que, encontramos o termo tensegridade que, por sua vez, nos levou ao entendimento do papel dos cruzamentos como substituto dos componentes de conexão extras, os quais surgiram no meu trabalho pela experimentação do princípio da conservação/ continuidade. Na esteira da pesquisa sobre a tensegridade de Fuller e demais projetistas da década de 50 veio o conhecimento do pioneirismo de Johansons conforme relatamos na seção anterior.

Os cruzamentos, a partir de então, se tornaram parte de técnicas de construções diferentes as quais possibilitaram uma grande variedade de formas com qualidades estruturais muito interessantes. Dentre elas, destacamos as EAEs: Chau 6, Chau 5 e Chau 4 (Figura 6).

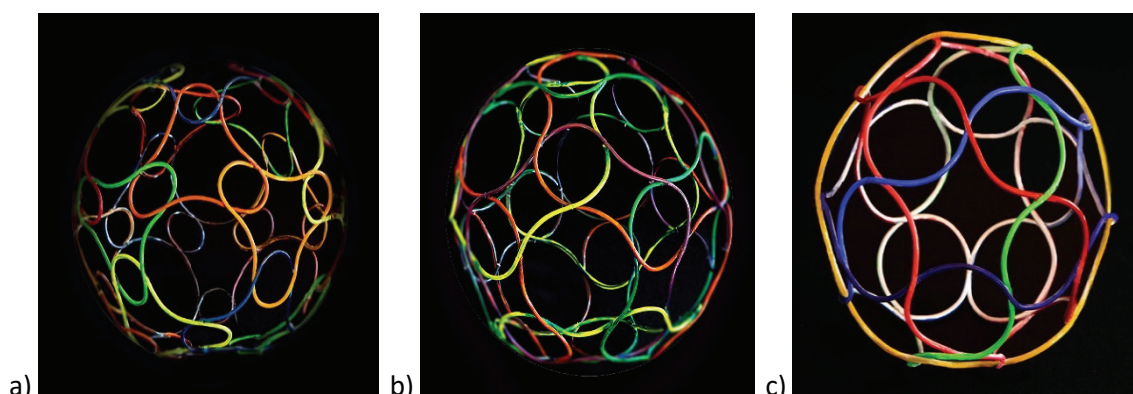


Figura 6 – a) CHAU 6. Autora: Christine Rocha. b) CHAU 4. Autora: Christine Rocha. c) CHAU 5. Autora: Christine Rocha

Essas EAEs foram realizações muito importantes na nossa pesquisa, não só pelas propriedades complexas próprias dos sólidos esféricos, mas pela riqueza de informações que obtivemos, provocadas por suas peculiaridades.

A superfície esférica onde espaços vazios se distribuem de forma simétrica ocorre na natureza em minúsculos seres chamados radiolários. Eles são protozoários ameboides fielmente retratados pelo naturalista e artista alemão, Ernest Haeckel e também são apontados como fonte de inspiração para vários projetos, inclusive as cúpulas geodésicas de Fuller.

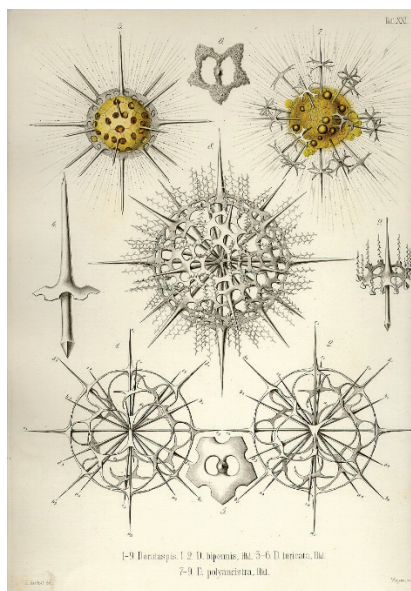


Figura 7 – Ilustrações de radiolários de Ernest Haeckel, “Plate 21”³.

³ Ernst Haeckel: Die Radiolarien (RHIZOPODA RADIARIA). Disponível em: <https://www1.biologie.uni-hamburg.de/b-online/radio/index.html>. Acesso em 12/12/2023.

5.1. Atributos relacionados ao emprego da tensegridade

Ao projetar cúpulas geodésicas, Fuller tinha em mente construir abrigos resistentes, leves, econômicos e estáveis. As estruturas esféricas ou semiesféricas, conforme vimos na seção 4, têm em si uma série de propriedades que pela própria geometria favorece tais qualidades estruturais. O princípio por trás desses atributos é a tensegridade. As EAEs Chaus são estruturas esféricas e, portanto, podemos inferir possuir os mesmos atributos. Mas, além da tensegridade inerente à sua geometria, temos também os cruzamentos que, conforme idealizou Johansons é tanto um elemento de estabilidade quanto um meio eficaz de se construir evitando soldas “quentes” nas juntas. Muitas das EAEs onde os cruzamentos tinham como finalidade substituir pregos, parafusos, rebites, dentre outros componentes extras de conexão, se revelaram estáveis, provando que realmente os cruzamentos distribuídos de modo simétrico nas estruturas cumprem o papel de “soldas frias”.

Sabemos que os pontos fracos de qualquer obra estão nas juntas, nas emendas, nos locais onde o material precisou ser reconectado. Estas conexões significam mais materiais, mais energia, mais trabalho, onerando a obra; daí um dado relacionado à economia. Na mesma linha de pensamento, esses componentes extras de conexão, por menores que sejam, aumentam o volume da obra, tornando-as, inevitavelmente, mais pesadas. Esses resultados confirmam que as qualidades estruturais de resistência, leveza, economia e estabilidade estão diretamente relacionadas ao princípio da tensegridade. Mas também estão relacionados com o princípio da conservação/ continuidade e igualmente, com o terceiro princípio, alternância, conforme pode ser lido na segunda seção. Na verdade, uma das lições extras que aprendemos sobre a natureza é que seus princípios são interdependentes, qualidade esta que também pode se tratar de um princípio. Nessa perspectiva, há um atributo e ao mesmo tempo um princípio que apresentamos como diferencial em nossas estruturas, comparadas às demais obras de tensegridade: as curvas, o quinto princípio investigado em nosso projeto.

A maioria de nossas EAEs tem superfícies curvas, ainda que tenhamos partido de um material reto como uma folha ou um arame. A natureza, especialmente a natureza viva, tem uma preferência clara pelas curvas. Nas EAEs (Figuras 5 e 6), bem como outras tantas desenvolvidas ao longo do projeto Curva Omnidirecional, essa configuração deriva dos cruzamentos alternados que tem um papel também na modelagem das estruturas. Portanto, nelas os cruzamentos não estão somente contribuindo para estabilidade e economia da estrutura mas, ao mesmo tempo, participam da configuração final da estrutura no que tange a sua superfície curva. Assim como nas obras de cestaria, tecelagem e afins, as curvas são o resultado da combinação da geometria e dos cruzamentos. Na EAE Buraco negro, nota-se uma curva que começa a crescer e sobe até começar a se declinar novamente nas bordas. As CHAUs (Figuras 6) têm uma superfície de curvatura positiva. Devemos lembrar que tais características não foram, sequer, imaginadas. Elas foram fruto do emprego de determinados princípios conforme explicamos anteriormente.

Não encontramos nenhuma obra de tensegridade feita por Fuller ou seus contemporâneos que realmente tenham superfície curva. Isso também se aplica as obras de Johansons. As cúpulas geodésicas de Buckminster Fuller forjam uma curvatura ao empregar uma malha rica em subdivisões triangulares. Cada aresta desses triângulos é reta e não literalmente curvas. Embora Fuller tenha tentado recriar as curvas da natureza em suas cúpulas, teve que lançar mão de artifícios para simular curvaturas. Isso demonstra o quanto é desafiador, até mesmo para

grandes engenheiros, conseguir estruturas realmente curvas. As curvaturas reais nas obras feitas pelos homens até hoje, são dadas pelo emprego de fôrma e força contribuindo para o maior gasto de material e energético.

Ainda que, nos últimos tempos, podemos contar com uma série de aparatos tecnológicos como *software* de design generativos, máquinas de corte eletrônicas, impressão 3D, dentre outras, que ampliaram nossa liberdade criativa infinitamente, construir obras de formato curvo, é bastante oneroso do ponto de vista energético, principalmente na montagem dessas obras. Em muitos casos demandam artifícios que incluem uma quantidade significativa de componentes extras de conexão e todos os gastos relativos a esse tipo de tecnologia.

Na natureza, as curvas emergem do tecido geométrico que as compõe, onde, num nível mais fundamental, átomos se organizam espacialmente e formam moléculas. Estas se combinam até se revelarem aos nossos olhos como estruturas curvas. Sabemos que as pétalas das flores não são feitas sobre uma forma de modelagem. Nada a força a ser como tal. Da mesma maneira, não se pode planificá-la sem causar danos à sua superfície. Assim, embora ainda estejamos muito longe de atingir o nível de eficiência da natureza em nossos projetos, acreditamos ter conseguido pistas importantes para obtenção de curvaturas variadas, econômicas e eficientes no projeto Curva Omnidirecional.

6. Conclusão

O projeto Curva Omnidirecional continua na busca de identificar princípios por trás das grandes obras da natureza com o fim de neles encontrar maneiras de projetar com sustentabilidade. Espero ter demonstrado o quão profícuo esse caminho se revelou, embora tenha destrinchado, nesse artigo, apenas um dos princípios identificados nessa trajetória: a tensegridade. Sobretudo, desejo que os resultados colhidos até aqui possam vir a somar significativamente aos resultados que outras abordagens, que veem a inspiração na natureza como um caminho para tornar nossas práticas mais eficientes, econômicas, duradouras, leves, estáveis, etc; enfim, com todos os atributos já alcançados pela natureza, por anos de evolução.

Referências

BUCKMINSTER FULLER INSTITUTE. Introduction to Buckminster Fuller. **Buckminster Fuller Institute**. Disponível em: <https://www.bfi.org/about-fuller/biography/introduction-to-buckminster-fuller/>. Acesso em: 23 dez. 2023.

CAPRA, Fritjof. **A Ciência de Leonardo da Vinci**. São Paulo: Cultrix, 2008.

CARRIERI, Renato. **Estruturas**: a resistência pela forma, à luz da produção contemporânea. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

ELIPE, M^a Dolores Álvarez. Ensegrities and Tensioned Structures. **Journal of Architectural Environment & Structural Engineering Research**, v. 3, n. 3, jul. 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/343652287_Ensegrities_and_Tensioned_Structures#fullTextFileContent. Acesso em: 22 dez. 2023.

EMMERICH, David Georges. Emmerich on Self-tensioning Structures. **Sage Journals**, v. 21, n. 1, mar. 2006. Disponível em : <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1260/026635106777641144?journalCode=spsa>. Acesso em: 20 dez. 2023.

ENGENHO & ARTE. A ponte de emergência para a outra margem de Leonardo da Vinci. 2020. Disponível em <https://www.engenhoearte.info/post/a-ponte-de-emerg%C3%Aancia-para-a-outra-margem-de-leonardo-da-vinci>. Acesso em: 05 dez. 2023.

FULLER, Richard Buckminster. **Synergetics**: explorations in the geometry of thinking. New York: Macmillan Publishing Company, 1975. Disponível em: <https://www.bfi.org/about-fuller/bibliography/books-by-fuller/>. Acesso em: 22 dez. 2023.

GOETHE, Johann W. V. **A Metamorfose das Plantas**. São Paulo: Edipro, 2019. Disponível em: https://www.google.com.br/books/edition/A_Metamorfose_das_Plantas/pTuZDwAAQBAJ?hl=pt-BR&gbpv=1&printsec=frontcover. Acesso em: 23 dez. 2023.

GOMEZ-JAUREGUI, Valentin. Controversial Origins of Tensegrity. *In*: Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium, 2009. **Anais [...]**. Valencia: Universidad Politecnica de Valencia, 2009, p. 1642-1652. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/50838903_Controversial_Origins_of_Tensegrity. Acesso em: 20 dez. 2023.

KARLIS JOHANSONS. *In*: WIKIPÉDIA: a enciclopédia livre. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Karlis_Johansons. Acesso em: 20/12/2023.

KURILPA BRIDGE CONSTRUCTION. *In*: WIKIPÉDIA: a enciclopédia livre. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Kurilpa_Bridge#/media/File:KurilpaBridgeConstruction7.JPG. Acesso em: 22 dez. 2023.

MANHATTAN TOY. Skwish Classic. **Manhattan Toy**. Disponível em: <https://www.manhattantoy.com/products/skwish-classic>. Acesso em: 18 dez. 2023.

NASA. Super Ball Bot. **Nasa**. 2014. Disponível em: <https://www.nasa.gov/image-article/super-ball-bot/>. Acesso em: 02 dez. 2023.

OXMAN, Neri. O design na interseção da tecnologia e da biologia. **Palestra TED, Ideas Worth Spreading**. 2015. Disponível em: https://www.ted.com/talks/neri_oxman_design_at_the_intersection_of_technology_and_biology/transcript?awesm=on.ted.com_8x4q&language=pt. Acesso em: 22 dez. 2023.

SNELSON, Kenneth. **Tensegrity, weaving and the binary world**. Disponível em: http://kennethsnelson.net/Tensegrity_and_Weaving.pdf. Acesso em: 22 dez. 2023.

TENSEGRIDADE. *In*: WIKIPÉDIA: a enciclopédia livre. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Tensegridade>. Acesso em: 20 dez. 2023.

THOMPSON, D'Arcy Wentworth. **On growth and form**. Cambridge: University Press, 1917. Disponível em: <https://www.gutenberg.org/files/55264/55264-h/55264-h.htm>. Acesso em: 10 jan. 2021.

