



Curva Omnidirecional e o princípio da Tensegridade

Omnidirectional Curve and the principle of tensegrity

Primeiro autor: Christine Ribeiro da Rocha Alves

Christinealves123@gmail.com

Segundo autor: Anésio de Leles Ferreira Filho

leles@ene.unb.br

[Linha temática: T7. *Design* biofílico, *Design* bioinspirado, Biônica, Biomimética]

Resumo:

Relatamos nesse artigo parte de uma investigação sobre o design da natureza cujo conteúdo completo faz parte do projeto Curva Omnidirecional. Em tal projeto buscamos 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, sobre o qual abordaremos mais detalhadamente 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. Tais qualidades foram verificadas em nossos experimentos, comprovando o do quão proficuo tal abordagem bioinspirada pode ser para o ideal de 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 the complete content is part of the Omnidirectional Curve project. In this project, we seek to identify guiding principles of natural design, through a methodology initiated by the observation of natural structures followed by theoretical foundations of a 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 the works of nature and human constructions the following attributes: resistance, economy and lightness. Such qualities were verified in our experiments, proving how useful such a bio-inspired approach can be for the ideal of 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. A 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. Logo, ficou claro que, instrumentos e geometria básicos não dariam conta de tamanha complexidade. Logo surgiu a seguinte pergunta: *Como são configuradas estas curvas e por que elas são assim e não de outra forma?*

Desde então, tal pergunta se tornou comum 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. Com essa perspectiva, um estudo começa 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 escolhida em referência as 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 5 princípios, a saber: Proporção áurea, Conservação/continuidade, Alternância, Tensegridade e Curvas/ondas. Começo meu relato apresentando brevemente tais princípios, na primeira seção. Na segunda, descrevo a metodologia empregada nesse estudo. Na terceira seção, apresento o conceito de tensegridade, sua história, suas aplicações na engenharia de acordo com a literatura atinente. Na quarta, discorro sobre o caminho que me levou a identificação desse princípio. Na quinta seção apresento os resultados principais dessa empreitada. E, por fim a conclusão.

1. Cinco primeiros princípios do projeto Curva Omnidirecional.

1º. Proporção áurea: identificado como princípio pela observação do miolo do girassol, no qual, segundo pesquisas recentes, tem por trás da ordenação de suas inflorescências, o ângulo de ouro.

2º. Continuidade/Conservação: identificado a partir da observação do mundo vegetal onde as partes das plantas são diferenciações de uma única fonte: a semente. Assim como as partes das plantas dispensam conectores extras, podemos observar

essa constante na natureza: estruturar suas obras de forma mais contínua, proporcionando uma maior resistência da mesma.

3º. Alternância: identificado pela observação das ramificações muito frequentes nos vegetais como também em órgãos e sistemas do corpo humano como o sistema circulatório e respiratório, esse princípio está relacionado a otimização da distribuição das estruturas que as possuem, dentre outras qualidades estruturais.

4º. Tensegridade: identificado pela observação de algumas estruturas construídas dentro do próprio projeto Curva Omnidirecional. Está por trás de estruturas naturais promovendo qualidades tais como: resistência, economia, leveza, etc.

5º. Curvas e Ondas: identificado frente por sua abundância no mundo natural e por sua manifestação frequente nos construtos experimentais do nosso projeto.

2. Metodologia

Etapas da Metodologia empregada no projeto Curva Omnidirecional

1ª- 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 observação dos mesmos é o ponto de partida dessa metodologia.

2ª- Identificação do princípio: Os princípios estão por trás dos padrões que verificamos na natureza. A frequência com que aparecem nos leva a identifica-los como tal.

3ª- Fundamentação teórica: Busca-se respaldo ou refutação do princípio conjecturado por meio de uma pesquisa multidisciplinar.

4ª- Experimentação: Construção de estruturas a partir dos princípios identificados onde busca se averiguar qualidades estruturais inicialmente atribuídas aos mesmos.

5ª- Análise de resultados: Levantamento de atributos relacionados ao princípio identificado nos construtos feitos na 4ª etapa.

Isso posto, faz-se necessários complementar algumas informações especificamente a respeito da primeira e quarta etapas dessa metodologia.

*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.

*Sobre a quarta etapa: para garantir que o princípio identificado revelasse as qualidades estruturais supostamente relacionadas ao mesmo, foram impostas regras de construção muito rígidas, com as quais acreditamos ter obtido resultados confiáveis:

1º. Não são feitos nenhum tipo de esboço prévio da estrutura, de modo que o resultado sempre fora imprevisto.

2º. 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).

3. Tensegridade

“A palavra tensegridade, é uma invenção: é uma contração de integridade tensional.” Buckminster Fuller (1986) 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 seus livros. O norte americano já defendia nessa época, a bioinspiração como meio de tornar nossos projetos menos danosos ao meio ambiente. Grande parte de seu pensamento e seus projetos foram publicados na obra: *Synergetics – Explorations in the Geometry of Thinking*, 1986, onde pode ser lido: *“Todas as estruturas, devidamente compreendidas, desde o sistema solar até o átomo, são estruturas de tensegridade.”* A enciclopédia livre nos traz uma definição mais clara:

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 vectorial fechado onde os vários elementos do sistema se solidarizam com o fim de aumentar a estabilidade estrutural, mantendo-a. (2010)

Fuller também mostrou que essas forças não são opostas, mas complementares. São como outros pares na natureza que se complementam para gerar equilíbrio. É possível perceber que essa visão da tensegridade traduz-se no pensamento filosófico do engenheiro também, pois ele pregava uma visão cooperativa entre os homens e entre homens e natureza, em prol do equilíbrio do todo. Visão holística esta que, a propósito, é tão atual quanto prementes em nossos dias.

3.1. 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. Em seguida, iremos destacar o papel dos cruzamentos na estabilidade tensional por meio da obra do artista letão, Karl Johanson.

3.1.1. Tensegridade dada pela forma

Fuller ficou também conhecido como o pai das cúpulas geodésicas. Em um determinado período de suas investigações, o projetista bioinspirado investigava um sistema de coordenadas diferentes do proposto por Descartes, algo que se aproximasse mais do mundo natural.

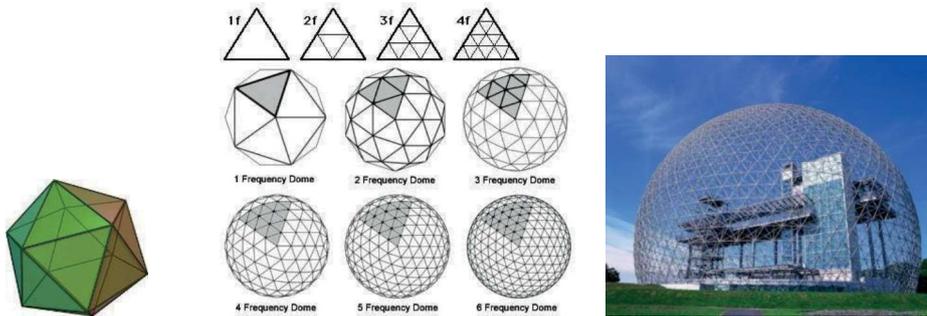


Figura 1: icosaedro

Figura 2 – Esquema de geodésicas

Figura 3: Cúpula geodésica

As cúpulas geodésicas de Fuller tem a superfície revestida por uma malha triangulada muito bem estudada para gerar algo mais próximo possível de uma forma esférica. Partindo de um icosaedro o engenheiro ensaiou diversas possibilidades de divisões e patenteou sua inovação, bem como divulgou suas grandes qualidades estruturais.

Embora o cuidado na elaboração da superfície dessas obras tenha sido importante para suas qualidades estruturais, as esferas e as cúpulas são estruturas de tensegridade, cujos atributos estão diretamente relacionados à sua própria geometria, independentemente das linhas que compõem seu arcabouço ou do material que se emprega em sua construção. Claro que esses fatores também influenciam na qualidade da obra, mas as formas curvas têm qualidades estruturais implícitas ao próprio formato.

Na tese de Renato Carrieri, *Estruturas que resistem pela forma, à luz da arquitetura contemporânea*, o arquiteto brasileiro descreve o comportamento estrutural das cúpulas destacando suas qualidades estruturais atribuídas pela própria conformação curva.

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. (2007)

A presença da tensegridade nas estruturas com formatos curvos como esferas e cúpulas está amparado também pela simetria perfeita das esfera e suas partes. 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.

Além de criar suas cúpulas, cuja tensegridade emerge espontaneamente da forma, Fuller achou que poderia forjar tal princípio com base em dois materiais.

3.1.2. Tensegridade a partir de dois materiais diferentes

Assim como Fuller acreditava na onipresença da tensegridade na natureza, inerentes a cada material, forças contrárias também atuam de modos a manter seus contornos. Alguns materiais suportam melhor as forças de compressão, como: madeira, tijolo, metal, enfim, qualquer material rígido. Outros suportam melhor as forças de tração, podem ser esticados, ou tensionados, como: cordas, cabos flexíveis, etc.

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 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 do mesmo princípio. Emmerich estudou de modo independente, a tensegridade ao mesmo tempo em que Fuller e seu discípulo mais famoso, Kenneth Snelson concretizavam suas obras de tensegridade nos Estados Unidos da América.



Figura 4: B.Fuller

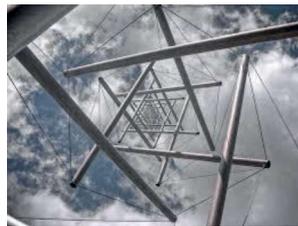


Figura 5: Needle Tower de K. Snelson

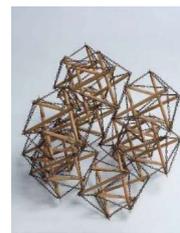


Figura 6: D.Emmerich

Todos esses tipos de estruturas foram pensados como um novo modo de construir, podendo ser empregado por engenheiros civis, *designers* industriais, arquitetos, etc. Porém, por mais que tenha sido aclamada como uma estratégia inovadora, sua prática parece não ter correspondido à fama.

Um exemplo raro em grande escala é a ponte Kurilpa, inaugurada na Austrália em 2009. Fora isso, não encontramos nada dentro da engenharia civil. E no *design* parece ainda mais raro. Imagino que um dos motivos dessa escassez seriam as dificuldades de execução desse tipo de obra.

3.1.3. Tensegridade por cruzamentos – Conexões frias

Os projetistas da década de 50 que exploraram a *tensegridade* a partir de dois tipos de materiais reconheceram as construções autoestabilizadoras de Karlis Johanson, como protótipos de suas inovações. Johanson, artista construtivista letão, participou da primeira exposição de arte Russa em Berlim no ano de 1922. Porém suas obras traziam um elemento diferente que parece ter sido ignorado ou deixado de lado por seus sucessores. O ideal de Johanson, conforme a Enciclopédia livre Wikipedia:

O conceito fundamental em todo o trabalho de Johansons se relaciona a uma questão: como a estabilidade estrutural por 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 cruces’. (1990)

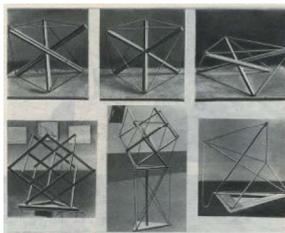


Figura 7: Obras de Karlis Johansons



Figura 8: Ponte militar de Leonardo da Vinci

Essa referência deixa claro o intento de Johansons: obter *tensegridade* por meio de cruzamentos. No entanto, não encontramos registros confirmando se o artista alcançou de fato seu objetivo. Mas alguns séculos antes, Leonardo da Vinci construiu uma ponte com essas características. O projeto do artista renascentista 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 na mesma. 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.

Antes de finalizar esta seção, devemos deixar claro que, essa forma de classificar os tipos de tensegridade foi uma proposta nossa afim de destacar elementos específicos propostos por cada projetista. Mas, faz-se necessário informar que alguns autores consideram obra de tensegridade apenas obras construídas de acordo com as estratégias patenteadas por Fuller, Snelson e Emmerich.

Dentro da nossa proposta de investigação, consideramos tensegridade qualquer obra que, como na natureza se sustenta pela combinação equilibrada de forças contrárias. Dito isto, a seguir relatamos o caminho que nos levou a identifica-lo como tal.

4. Jogo de tensão – Prenúncio de um princípio.

A identificação do princípio da *tensegridade* não foi sugerido por algo do mundo natural, como foi o caso dos primeiros princípios (conforme exposto no quadro na primeira seção) mas sim por algumas estruturas produzidas na fase de experimentação projeto Curva Omnidirecional. Abaixo o registro fotográfico das mesmas.

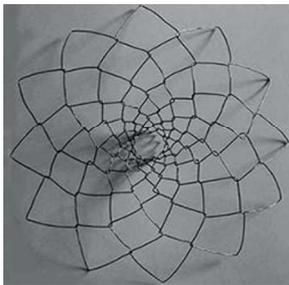


Figura 9: Buraco Negro

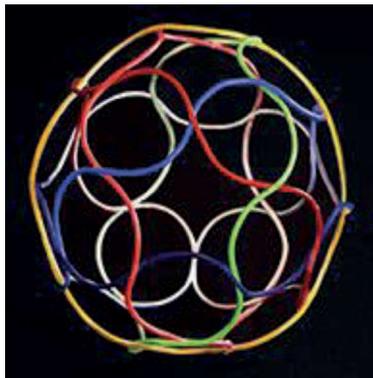


Figura 10: CHAU5



Figura 11: CHAU 4

Engendradas pela aplicação do princípio da Conservação/continuidade, essas EAEs apresentaram propriedades que nos despertaram para o quarto princípio. Por isso, é imprescindível uma explicação mais detalhada do segundo princípio para em seguida focarmos no princípio em destaque nesse artigo: a tensegridade.

A ideia de conservação pode ser explicado com a famosa frase de Lavoisier: “Na natureza, nada se perde, nada se cria, tudo se transforma.” A lei da conservação foi formulada pelo químico francês observando o mundo subatômico, mas o que nos sugeriu tal princípio em nosso projeto foi a observação do mundo vegetal, onde tudo parte de uma única semente a qual se diferencia em cada etapa do desenvolvimento até se tornar plena e voltar a semente: nada se perde. O caule se transforma em folha, a folha em flor, etc. Tudo se transforma. 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 ditaram 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 são mais espessas, 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 (2015)

Oxman 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 um fio passa por cima enquanto o outro passa por baixo até que os dois se encontrem encerrando a obra.

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. O cruzamento dos fios em pontos estratégicos dessa EAE permitem que ela se sustentasse sem nenhum apoio extra, sem emprego de nenhum tipo de solda, parafuso, etc.

Observamos então que essas qualidades criavam uma espécie de “jogo de tensão”, onde em pontos simetricamente dispostos uma força puxa enquanto a outra empurra mantendo o todo equilibrado. Essa propriedade chamou muito nossa atenção e continuamos testando a Conservação/continuidade com a mesma estratégia e dessa vez obtivemos o primeiro sólido esférico do projeto. Depois fizemos mais duas com uma configuração superficial diferente, CHAU 6 E 4 (Figuras 14 e 15 respectivamente). Essas EAEs foram as realizações mais importantes da nossa pesquisa, não só pelas propriedades complexas próprias dos sólidos esféricos, mas pela riqueza de informações que obtivemos provocadas por suas peculiaridades. Além da questão do papel dos entrelaçamentos nas últimas EAEs, de forma concomitante, procuramos conhecer as esferas presentes na natureza e pudemos constatar a grande quantidade dessas configurações nesse meio.

As EAE CHAU, com suas superfícies cheias de buracos lembra o arcabouço de minúsculos seres conhecidos como radiolários.



Figura 12: Aulonia Hexagona



Figura 13: Radiolário



Figura 14: CHAU 6

A simetria da distribuição desses espaços vazios no todo é responsável pela resistência dessas conchas cuja função é proteger o animal. Como observou o engenheiro bioinspirado, Robert Le Ricolais “*A arte da estrutura é saber onde colocar os buracos.*” (1894 -1977) Isso indica que o segredo da resistência na natureza não está na solidez absoluta.

Encontrar tais organismos na natureza cuja superfície se assemelha as nossas EAEs construídas pelo emprego dos princípios do *design*

da natureza, foi gratificante. Porém, foi ainda mais motivador saber que tais organismos serviram de inspiração para um dos mais famosos e antigos defensores da bioinspiração: Richard Buckminster Fuller. E para tudo continuar nesse caminho curvo, circular ou quiçá, esférico, descobrimos que o americano também é o pai da tensegridade. O conceito por trás desse princípio corresponde ao que chamávamos, até então, de “jogo de tensão”. Depois de tantas referências circunscrevendo o mesmo princípio, nos lançamos à fundamentação teórica conforme relatamos na seção anterior.

Dessa maneira, esperamos ter exposto com clareza, como chegamos a identificação do quarto princípio. Isso feito, passemos aos resultados.

5. Resultados

Inicialmente faremos uma breve análise da abordagem e da metodologia empregadas no projeto Curva Omnidirecional. Em seguida, partiremos para os resultados observados nas EAEs nas quais o princípio da tensegridade foi identificado, destacando os atributos a este associado. Por fim, colocamos como resultado inovador, a obtenção de curvaturas pelo emprego dos princípios identificados ao longo do projeto. Para essa exposição, continuaremos usando como referências a EAE Buraco Negro (**Figura 9**) e a CHAU 5 (**Figura 10**) expostas na seção 5.

5.1- Abordagem e metodologia

Conhecer o *design* da natureza tendo em vista a bioinspiração a partir da observação dos padrões da natureza, que por sua vez, nos revelavam a identificação de princípios, se mostrou um caminho eficiente e profícuo. Além do amparo da teoria respaldando nossa pesquisa, temos os frutos concretos como modelos revelando o enorme potencial aplicativo em diversas áreas e, cujos atributos comprovados pela experimentação são desejáveis dentro da projeção sustentável.

5.2 – Atributos relacionados ao emprego da *tensegridade*

Com relação especificamente ao princípio da *tensegridade* por trás do qual estão os atributos de resistência, economia, leveza, autoportância, dentre outros, pudemos verificar nas EAEs do nosso projeto tais qualidades de forma inequívoca. Sabemos que os pontos fracos de qualquer obra está nas juntas, nas emendas, nos locais onde o material precisou ser reconectado. Estas conexões significam mais materiais, mais energia, mais trabalho, onerando a obra. Na mesma linha de pensamento, esses componentes extras, por menores que sejam, aumentam o volume da obra, tornando-as, inevitavelmente, mais pesadas. E por fim, ser autoportante, significa não depender de outros elementos de sustentação além da própria composição geométrica. A EAE buraco negro se mantém sem esses artificios. A CHAU 5 (**Figura 10**) dentre todas as esferas do projeto, também pode ser autoportante devido a sua configuração mais contínua comparada as demais. Ela foi engendrada por círculos máximos, os quais a abraçam de polo a polo. Esses resultados nos convenceram de que o emprego do princípio da *tensegridade* dado por cruzamentos é uma estratégia muito poderosa para obtenção de obras com qualidades desejáveis diante do desafio da sustentabilidade.

5.3 – Novas formas de construir superfícies curvas

As EAEs postas aqui sob análise, tem superfícies curvas. Na Buraco negro, nota-se uma curva que começa a crescer e sobe até começar a se declinar novamente nas bordas. A CHAU tem uma superfície de curvatura positiva. Devemos lembrar que

tais características não foram, se quer, imaginadas. Elas foram frutos do emprego de determinados princípios conforme explicamos anteriormente.

Nenhuma outra obra de *tensegridade* feita por Fuller ou seus contemporâneos, é curva. Isso também se aplica as obras de Johanson. E mesmo, as cúpulas geodésicas de Buckminster Fuller forjam uma curvatura ao empregar uma malha triangulada bem distribuída. Cada aresta desses triângulos são retos e não literalmente curvas geodésicas como o nome sugere. 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 com um alto custo material e energético. Ainda que, nos últimos tempos, podemos contar com uma série de aparatos tecnológicos como softwares de *design* generativos, máquinas de corte eletrônicas que ampliaram nossa liberdade criativa infinitamente, construir obras de formato curvo, demanda um gasto de energia gigantesco, conforme fica clara na fala do o *design* e cientista da computação do MIT (Massachusetts Institute of Technology) Skylar Tibbits (2021)

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 ao 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 a 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*. E, sobretudo desejo que os resultados colhidos até aqui possam vir a somar significativamente aos resultados que outras abordagens, as quais vêm a inspiração na natureza um caminho para tornar nossas práticas mais eficientes, econômicas, duradouras, leves e, enfim, com todos os atributos já alcançados por anos de evolução pela natureza.

Referências

BRAYER, Marie-Ange. David Georges Emmerich. *Editions HYX*, Orléans, France. https://www.editions-hyx.com/sites/default/files/public/media/david_george_emmerich_2.pdf

CARRIERI, Renato. *Estruturas: A Resistência pela forma, à luz da produção contemporânea*. Tese apresentada a Faculdade de Arquitetura e Urbanismo de São Paulo para obtenção do título de Doutor em arquitetura e urbanismo. Universidade de São Paulo – São Paulo, 2007.

FULLER, Richard Buckminster. *Synergetics – Explorations in the Geometry of Thinking*. Macmillan Publishing Co.inc., 1975, 1979.

Tensegridade - Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Tensegridade>.

OXMAN, Neri. Design at the intersection of Technology and Biology, disponível em: <https://www.youtube.com/@TED>

TIBBITS, Skylar. *What Can Intelligent Materials Do?* Disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=-MsNjNeRFMY>

Vida e obra de Karlis Johansons. *Wikipédia – The free encyclopedia*. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Karlis_Johansons. Acesso em: 3 fev. 2021.

Imagens

Estudo de triangulações para a cúpula geodésica de Buckminster Fuller. Disponível em: <https://www.sonostarhub.com/pages/how-to-choose-the-right-sonostar-kit>. Acesso em: 29 jun. 2021.

ICOSAEDRO <https://pt.wikipedia.org/wiki/Icosaedro>

ILUSTRAÇÃO de Haeckel. Imagem *Pinterest*. Disponível em: <https://br.pinterest.com/pin/473652085782195538/>. Acesso em: 10 jan. 2021.

Need Tower - <https://pt.wikipedia.org/wiki/Tensegridade> Acesso em: 16/10/2023

Ponte militar de Leonardo Da Vinci. Imagem *Pinterest*. Disponível em: <https://br.pinterest.com/pin/642255596833266245/>. Acesso em: 19 jun. 2021.

Radiolários – Imagens disponíveis em: <https://www.sciencephoto.com/media/1000287/view/radiolaria-sem>
Acesso em 16/10/2023