

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

AFONSO LARRUSCAIM CAUDURO

**PROPOSTA DE UMA ESTRUTURA TENSEGRITY COMO OBRA DE ARTE PARA
A UNIPAMPA CAMPUS ALEGRETE**

**Alegrete
2022**

AFONSO LARRUSCAIM CAUDURO

**PROPOSTA DE UMA ESTRUTURA TENSEGRITY COMO OBRA DE ARTE PARA
A UNIPAMPA CAMPUS ALEGRETE**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Telmo Egmar Camilo Deifeld

**Alegrete
2022**

AFONSO LARRUSCAIM CAUDURO

PROPOSTA DE UMA ESTRUTURA TENSEGRITY COMO OBRA DE ARTE PARA A UNIPAMPA - CAMPUS ALEGRETE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 03 de agosto de 2022.

Banca examinadora:

Prof. Dr. TELMO EGMAR CAMILO DEIFELD - UNIPAMPA - Orientador

Prof. Dr. ALISSON SIMONETTI MILANI - UNIPAMPA

Prof. Dr. LUIS EDUARDO KOSTESKI - UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **TELMO EGMAR CAMILO DEIFELD, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 10/08/2022, às 17:04, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **ALISSON SIMONETTI MILANI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 10/08/2022, às 20:51, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LUIS EDUARDO KOSTESKI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/08/2022, às 14:59, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0891886** e o código CRC **41153C89**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, aos meus pais, Fabio e Luciana, por terem me dado a oportunidade de cursar uma segunda graduação longe de casa, me dando todo apoio e confiança para que eu pudesse me manter firme nesse caminho.

Aos meus demais familiares que sempre me apoiaram, mesmo de longe.

Ao meu orientador, professor Telmo, por todo o tempo e dedicação dispendidos na realização desse trabalho.

Aos demais professores e técnicos do curso, por toda a contribuição na minha formação.

Aos meus amigos, por todos os momentos que fizeram a jornada acadêmica ser mais leve e descontraída.

Agradeço a todas as pessoas que passaram pela minha vida e que contribuíram, de alguma forma, para que eu atingisse meus objetivos.

Meu mais sincero obrigado a todos vocês!

RESUMO

O estudo de estruturas tensegrity ganha destaque por serem estruturas retesadas leves e pelo formato peculiar que podem assumir. O presente trabalho propõe uma obra de arte baseada em tensegrity para a UNIPAMPA Campus Alegrete como meio de divulgação desse tipo de estrutura para a comunidade. Para tanto, primeiramente foi definida uma fachada dos prédios da UNIPAMPA Campus Alegrete onde a obra poderá ser fixada, depois foi proposta uma forma artística com base em formas geométricas e, com auxílio do software ANSYS®, a estrutura foi simulada numericamente e foram assim definidos os esforços atuantes para o dimensionamento dos elementos que compõem a estrutura. Foram definidos os carregamentos de peso próprio dos elementos e a carga de protensão a ser aplicada nos cabos, o que garantiu a rigidez da estrutura. Foram consideradas possíveis cargas de vento, atuando lateralmente na estrutura. Foram verificadas as tensões atuantes em cada elemento, e então dimensionados os elementos como as barras, os cabos e os elementos de fixação na parede, propondo materiais a serem utilizados em uma possível futura execução.

Palavras-chave: Tensegrity; Projeto; Tensoestrutura; Simulação Numérica.

ABSTRACT

The study of tensegrity structures is highlighted because they are light tensed structures and the peculiar shape they can assume. The present work proposes a work of art based on tensegrity for UNIPAMPA Campus Alegrete as a means of disseminating this type of structure to the community. To this end, first a facade of the UNIPAMPA Campus Alegrete buildings was defined where the structure could be fixed, then an artistic form was proposed based on geometric shapes and, using the ANSYS® software, the structure was numerically simulated and were thus defined the active efforts for the dimensioning of the elements that compose the structure. The self-weight loads of the elements and the prestressing load to be applied to the cables were defined, which ensured the rigidity of the structure. Possible wind loads acting laterally on the structure were considered. The tensions acting on each element were verified, and then the elements such as bars, cables and wall fixing elements were sized, proposing materials to be used in a possible future execution.

Keywords: Tensegrity; Project; Tensile Structure; Numerical Simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Escultura de loganson.....	13
Figura 2 – X-Column	14
Figura 3 – Patentes tensegrity.....	15
Figura 4 – Esculturas de Snelson.....	16
Figura 5 – Obras de arte tensegrity.....	17
Figura 6 – Jakob Tensegrity Torus.....	17
Figura 7 – Barcelona Tensegrity Tower	18
Figura 8 – Tensegritree	18
Figura 9 – Tensegrity na biologia	19
Figura 10 – Luminária tensegrity “Objeto impossível”	20
Figura 11 – Evolução robótica proposta com estrutura tensegrity.....	21
Figura 12 – Super Ball Bot	21
Figura 13 – Estrutura tensegrity confeccionada com polímeros com memória de forma	22
Figura 14 – Domos tensegrity executados por Geiger	22
Figura 15 – Georgia Dome	23
Figura 16 – Estádio Ciudad de La Plata	24
Figura 17 – Ponte Kurilpa.....	24
Figura 18 – Processo de montagem por Geiger.....	26
Figura 19 – Processo de montagem por Terry	27
Figura 20 – Geometria do elemento LINK8.....	28
Figura 21 – Geometria do elemento PIPE16.....	29
Figura 22 – Fachada do prédio administrativo da UNIPAMPA Campus Alegrete ...	32
Figura 23 – (a) Icosaedro regular e (b) Módulo I baseado no “Monumento a Forma Fútil”	33
Figura 24 – Faces do icosaedro que serão ligadas.....	33
Figura 25 – Faces do icosaedro que ficam ligadas	34
Figura 26 – Módulo II	35
Figura 27 – Proposta da obra de arte completa	35
Figura 28 – Barras de Marfim.....	36
Figura 29 – Linha de poliamida, ganchos metálicos e luvas	37

Figura 30 – Barra de Marfim com gancho	38
Figura 31 – Detalhe das ligações nos ganchos	38
Figura 32 – Processo de montagem do Módulo I e do Módulo III	39
Figura 33 – Prisma com base hexagonal	39
Figura 34 – Módulos I e III.....	40
Figura 35 – Módulo II	40
Figura 36 – Modelo reduzido da estrutura completa	41
Figura 37 – (a) Círculo de raio de 1,5 m circunscrito nos pentágonos regulares e (b) Coordenadas x e y dos pentágonos regulares	42
Figura 38 – Relações trigonométricas do icosaedro regular	42
Figura 39 – (a) Icosaedro e (b) Icosaedro rotacionado em $10,8^\circ$	43
Figura 40 – Proposta da estrutura completa modelada no ANSYS (visão superior)	44
Figura 41 – Proposta da estrutura completa modelada no ANSYS (vista lateral) ...	44
Figura 42 – Detalhe dos cabos auxiliares	45
Figura 43 – Modelagem da estrutura com os cabos de ligação	47
Figura 44 – Modelagem final da estrutura.....	47
Figura 45 – Tensões atuantes decorrentes da força peso e do vento lateral no sentido negativo de y	48
Figura 46 – Tensões atuantes decorrentes da força peso e do vento lateral no sentido positivo de y	48
Figura 47 – Tensões atuantes decorrentes da força peso	49
Figura 48 – Deformada com ação da força peso e do vento lateral no sentido negativo de y	49
Figura 49 – Deformada com ação da força peso e do vento lateral no sentido positivo de y	50
Figura 50 – Deformada com ação da força peso	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coordenadas do icosaedro do Módulo I.....	43
Tabela 2 – Coordenadas completas da estrutura.....	45
Tabela 3 – Reações de apoio.....	51
Tabela 4 – Dados para o dimensionamento das barras.....	52
Tabela 5 – Dados calculados para cada barra.....	52
Tabela 6 – Dados para o dimensionamento dos cabos	53
Tabela 7 – Dados para o dimensionamento das barras rosqueadas	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- A** – Área da seção transversal do elemento
- d** – Diâmetro do elemento
- $e_{1,ef}$** – Excentricidade efetiva de 1ª ordem
- E_{c0}** – Módulo de elasticidade à compressão
- $E_{c0,ef}$** – Módulo de elasticidade efetivo
- $f_{co,d}$** – Resistência à compressão de cálculo
- $f_{co,k}$** – Resistência à compressão característica
- f_u** – Tensão de ruptura do aço
- f_y** – Tensão de escoamento do aço
- γ** – Coeficiente ponderador
- I** – Inércia
- k_{mod}** – Coeficiente moderador de resistência de peças de madeira
- L** – Comprimento do elemento
- N_d** – Força normal de cálculo
- P_{cri}** – Carga crítica de Euler
- R_{nt}** – Resistência nominal à tração
- R_{nv}** – Resistência nominal ao corte
- σ_{Nd}** – Tensão decorrente da força normal de cálculo
- σ_{Md}** – Tensão decorrente do momento de cálculo
- T_d** – Força de tração de cálculo
- V_d** – Força cortante de cálculo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 OBJETIVO GERAL	13
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	14
2.1 HISTÓRICO	14
2.2 APLICAÇÃO EM OUTRAS ÁREAS.....	16
2.2.1 ARTES.....	17
2.2.2 BIOLOGIA	20
2.2.3 DESIGN	21
2.2.4 OUTRAS ENGENHARIAS.....	21
2.2.5 ENGENHARIA ESTRUTURAL.....	23
2.3 DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS TENSEGRITY.....	26
2.3.1 BUSCA DA FORMA.....	26
2.3.2 MONTAGEM.....	27
2.3.3 DETERMINAÇÃO E ANÁLISE DOS ESFORÇOS ATUANTES.....	28
2.3.3.1 LINK8.....	29
2.3.3.2 PIPE16	29
3 METODOLOGIA	31
4 RESULTADOS.....	32
4.1 ESCOLHA DA FACHADA.....	32

4.2 PROPOSTA DE FORMA.....	32
4.3 ESCOLHA E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	36
4.4 BUSCA DA FORMA	37
4.5 MODELAGEM NUMÉRICA E OBTENÇÃO DOS ESFORÇOS.....	41
4.5.1 SISTEMA DE COORDENADAS	41
4.5.2 ELEMENTOS E MATERIAIS	46
4.5.3 PROTENSÃO INICIAL E DEFINIÇÃO DOS CARREGAMENTOS.....	46
4.5.4 ANÁLISE DOS ESFORÇOS	48
4.6 DIMENSIONAMENTO.....	51
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
6 REFERÊNCIAS.....	56

1 INTRODUÇÃO

Um dos grandes objetivos históricos da engenharia estrutural é a busca por uma maior leveza das estruturas, seja pela descoberta de novos materiais, pelo uso mais eficiente dos materiais, pela melhoria das técnicas de construir ou pelo desenvolvimento de novos sistemas construtivos (DEIFELD, 2005). Dessa forma, dá-se um destaque para as estruturas retesadas, como estruturas tensegrity. Segundo Pauletti (2003), uma estrutura retesada pode ter um peso específico até duas ordens de grandeza menor que de uma estrutura convencional executada em concreto armado.

O termo “tensegrity” é uma contração de duas palavras em inglês: “tension” e “integrity”. Este termo foi criado por Richard Buckminster Fuller (1962) em sua patente, onde comparou os elementos comprimidos a pequenas ilhas que estariam em um oceano de trações.

O conceito de estruturas baseadas no princípio tensegrity sofreu diversas mudanças ao longo dos anos, abrangendo cada vez mais estruturas, porém seguindo o princípio de conter um conjunto de elementos sujeitos apenas à compressão, geralmente barras, ligados por um conjunto de elementos sujeitos unicamente à tração, normalmente cordões ou cabos (RICARDO, 2016).

Uma estrutura tensegrity é uma estrutura dependente de tensões pré-aplicadas de maneira equilibrada a fim de garantir sua estabilidade, geralmente necessitando de um processo chamado de “busca da forma”, onde a geometria da estrutura é definida.

As estruturas tensegrity ganharam notoriedade nas artes plásticas no início da década de 1960, porém existem diversas aplicações práticas no campo da engenharia estrutural dentro da engenharia civil e da arquitetura, como esculturas, torres, coberturas e até pontes.

Neste sentido surgiu o interesse de estudar estruturas tensegrity, aliando a leveza e a estética desse tipo de estrutura, para compor uma obra de arte na fachada de algum prédio da UNIPAMPA Campus Alegrete, trazendo para a universidade e para a região uma proposta de estrutura moderna e, por vezes, desconhecida do grande público. Desse modo, o presente trabalho tem por objetivo, também, divulgar este tipo de estrutura, seguindo a linha de estudos com tensoestruturas que já foram desenvolvidos na UNIPAMPA Campus Alegrete (KLUGE, 2014; PADOIN, 2015).

Essa escultura poderá, a depender de interesse da administração do campus, ser utilizada como painel de divulgação voltada à comunidade externa.

Pode-se afirmar que o dimensionamento e a construção de tensoestruturas, mais especificamente de estruturas tensegrity, ainda é um desafio para muitos engenheiros, o que incentiva a realização do presente estudo para difundir o conhecimento acerca deste tipo de estrutura.

1.1 Objetivo Geral

Propor uma estrutura tensegrity como obra de arte para ornar uma fachada da UNIPAMPA Campus Alegrete como incentivo ao estudo desse tipo de estrutura.

1.2 Objetivos Específicos

- Definir a fachada para fixação da estrutura;
- Encontrar uma forma equilibrada para a estrutura;
- Simular numericamente a estrutura definida;
- Montar o modelo reduzido da estrutura;
- Definir os esforços atuantes nos elementos da estrutura;
- Caracterizar os materiais da estrutura;
- Dimensionar os elementos da estrutura.

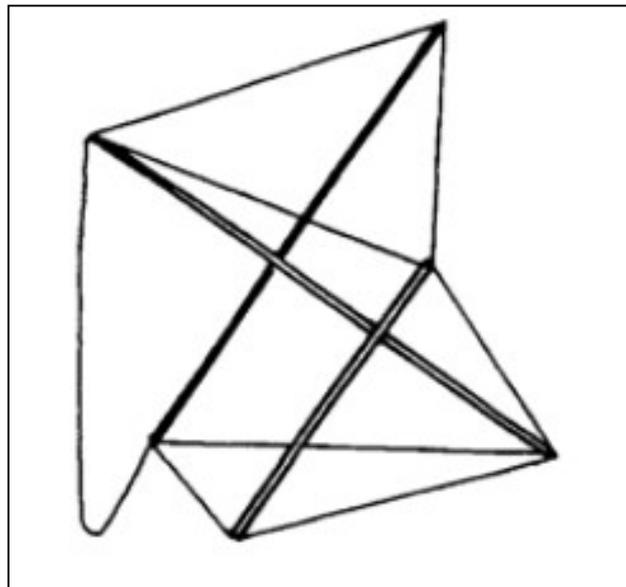
2 REVISÃO DE LITERATURA

Nos tópicos a seguir serão apresentados, de forma sucinta, o histórico, algumas áreas de aplicação e alguns dados relevantes para o dimensionamento e montagem das estruturas tensegrity.

2.1 Histórico

Não se pode afirmar de forma precisa a origem das estruturas tensegrity, nem mesmo um único autor, mas David George Emmerich, engenheiro holandês e um dos precursores do sistema, aponta para o trabalho de um escultor do leste europeu na década de 1920 (MOTRO, 2003). A escultura, nomeada de “Gleichgewichtskonstruktion” (Construção do equilíbrio, em tradução livre), de autoria de Karl loganson, está apresentada na Figura 1.

Figura 1 – Escultura de loganson



Fonte: Motro (2003, p. 8)

No entanto, o primeiro registro de patente deste sistema estrutural foi de Richard Buckminster Fuller (1962), grande entusiasta de estruturas com elementos puramente tracionados ou puramente comprimidos e criador do termo “tensegrity”.

Fuller foi professor durante um curso de verão no Black Mountain College, nos Estados Unidos, em 1948, inspirando um de seus alunos, o escultor Kenneth Snelson,

a criar esculturas com base no sistema tensegrity (MOTRO, 2003). Snelson criou diversas esculturas, sendo a “X-Column” (Figura 2), sua primeira obra de arte.

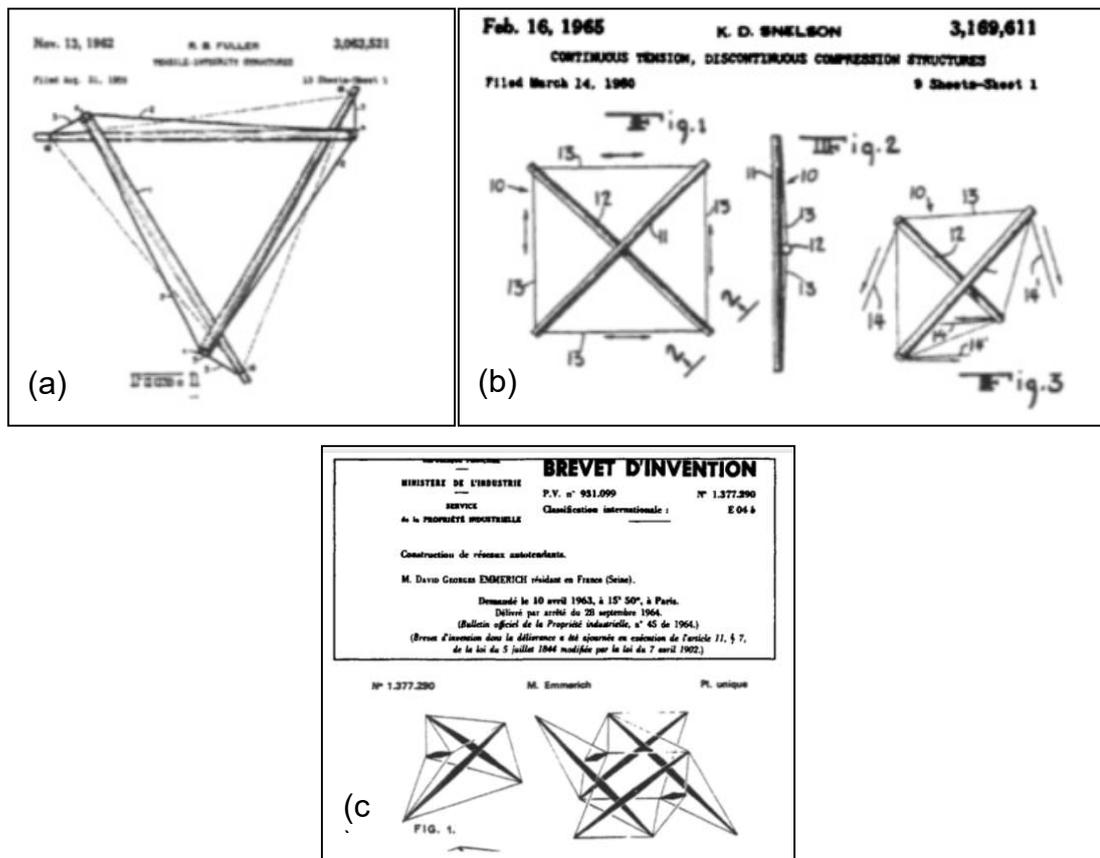
Figura 2 – X-Column (1948)



Fonte: Motro (2003, p. 14)

Na década de 1960, Füller (1962) e Snelson (1964) registraram patentes, nos Estados Unidos, descrevendo uma estrutura tensegrity praticamente simultaneamente. De forma independente e contemporânea, Emmerich o fez na Europa (MOTRO, 2003). A Figura 3 ilustra as estruturas descritas em cada patente.

Figura 3 – Patentes tensegrity: (a) Patente de Füller, (b) Patente de Snelson e (c) Patente de Emmerich



Fonte: Motro (2003, p. 11)

2.2 Aplicação em outras áreas

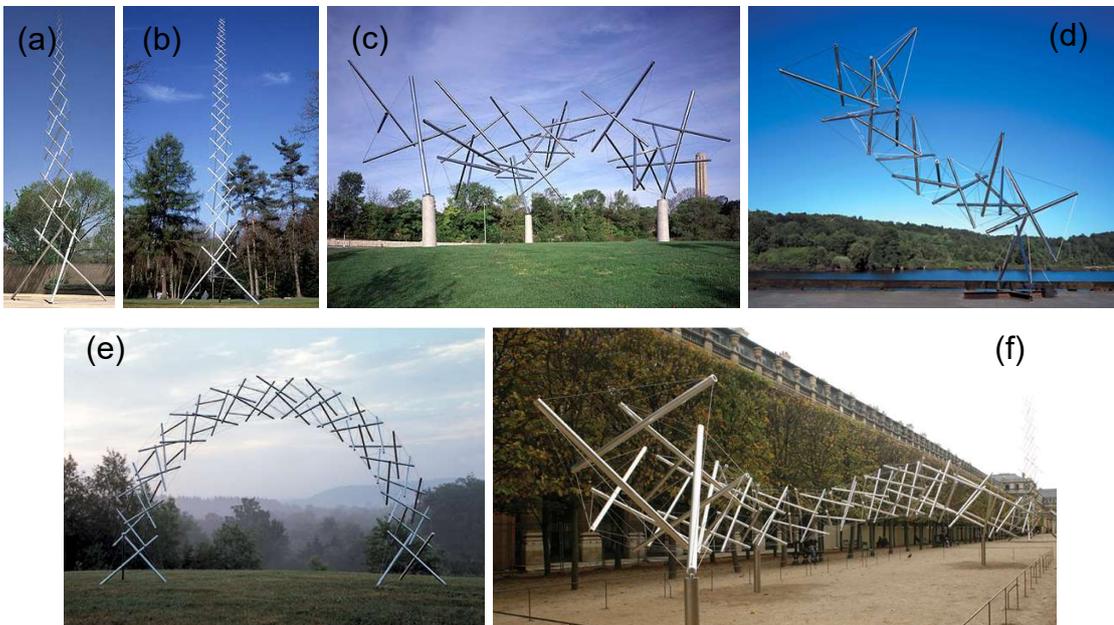
As primeiras estruturas tensegrity resumiam-se a manifestações artísticas, levando a crer que não teriam aplicação prática para a engenharia estrutural sob o argumento de que as estruturas não teriam a rigidez necessária para suportar esforços (RICARDO, 2016). No entanto, tais estruturas têm despertado o interesse de pesquisadores e projetistas estruturais como um sistema estrutural confiável (DEIFELD, 2005). Füller (1962) já dizia em sua patente que as estruturas tensegrity teriam aplicações especiais a estruturas com vãos livres capazes de “abrigar uma cidade inteira”.

A seguir serão apresentadas algumas áreas que são contempladas com estruturas tensegrity.

2.2.1 Artes

Snelson construiu diversas obras de arte baseadas em sistema tensegrity que estão espalhadas em diversos países, algo que, segundo Deifeld (2005), são marcos que divulgaram o comportamento das estruturas tensegrity. A Figura 4 reúne algumas das obras de Snelson.

Figura 4 – Esculturas de Snelson: (a) Needle Tower (1968), (b) Needle Tower II (1969), (c) Triple Crown (1991), (d) Dragon (2000), (e) Rainbow Arch (2001) e (f) Sleeping Dragon (2003)

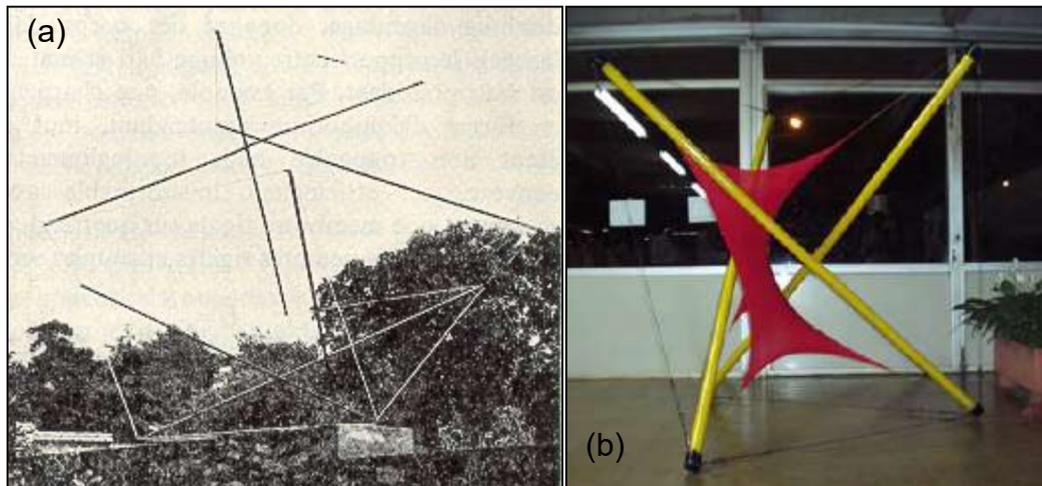


Fonte: Snelson (não datado)¹

A Figura 5 (a) mostra um monumento criado por Emmerich em 1966, denominado “Monument à la Forme Futile”, traduzido como “Monumento a Forma Fútil”. Monumento este que inspirou Pauletti, Titotto e Deifeld a criar o “Monumento a Forma Fútil II” (Figura 5 (b)), utilizando um módulo tensegrity, um prisma de base triangular com a adesão de uma membrana no centro que não encosta nas barras que compõem o módulo (DEIFELD, 2005).

¹ Retirado de <http://kennethsnelson.net/category/sculptures/outdoor-works/>.

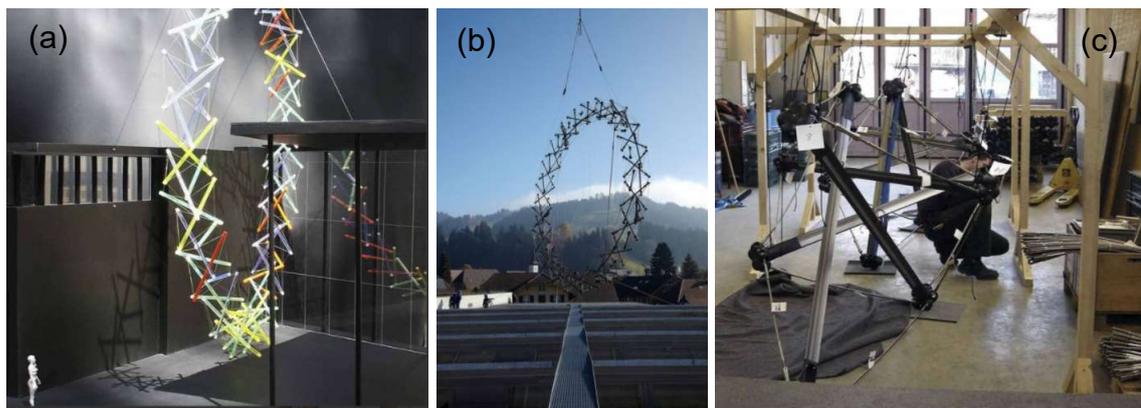
Figura 5 – Obras de arte tensegrity: (a) “Monument à la Forme Futile” (1966) e (b) “Monumento a Forma Fútil II” (2005)



Fonte: Deifeld (2005, p. 6); Deifeld (2005, p. 8)

A Jakob Tensegrity Torus (Figura 6 (a/b)) é uma estrutura circular localizada em frente à sede da Jakob Rope Systems, em Trubschachen, na Suíça, para mostrar o conceito de inovação e superação de desafios da empresa. A estrutura é composta por módulos tensegrity (Figura 6 (b)) e tem um diâmetro total de 15 metros (Jakob Rope Systems, 2020).

Figura 6 – Jakob Tensegrity Torus: (a) Arte conceitual da Jakob Tensegrity Torus, (b) Jakob Tensegrity Torus (2005-2009) e (c) Módulo básico da Jakob Tensegrity Torus



Fonte: Jakob Rope Systems (2020)

A Barcelona Tensegrity Tower (Figura 7) é um projeto criado por um grupo de pesquisa da Universidade Internacional da Catalunha, com alunos do curso de Arquitetura Biodigital, para ser exposta na universidade em 2008. A torre, que tem 10

metros de altura, foi confeccionada em madeira com participação dos estudantes em todas as etapas do projeto (RIEKSTINS, 2008).

Figura 7 – Barcelona Tensegrity Tower (2008)



Fonte: Riekstins (2008)

A Tensigretree (Figura 8) é um monumento confeccionado para comemorar o aniversário de 50 anos da Universidade de Kent e os 10 anos da Escola de Arquitetura, além de homenagear as árvores removidas na expansão da universidade. A escultura, que possui 7 metros de altura e 12 metros de diâmetro, foi inaugurada em 2015 e, de acordo com o prof. Don Gray, responsável pelo projeto com colaboração do engenheiro e especialista em estruturas tensegrity prof. Andrea Micheletti, a estrutura tem a capacidade de “intrigar, provocar e encantar” (RAESIDE, 2015).

Figura 8 – Tensegritree (2015)



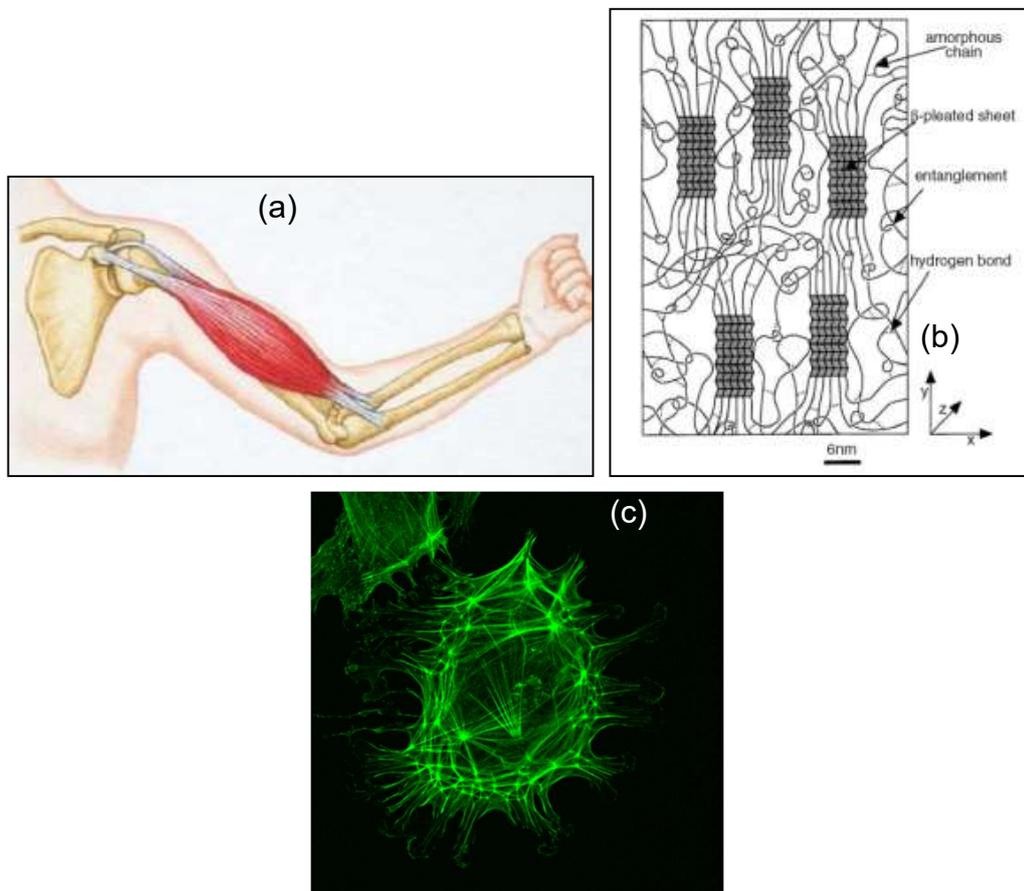
Fonte: Raeside (2015)

2.2.2 Biologia

Diversos estudos publicados sugerem que o conceito de tensegrity está também presente no corpo dos animais, desde o nível macroscópico até o microscópico (INGBER, 1993; INGBER, 1997; INGBER *et al.*, 2000; INGBER *et al.*, 2014). No nível macroscópico, tem-se a organização do sistema locomotor, com os ossos do esqueleto assumindo o papel de estruturas comprimidas e os músculos, tendões e ligamentos ficando sujeitos à tração. No nível microscópico, as células se estabilizariam seguindo o princípio tensegrity.

O conceito de tensegrity ainda pode ser encontrado em outros padrões da natureza, como na estrutura das teias de aranha aponta Galil (2010). A Figura 9 apresenta alguns exemplos de estruturas tensegrity encontrados na biologia.

Figura 9 – Tensegrity na biologia: (a) Corpo humano, (b) Teia de aranha e (c) Filamento de actina do citoesqueleto

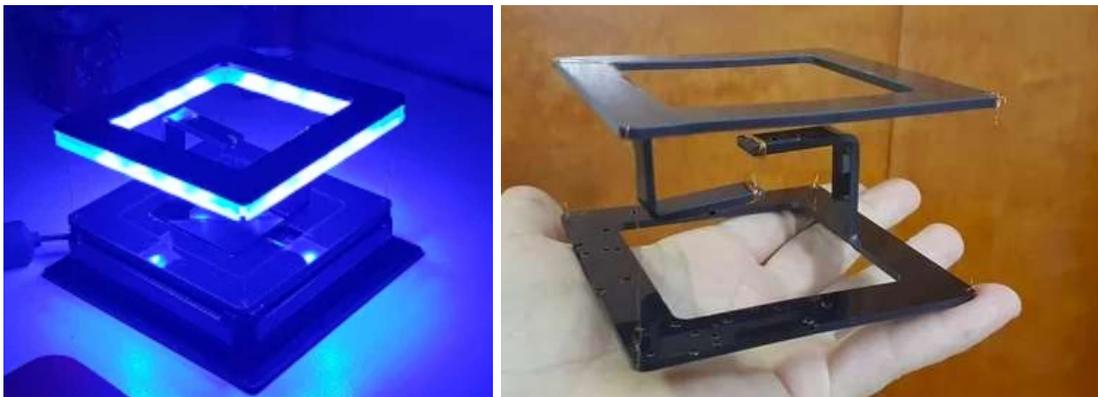


Fonte: Galil (2005, p. 45); Galil (2005, p. 44); Deifeld (2005; p. 12)

2.2.3 Design

A confecção de objetos que podem compor o mobiliário de uma residência também pode seguir o princípio de uma tensegrity. Suhanko (2020) mostrou como confeccionar um suporte com luminária (utilizando luzes de LED RGB) se referindo a ela como “Objeto impossível”. A Figura 10 mostra o resultado final da luminária com suporte tensegrity.

Figura 10 – Luminária tensegrity “Objeto impossível”

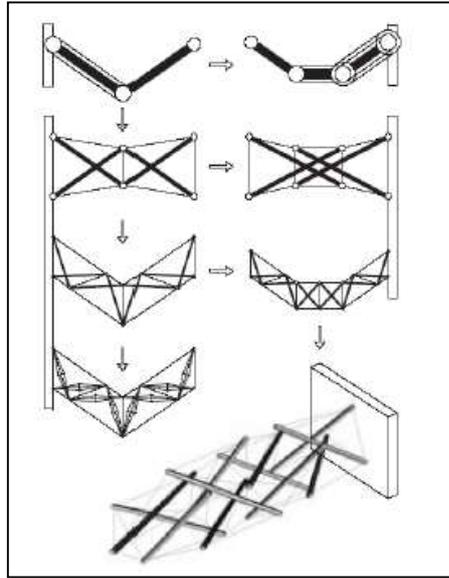


Fonte: Suhanko (2020)

2.2.4 Outras engenharias

Aldrich *et al.* (2003), começaram a estudar a aplicação de modelos tensegrity para sistemas de controle (Figura 11). Já Paul *et al.* (2005) estudaram a aplicação de modelos tensegrity na locomoção de robôs, tentando assemelhar as pernas robóticas de pernas de sistemas biológicos buscando aumentar a tolerância à falha dos membros robóticos, dado que a estrutura de sistemas biológicos permite que os seres continuem se locomovendo mesmo com alguma de suas pernas danificada.

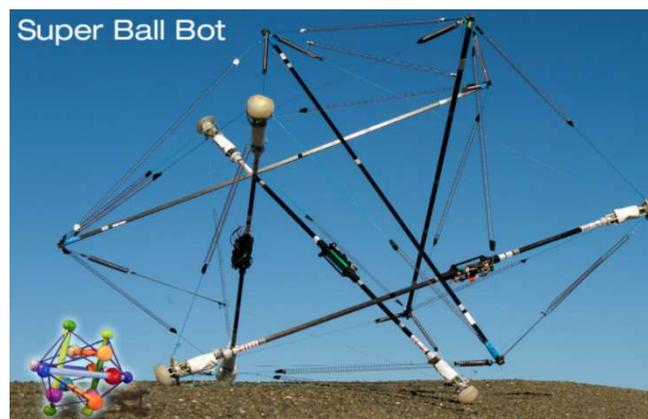
Figura 11 – Evolução robótica proposta com estrutura tensegrity



Fonte: Aldrich *et al.* (2003, p. 5245)

Mais recentemente, a NASA (2014) desenvolveu um robô, chamado Super Ball Bot (Figura 12), um robô terrestre dobrável baseado em um sistema tensegrity esférico, que lembra muito a obra “Monument à la Forme Futile”, que pode vir a ser utilizado em explorações espaciais. A capacidade de se dobrar e de resistir a certos impactos aparecem como principais vantagens desse modelo robótico (NASA, 2014).

Figura 12 – Super Ball Bot

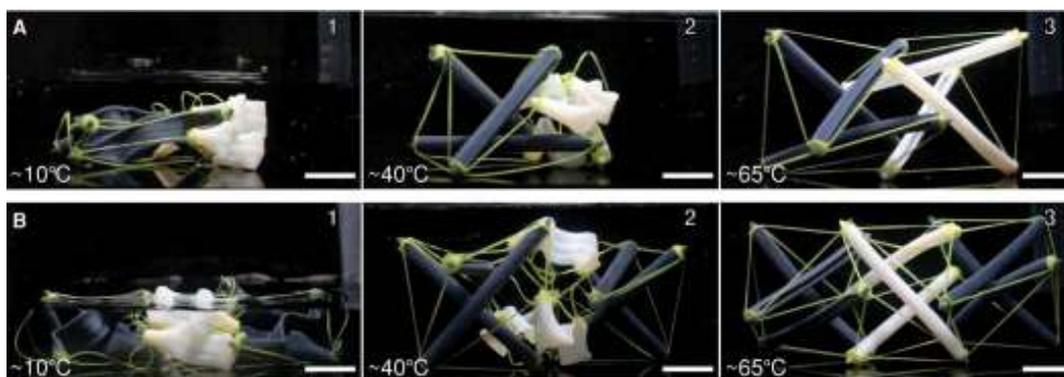


Fonte: NASA (2014)

Liu *et al.* (2017) estudaram um modelo tensegrity impresso com impressoras 3D (Figura 13), utilizando polímeros com memória de forma, que respondem à estímulos térmicos para retornar ao seu formato original. Este tipo de estrutura pode

vir a ser utilizado para confeccionar antenas que fiquem comprimidas no foguete e se abram no espaço usando o calor dos raios solares. Outra possível aplicação está em construir stents que se abram para desobstruir vasos sanguíneos (LIU *et al.*, 2017)

Figura 13 – Estrutura tensegrity confeccionada com polímeros com memória de forma



Fonte: LIU *et al.* (2017, p. 5)

2.2.5 Engenharia Estrutural

A grande maioria das estruturas construídas com base em estruturas tensegrity são os domos que fazem a cobertura de arenas esportivas, com destaque para as coberturas executadas por David Geiger (1986), a Olympic Gymnastic Arena (Figura 14 (a)), em 1986, e a Olympic Fencing Arena, em 1986 (Figura 14 (b)), na Coreia do Sul, sendo as primeiras estruturas tensegrity em grande escala.

Figura 14 – Domos tensegrity executados por Geiger: (a) Olympic Gymnastic Arena (1986) e (b) Olympic Fencing Arena (1986)



Fonte: Geiger *et al.* (1986); Structurae (não datado)²

² Retirado de <https://structurae.net/en/structures/seoul-olympic-fencing-hall>.

Ambos são domos circulares, com 120 m de diâmetro para a Olympic Gymnastic Arena e 93 m de diâmetro para a Olympic Fencing Arena (STRUCTURAE, 2022). São compostos de um anel de tração central, um anel de compressão periférico, anéis intermediários de tração (borda inferior), cabos na direção radial (borda superior), diagonais intermediárias e mastros volantes (GEIGER *et al.*, 1986; TUCHMAN, HO-CHUL, 1986).

O Georgia Dome (Figura 15), construído em Atlanta, nos EUA, foi um domo de formato oval, medindo 240 m por 190 m (STRUCTURAE, 2022), sendo executada por Wesley R. Terry. A rede de cabos que compunha a estrutura era ancorada a um anel de compressão de concreto armado (DEIFELD, 2005).

Figura 15 – Georgia Dome (1992)



Fonte: Deifeld (2005, p. 23)

O Estádio Ciudad de La Plata (Figura 16) conta com uma estrutura tensegrity patenteada pelo arquiteto argentino Roberto Ferreira. A cobertura foi projetada para se assemelhar a dois picos de montanha, sendo formada por dois círculos, com diâmetros de 85 m e distam 48 m um do outro. A estrutura possui três camadas de cabos de aço tracionados, cabos em diagonal, colunas verticais e um arco metálico que atravessa o estádio (LEVY *et al.*, 2013).

Figura 16 – Estádio Ciudad de La Plata (2003)



Fonte: Levy *et al.* (2013, p. 309)

A ponte Kurilpa (Figura 17) foi construída em 2009, em Brisbane, Austrália, após uma competição que definiria o design da ponte para compor a paisagem que liga o centro da cidade ao Queensland Gallery of Modern Art, tendo escolhido o método construtivo que une tensegrity com um tabuleiro contínuo. A ponte tem 470 m, com um vão livre de 120 m, e é a estrutura tensegrity mais longa do mundo. Serve como passarela para pedestres e foi premiada no World Architecture Festival 2011 Awards como melhor estrutura de transporte do mundo (ARUP).

Figura 17 – Ponte Kurilpa



Fonte: ARUP (não datado)³

³ Retirado de <https://www.arup.com/projects/kurilpa-bridge>.

2.3 Dimensionamento de estruturas tensegrity

Estruturas retesadas, como as estruturas tensegrity, são estruturas leves e que dependem de um campo de tensões pré-aplicadas de forma equilibrada para garantir sua estabilidade. É um sistema que demonstra inter-dependência entre sua forma geométrica assumida e a existência de uma protensão aplicada, já que a análise estrutural deve interagir com o projeto arquitetônico desde os estágios iniciais. Além disso, percebe-se também uma inter-dependência entre a rigidez da estrutura e a intensidade da protensão aplicada, dado que a rigidez da peça é, quase em sua totalidade, geométrica (DEIFELD, 2005).

Nos tópicos a seguir, são apresentadas as etapas de busca da forma, a montagem do sistema e a análise dos carregamentos atuantes.

2.3.1 Busca da forma

Existem diferentes métodos de busca da forma para estruturas retesadas. De acordo com Pasqual (2011), os métodos para busca da forma podem seguir por modelos físicos ou analíticos.

Os modelos físicos consistem em construir uma estrutura, em escala reduzida, e obter, a partir da visualização do arranjo geométrico, informações do comportamento estrutural da peça.

Os modelos analíticos se baseiam em soluções numéricas para a configuração do sistema.

De acordo com Tibert e Pellegrino (2003), os métodos analíticos podem ser divididos em cinemáticos e estáticos.

Os métodos cinemáticos consistem em manter o comprimento do elemento comprimido enquanto se encurta o elemento tracionado até um ponto mínimo ou manter o comprimento do elemento tracionado enquanto se alonga o elemento comprimido até um ponto máximo.

Os métodos estáticos consistem em buscar estabelecer uma relação entre a configuração de equilíbrio da estrutura com as forças que atuam em seus componentes.

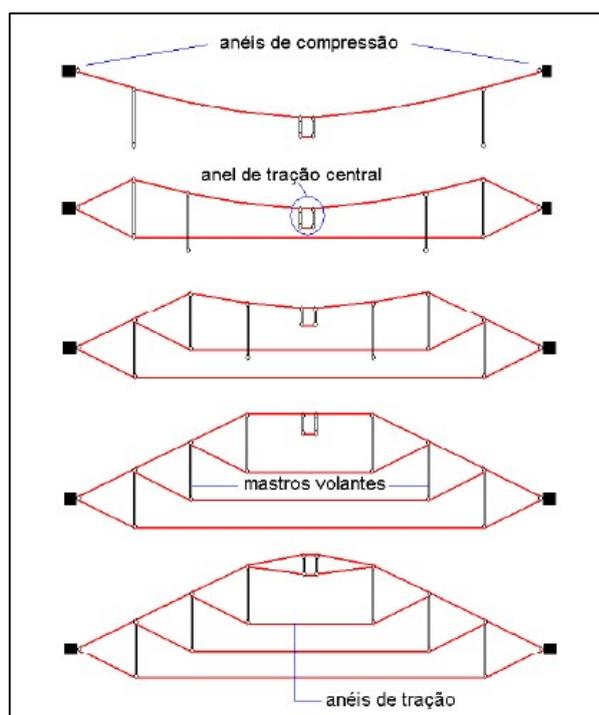
Diversos autores também estudaram métodos de busca da forma (DEIFELD e PAULETTI, 2004, DEIFELD, 2005; ZHANG, MAURIN e MOTRO, 2006; PEÑA *et al.* 2011; MA, CHAN e SKELTON, 2021).

2.3.2 Montagem

A etapa de montagem de uma estrutura tensegrity é de extrema importância, sendo necessário ter um rigoroso planejamento de todo o processo. Uma forma eficiente de definir o processo de montagem, utilizada por Geiger *et al.* (1986) em seus primeiros domos, consiste em partir de uma estrutura montada, imaginar sua desmontagem e inverter o processo no momento de construir.

Na construção dos domos de Seul, a conexão dos cabos era executada gradualmente, à medida que o anel de tração central era erguido, com os mastros volantes sendo ligados e suspensos nos cabos para depois ser ligados ao anel de tração externo. O procedimento seguiu o mesmo para todos os conjuntos que compõem a estrutura. O procedimento está ilustrado na Figura 18.

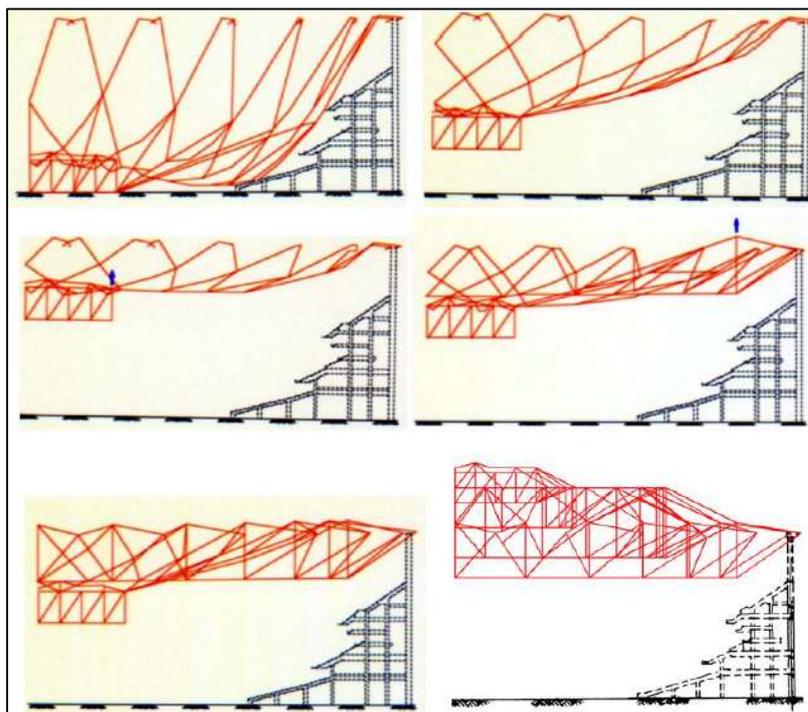
Figura 18 – Processo de montagem por Geiger



Fonte: Deifeld (2005, p. 34)

Terry, na construção da cobertura do Georgia Dome, utilizando cabos pré-fabricados, realizou um procedimento diferente, onde a montagem da estrutura foi realizada toda no chão e posteriormente erguida de maneira uniforme. O procedimento está ilustrado na Figura 19.

Figura 19 – Processo de montagem por Terry



Fonte: Deifeld (2005, p. 35)

2.3.3 Determinação e análise dos esforços atuantes

Após a obtenção de uma configuração equilibrada, são analisados os carregamentos provenientes do retesamento (esforços internos) e os demais carregamentos a que a estrutura possa estar sujeita. Para tal, pode se fazer uso de softwares de simulação numérica.

O ANSYS® é um software reconhecido e de uso geral para análises numéricas, além de possuir licença disponível na UNIPAMPA, o que o torna uma escolha atraente. Alguns trabalhos desenvolvidos na UNIPAMPA (PADOIN, 2015; GOULART, 2015; SOARES, 2016) e em outros lugares (DEIFELD, 2005) já demonstraram as vantagens da modelagem numérica utilizando o software ANSYS®.

Dentro do programa são disponibilizados diversos elementos para os mais variados tipos de estruturas. Para simular estruturas tensegrity são necessários

elementos que simulem cabos e barras, podendo ser utilizados os elementos LINK180 e PIPE16 (ANSYS, 2007).

2.3.3.1 LINK8

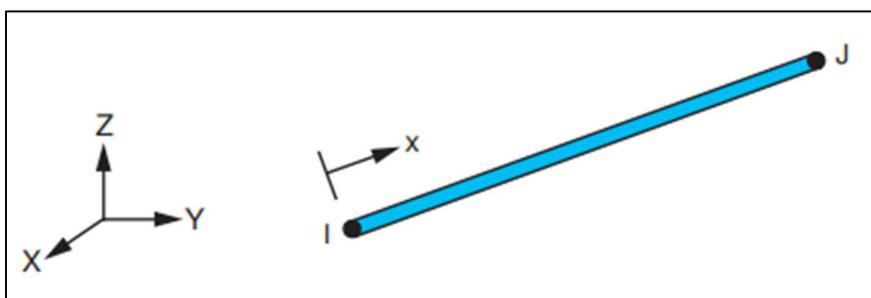
O LINK8 é um elemento unidimensional, contido no software ANSYS®, que possui 2 nós (i, j) e 3 graus de liberdade por nó, podendo sofrer translação nas direções x, y e z. O elemento pode ser submetido à tração e compressão uniaxial (ANSYS, 2007).

De acordo com o referencial de elementos do ANSYS® (2007), esse elemento comporta algumas constantes geométricas de entrada, sendo a área da seção transversal e a deformação inicial além de diversas propriedades mecânicas, como módulo de elasticidade, massa específica e coeficiente de dilatação térmica.

Existem algumas restrições para esse elemento, como o comprimento e a área da seção transversal tendo que ser, necessariamente, maior que 0 (ANSYS, 2007).

A Figura 20 ilustra a geometria do elemento LINK8.

Figura 20 – Geometria do elemento LINK8



Fonte: ANSYS (2007, p. 177)

O LINK8 foi utilizado para simular os cabos que configuram a estrutura tensegrity proposta no presente trabalho.

2.3.3.2 PIPE16

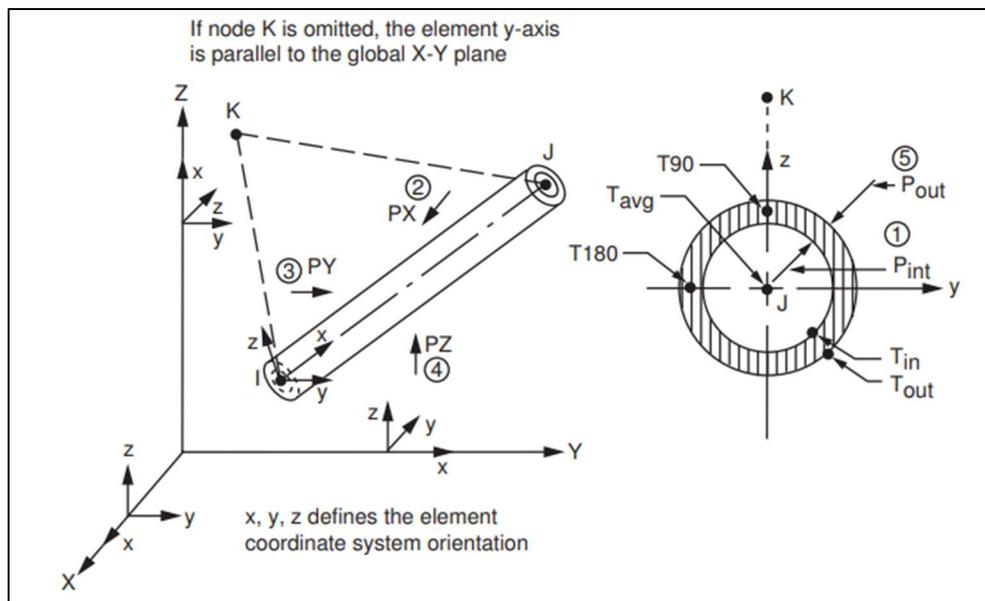
O PIPE16 é um elemento tubular, contido no software ANSYS®, composto por 2 nós (i, j) e 6 graus de liberdade por nó, podendo sofrer translação nos eixos x, y e z e rotação sobre os eixos x, y e z. O elemento suporta tração, compressão e flexão (ANSYS, 2007).

De acordo com o referencial de elementos do ANSYS® (2007), esse elemento comporta algumas constantes geométricas de entrada, sendo o diâmetro externo e a espessura da parede além de diversas propriedades mecânicas, como módulo de rigidez, densidade, propriedades isotrópicas para o material, entre outras.

As restrições para esse elemento são de que o comprimento, o diâmetro externo e a espessura da parede devem ser maiores que 0 (ANSYS, 2007).

A Figura 21 apresenta a geometria do elemento PIPE16.

Figura 21 – Geometria do elemento PIPE16



Fonte: ANSYS (2007, p. 219)

O PIPE16 foi utilizado para simular as barras que configuram a estrutura tensegrity proposta no presente trabalho.

3 METODOLOGIA

Apresenta-se a seguir a metodologia proposta para a elaboração do presente trabalho.

O presente trabalho apresenta uma proposta, em estrutura tensegrity, de uma obra de arte para ornar junto à fachada de algum prédio da UNIPAMPA, Campus Alegrete, seguindo as seguintes etapas:

Etapa 1: Escolha da fachada onde ficará localizada a obra de arte. A partir de análise visual, foi selecionado o local para a fixação da estrutura.

Etapa 2: Proposta de modelo. Foi idealizada, de forma preliminar, uma forma plástica para a estrutura.

Etapa 3: Escolha e caracterização dos materiais utilizados.

Etapa 4: Busca da forma. Foi montado um modelo físico em escala reduzida que corresponde à forma arquitetônica proposta inicialmente. O método de montagem dessa etapa consiste em uma mescla do método de Geiger, onde a estrutura é imaginada montada, imagina-se seu processo de desmontagem e então, no momento de construir, o processo é invertido, e o implementado por Terry na construção do Geórgia Dome, onde a estrutura é montada no chão, tem todos os seus elementos conectados e o seu içamento é realizado de uma única vez, aplicando então as cargas de retesamento.

Etapa 5: Modelagem numérica e obtenção dos esforços. Através de simulação numérica, utilizando o software ANSYS® 11.0, foram obtidos os carregamentos de protensão e das tensões atuantes na estrutura.

Etapa 6: Dimensionamento. Foram dimensionados os elementos que compõem a estrutura utilizando os esforços obtidos na etapa da modelagem numérica.

4 RESULTADOS

4.1 Escolha da fachada

Primeiramente, através de análise visual, foram analisadas as fachadas do prédio acadêmico da UNIPAMPA Campus Alegrete. Logo após, foi selecionada a fachada ideal para fixação da obra, sendo uma fachada lisa e de fácil visualização para quem adentra às instalações do campus, além de poder ser vista por quem passar em frente à universidade (Figura 22).

Figura 22 – Fachada do prédio administrativo da UNIPAMPA Campus Alegrete

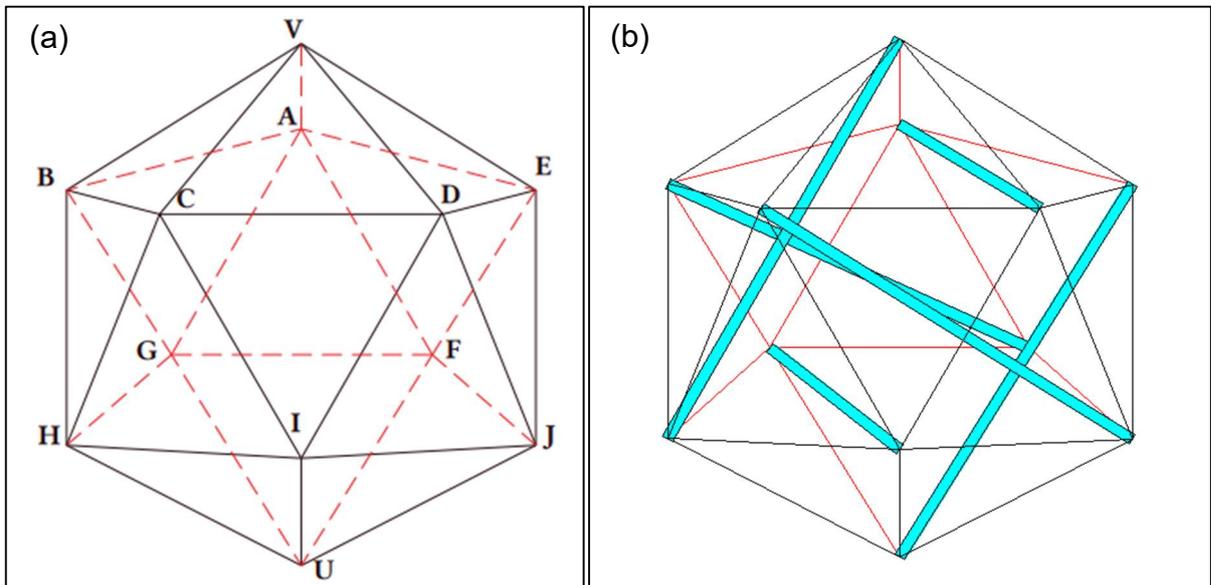


Fonte: Acervo do autor

4.2 Proposta de forma

Partindo de uma análise preliminar de estruturas tensegrity conhecidas, foi possível observar um padrão geométrico externo. Tomando como exemplo a estrutura do “Monumento a Forma Fútil”, pôde-se concluir que a forma equilibrada tem por base um icosaedro regular, um poliedro tridimensional formado por 30 arestas, 12 vértices e 20 faces na forma de triângulos equiláteros (Figura 23).

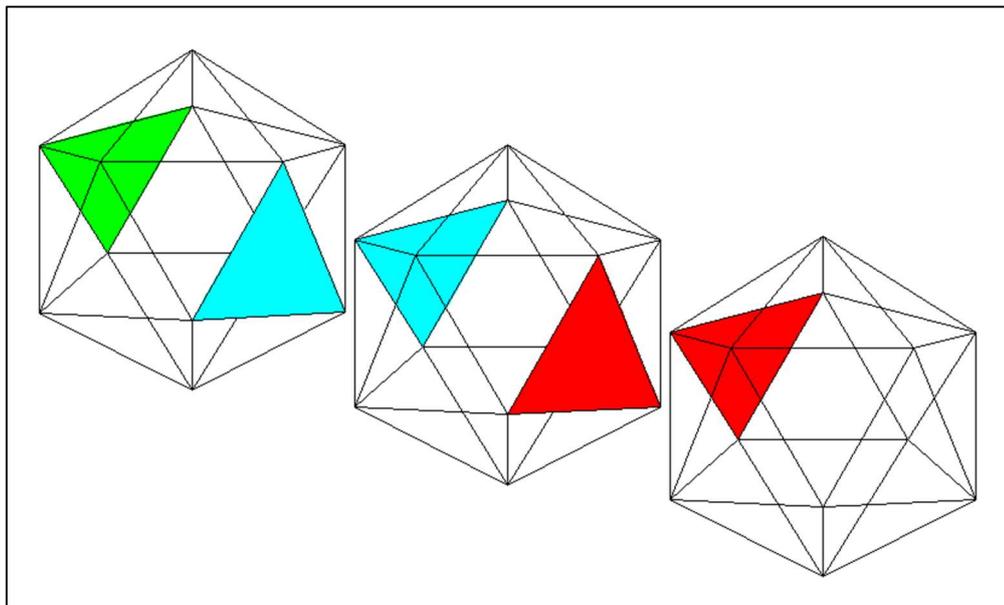
Figura 23 – (a) Icosaedro regular e (b) Módulo I baseado no “Monumento a Forma Fútil”



Fonte: Martins (2017, p. 106); Autoria própria

A partir dessa observação, foi imaginada uma estrutura composta por 3 módulos baseados em icosaedros regulares, interligados lado a lado por suas faces triangulares de modo que não houvesse contato direto entre vértices (Figura 24).

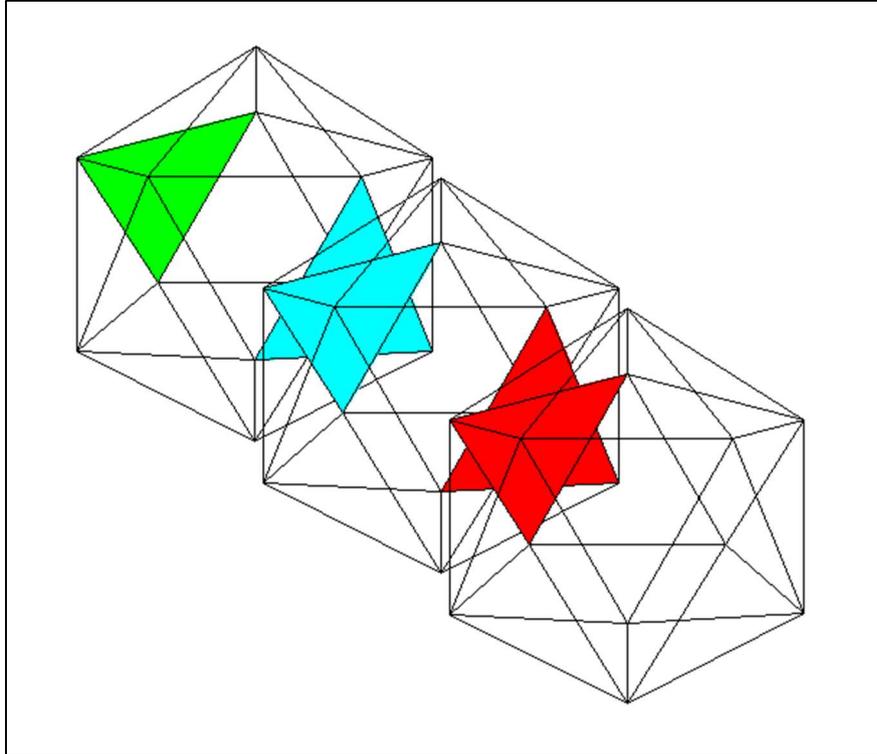
Figura 24 – Faces do icosaedro que serão ligadas



Fonte: Autoria própria

Como pode ser observado na Figura 25, as faces que estão pintadas com as mesmas cores se encontram e serão fixadas. A face em verde ficará fixada na fachada definida no item 4.1.

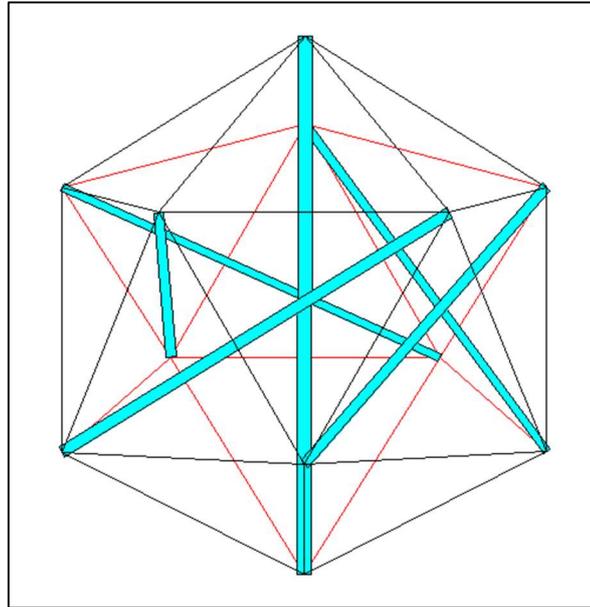
Figura 25 – Faces do icosaedro que ficam ligadas



Fonte: Autoria própria

Inicialmente a estrutura final foi imaginada com 3 configurações tensegrity diferentes baseadas no icosaedro, como uma alusão à diferentes maneiras de visualizar e resolver um mesmo problema. No entanto, só foi possível encontrar uma segunda configuração, e utilizando uma barra com comprimento diferente das demais (Figura 26).

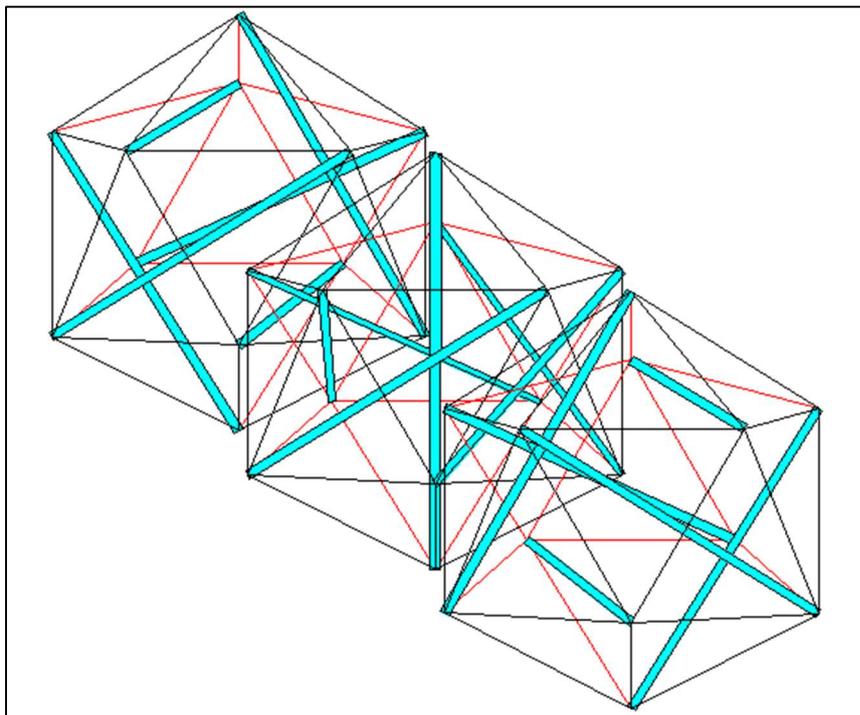
Figura 26 – Módulo II



Fonte: Autoria própria

Portanto, optou-se por utilizar essa segunda forma (Módulo II) entre duas outras iguais (Módulo I), para manter a ideia de 3 módulos icosaédricos. A Figura 27 mostra a proposta da estrutura completa.

Figura 27 – Proposta da obra de arte completa



Fonte: Autoria própria

4.3 Escolha e caracterização dos materiais

Para a realização da obra, tanto no modelo reduzido quanto em escala real, optou-se por utilizar madeira como elemento comprimido. Para o modelo reduzido foram utilizadas barras de Marfim (*Balfourodendron riedelianum*), com comprimento de 70 cm e diâmetro de 10 mm, com exceção da barra maior do segundo módulo, com 83 cm de comprimento (Figura 28).

Figura 28 – Barras de Marfim



Fonte: Acervo do autor

O Marfim é uma dicotiledônea que possui um módulo de elasticidade de cerca de 12 GPa e possui baixa resistência natural ao apodrecimento (IPT, 2022). Dessa forma, não é indicada para o uso da obra em escala real.

Para os elementos tracionados, no modelo reduzido foi utilizada linha de poliamida com diâmetro de 0,8 mm, fixados por ganchos metálicos de 2 mm de espessura, utilizando luvas tamanho 4 (2,5 mm) para garantir a fixação da linha nos ganchos (Figura 29).

Figura 29 – Linha de poliamida, ganchos metálicos e luvas



Fonte: Acervo do autor

A caracterização dos materiais propostos para o modelo em escala real está abordada no item 4.6.

4.4 Busca da forma

O processo de busca da forma propriamente dito não foi realizado, pois partiu-se de uma forma externa pré-determinada e apenas foram realizados ajustes internos das barras. No entanto, para auxiliar na definição final da forma e no processo de montagem, foi montado um modelo reduzido utilizando os materiais descritos no item 4.3.

Para a construção do modelo reduzido, inicialmente foi necessário regularizar o tamanho das barras, padronizando o tamanho delas em 70 cm (e a maior com 83 cm). Posteriormente foi realizado o processo de fixação dos ganchos nas extremidades das barras, sendo necessário realizar a pré furação e fixação manual (Figura 30).

Figura 30 – Barra de Marfim com gancho



Fonte: Acervo do autor

As extremidades das barras foram numeradas para facilitar a ordem de montagem. Posteriormente foi fixado o tamanho dos cabos de poliamida em 43 cm, utilizando as luvas para prender o cabo garantindo seu comprimento (Figura 31).

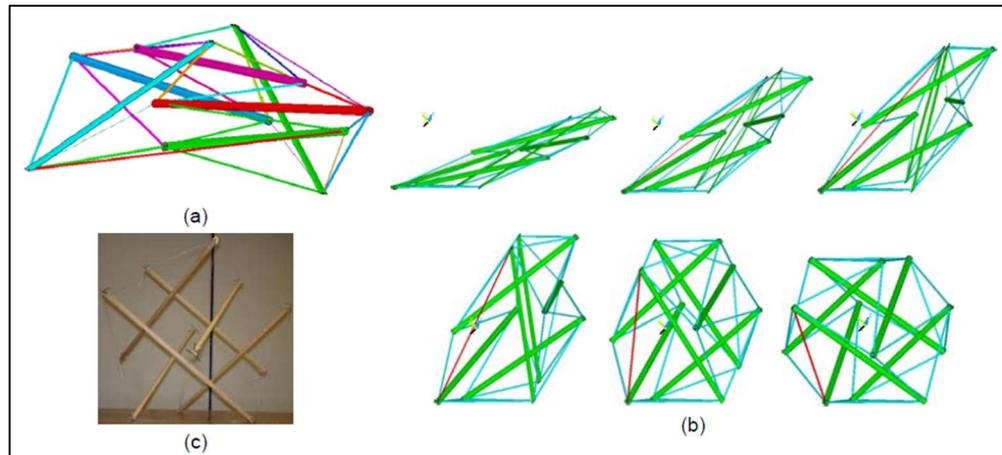
Figura 31 – Detalhe das ligações nos ganchos



Fonte: Acervo do autor

O primeiro módulo foi montado de acordo com as orientações descritas por Deifeld (2005), com a fixação posterior dos cabos auxiliares que concluem a forma icosaédrica do módulo (Figura 32).

Figura 32 – Processo de montagem do Módulo I e do Módulo III

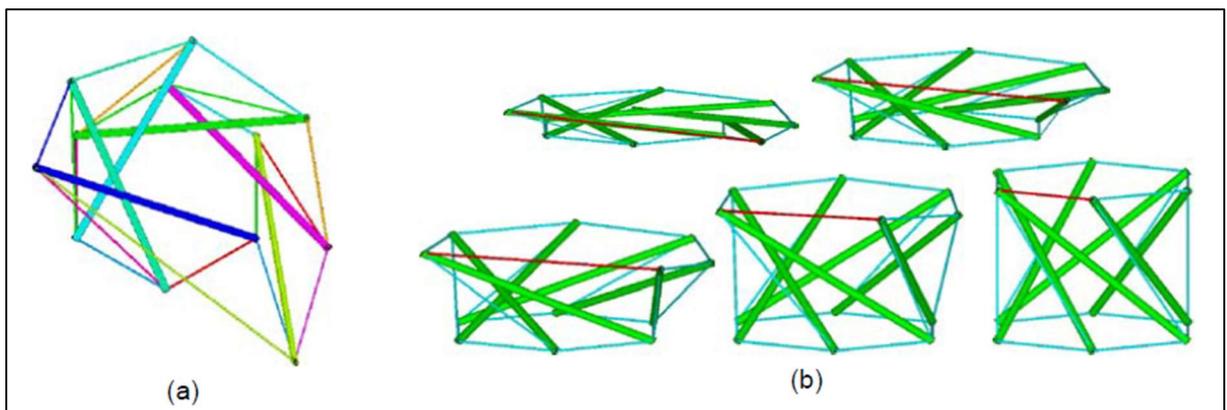


Fonte: Deifeld (2005, p. 73)

Como os módulos I e III são iguais, o processo de montagem se repetiu.

O processo de montagem do módulo II foi adaptado do prisma com base hexagonal descrito por Deifeld (2005), adaptando a base para o pentágono e adicionando a barra maior no centro do modelo (Figura 33).

Figura 33 – Prisma com base hexagonal



Fonte: Deifeld (2005, p. 72)

As Figuras 34 e 35 mostram os 3 módulos montados.

Figura 34 – Módulos I e III



Fonte: Acervo do autor

Figura 35 – Módulo II



Fonte: Acervo do autor

Após a montagem dos 3 módulos, eles foram unidos de modo a garantir a forma final proposta no item 4.2 (Figura 36).

Figura 36 – Modelo reduzido da estrutura completa



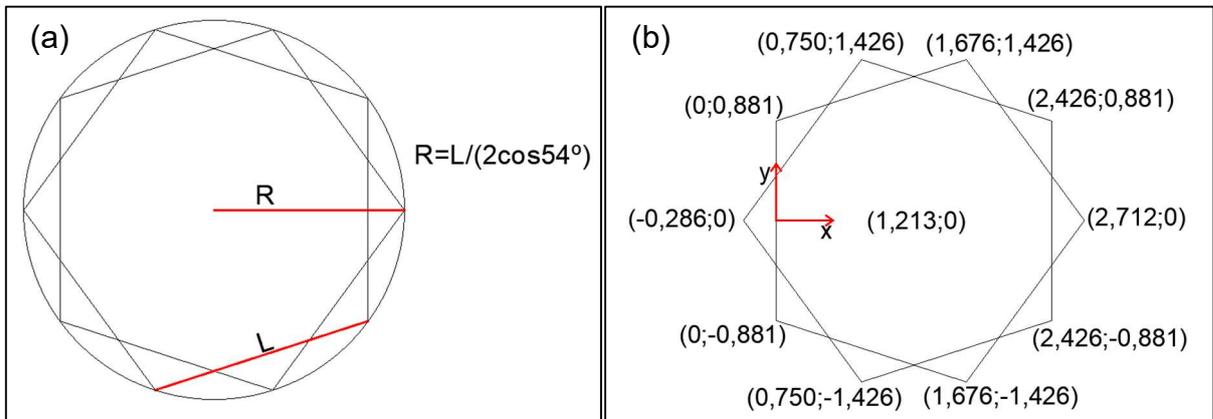
Fonte: Acervo do autor

4.5 Modelagem numérica e obtenção dos esforços

4.5.1 Sistema de coordenadas

Analisando a forma geométrica do icosaedro, foi possível observar que a parte central da forma se baseia em pirâmides pentagonais regulares, giradas 36° uma em relação a outra. Utilizando o software AutoCAD, foram traçadas coordenadas x e y que definiram os pontos correspondentes aos pentágonos que compõem a base das pirâmides, de modo que pudesse ser traçado um círculo, com raio de 1,5 m, passando por todos os pontos (Figura 37).

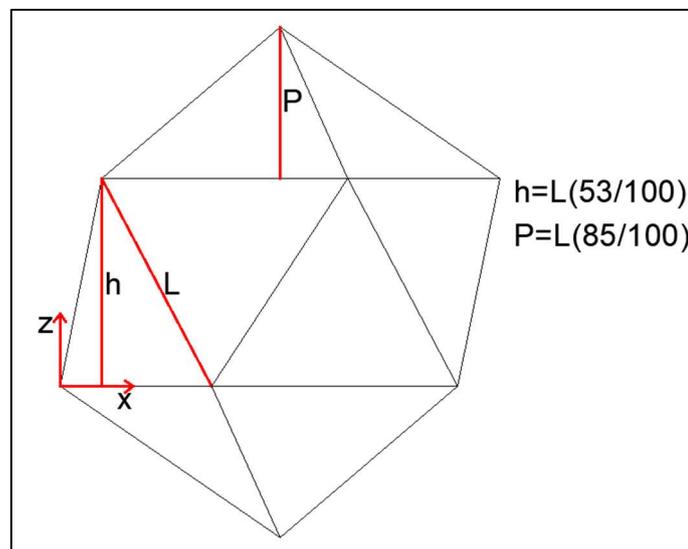
Figura 37 – (a) Círculo de raio de 1,5 m circunscrito nos pentágonos regulares e (b) Coordenadas x e y dos pentágonos regulares



Fonte: Autoria própria

De forma a definir as coordenadas no eixo z da estrutura tridimensional, foram utilizadas relações trigonométricas obtidas do trabalho de Martins (2017) e estão descritas na Figura 38.

Figura 38 – Relações trigonométricas do icosaedro regular

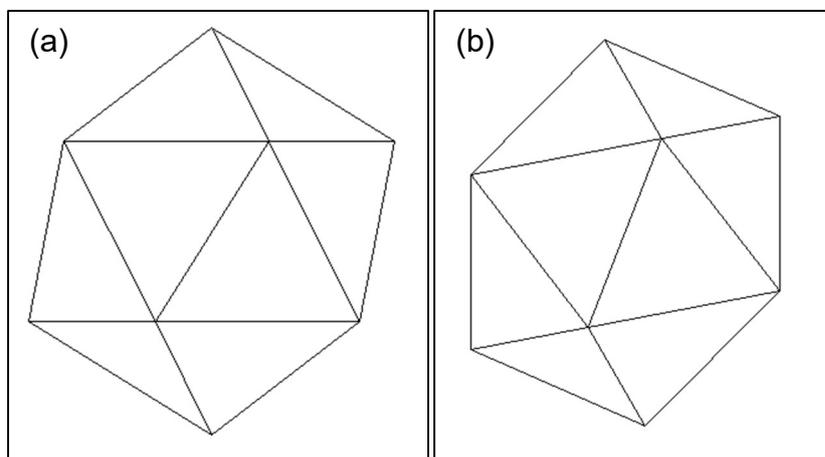


Fonte: Autoria própria

Com as coordenadas do icosaedro definidas, observou-se que, para que a estrutura pudesse coincidir com a fachada onde será fixada, é necessário que uma das faces triangulares da parte central do icosaedro coincida com a vertical. Assim sendo, utilizando relações trigonométricas, constatou-se que a estrutura precisaria ser

rotacionada em aproximadamente $10,8^\circ$ em torno do eixo y, gerando novas coordenadas (Figura 39).

Figura 39 – (a) Icosaedro e (b) Icosaedro rotacionado em $10,8^\circ$



Fonte: Autoria própria

A Tabela 1 apresenta as coordenadas geradas inicialmente para o icosaedro e as coordenadas refinadas para o icosaedro rotacionado em $10,8^\circ$.

Tabela 1 – Coordenadas do icosaedro do Módulo I

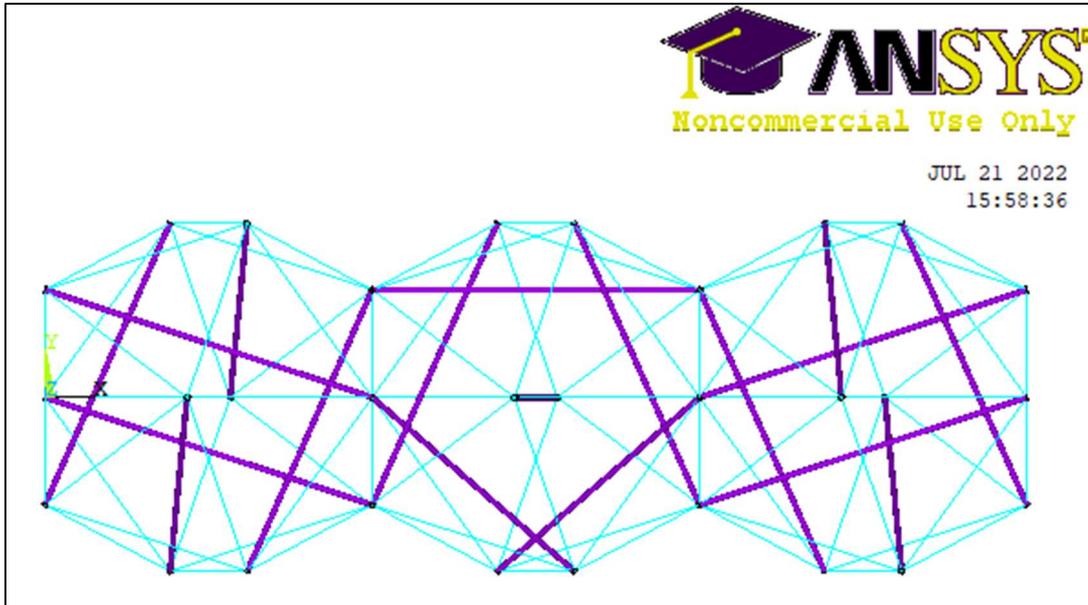
Ponto	Coordenadas iniciais			Coordenadas refinadas		
	x	y	z	x	y	z
k1	1,213	0,000	2,434	1,157	0,000	2,698
k2	1,676	1,426	1,499	1,646	1,426	1,840
k3	2,712	0,000	1,499	2,664	0,000	2,035
k4	1,676	-1,426	1,499	1,646	-1,426	1,840
k5	0,000	-0,881	1,499	0,000	-0,881	1,526
k6	0,000	0,881	1,499	0,000	0,881	1,526
k7	0,750	-1,426	0,000	1,018	-1,426	0,194
k8	2,426	-0,881	0,000	2,664	-0,881	0,509
k9	2,426	0,881	0,000	2,664	0,881	0,509
k10	0,750	1,426	0,000	1,018	1,426	0,194
k11	-0,286	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
k12	1,213	0,000	-0,935	1,507	0,000	-0,664

Fonte: Autoria própria

Com as coordenadas refinadas definidas, foi possível fazer a definição dos keypoints dentro do software ANSYS, que correspondem aos vértices da figura. Gerando, em seguida, as linhas que ligam cada keypoint, correspondendo aos cabos

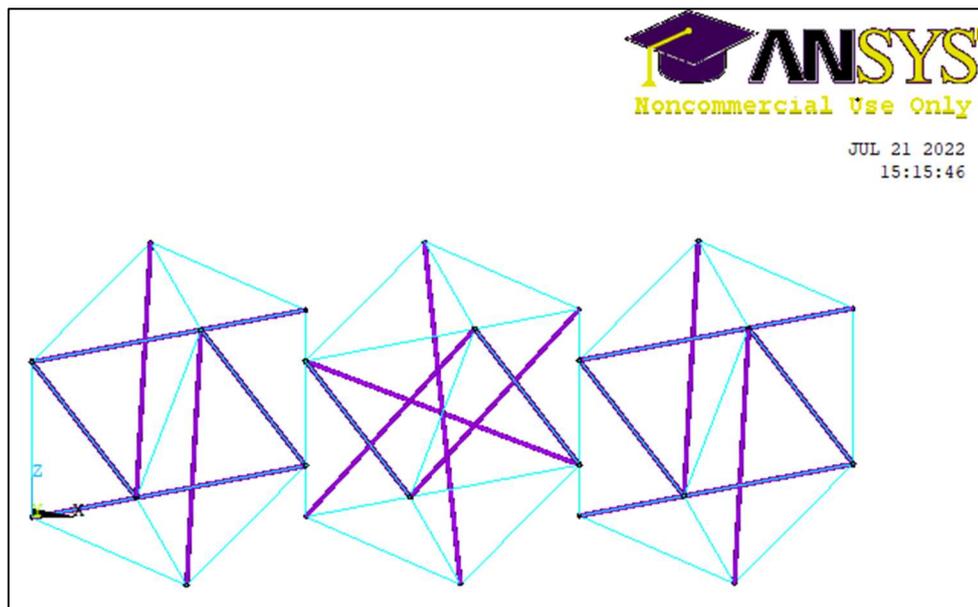
tracionados da estrutura. E, por fim, foram criadas novas linhas correspondendo às barras comprimidas da estrutura na configuração da estrutura completa (Figuras 40 e 41).

Figura 40 – Proposta da estrutura completa modelada no ANSYS (visão superior)



Fonte: Autoria própria

Figura 41 – Proposta da estrutura completa modelada no ANSYS (vista lateral)



Fonte: Autoria própria

A Tabela 2 apresenta as coordenadas utilizadas para modelar a estrutura completa no software ANSYS.

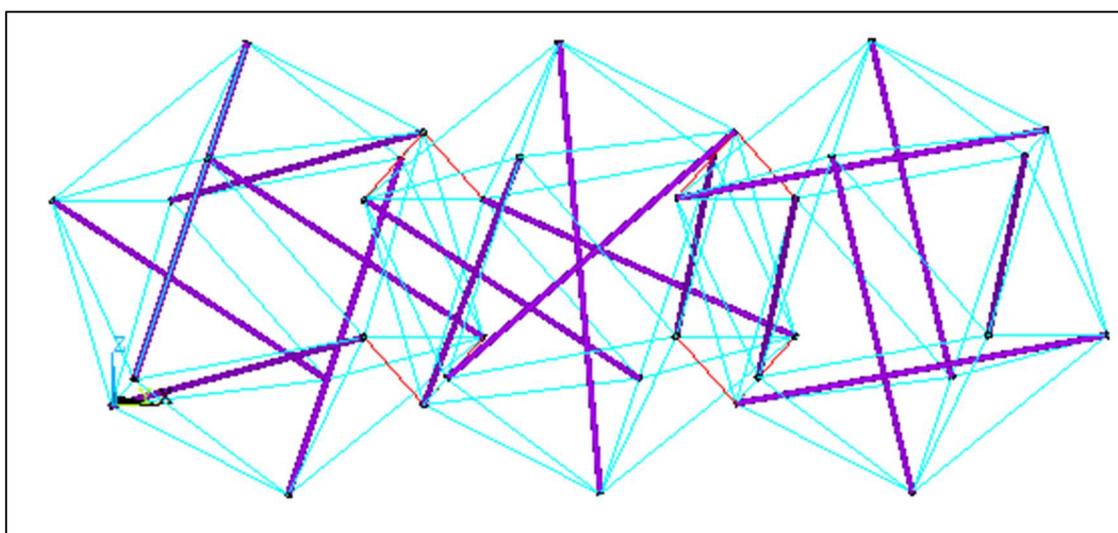
Tabela 2 – Coordenadas completas da estrutura

Módulo I				Módulo II				Módulo III			
Ponto	x	y	z	Ponto	x	y	z	Ponto	x	y	z
k1	1,157	0,000	2,698	k13	3,821	0,000	2,707	k25	6,485	0,000	2,716
k2	1,646	1,426	1,840	k14	4,311	1,426	1,849	k26	6,975	1,426	1,858
k3	2,664	0,000	2,035	k15	5,328	0,000	2,043	k27	7,992	0,000	2,052
k4	1,646	-1,426	1,840	k16	4,311	-1,426	1,849	k28	6,975	-1,426	1,858
k5	0,000	-0,881	1,526	k17	2,664	-0,881	1,534	k29	5,328	-0,881	1,543
k6	0,000	0,881	1,526	k18	2,664	0,881	1,534	k30	5,328	0,881	1,543
k7	1,018	-1,426	0,194	k19	3,682	-1,426	0,203	k31	6,346	-1,426	0,212
k8	2,664	-0,881	0,509	k20	5,328	-0,881	0,517	k32	7,992	-0,881	0,526
k9	2,664	0,881	0,509	k21	5,328	0,881	0,517	k33	7,992	0,881	0,526
k10	1,018	1,426	0,194	k22	3,682	1,426	0,203	k34	6,346	1,426	0,212
k11	0,000	0,000	0,000	k23	2,664	0,000	0,008	k35	5,328	0,000	0,017
k12	1,507	0,000	-0,664	k24	4,171	0,000	-0,655	k36	6,836	0,000	-0,646

Fonte: Autoria própria

Para garantir que não houvesse um escorregamento entre os módulos, foram inseridos cabos auxiliares nas ligações entre os módulos, que aparecem em vermelho na Figura 42.

Figura 42 – Detalhe dos cabos auxiliares



Fonte: Autoria própria

4.5.2 Elementos e materiais

Os cabos foram simulados com o elemento LINK8, com diâmetro de 4 mm (área de $0,12 \text{ cm}^2$) e módulo de elasticidade de 210 GPa. As barras foram simuladas com o elemento PIPE16, com diâmetro externo de 8 cm, 4 cm de espessura de parede e módulo de elasticidade de 14,837 GPa que é o módulo de elasticidade do Jatobá (*Hymenaea spp.*), uma madeira altamente resistente e de grande uso estrutural (IPT, 2022).

4.5.3 Protensão inicial e definição dos carregamentos

A fim de garantir a estrutura com certa rigidez, buscou-se aplicar um campo equilibrado de tensões à estrutura. Primeiramente foram definidos os vínculos de apoio, limitando os movimentos de translação nos eixos x, y e z nos keypoints 5, 6 e 11, que são os keypoints que correspondem aos pontos de fixação da estrutura na fachada.

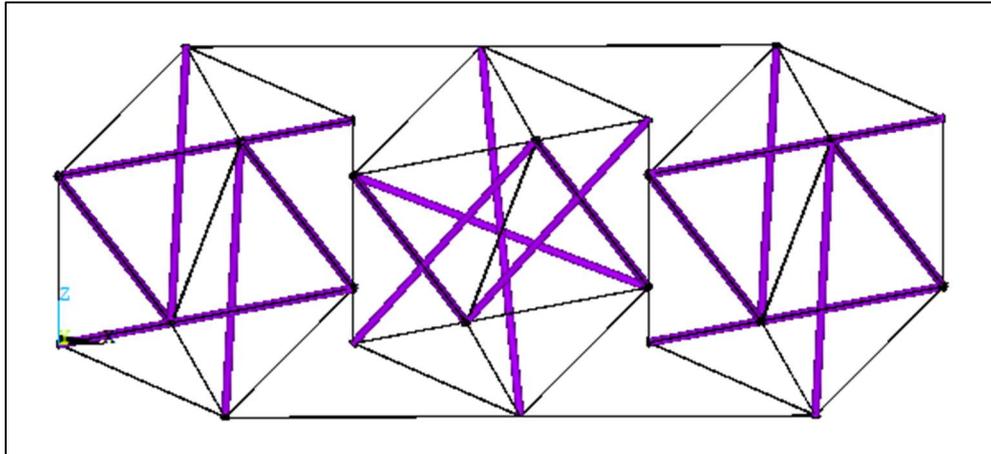
A carga predominante em ação nesse tipo de estrutura é o peso próprio, agindo predominantemente nos nós. Cada nó é composto pela metade do peso de uma barra e a metade do peso de cada cabo que chega nele. Considerando que cada nó é composto por 5 cabos, a carga que age corresponde ao peso de 2,5 cabos. Cada cabo foi fixado com um comprimento de 1,76 m, as barras tem comprimento de 2,85 m e a barra maior possui 3,37 m.

Utilizando o peso específico do Jatobá de 960 kg/m^3 (IPT, 2022) e o peso específico do aço de 7850 kg/m^3 , chegou-se à carga de 71,77 N aplicada a cada nó. Já para os dois nós da barra maior do Módulo II, foi aplicada uma carga de 83,98 N.

Foi aplicada uma protensão inicial nos cabos de 0,05%, o que equivale um encurtamento nos cabos de 9 mm, gerando a uma força de tração de 1,32 kN.

A estrutura não convergiu na configuração inicial, necessitando da adição de cabos de ligação entre os módulos, também protendidos, aumentando a rigidez total da estrutura (Figura 43).

Figura 43 – Modelagem da estrutura com os cabos de ligação

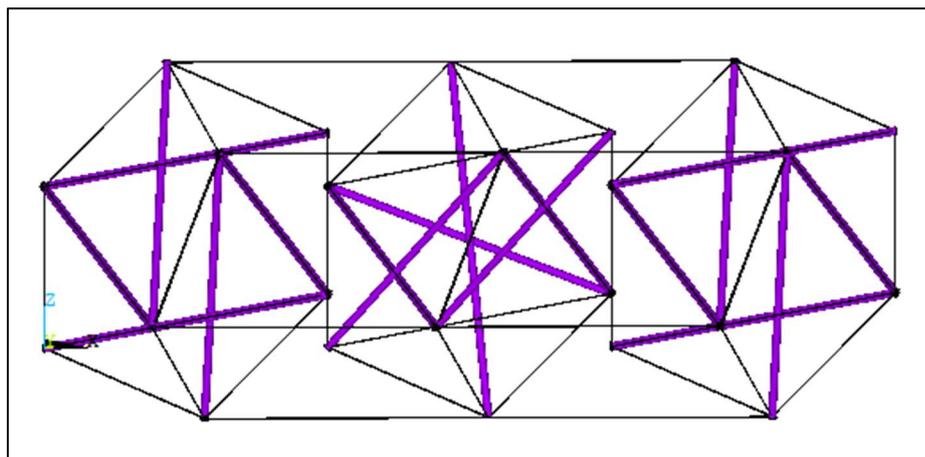


Fonte: Autoria própria

Por se tratar de uma estrutura não convencional e “aberta”, não se tem precisão nas ações decorrentes do vento. Nesse sentido, prevendo uma possível ação de vento lateral na estrutura, foi aplicada uma carga equivalente a uma vez a gravidade no sentido do eixo y em cada nó.

A estrutura não convergiu, sendo necessário aumentar a rigidez da estrutura mais uma vez com cabos de ligação entre os módulos. Foram fixados mais 4 cabos protendidos nas laterais da estrutura (Figura 44).

Figura 44 – Modelagem final da estrutura

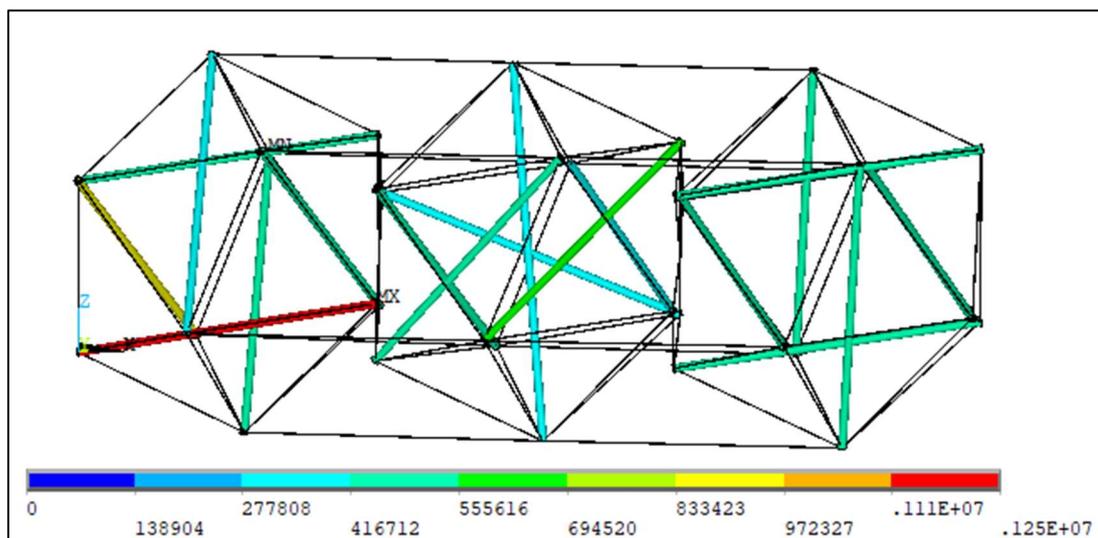


Fonte: Autoria própria

4.5.4 Análise dos esforços

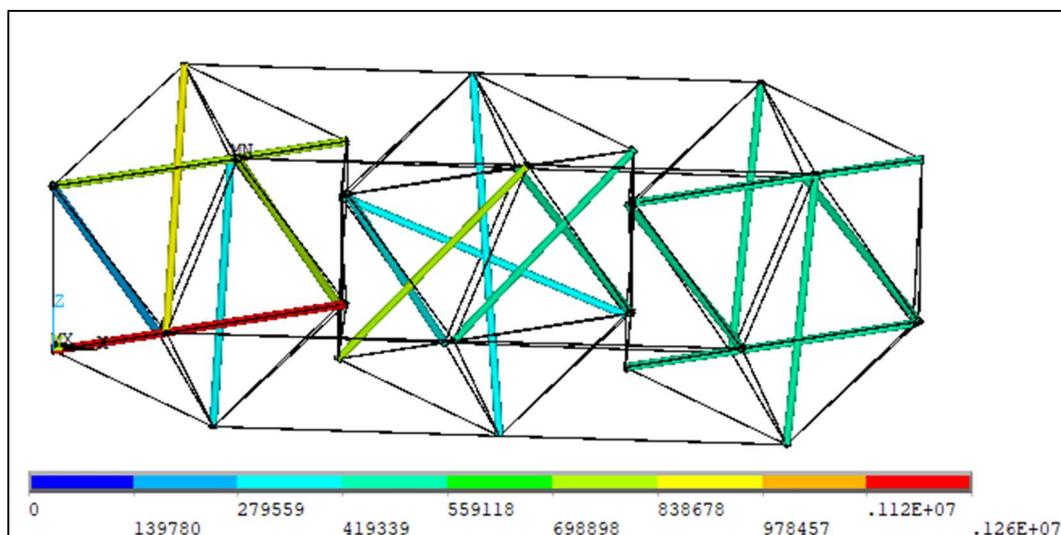
Com os carregamentos definidos e a geometria da estrutura ajustada, foram obtidas as tensões atuantes. As Figuras 45 e 46 apresentam as tensões atuantes quando há ação do vento, nas duas direções, e a Figura 47 apresenta as tensões sem considerar a ação do vento.

Figura 45 – Tensões atuantes decorrentes da força peso e do vento lateral no sentido negativo de y



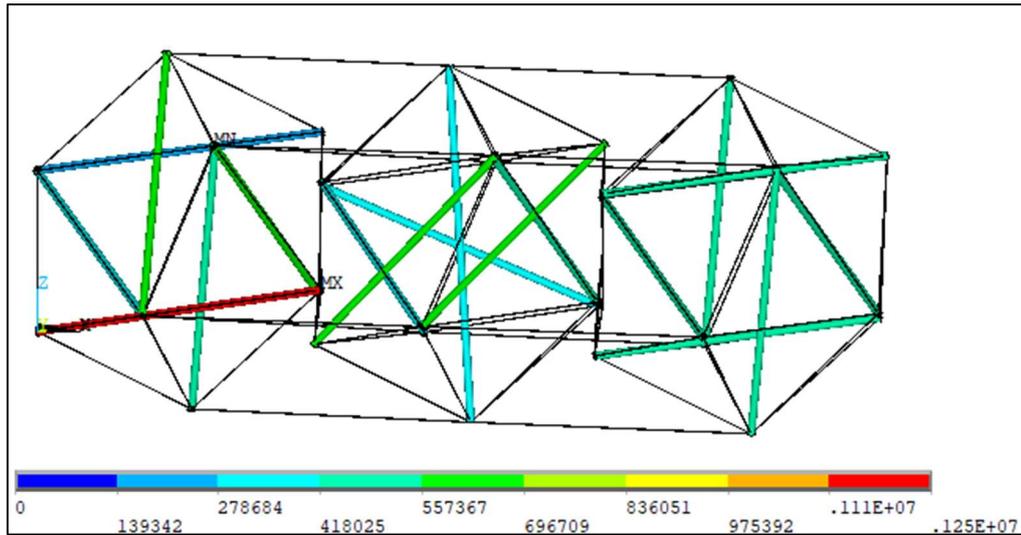
Fonte: Autoria própria

Figura 46 – Tensões atuantes decorrentes da força peso e do vento lateral no sentido positivo de y



Fonte: Autoria própria

Figura 47 – Tensões atuantes decorrentes da força peso

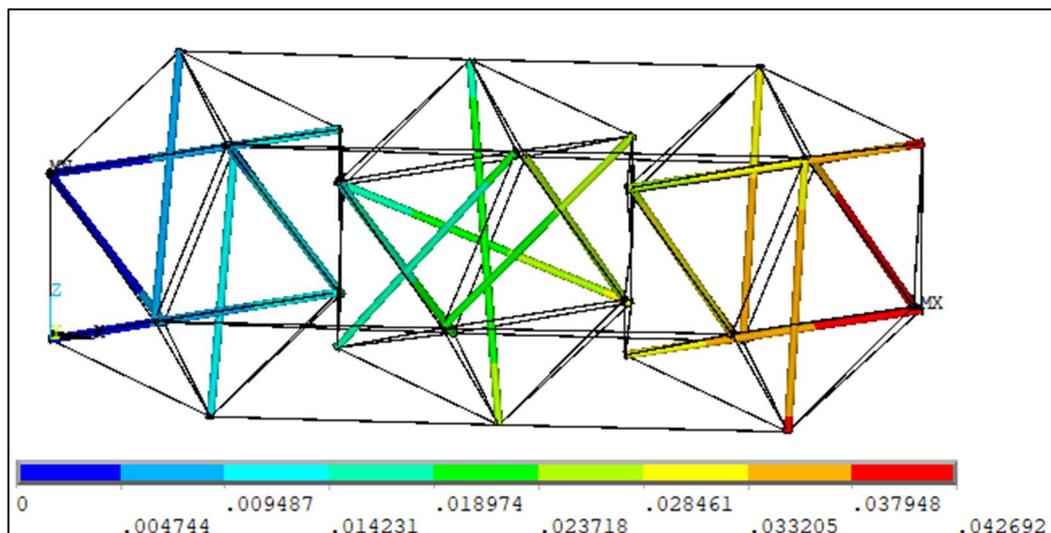


Fonte: Autoria própria

A partir da análise das tensões apresentadas nas Figuras 45, 46 e 47 pode-se notar que, com ou sem ação do vento, a barra mais solicitada segue sendo a mesma, sendo submetida a uma tensão de compressão da ordem de 1,3 MPa. As demais barras estão submetidas a tensões máximas de 0,6 MPa quando não há ação do vento, subindo para tensões próximas a 1 MPa quando há a ação do vento.

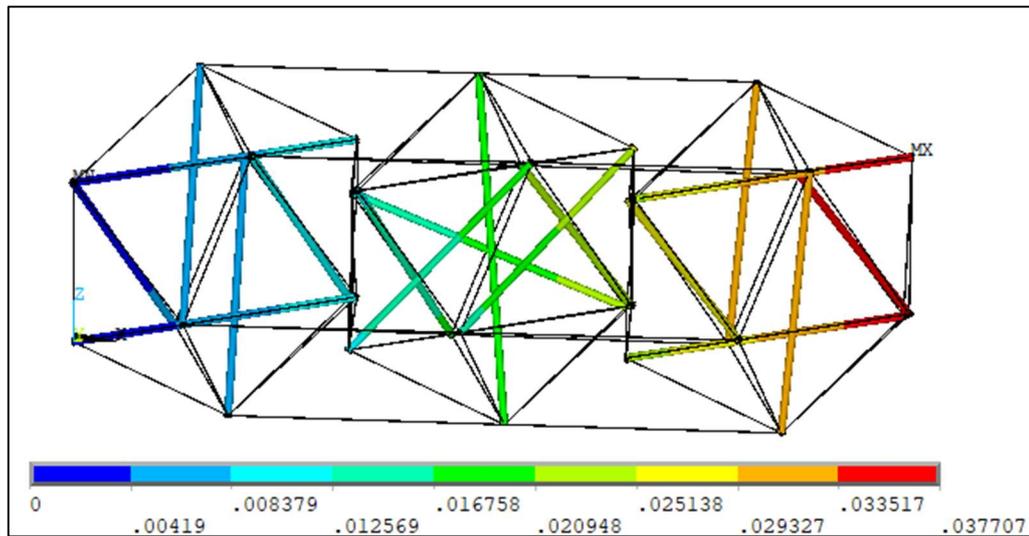
A deformada encontrada com a aplicação das cargas é apresentada nas Figuras 48, 49 e 50.

Figura 48 – Deformada com ação da força peso e do vento lateral no sentido negativo de y



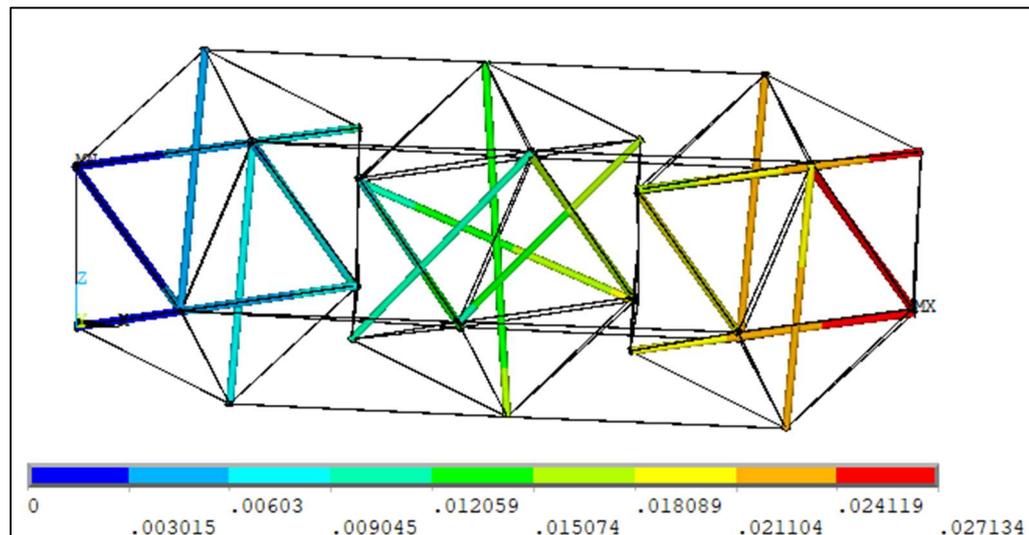
Fonte: Autoria própria

Figura 49 – Deformada com ação da força peso e do vento lateral no sentido positivo de y



Fonte: Autoria própria

Figura 50 – Deformada com ação da força peso



Fonte: Autoria própria

Analisando a configuração deformada, é possível observar que o deslocamento máximo é da ordem de 4,3 cm, quando há a ação do vento no sentido negativo de y, na região mais distante dos apoios. Sem a ação do vento, o deslocamento máximo é de 2,7 cm, ocorrendo também na região mais distante dos apoios.

A Tabela 3 apresenta as reações de apoio obtidas para a estrutura.

Tabela 3 – Reações de apoio

Apoio	Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)
k5	-3,92	-0,03	1,5
k6	-3,92	0,67	2,61
k11	7,83	-0,64	1,12

Fonte: Autoria própria

4.6 Dimensionamento

Inicialmente as barras foram classificadas quanto ao seu índice de esbeltez λ a fim de verificar a forma de ruptura das peças. As barras médias apresentaram um valor de $\lambda=142,6$ e a barra maior apresentou um valor de $\lambda=168,4$, sendo classificadas como peças esbeltas já que para ambos os casos $\lambda>80$, rompendo através da perda de estabilidade lateral, obedecendo à condição:

$$\frac{\sigma_{Nd}}{f_{c0,d}} + \frac{\sigma_{Md}}{f_{c0,d}} \leq 1 \quad (1)$$

Onde:

$f_{c0,d}$ é o valor de cálculo de resistência à compressão da madeira;

σ_{Nd} é a tensão de compressão devido à força normal;

σ_{Md} é a tensão atuante devido ao momento gerado por excentricidades que podem ocorrer.

A Tabela 4 apresenta os dados mecânicos utilizados para o cálculo do dimensionamento das barras. A Tabela 5 apresenta os dados obtidos para os diferentes comprimentos de barra.

Tabela 4 – Dados para o dimensionamento das barras

Dados de Cálculo (Jatobá)	
E_{c0} (MPa)	14837
I (m ⁴)	2,01E-06
k_{mod}	0,56
$f_{co,k}$ (MPa)	82,2
$f_{co,d}$ (MPa)	32,9
$E_{c0,ef}$ (MPa)	8308,7

Fonte: Autoria própria

Tabela 5 – Dados calculados para cada barra

Dado	Barra	
	Média	Maior
L (m)	2,85	3,37
d (m)	0,08	0,08
A (m ²)	0,005	0,005
P_{cri} (kN)	20,27	14,54
N_d (kN)	9,15	2,11
$e_{1,ef}$ (m)	0,017	0,015
σ_{Nd} (MPa)	1,82	0,42
σ_{Md} (MPa)	0,15	0,03

Fonte: Autoria própria

Utilizando a equação (1) obteve-se o valor de 0,059 para as barras médias e 0,014 para a barra maior, ambos os casos obedecendo o limite com segurança. Nesse sentido, a sugestão de peças de Jatobá com 8 cm de diâmetro é segura para a confecção da estrutura. Sugere-se que as peças sejam previamente tratadas para suportar os efeitos das intempéries.

Os cabos foram dimensionados de acordo com o escoamento da seção bruta, utilizando cabos de aço com 4 mm de diâmetro, seguindo a equação:

$$R_{dt} = \frac{A f_y}{\gamma_{a1}} \geq S_{dt} \quad (2)$$

Onde:

R_{dt} é a resistência à tração;

A é a área da seção transversal;

f_y é a tensão de escoamento do aço;
 γ_{a1} é o coeficiente minorador;
 S_{dt} é a solicitação de cálculo.

A Tabela 6 apresenta os dados para o dimensionamento dos cabos.

Tabela 6 – Dados para o dimensionamento dos cabos

Dados de Cálculo (Aço)	
d (m)	0,004
A (m ²)	1,26E-05
γ_{a1}	1,1
N _{Sd} (kN)	1,85
f_y (MPa)	250
R _{dt} (kN)	2,86

Fonte: Autoria própria

A condição imposta na equação (2) é satisfeita, sendo seguro utilizar cabos com diâmetro de 4 mm. Sugere-se a utilização de cabos com ganchos nas extremidades do tipo “espia” para facilitar a fixação.

As ligações da estrutura na fachada foram dimensionadas utilizando barras rosqueadas de aço com diâmetro de 9,5 mm. Como as barras estão submetidas à tração e à corte simultaneamente, o dimensionamento deve atender à condição:

$$\left(\frac{V_d}{R_{nv}/\gamma_{a2}}\right)^2 + \left(\frac{T_d}{R_{nt}/\gamma_{a2}}\right)^2 \leq 1 \quad (3)$$

Onde:

V_d é a força cortante de cálculo;
 T_d é a força de tração de cálculo;
 R_{nv} é a resistência nominal de corte;
 R_{nt} é a resistência nominal de tração;
 γ_{a2} é o coeficiente minorador.

A Tabela 7 apresenta os dados para o dimensionamento das barras.

Tabela 7 – Dados para o dimensionamento das barras rosqueadas

Dados de Cálculo (A307)	
d (m)	0,0095
A (m ²)	7,09E-05
f _u (MPa)	415
γ _{a2}	1,35
R _{nt} (kN)	22,06
R _{nv} (kN)	23,53
T _d (kN)	5,48
V _d (kN)	3,65

Fonte: Autoria própria

Utilizando a equação (3) obteve-se o valor de 0,156, sendo inferior a 1 e cumprindo a condição estabelecida na equação. Dessa forma, sugere-se a utilização de aço A307 de 9,5 mm de diâmetro para as barras rosqueadas que fixam a estrutura na parede.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Estruturas tensegrity são tensoestruturas com elementos submetidos unicamente à tração ou unicamente à compressão, necessitando de um campo equilibrado de tensões para garantir rigidez. São estruturas extremamente leves em comparação às suas dimensões.

A estrutura proposta e dimensionada no presente trabalho possui uma massa total de menos de 300 kg, contando com 3 módulos tensegrity interligados, chegando a quase 8 m de comprimento.

As tensões encontradas na simulação numérica se mostraram pequenas em comparação com a resistência dos materiais utilizados na proposta, garantindo a segurança na execução dessa estrutura.

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que a estrutura é uma obra executável, servindo de divulgação para a UNIPAMPA Campus Alegrete. O local encontrado para a fixação da estrutura contribui com a realização desse objetivo.

Entretanto, para que o projeto possa ser de fato executado, são necessárias ainda algumas etapas, como o dimensionamento e o detalhamento dos elementos de ligação entre os cabos e as barras, o detalhamento da ligação da obra na parede, a descrição do projeto executivo e uma análise de custos.

Ficam então essas etapas como sugestão para trabalhos futuros, além de testar o dimensionamento com madeiras mais leves.

6 REFERÊNCIAS

ALDRICH, J. B.; SKELTON, R. E.; KREUTZ-DELGADO, K. Control Synthesis for a Class of Light and Agile Robotic Tensegrity Structures. *In: 2003 American Control Conference, 2003, Denver, Colorado, USA. Proceedings of the IEEE American Control Conference, Denver, Colorado, USA, 4-6 jun. 2003. p. 5245-5251.*

ANSYS. **ANSYS Elements Reference: ANSYS Release 11.0.** USA, 2007.

ARUP. **The world's first tensegrity bridge.** Disponível em: <https://www.arup.com/projects/kurilpa-bridge>. Acesso em: 01 mar. 2022.

Building Technologies – Graduate School of Architecture Planning and Preservation. Disponível em <http://www.columbia.edu/cu/gsap/BT/DOMES/SEOUL/intro.html>. Acesso em 12.11.2003.

DEIFELD, T. E. C.; PAULETTI, R. M. O. **Numerical and physical modeling of tensegrity structures.** Disponível em: http://www.lmc.ep.usp.br/people/tdeifeld/Publicacoes_arquivos/IASS2004_ref229_Deifeld.pdf. Acesso em: 26 fev. 2022.

DEIFELD, T. E. C. **Sobre a análise e os processos construtivos das estruturas tensegrity.** Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

FULLER, R. B. **Tensile-integrity structures**, 13 nov. 1962. Disponível em: <http://www.google.com.br/patents/US3063521>. Acesso em: 12 dez. 2021.

GALIL, W. M. Tensegrity systems in nature and their impacts on the creativity of lightweight metal structures that can be applied in Egypt. **WIT Transactions on Ecology and the Environment**, v. 138, p. 41-52, 2010.

GEIGER, D.; STEFANIUK, A.; CHEN, D. **The Design and Construction of Two Cable Domes for the Korean Olympics.** Shells, Membranes and Space Frames,

Proceedings IASS Symposium, Osaka, Japan, 1986. Disponível em: <http://www.columbia.edu/cu/gsap/BT/DOMES/SEOUL/s-desig.html>. Acesso em: 28 fev. 2022.

GOULART, J. D. **Análise numérica de vigas de concreto armado reforçadas com compósito contendo fibras de juta através do método dos elementos finitos**. 2015. 88p. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2015.

INGBER, D. E. Cellular tensegrity: defining new rules of biological design that govern the cytoskeleton. **J. Cell Sci.**, v. 104, p. 613-627, 1993.

INGBER, D. E. Tensegrity: the architectural basis of cellular mechanotransduction. **Annu Rev Physio**, v. 59, p. 575-79, 1997.

INGBER, D. E.; HEIDEMAN, S. R.; LAMOUREUX, P.; BUXBAUM, R. E. Opposing views on tensegrity as a structural framework for understanding cell mechanics, **J. Appl. Physiol.**, v. 89, p. 1663-1678, 2000.

INGBER, D. E.; WANG, N.; STAMENOVIC, D. Tensegrity, cellular biophysics, and the mechanics of living systems. **Rep Prog Phys.**, v. 77, n. 4, p. 1-42, 2014.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **Informações sobre madeiras: Jatobá**. Disponível em: http://www.ipt.br/informacoes_madeiras/14.htm. Acesso em: 20 jul. 2022.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **Informações sobre madeiras: Pau-marfim**. Disponível em: https://www.ipt.br/informacoes_madeiras3.php?madeira=70. Acesso em: 20 jul. 2022.

JAKOB ROPE SYSTEMS. **The Jakob Tensegrity Torus: A gate to the sky**. 28 fev. 2020. Disponível em: <https://www.jakob.com/de/en/news/a-gate-to-the-sky-jakobr-tensegrity-torus>. Acesso em: 20 jan. 2022.

KLUGE, R. **Tensoestrutura: Uma proposta para passeios da Unipampa Campus Alegrete**. 2014. 72p. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2014.

LEVY, M.; JING, T. -F.; BRZOZOWSKI, A.; FREEMAN, G. Estadio Ciudad de La Plata (La Plata Stadium), Argentina. **Structural Engineering International**, v. 23, n. 3, p. 303-310, 2013.

LIU, K.; WU, J.; PAULINO, G. H.; QI, H. J. Programmable Deployment of Tensegrity Structures by Stimulus-Responsive Polymers. **Nature Scientific Reports**, v. 7, n. 3511, 2017.

MA, S.; CHEN, M.; SKELTON, R. E. Tensegrity system dynamics based on finite element method. **Preprint submitted to Elsevier**, 13 p., 2021. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/2106.02176.pdf>. Acesso em: 26 fev. 2022.

MARTINS, E. O. **Seções planas, ângulos e segmentos notáveis nos poliedros regulares: Uma proposta de integração e dinamização das geometrias espacial e plana**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

MOTRO, R. **Tensegrity: structural systems for the future**. Londres: Kogan Page Science, 2003. 236 p.

NASA. **Super Ball Bot**. 10 set. 2014. Disponível em: <http://www.nasa.gov/content/super-ball-bot/>. Acesso em: 28 fev. 2022.

PADOIN, D. G. **Modelagem numérica de tensoestruturas: Um estudo de caso**. 2015. 90p. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2015.

PASQUAL, T. C. S. **Um estudo sobre a ação do vento nas estruturas de membrana**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

PAUL, C.; LIPSON, H.; VALERO CUEVAS, F. J. Design of Tensegrity Robots for Fault Tolerant Locomotion. *In*: 12th International Conference on Advanced Robotics (ICAR), 2005, Seattle, Washington, USA. **Proceedings of 12th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)**. Seattle, Washington, USA. 18-20 jul., 2005.

PAULETTI, R. M. O. **História, Análise e Projeto de Estruturas Retesadas**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

PEÑA, D. M.; LLORENS, I.; SASTRE, R.; CRESPO, D.; MARTÍNEZ, J. Application of tensegrity to tensile-textile constructions: formfinding and structural analysis. **J. IAASS**, v. 52, n. 2, p. 67-81, 2011.

RAESIDE, W. **Iconic Tensegritree structure marks double birthday - University of Kent**. 13 nov. 2015. Disponível em: <https://www.kent.ac.uk/news/kentlife/7321/iconic-tensegritree-structuremarks-double-birthday>. Acesso em: 15 fev. 2022.

RIEKSTINS, A. **Introduction Tencellity Tower**. 18 abr. 2008. Disponível em: <http://tensegritytower.blogspot.com.br/>. Acesso em: 21 jan. 2022.

SOARES, H. F. T. **Análise numérica das tensões na diagonal comprimida de um pórtico preenchido por alvenaria**. 2016. 62p. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2016.

SNELSON, K. D. **Continuous tension, discontinuous compression structures**. U.S. Patent No. 3,169,611. 16 fev. 1965. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/US3169611A>. Acesso em: 12 dez. 2021.

SNELSON, K. **Outdoor Works**. Disponível em: <http://kennethsnelson.net/category/sculptures/outdoor-works/>. Acesso: 20 jan, 2022.

STRUCTURAE - International Database and Gallery of Structures. Disponível em: <http://www.structurae.net/en/structures>. Acesso em: 28 fev. 2022.

SUHANKO, D. **DIY – “Objeto impossível” – ou, “tensegridade”**. 22 jun. 2020. Disponível em: <http://dobitaobyte.com.br/diy-objeto-impossivel-ou-tensegridade/>. Acesso em: 28 fev. 2022.

TIBERT, A. G.; PELLEGRINO, S. **Review of form-finding methods for tensegrity structures**. International Journal of Space Structures, v. 18, n. 4, p. 209-223, 2003.

TUCHMAN, J.; HO-CHUL, S. **Olympic Domes First of Their Kind**. Engineering News Record, 6 mar. 1986. Disponível em: <http://www.columbia.edu/cu/gsap/BT/DOMES/SEOUL/s-olymp.html>. Acesso em: 28 fev. 2022.