

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

MATEUS MAKOSKI

APLICAÇÃO DE EXTENSOMETRIA EM UMA TRELIÇA PLANA

XANXERÊ - SC

2022

MATEUS MAKOSKI

APLICAÇÃO DE EXTENSOMETRIA EM UMA TRELIÇA PLANA

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Coordenadoria do Curso de Engenharia Mecânica do Câmpus Xanxerê do Instituto Federal de Santa Catarina, para a obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Samuel Scheleski

Coorientador: Prof. Raphael Basilio Pires Nonato

XANXERÊ - SC

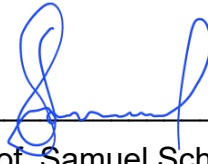
2022

MATEUS MAKOSKI

APLICAÇÃO DE EXTENSOMETRIA EM UMA TRELIÇA PLANA

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título em bacharel em engenharia mecânica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo indicada.

Xanxerê, 12 de Dezembro de 2022



Prof. Samuel Scheleski

Orientador

Instituto Federal de Santa Catarina

Prof. Raphael Basilio Pires Nonato

Coorientador

Instituto Federal de Santa Catarina

Prof. Carlos Alfredo Gracioli Aita

Instituto Federal de Santa Catarina

*O presente projeto é dedicado a todos que buscam
suprir suas necessidades de conhecimento.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por ter me dado força e determinação para enfrentar as dificuldades.

A esta universidade, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram a janela que hoje vislumbro um horizonte superior, eivado pela acendrada confiança no mérito e ética aqui presentes.

Ao meu orientador Samuel e coorientador Raphael, pelo suporte no pouco tempo que lhe couberam, pelas suas correções e incentivos.

Aos meus pais, minha irmã, minha esposa e minha filha, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

*“A vida ultrapassa a matemática quando faz acontecer coisas
cujas possibilidades beiram o impossível.”
(Beatriz Mello)*

RESUMO

A treliça é uma estrutura utilizada principalmente para redução de massa. Após a fabricação, a mesma apresenta discrepâncias em relação àquela projetada. O objetivo geral deste projeto é constatar a diferença entre a obtida pelo processo de fabricação (física) e a obtida via projeto (virtual), utilizando-se três métodos: o analítico, o computacional e o experimental. Sua modelagem geométrica inicial visando à fabricação será em 3D, adotando-se o modelo 2D para cálculo. Com o auxílio da técnica de extensometria, foram instalados extensômetros em locais específicos para avaliação, obtendo assim os valores de deformação. No que se refere a processos de fabricação da treliça, corte, soldagem e pintura são realizados. Define-se os locais de colagem dos extensômetros, passando para a posterior limpeza da superfície e a colagem dos extensômetros. Ligam-se os extensômetros ao equipamento de aquisição de dados após a colocação da treliça na bancada e posiciona-se o carregamento no ponto previamente definido da estrutura. Para as condições impostas, obteve-se as seguintes deformações experimentais: (a) -79,73 micrometros/metro no elemento estrutural 7; e (b) 17,08 micrometros/metro no elemento 6. Ao serem comparadas aos valores provenientes dos métodos analítico e teórico, obtêm-se módulos de erros relativos de, respectivamente: (a) 30,42%; e (b) 152,34%. Diante destes resultados, realizou-se uma análise adicional, em que se obteve valores mais próximos aos calculados: (a) -50,72 micrometros/metro para o elemento estrutural 7; e (b) 37,89 micrometros/metro no elemento 6. Ao serem comparadas aos valores provenientes dos métodos analítico e teórico, obtêm-se módulos de erros relativos de, respectivamente: (a) 20%; e (b) 14%. Com isso, conclui-se que os resultados obtidos ficaram coerentes com os valores visados para os experimentos.

Palavras-chave: Medição de deformação; extensometria; treliça; treliça plana; extensômetro.

ABSTRACT

The truss is a structure used mainly for mass reduction. After manufacturing, it presents discrepancies in relation to that designed. The general objective of this design is to verify the difference between that obtained by the manufacturing process (physical) and that obtained via design (virtual), using three methods: the analytical, the computational and the experimental. Its initial geometric modeling aimed at manufacturing will be in 3D, adopting the 2D model for calculation. With the aid of the extensometry technique, the extensometers are installed in specific places for evaluation, thus obtaining the strain values. With regard to the truss manufacturing processes, cutting, welding and painting are carried out. The locations for bonding the extensometers are defined, moving on to subsequent cleaning of the surface and actual bonding of the extensometers. The extensometers are connected to the data acquisition equipment after placing the truss on the bench and positioning the load at the previously defined point of the structure. For the imposed conditions, the following experimental strains were obtained: (a) -79.73 micrometers/meter in structural element 7; and (b) 17.08 micrometers/meter in element 6. When compared to the values from the analytical and computational methods, absolute values of the relative errors are obtained, respectively: (a) 30.42%; and (b) 152.34%. In view of these results, an additional analysis was carried out, in which values closer to those calculated were obtained: (a) -50.72 micrometers/meter for structural element 7; and (b) 37.89 micrometers/meter in element 6. When compared to the values from the analytical and theoretical methods, absolute values of the relative errors are obtained, respectively: (a) 20%; and (b) 14%. Therefore, it is concluded that the results obtained were consistent with the values targeted for the experiments.

Keywords: Strain measurement; extensometry; truss; planar truss; strain gage.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Ironbridge, Coalbrookdale, Inglaterra | 18 |
| Figura 2: Principais componentes de uma treliça..... | 19 |
| Figura 3: Modelos mais comumente utilizados..... | 19 |
| Figura 4: Modelo de treliça Fink..... | 20 |
| Figura 5: Modelo de Treliça Pratt..... | 21 |
| Figura 6: Modelo de treliça Howe..... | 21 |
| Figura 7: Modelo de treliça Warren..... | 22 |
| Figura 8: Diagrama de corpo livre treliça..... | 23 |
| Figura 9: Treliça exemplo..... | 24 |
| Figura 10: Detalhe do nó A..... | 25 |
| Figura 11: Detalhe do nó D..... | 25 |
| Figura 12: Detalhe do nó B..... | 26 |
| Figura 13: Exemplo para método das seções..... | 27 |
| Figura 14: Corte AA e BB..... | 28 |
| Figura 15: Detalhamento dos cortes AA e BB..... | 28 |
| Figura 16: Detalhamento corte BB..... | 29 |
| Figura 17: Extensômetro Uniaxial..... | 31 |
| Figura 18: Extensômetros biaxiais..... | 31 |
| Figura 19: (a) Extensômetro triaxial de 45°; (b) Extensômetro quadriaaxial..... | 32 |
| Figura 20: Tipos de strain gauges..... | 32 |
| Figura 21: Deformação de um fio..... | 33 |
| Figura 22: Programa FTOOL®..... | 37 |
| Figura 23: Bancada de treliças..... | 39 |
| Figura 24: Modelagem da treliça metálica..... | 40 |
| Figura 25 - Esmerilhadeira angular..... | 41 |
| Figura 26 - Aparelho de solda MIG/MAG..... | 41 |
| Figura 27: Esquemático da treliça utilizada no projeto..... | 42 |
| Figura 28 - Colagem dos extensômetros..... | 43 |
| Figura 29 - Sistema de aquisição..... | 43 |

| | |
|--|----|
| Figura 30: Etapas seguidas para preparação da superfície. | 45 |
| Figura 31: Tubos selecionados, preparação e colagem dos extensômetros. | 45 |
| Figura 32: Modelo para o cálculo analítico. | 46 |
| Figura 33: Detalhamento do nó A. | 46 |
| Figura 34: Detalhamento do nó B. | 47 |
| Figura 35: Detalhamento do nó D. | 48 |
| Figura 36: Detalhamento do nó E. | 49 |
| Figura 37: Demonstração das forças atuantes em cada barra. | 49 |
| Figura 38: Projeto e análise pelo software FTOOL®. | 50 |
| Figura 39: Treliza posicionada para a aquisição de dados. | 51 |
| Figura 40: Tela com os resultados obtidos a partir do teste 1 com a carga especificada. | 52 |
| Figura 41 - Pontos de medições para o teste 2. | 53 |
| Figura 42 - Tela com os resultados obtidos a partir dos experimentos com a carga especificada. | 54 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1: Composição e fator de sensibilidade para ligas metálicas utilizadas em extensômetros..... | 35 |
| Tabela 2: Composição Química e propriedades mecânicas para o aço SAE 1008 | 39 |
| Tabela 3: Esforços atuantes em cada membro..... | 50 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 14 |
| 1.1. | Justificativa | 15 |
| 1.2 | Objetivos | 16 |
| 1.1.1. | Objetivo Geral | 16 |
| 1.1.2. | Objetivos Específicos | 16 |
| 1.3 | Delimitações | 16 |
| 2 | REVISÃO DA LITERATURA | 17 |
| 2.1 | Estruturas metálicas | 17 |
| 2.1.1 | Treliças simples | 18 |
| 2.1.2 | Tipos de treliças | 19 |
| 2.1.3 | Treliças Fink | 20 |
| 2.1.4 | Treliças Pratt | 20 |
| 2.1.5 | Treliça Howe | 21 |
| 2.1.6 | Treliça Warren | 21 |
| 2.2 | Método dos nós | 22 |
| 2.3 | Método das seções | 27 |
| 2.4 | Extensômetros | 30 |
| 2.5 | FTOOL® | 36 |
| 3 | METODOLOGIA | 37 |
| 3.1 | Delimitação da pesquisa | 37 |
| 3.1.1 | Do ponto de vista da sua natureza | 37 |
| 3.1.2 | Do ponto de vista da forma de abordagem do problema | 38 |
| 3.1.3 | Do ponto de vista dos seus objetivos | 38 |
| 3.1.4 | Do ponto de vista dos procedimentos técnicos | 38 |
| 3.2 | Dados de entrada do projeto | 39 |
| 3.3 | Método Analítico | 40 |
| 3.4 | Método Computacional | 40 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 3.5 | Fabricação | 41 |
| 3.6 | Modelagem, fabricação e montagem do sistema | 41 |
| 3.7 | Colagem dos extensômetros | 42 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 44 |
| 4.1 | Modelagem, fabricação e montagem do sistema | 44 |
| 4.1.1 | Fabricação | 44 |
| 4.1.2 | Colagem dos extensômetros e instalação do sistema de aquisição | 44 |
| 4.2 | Calculo pelo Método Analítico | 45 |
| 4.3 | Cálculo utilizando o <i>software</i> FTOOL® | 50 |
| 4.4 | Obtenção de Resultados por Extensometria | 51 |
| 4.4.1 | Resultados obtidos no segundo experimento | 52 |
| 5 | CONCLUSÕES | 55 |
| 6 | REFERÊNCIAS | 56 |
| 7 | APÊNDICES | 59 |
| 7.1 | Apêndice 1: Desenho dos Elementos Constituintes da Treliça | 59 |
| 7.2 | Apêndice 2: Desenho de Montagem da Treliça | 63 |

1 INTRODUÇÃO

Treliça é uma estrutura com elementos delgados ligados entre si pelas extremidades. Essa ligação pode ser feita através de soldagem, parafusos ou pinos, ou rebites. É construída geralmente a partir de vigas I, U, cantoneiras ou perfis especiais. Para serem utilizadas em apoios de coberturas, pontes e guindastes. (MERIAM e KRAIGE, 2016).

Atualmente há uma grande busca por construções mais leves, baratas, com uma ótima resistência e durabilidade. Para isso, as estruturas devem ser projetadas para que suportem cargas, permanecendo em boas condições, de forma que não comprometam o conforto, a durabilidade e a segurança dos usuários durante toda a sua vida útil. Para se conseguir tais intentos, cabe aos engenheiros e projetistas evitarem eventuais falhas que possam ocorrer durante a vida útil da estrutura, de posse dos resultados obtidos após a realização de estudos e análises. (MODESTI, 2019).

Para se obter esses resultados é necessário, em primeiro lugar, descobrir qual o esforço sofrido por cada elemento de determinada treliça. Dentre os métodos existentes para obtenção de deslocamentos em membros estruturais, tem-se o método analítico. Neste, é preciso analisá-la em diagrama de corpo livre, de forma desmembrada individual ou em uma determinada combinação de elementos. Com a aplicação da terceira lei de Newton, onde a cada reação sempre irá existir uma reação oposta de mesma intensidade, é possível se obter as forças internas da estrutura. (MERIAM e KRAIGE, 2016).

Pelo método computacional, tem-se a estrutura modelada matematicamente e computacionalmente em termos de sua geometria, condições de apoios e carregamentos aplicados.

Já pelo método experimental, a análise dos esforços internos em uma treliça pode ser feita por meio da implementação de instrumentação de extensometria que, segundo Fialho (2010), “[...] é o método que tem por objetivo a medição das deformações superficiais dos corpos.”

Segundo Hibbeler (2016), quando há aplicação de força em um corpo, o mesmo tende a variar sua forma e/ou tamanho. Essas variações, quando comparadas à dimensão inicial, são definidas como deformações, que podem ser extremamente visíveis (quando da utilização de equipamentos e instrumentos adequados) ou praticamente imperceptíveis (quando observados de modo inadequado).

Para a medição de pequenas variações sofridas por um corpo de prova ou uma máquina, podemos aplicar a extensometria, que é conduzida por meio da utilização de extensômetros, que utilizam a resistência da superfície para determinar se o material teve um alongamento ou encurtamento. (FIALHO, 2010).

Deste modo, torna-se de grande valia verificar se os resultados do método analítico (diante de todas as limitações a ele inerentes) são compatíveis com os resultados obtidos via método experimental (que também é passível de incorreções, tanto procedimentais como também metodológicas) e também com o método computacional.

1.1. Justificativa

Diante da competitividade do mercado, a busca por projetos mais adequadamente fundamentados para auxiliar no dimensionamento do produto que será fabricado torna-se cada vez mais evidente. Deste modo, consegue-se reduzir a incerteza acerca dos resultados atrelados às condições do projeto.

Diante disto, ao comparar os resultados de três métodos distintos (analítico, computacional e experimental), em tese, tem-se a possibilidade de obtenção de maior acuracidade dos resultados. Adicionalmente, o fato de a técnica de extensometria poder ser aplicada a uma estrutura de maiores dimensões em ambiente laboratorial pode vir a ser um pequeno legado deixado para o IFSC (câmpus Xanxerê).

O potencial de aplicabilidade da extensometria é grande, pois esta técnica pode ser grande aliada na manutenção da competitividade das empresas, pois possibilita a realização de análises experimentais para a otimização do processo de projeto, podendo vir a diminuir o tempo de desenvolvimento de produtos e minimizando a possibilidade de alguns tipos de erros.

Assim, pode-se afirmar que, a partir desta pesquisa e de possíveis publicações dela

advindas, informações relevantes sobre aplicação de extensometria a estruturas podem vir a serem conseguidas, o que pode ser aproveitado por empresas, pessoas e público interessado nesta temática.

1.2 Objetivos

O objetivo geral e os dele advindos são descritos a seguir.

1.1.1. Objetivo Geral

Constatar a diferença entre a deformação obtida pelo processo de fabricação (física) e a obtida via projeto (virtual), utilizando-se três métodos: o analítico, o computacional e o experimental.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Projetar uma treliça plana que se adeque a uma bancada didática para ensaio de treliças.
- Especificar cargas externas a serem aplicadas na treliça.
- Realizar a fabricação da treliça definida no problema.
- Submeter esta treliça a um esforço pré-determinado, tendo como base a bancada de treliças disponível no IFSC, câmpus de Xanxerê.
- Calcular os esforços nos membros estruturais pelo método dos nós e transformá-los em deformações.
- Calcular os esforços nos membros estruturais pelo software FTOOL[®] e transformá-los em deformações.
- Aplicar a técnica de extensometria para medição de deformações nos membros de uma treliça.

1.3 Delimitações

O projeto se delimitou a projetar, fabricar e comparar os resultados das deformações

em uma treliça plana utilizando os métodos analítico e experimental. Para o método analítico, o método dos nós foi o selecionado. Para um resultado adicional de deformação pelo método analítico, o *software* FTOOL[®] é utilizado. O método experimental é aplicado por meio de extensometria.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo é abordada a revisão da literatura de: (a) estruturas metálicas; (b) método dos nós; (c) método das seções; (d) extensômetros; (e) FTOOL[®].

2.1 Estruturas metálicas

A utilização de estruturas metálicas teve seu início no século XII, onde eram utilizados tirantes em ferro fundido, usados como um elemento de reforço nas estruturas de madeiras fabricadas na época. Já no século XVI, tornaram-se comuns as estruturas para telhado em ferro fundido com sistemas estruturais pouco racionais, uma vez que nessa época a análise estática encontrava-se em fase inicial de desenvolvimento. No final do século XVIII teve início a construção de cúpulas de igrejas e pontes (PFEIL, 2021).

Segundo Fakury, Castro, Silva e Caldas (2015), as vantagens do aço em relação aos demais materiais são alta resistência, elevada ductilidade, manutenção barata, e rapidez na fabricação e montagem. Destacam-se também, projetos que necessitam de um grande vão livre, como por exemplo ginásios, estádios e galpões, a utilização do aço seria o mais adequado e exequível.

Por volta do ano de 1775, projeto criado pelo arquiteto Thomas Pritchard e construída por Abraham Darby III, a ponte sobre o rio Severn em Coalbrookdale - Inglaterra (Figura 1), é formada por arcos em ferro fundido treliçados, seguindo modelos utilizados em pontes de alvenaria.

Figura 1: Ironbridge, Coalbrookdale, Inglaterra



Fonte: Educacional.com.br (2016).

2.1.1 Treliças simples

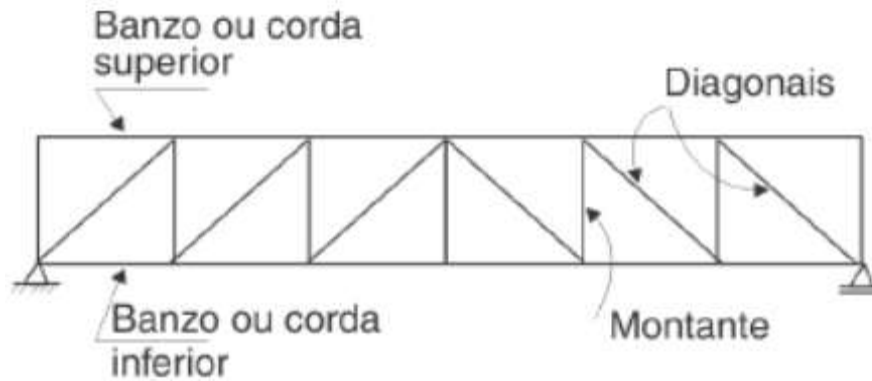
Segundo Cerveja (2019), a treliça é um dos principais tipos de estruturas da engenharia. Ela oferece uma solução prática e econômica a muitas situações de engenharia, especialmente no projeto de pontes e edifícios.

As treliças são estruturas relativamente leves e capazes de superar grandes vãos, muitas vezes com elevadas solicitações de carga. São aplicadas em projetos de pontes, estruturas de coberturas, torres de transmissão, tornando-se uma solução econômica e prática. (MODESTI, 2019).

Conforme Meriam e Kraige (2010), treliças são estruturas deformáveis obtidas pela união de elementos unidos por suas extremidades, comumente construídas a partir dos perfis estruturais, como por exemplo cantoneiras, vigas I e U, entre outras, tendo sua união realizada a partir de rebites, pinos, solda e parafusos. Quando esses elementos estão situados em um mesmo plano, podemos considerar que essa é uma treliça plana.

Segundo Pfeil (2021), uma treliça plana possui sua estrutura formada a partir de um banzo inferior e um superior, ligados entre si pelas diagonais e os montantes. Suas uniões são nomeadas nós interligados, que a partir da união de montantes e diagonais formam triângulos internos que servem para distribuir melhor a força aplicada sobre estes. Na Figura 2 estão ilustrados os principais componentes de uma treliça.

Figura 2: Principais componentes de uma treliça.



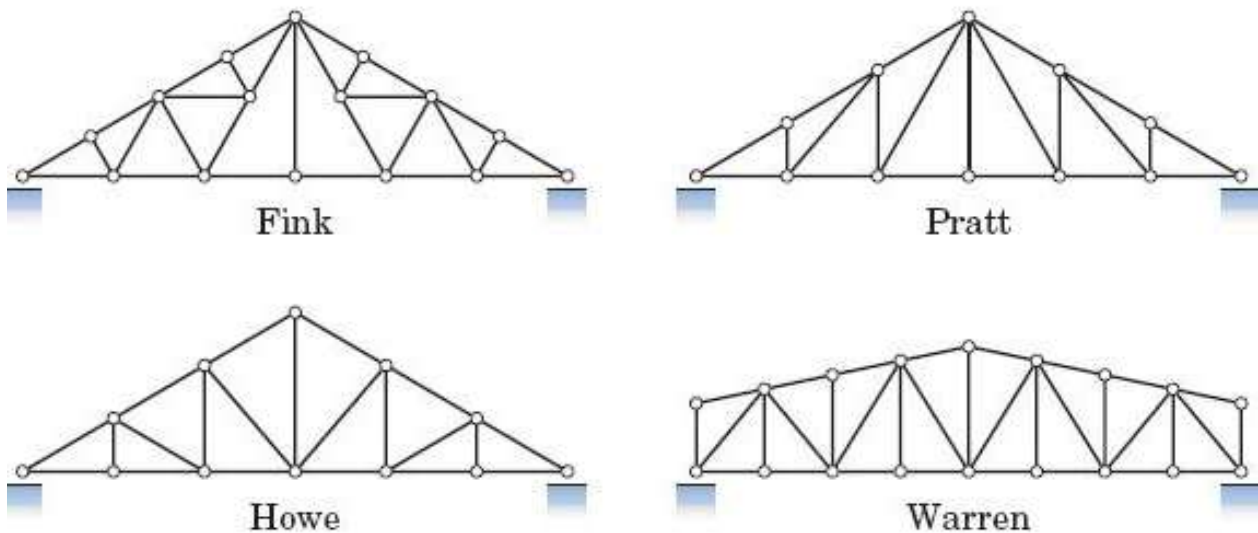
Fonte: PFEIL, W.; PFEIL, M. (2021).

Uma forma fácil para obter uma treliça simples é utilizar a equação $m = 2n + 3$, onde m é o número de elementos e n , o número de nós presentes na treliça.

2.1.2 Tipos de treliças

Segundo Meriam e Kraige (2007), os modelos mais comuns de treliças são 4: Pratt, Howe, Warren e Fink, suas estruturas são conforme demonstrado na Figura 3, a seguir:

Figura 3: Modelos mais comumente utilizados.

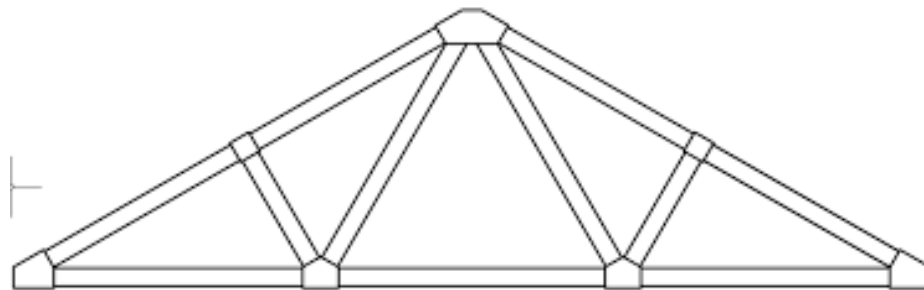


Fonte: Meriam e Kraige (2007).

2.1.3 Treliças Fink

Estrutura desenhada para suportar a maior ponte ferroviária da época, localizada sobre o rio Monongahela, em Fairmont. Teve sua patente concedida no ano de 1854 pelo engenheiro e executivo americano nascido na Alemanha, Albert Fink. (ENCYCLOPEDIA BRITANNICA, 2019). Treliça conhecida pelos seus múltiplos elementos diagonais que se projetam para a base inferior da treliça, partindo do topo e assim tendo uma variedade de ângulos de inclinação, conforme é possível analisar na Figura 4.

Figura 4: Modelo de treliça Fink



Fonte: Autoria Própria (2022).

2.1.4 Treliças Pratt

Modelo desenvolvido pelos engenheiros Thomas e Caleb Pratt. No ano de 1844 realizaram a patente dessa treliça, quando trabalhavam na construção de pontes na cidade de Boston, EUA (HISTORY OF BRIDGES, 2019). Uma de suas principais características fica por conta das suas diagonais, que são colocadas em paralelo, inclinadas e voltadas para o centro superior da treliça. Na Figura 5 está representada uma estrutura que segue o modelo Pratt.

Figura 5: Modelo de Treliça Pratt.



Fonte: Autoria própria (2022).

2.1.5 Treliça Howe

Criada por um dos pioneiros em construções de pontes, William Howe, a estrutura teve seu primeiro modelo desenvolvido para uma ponte sobre o rio Connecticut, no ano de 1840. (HISTORY OF BRIDGES, 2019). Tem seu projeto muito parecido com a treliça Pratt, com exceção de que as diagonais são com inclinação partindo do topo e direcionadas para o centro na base da treliça, conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6: Modelo de treliça Howe.



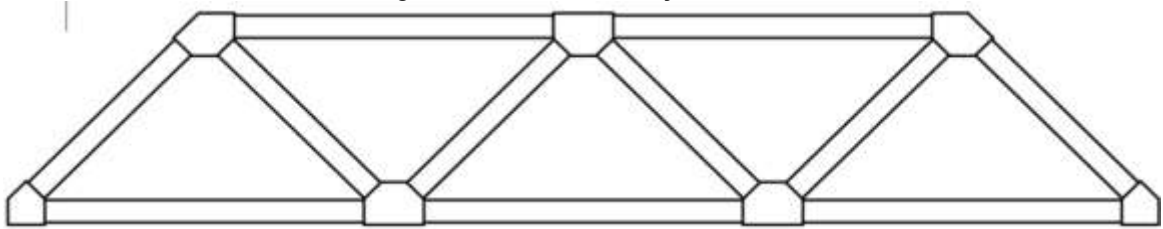
Fonte: Autoria própria (2022).

2.1.6 Treliça Warren

Essa treliça foi projetada e patenteada pelo engenheiro britânico James Warren e

Willoughby Theobald em 1848. A ponte de Manhattan, EUA, foi a primeira ponte suspensa a utilizar esse modelo de estrutura. (REVOLVY, 2019). Uma de suas principais características fica por conta da utilização de triângulos equiláteros ou isósceles em sua construção, sendo conhecida como uma das treliças mais simples. Na figura 7 é possível ver uma aplicação da treliça Warren.

Figura 7: Modelo de treliça Warren.



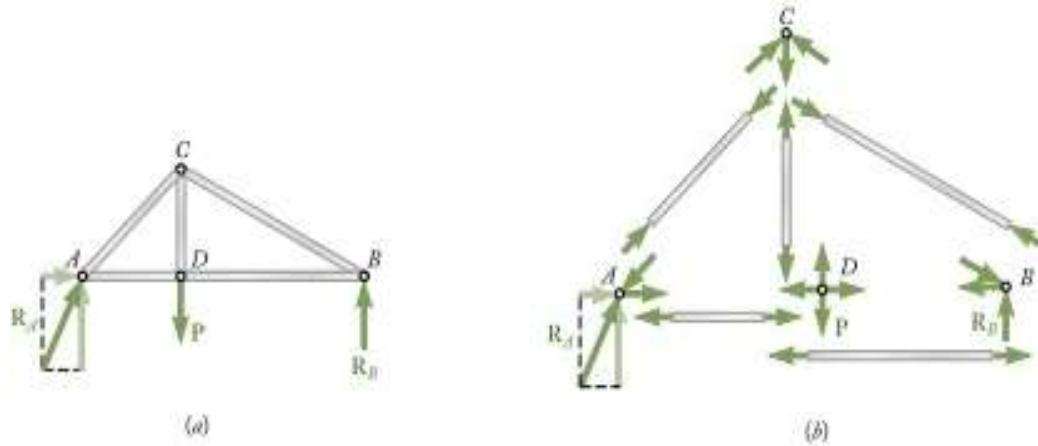
Fonte: Autoria Própria (2022).

2.2 Método dos nós

O procedimento para aplicação do método dos nós está na consideração do equilíbrio do nó de uma treliça. A força em um elemento transforma-se em uma força externa no diagrama de corpo livre do nó e as equações de equilíbrio podem e devem ser aplicadas para obter as magnitudes das forças nos elementos restantes (Hibbeler, 2010).

É necessário desenhar um diagrama de corpo livre antes de aplicar as equações de equilíbrio. A linha de aderência da força aplicada em cada nó é detalhada na geometria da treliça, isso porque a força no elemento atua ao longo de seu eixo geométrico.

Figura 8: Diagrama de corpo livre treliça.



Fonte: BEER (2016).

As equações 1, 2 e 3 representam as principais equações utilizadas para determinação das forças atuantes em certo ponto “ p ” da treliça.

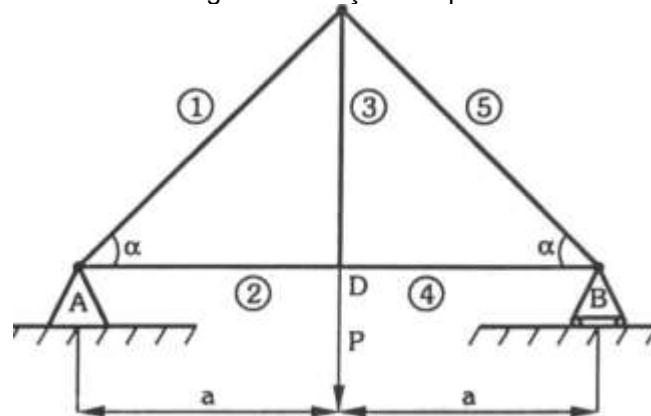
$$\sum F_x = 0, \quad (1)$$

$$\sum F_y = 0, \quad (2)$$

$$\sum M_p = 0. \quad (3)$$

A Figura 9 ilustra uma treliça simples, que se utiliza como exemplo para demonstração do cálculo pelo método dos nós.

Figura 9: Treliça exemplo.



Fonte: Autoria Própria (2022).

Pode-se concluir que, para esse caso, as reações R_A e R_B serão iguais, pois a treliça a ser analisada é simétrica e a única força atuante, P , encontra-se entre os elementos 2 e 4, sendo assim tem-se, pela Equação 4:

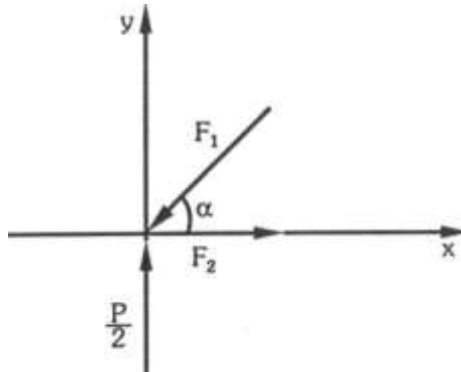
$$R_A = R_B = \frac{P}{2}. \quad (4)$$

Com base nas cargas apresentadas, é possível afirmar se a barra está sofrendo compressão ou tração. Para o exemplo em questão, pode-se considerar que a barra 1 e 5 estão em compressão. As barras 2 e 4 estão em tração, pois equilibram as barras 1 e 5. Sendo assim, a barra 3 também encontra-se em tração pois está sendo tracionada pela carga P .

A análise deve começar pelo nó que possuir ao menos uma força conhecida e duas ou menos desconhecidas. Assim, ao se aplicar as equações de equilíbrio, obtêm-se duas equações algébricas que podem ser solucionadas para as duas forças desconhecidas (HIBBELER, 2010).

Diante disto, em nosso caso, os dois pontos com menos forças desconhecidas são o nó A e nó B . Utilizando a Equação 2 no nó A , ilustrado na Figura 10, pode-se obter a Equação 5:

Figura 10: Detalhe do nó A.



Fonte: Autoria Própria (2022).

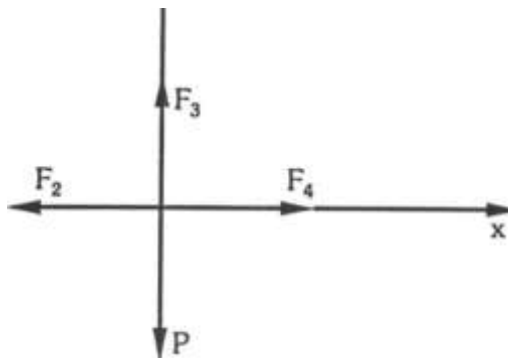
$$F_1 = \frac{P}{2 \operatorname{sen}(\alpha)} = \frac{P}{2} \operatorname{cosec}(\alpha). \quad (5)$$

Ao aplicar a Equação 1, obtém-se a Equação 6:

$$F_2 = F_1 \cos(\alpha) = \frac{P \cos(\alpha)}{2 \operatorname{sen}(\alpha)} = \frac{P}{2} \cot g(\alpha) \quad (6)$$

Com a determinação da força F_2 , o nó D fica dentro das especificações propostas, conforme mostra Figura 11.

Figura 11: Detalhe do nó D.



Fonte: Autoria Própria (2022).

Ao aplicar a Equação 2, obtém-se a Equação 7:

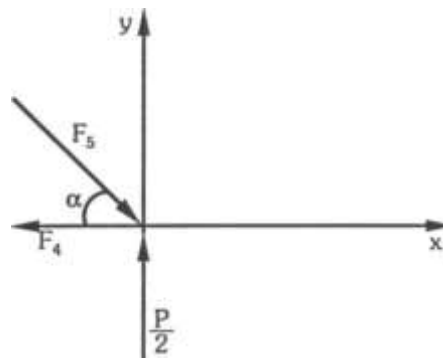
$$F_3 = P. \quad (7)$$

Ao aplicar a Equação 1, obtém-se a Equação 8:

$$F_4 = F_2 = \frac{P}{2} \cot g(\alpha). \quad (8)$$

Para determinação da força F_5 , é possível utilizar do nó B , em detalhe na Figura 12.

Figura 12: Detalhe do nó B.



Fonte: Autoria Própria (2022).

Ao aplicar a Equação 2, obtém-se a Equação 9:

$$F_5 = \frac{P}{2 \operatorname{sen}(\alpha)} = \frac{P}{2} \operatorname{cosec}(\alpha). \quad (9)$$

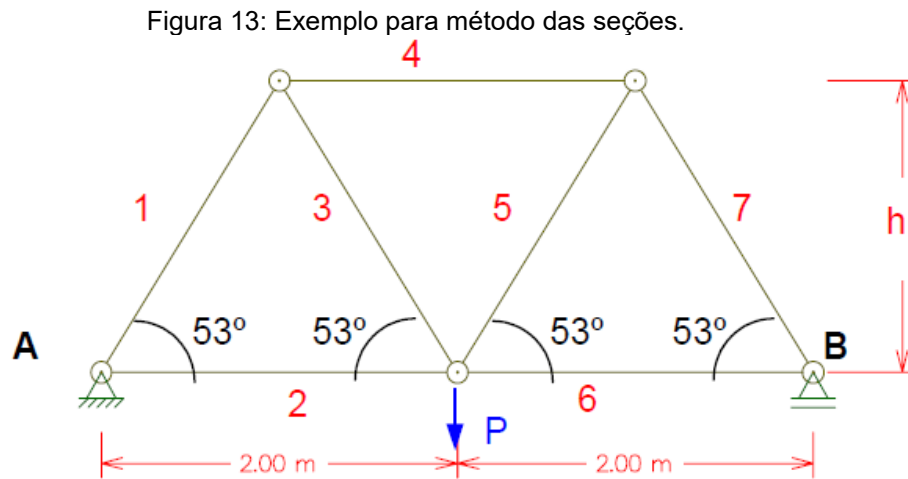
Visto que o exemplo simetria geométrica e de carregamento aplicado, é possível afirmar que F_5 será igual a F_1 .

2.3 Método das seções

Uma das utilizações do método das seções é selecionar os elementos de uma treliça completa, baseando-se no princípio de que se o corpo está em equilíbrio, toda e qualquer parte desse também estará em equilíbrio (HIBBELER, 2010).

Assim, de acordo com o método das seções, é necessário dividi-la em duas partes e desenhar um diagrama de corpo livre de uma de suas partes, e deste modo, equações de equilíbrio podem ser aplicadas para determinar as forças dos membros na seção de corte. Entretanto, é necessário selecionar uma seção que não tenha mais de três elementos com forças desconhecidas já que só podem ser aplicadas três equações de equilíbrio na parte isolada (HIBBELER, 2010).

Para um melhor entendimento, utiliza-se a treliça da Figura 13 e aplica-se o método para encontrar valor de esforço para cada elemento estrutural.



Fonte: Autoria própria (2022).

A partir do ângulo de 53 graus, é possível determinar a altura h (Equação 10).

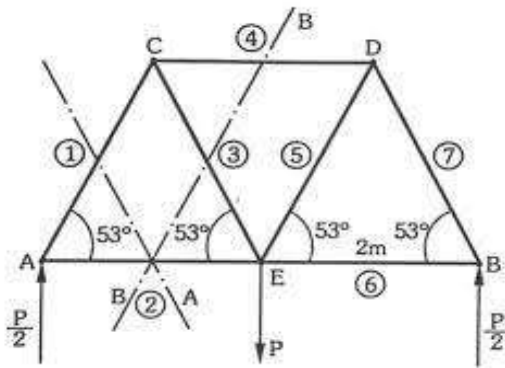
$$h = \operatorname{tg}(53^\circ) \Rightarrow h = 1,33 \text{ m.} \quad (10)$$

Com base na simetria geométrica e de carregamento, pode-se dizer que a Equação 11 é verdadeira.

$$R_A = R_B = \frac{P}{2}. \quad (11)$$

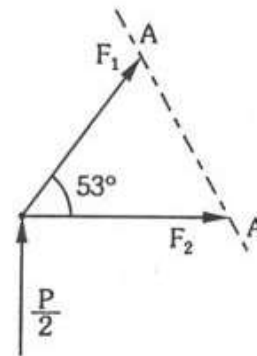
Aplicando o corte AA (Figura 15) na treliça e assim utilizando o lado esquerdo da estrutura cortada para verificar o equilíbrio, será possível encontrar a carga axial nas barras 1 e 2

Figura 14: Corte AA e BB.



Fonte: Autoria Própria (2022).

Figura 15: Detalhamento dos cortes AA e BB.



Fonte: Autoria Própria (2022).

Ao aplicar a Equação 2, obtém-se a Equação 12:

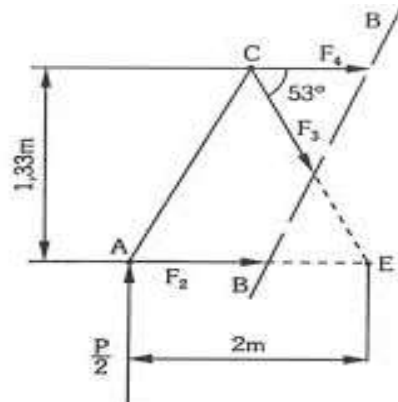
$$F_1 \operatorname{sen}(53^\circ) + \frac{P}{2} \Rightarrow F_1 = -0,625 P. \quad (12)$$

Ao aplicar a Equação 1, obtém-se a Equação 13:

$$F_2 + F_1 \cos(53^\circ) = 0. \Rightarrow F_2 = -\left(\frac{P}{2} \frac{0,6}{0,8}\right) \quad (13)$$

Aplicando o corte BB (figura 16) na treliça e, deste modo, utilizando o lado com menos barras para verificar o equilíbrio, será possível encontrar a carga axial nas barras 3 e 4.

Figura 16: Detalhamento corte BB.



Fonte: Autoria Própria (2022).

Ao aplicar a Equação 3 para o ponto E , tem-se:

$$1,33 F_4 + 2 \frac{P}{2} = 0 \Rightarrow F_4 = -0,75P \quad (13)$$

Ao aplicar a Equação 2, tem-se a Equação 14:

$$F_3 = \frac{P}{2 \operatorname{sen}(53^\circ)} \Rightarrow F_3 = 0,625P \quad (13)$$

Com base na simetria da estrutura e carregamento da treliça é possível dizer que as demais cargas da treliça são (Equações 14, 15 e 16):

$$F_7 = F_1 = -0,625P \quad (14)$$

$$F_6 = F_2 = 0,375P \quad (15)$$

$$F_5 = F_3 = 0,625P \quad (16)$$

2.4 Extensômetros

Segundo Freddi (2015), a engenharia manipula modelos matemáticos que buscam apresentar o comportamento de estruturas, materiais e diversos sistemas mecânicos complexos. Para que seja possível confirmar uma teoria é necessário realizar algumas análises experimentais em busca de confirmações sobre as hipóteses propostas, sendo possível garantir segurança, desempenho e confiabilidade. Com base nas análises realizadas é possível destacar parâmetros realmente relevantes, buscando simplificações que podem ser realizadas no modelo. A medição de deslocamentos e deformações se torna, portanto, uma ferramenta essencial para a engenharia.

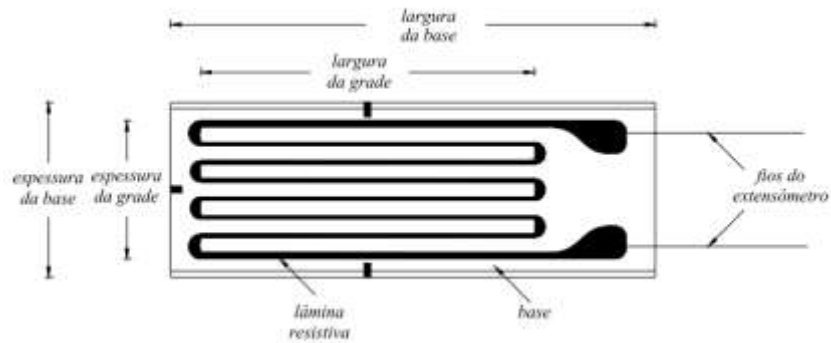
Extensômetros elétricos são dispositivos que convertem leves deformações em variações de resistência elétrica equivalentes, tornando-se ferramenta essencial para a engenharia (ANDOLFATO, CAMACHO E BRITO, 2004). Esses componentes são formados por conjuntos de fios ou tiras metálicas dispostas como uma serpentina, buscando o menor espaçamento entre os fios ou tiras. A proximidade visa amplificar os efeitos causados pela tensão de cisalhamento (τ) e do coeficiente de Poisson (ν) (MINELLA, 2017).

Sua produção parte de uma lâmina metálica resistiva de espessura micrométrica fixada em uma base, que é em material eletricamente isolado. Essa fabricação é realizada através do processo fotogração, dando assim uma maior precisão no padrão do componente (ANDOLFATO, CAMACHO E BRITO, 2004).

De acordo com Thomazini e Albuquerque (2020), algumas das principais características dos extensômetros são a elevada exatidão de medição, aferições consistentes e contínuas, baixo custo, facilidade na instalação e a possível aplicação em ambientes inacessíveis (imersão em gases, líquidos e atmosferas corrosivas).

Os extensômetros com resistência elétrica comumente são de 120 Ω , mas também pode-se encontrá-los com uma resistência de 350, 500 e 1000 Ω . Na Figura 17, pode-se observar um exemplo de extensômetro uniaxial.

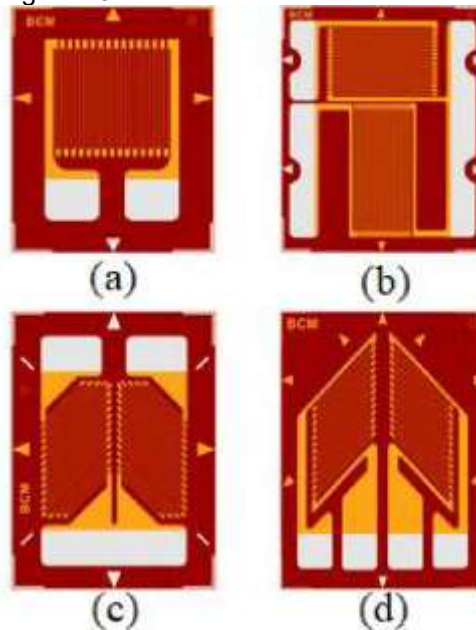
Figura 17: Extensômetro Uniaxial.



Fonte: Andolfato, Camacho e Brito (2004).

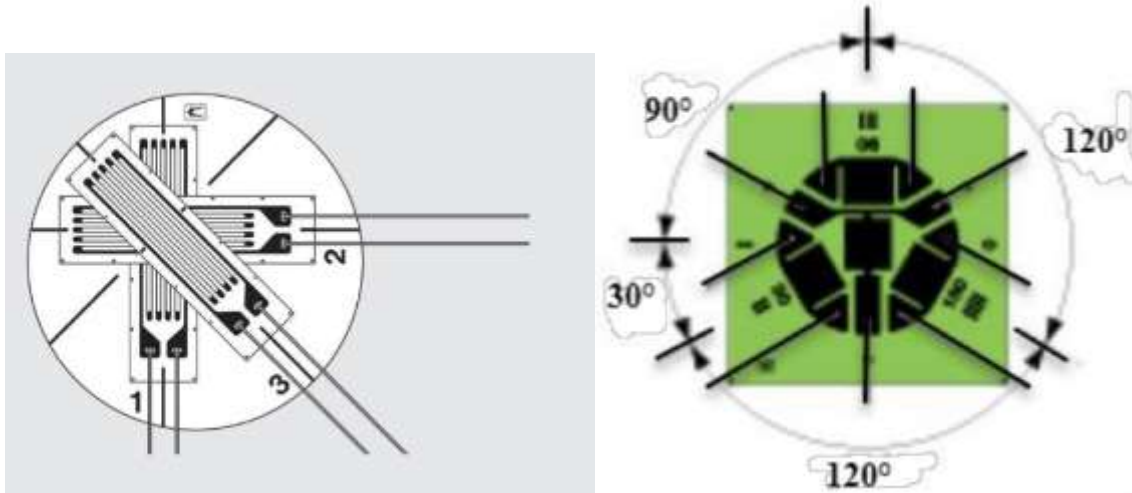
Os extensômetros possuem as configurações bi, tri e quadriaxial, nos ângulos de 90 para os biaxiais (Figura 18), 0, 90 e 45° para os triaxiais e em um intervalo composto por 120, 90 e 30° para o quadriaxial (Figura 19).

Figura 18: Extensômetros biaxiais.



Fonte: BCM sensor (2022).

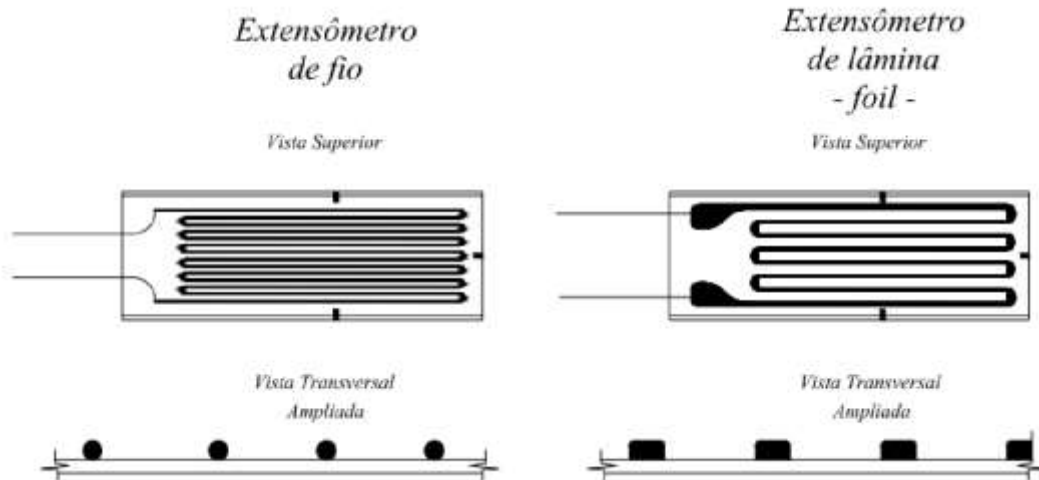
Figura 19: (a) Extensômetro triaxial de 45°; (b) Extensômetro quadriaxial.



Fonte: Minela (2017).

Os *strain gauges* possuem duas classificações: *gauges* de filamento e *gauge* de lâmina. Suas diferenças são quase que imperceptíveis pois, de certa forma, suas aplicabilidades não se destoam, como exemplificado na Figura 20.

Figura 20: Tipos de strain gauges.



Fonte: Andolfato, Camacho e Brito (2004).

O princípio físico dos extensômetros está no fato de que diante de uma deformação os metais tendem a modificar a sua resistência elétrica. Segundo Resnick e Halliday (2009), resistividade (ρ) é uma característica de cada material que implica na capacidade do material de conter a passagem de elétrons por meio dele. Para a

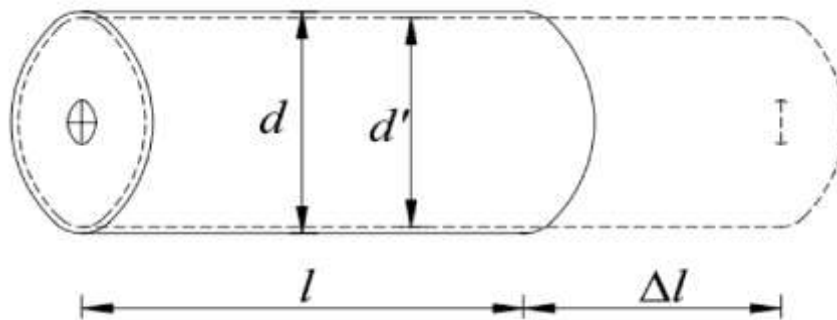
determinação da resistência elétrica de um elemento cilíndrico, pode-se utilizar a Equação 17.

$$R = \frac{L}{A} \rho \quad (17)$$

L é o comprimento longitudinal do condutor e A é a área da seção transversal do mesmo.

A Figura 21 detalha um cilindro antes e depois de uma deformação longitudinal, onde L é o comprimento inicial dando ao elemento uma resistência R . Em seu segundo estágio (linha pontilhada) o fio sofre uma deformação fazendo com que seu comprimento passe a ser $L + \Delta L$, que por consequência torna a sua resistência igual a $R + \Delta R$.

Figura 21: Deformação de um fio.



Fonte: Andolfato, Camacho e Brito (2004).

Perante essas informações e a Equação 17, é possível obter a mudança relativa causada pela deformação:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta A}{A}, \quad (18)$$

em que A é a seção transversal que, comumente pode ser circular maciça ou retangular maciça, dadas, respectivamente, pelas Equações 18 e 19, em que d é o diâmetro do

condutor elétrico (se for circular maciço), b e t são respectivamente a base e espessura do condutor elétrico (se for retangular maciço).

$$A = \frac{\pi d^2}{4}, \quad (19)$$

$$A = b t. \quad (20)$$

Devido ao efeito de Poisson, o elemento da Figura 21, além de ser deformado longitudinalmente, será comprimido radialmente, transformando seu diâmetro original d em um diâmetro d' . Dessa forma, ao aplicar essas condições as Equação 19 e 20 e realizar as devidas operações matemáticas, obtém-se:

$$\frac{\Delta A}{A} = -2\nu \frac{\Delta L}{L}, \quad (21)$$

onde ν é o coeficiente de Poisson. Substituindo a equação 21 na Equação 20 e assumindo que $\frac{\Delta L}{L}$ é equivalente a deformação ε , tem-se:

$$\frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon} = (2\nu + 1) + \frac{\frac{\Delta \rho}{\rho}}{\varepsilon} \quad (22)$$

Admitindo-se que a mudança na resistividade elétrica ρ ocorra proporcionalmente à mudança volumétrica do material, de maneira que: $\frac{\Delta \rho}{\rho} = m \frac{\Delta V}{V}$ e que $\frac{\Delta V}{V} = (1 - 2\nu)\varepsilon$, então a Equação 23 é válida.

$$\frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon} = (1 + m) + 2\nu(1 - m) \quad (23)$$

Sendo m a constante de proporcionalidade definida experimentalmente. Segundo Andolfato, Camacho e Brito (2004), “a maioria dos materiais resistivos comumente usados em extensômetros são ligas de cobre e níquel, onde m é aproximadamente à unidade”. Desta forma, obtém-se a Equação 24.

$$\frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon} \cong 2. \quad (24)$$

De acordo com Andolfato, Camacho e Brito (2004), o valor obtido na Equação 24 é conhecido como sensibilidade à deformação no material k e é determinado a partir do material resistivo a ser utilizado. Desta forma, a Equação 24 pode ser reescrita conforme a Equação 25.

$$\frac{\Delta R}{R} \cong k \varepsilon. \quad (25)$$

A Equação 25 demonstra que a mudança relativa na resistência é proporcional à magnitude da deformação medida. Sendo assim, é desejável que o material utilizado tenha um valor de k constante, sem correlação com a magnitude da deformação (ANDOLFATO, CAMACHO E BRITO, 2004).

Tabela 1: Composição e fator de sensibilidade para ligas metálicas utilizadas em extensômetros.

| MATERIAL | COMPOSIÇÃO (%) | k |
|----------------------|----------------------------|------|
| CONSTANTAN | 57 Cu, 43 Ni | 2,05 |
| KARMA | 73 Ni, 20 Cr, res. Fe + Al | 2,1 |
| NICHROME V | 80 Ni, 20 Cr | 2,2 |
| PLATINA - TUNGSTÊNIO | 92 Pt, 8 W | 4,0 |

Fonte: Minela (2017).

2.5 FTOOL®

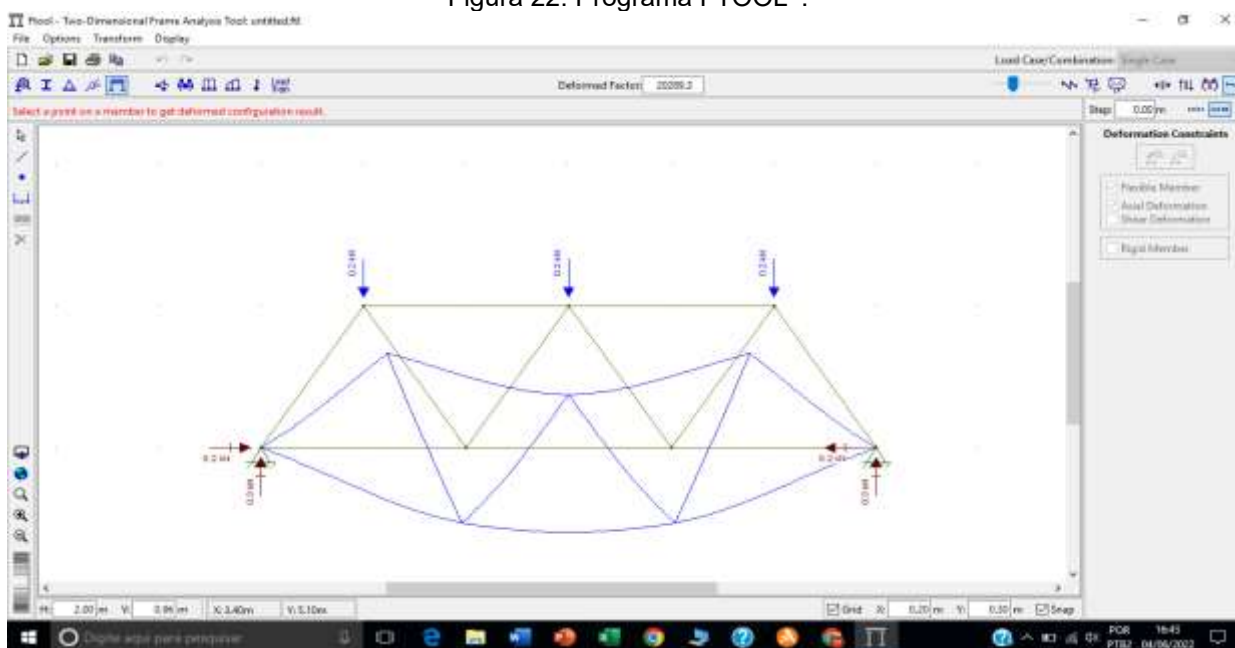
Segundo Sancho (2014), o FTOOL® é uma das mais conhecidas ferramentas para análise estrutural bidimensional. Com ela é possível montar uma grande variedade de esquemas estruturais e, adicionando alguns parâmetros, construir gráficos de momento fletor, esforço normal e cortante, linha elástica e gráfico de configuração deformada.

Para a @Ftool (2022), seu *software* tem como objetivo básico motivar o aluno para aprender o comportamento estrutural. Seu sucesso deve-se ao seu fluxo de trabalho simples e amigável, utilizando uma única interface tanto para a modelagem de uma estrutura quanto para a exibição de seus resultados.

Para o uso educacional, se destina ao ensino do comportamento estrutural de pórticos planos, se colocando em um espaço pouco explorado por programas educativos, que se preocupam mais com o ensino das técnicas numéricas de análise, ou versões educacionais que se destinam a linhas comerciais. Segundo Sancho (2014), é muito difícil motivar o aluno padrão a compreender a teoria dos métodos de análise sem entender como esses modelos se comportam na prática.

A utilização do FTOOL® se inicia com informações sendo lançadas progressivamente numa sequência lógica de operação facilmente assimilada. O programa integra em suas ações todas as fases do processo de análise estrutural, como a criação do modelo estrutural, a manipulação do modelo com aplicação de atributos, a resolução das incógnitas pelo método da rigidez direta e a visualização de resultados. A Figura 22 apresenta a interface do programa.

Figura 22: Programa FTOOL®.



Fonte: Autoria própria (2022).

3 METODOLOGIA

Neste capítulo, aborda-se a delimitação da pesquisa, os dados de entrada do projeto, os métodos de cálculo e os processos de fabricação.

3.1 Delimitação da pesquisa

Esta pesquisa delimita-se de acordo com os seguintes pontos de vista: (a) de sua natureza; (b) da forma de abordagem do problema; (c) dos seus objetivos; (d) dos procedimentos técnicos.

3.1.1 Do ponto de vista da sua natureza

Segundo Silva e Menezes (2001), a pesquisa aplicada busca conhecimentos para que sejam aplicados em soluções específicas na prática. Com base nessa afirmação, a pesquisa será realizada na instituição do IFSC, câmpus Xanxerê, com a utilização da

bancada de treliça, assim se caracterizando como uma pesquisa aplicada, pois serão realizados a comparação entre dados teóricos e experimentais referente a uma treliça baseada no modelo Warren.

3.1.2 Do ponto de vista da forma de abordagem do problema

Para a abordagem do problema, essa pesquisa se classificou como uma pesquisa qualitativa, pois nela serão reunidos dados com bases teóricas e experimentais e realizada a comparação entre eles.

Pesquisas qualitativas não precisam da utilização de métodos e técnicas estatísticas, mas utilizam o ambiente como uma fonte direta para a coleta de dados.

3.1.3 Do ponto de vista dos seus objetivos

Segundo Gil (1991), pesquisa descritiva busca, após a observação, realizar o registro, análise, classificação e interpretação dos dados, mas o pesquisador não interfere nos resultados. Já a pesquisa explicativa busca identificar as causas dos fenômenos estudados, além de registrar e analisá-los. Isso se dá tanto por meio da aplicação de métodos experimental/matemático, como pela interpretação dos métodos qualitativos.

Assim, a pesquisa se caracteriza como sendo uma pesquisa descritiva e explicativa, onde serão utilizados dados obtidos através dos experimentos por meio dos extensômetros e comparados aos dados obtidos teoricamente através do método dos nós.

3.1.4 Do ponto de vista dos procedimentos técnicos

Com o foco em determinar esforços sofridos por uma determinada treliça, devido à aplicação de um carregamento conhecido, esta pesquisa se porta como uma pesquisa teórico-experimental, onde segundo Gil (1991) é aquela pesquisa na qual se determina um objeto de estudo, selecionam-se as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo e definem-se as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no projeto.

Também pode-se definir a pesquisa como sendo um estudo de caso, onde será estudada uma única treliça e a mesma terá seus valores determinados por três diferentes modos. É definido por Gil (1991) como sendo um envolvente estudo aprofundado e exaustivo de um ou poucos objetos, de maneira que se permita o seu amplo e detalhado conhecimento.

3.2 Dados de entrada do projeto

Para uma melhor fixação dos extensômetros e uma melhor visualização das forças atuantes, o material que constituirá a treliça será o tubo quadrado em aço SAE 1008 (propriedades mecânicas vide Tabela 2) com dimensões 20 x 20 mm e espessura de 1,20 mm. Para definição das medidas da treliça será utilizada como base a bancada de treliças, que se encontra disponível no campus Xanxerê. Deste modo, a treliça possui 1200 mm de comprimento com altura de 300 mm (projeto vide Apêndice 1, no capítulo 7, seção 7.1).

Tabela 2: Composição Química e propriedades mecânicas para o aço SAE 1008

| Aço | Composição Química (%) | | | | Propriedades mecânicas | | | |
|----------|------------------------|-------------|-------------|-------------|------------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|
| | Manganês (Mn) | Carbono (C) | Enxofre (S) | Fosforo (P) | Ferro (Fe) | Limite de escoamento | Resistencia a tração | Módulos de elasticidade |
| SAE 1008 | 0,3 – 0,5 | 0,10 (Max) | 0,05 (Max) | 0,04 (Max) | Rest ante | 285 MPa | 340 MPa | 190 – 210 GPa |

Fonte: Elaborado pelo autor com dados fornecidos por LUZ, 2017

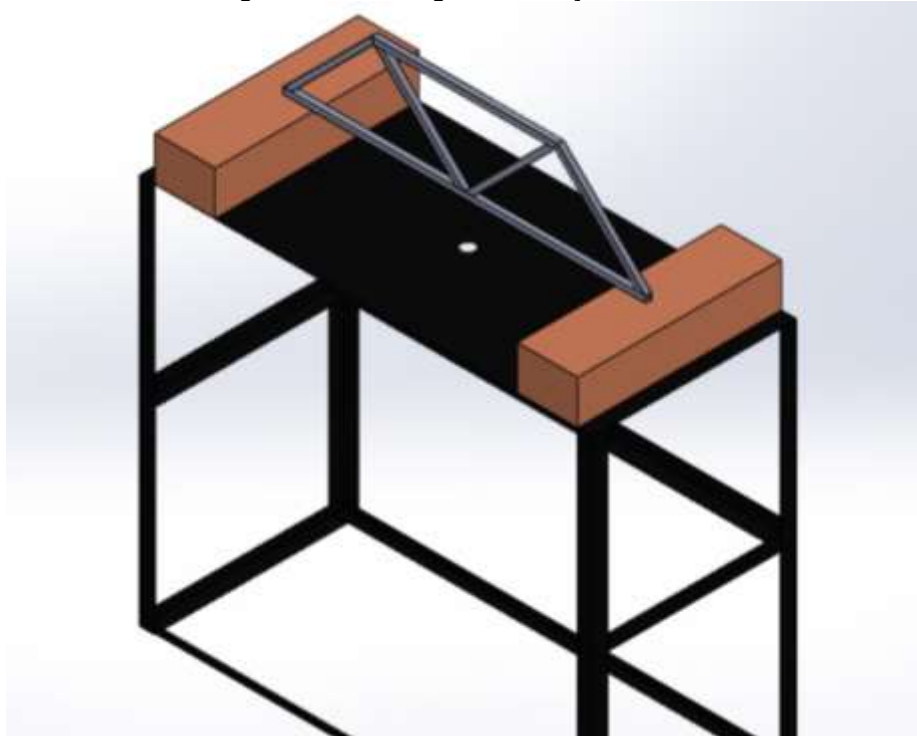
Figura 23: Bancada de treliças.



Fonte: Autoria própria (2022).

Com material e dimensões definidas, é realizada a modelagem para definir tamanhos exatos para fabricação da mesma. Para isto, se utiliza o *software* SOLIDWORKS®. A Figura 24 mostra a modelagem realizada utilizando as informações disponíveis.

Figura 24: Modelagem da treliça metálica.



Fonte: Autoria Própria (2022).

3.3 Método Analítico

Com base na problemática descrita, se utiliza o método de nós para realizar os cálculos das forças atuantes em cada nó da treliça. Deste modo, de acordo com a terceira lei de Newton, em que toda a força aplicada possui uma força oposta de mesma magnitude, é possível utilizar as Equações 1, 2 e 3 para cada nó a ser calculado.

3.4 Método Computacional

Para os resultados das simulações de *software* será utilizado o aplicativo FTOOL®,

esse que possibilita uma interface bastante interativa e de fácil operação, proporcionando esforços e reações sofridas por uma determinada estrutura desenhada.

3.5 Fabricação

Com base no projeto e especificações definidos com o auxílio do *software* SOLIDWORKS®, é possível pôr em prática a fabricação da treliça e a preparação para colagem dos extensômetros. Será utilizada para corte e encaixe uma lixadeira manual (Figura 25). Para união das peças, será aplicado o processo de soldagem MIG/MAG (Figura 26).

Figura 25 - Esmerilhadeira angular.



Fonte: Dewalt (2022).

Figura 26 - Aparelho de solda MIG/MAG.



Fonte: Esab (2022)

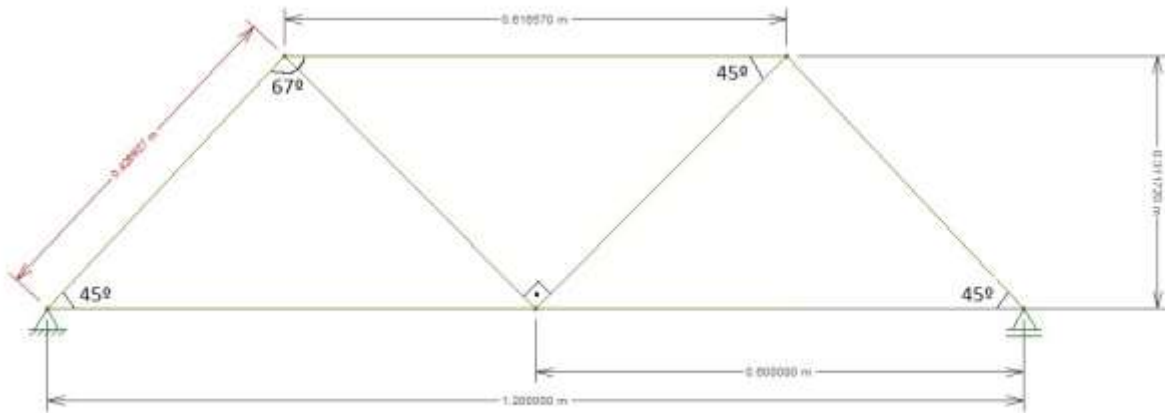
3.6 Modelagem, fabricação e montagem do sistema

Utilizando como base o material e o modelo selecionados para a treliça que será então construída, inicia-se a modelagem e detalhamento do projeto para construção da mesma. Assim, foi definido que seriam utilizados perfis quadrados, como citado anteriormente, possuindo seu banzo inferior de 1200mm, com uma altura de 311,72 mm, possuindo 4 diagonais com tamanho igual a 428,93 mm e um banzo superior com medida de 616,57mm (vide esquemático da Figura 27).

Referente à bancada de apoio para a realização dos testes, foram realizadas

medições para dispor a estrutura na bancada e facilitar a fixação da carga à treliça. Juntamente a isto, também é registrada a massa atrelada à treliça, aproximadamente 112,0 kg.

Figura 27: Esquemático da treliça utilizada no projeto.



Fonte: autoria própria (2022).

3.7 Colagem dos extensômetros

Com a treliça fabricada, é possível iniciar o processo de preparação da superfície para receber os extensômetros. Esse processo é importante para uma adequada fixação e eficácia no funcionamento. Para isto, serão utilizadas lixas com granulação de 80 a 320 micrometros e desengraxantes industriais.

Com a superfície preparada, é possível iniciar a colagem dos extensômetros. Conforme definido na modelagem, pressupõe-se que haja apenas esforços na direção axial. Sendo assim, para esse experimento serão utilizados extensômetros uniaxiais. Sua colagem será com o auxílio de uma fita adesiva. É possível manusear os extensômetros com maior facilidade e precisão utilizando cola líquida na base do extensômetro e assim realizando a colagem na peça. Após a fixação, é possível realizar a remoção da fita e efetuar a soldagem nas ligações elétricas dos extensômetros. Ao final, uma fina camada

de silicone é acrescentada ao circuito (Figura 28).

Figura 28 - Colagem dos extensômetros



Fonte: Autoria Própria (2022).

Com a ligação realizada nos extensômetros, é possível realizar a conexão dos aparelhos para registros dos dados. O equipamento utilizado será o ADS 1800 da Lynx@ que proporciona uma amostragem de até 24000 dados por segundo em oito canais de medição com resolução de 24 bits (Figura 29).

Figura 29 - Sistema de aquisição



Fonte: Autoria Própria (2022).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base na teoria apresentada anteriormente, juntamente com metodologia definida, o presente capítulo se destina apresentar os resultados provenientes dos três métodos e discuti-los.

4.1 Modelagem, fabricação e montagem do sistema

Resultados referentes à modelagem, fabricação e montagem do sistema são providos nesta seção.

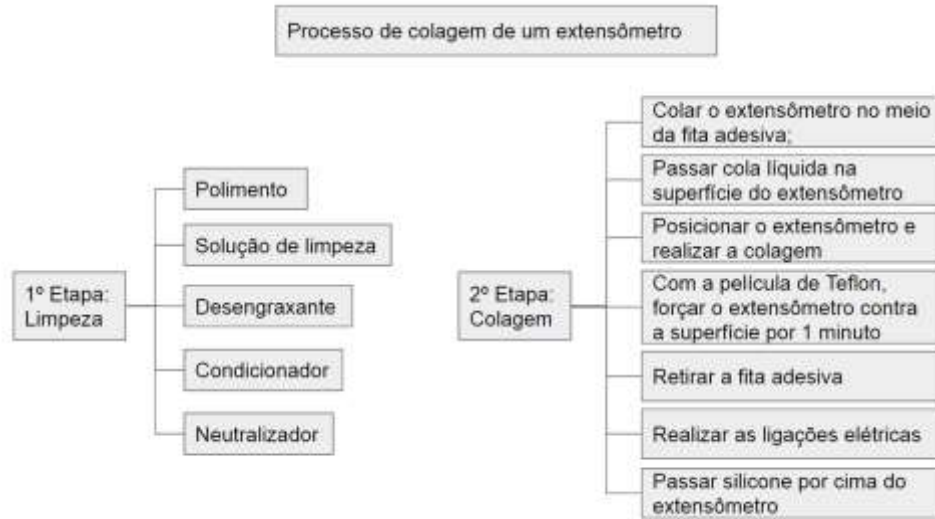
4.1.1 Fabricação

De acordo com o projeto, deu-se início à fabricação da estrutura. Com informações concretas de tamanhos, corte e pontos de união, realizam-se os cortes das matérias-primas nas dimensões correspondentes às dos seus elementos estruturais. Posteriormente, com a utilização do processo de soldagem, foram unidas entre si de acordo com os desenhos técnicos do Anexo 1.

4.1.2 Colagem dos extensômetros e instalação do sistema de aquisição

Após o término do processo de fabricação, prepara-se a superfície para a fixação dos extensômetros, (Figura 30). Para isto, foram utilizadas recomendações encaminhadas pela empresa responsável pelo fornecimento dos extensômetros. A Figura 31 demonstra os tubos selecionados e os extensômetros colados.

Figura 30: Etapas seguidas para preparação da superfície.



Fonte: Baraldi (2022).

Figura 31: Tubos selecionados, preparação e colagem dos extensômetros.

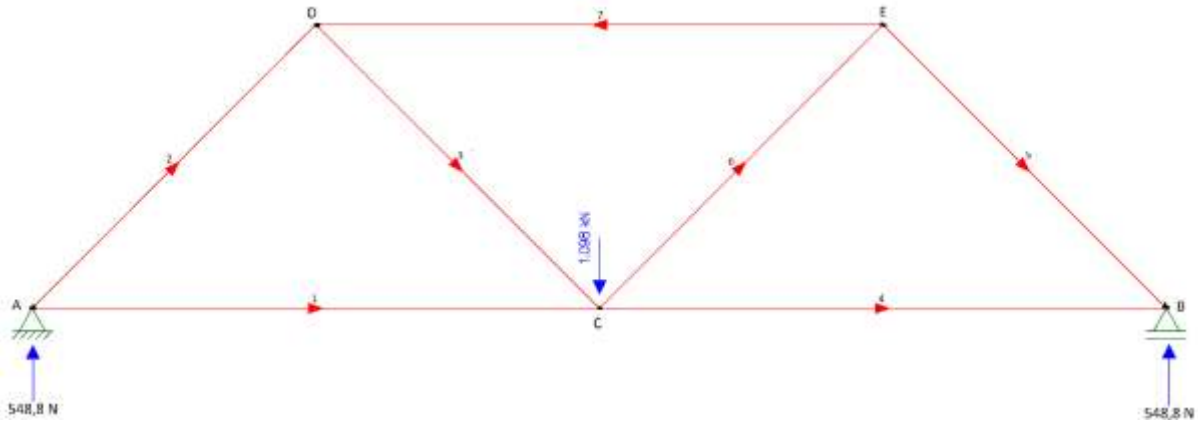


Fonte: Autoria própria (2022).

4.2 Cálculo pelo Método Analítico

Utilizando as informações disponíveis no detalhamento, é possível realizar o cálculo teórico, a partir do método de nós, conforme apresentado anteriormente. Empregando os dados de entrada de carregamento e geométricos, a treliça apresenta-se da seguinte forma (Figura 32):

Figura 32: Modelo para o cálculo analítico.



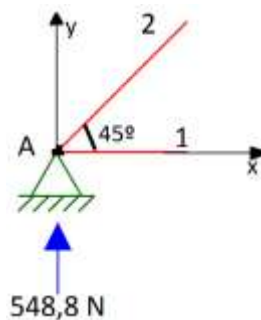
Fonte: Autoria Própria (2022).

Observando a treliça, percebemos que se trata de uma estrutura simétrica, com isso, é possível dizer que R_A e R_B serão iguais. Deste modo, a carga externa aplicada, a qual se encontra no centro do banzo inferior, será dividida para esses dois apoios.

Assim, é possível afirmar que $R_A = R_B = \frac{P}{2}$. Como o valor da carga externa é de $1097,6\text{ N}$, concluímos que R_A e R_B terão valores iguais a $548,8\text{ N}$.

Tendo como referência o nó A (Figura 33), e utilizando as Equações 1 e 2, encontram-se as forças atuantes nas barras F_1 e F_2 , conforme cálculos representados pelas Equações 26 e 27.

Figura 33: Detalhamento do nó A.



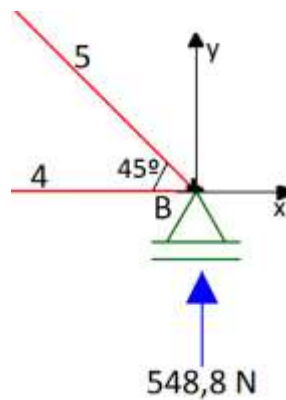
Fonte: Autoria própria (2022).

$$R_A - \frac{\sqrt{2}}{2} F_2 = 0 \Rightarrow F_2 = 776,2 \text{ N.} \quad (26)$$

$$F_1 - \frac{\sqrt{2}}{2} F_2 = 0 \Rightarrow F_1 = 548,8 \text{ N.} \quad (27)$$

Procedimento análogo é seguido para a obtenção dos esforços internos nas barras 4 e 5 (F_4 e F_5), com ponto de referência no nó B (Figura34) (Equações 28 e 29):

Figura 34: Detalhamento do nó B.



Fonte: Autoria própria (2022).

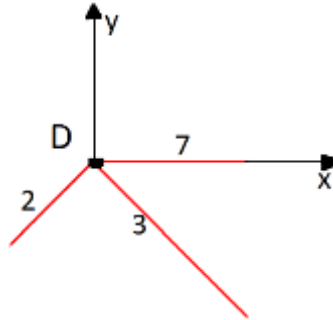
$$R_B - \frac{\sqrt{2}}{2} F_5 = 0 \Rightarrow F_5 = 776,2 \text{ N.} \quad (28)$$

$$F_4 - \frac{\sqrt{2}}{2} F_5 = 0 \Rightarrow F_4 = 548,8 \text{ N.} \quad (29)$$

Para o Nó D (Figura 35), tem-se 3 barras na qual já se possui o resultado para a

barra F_2 . Assim, fica possível a aplicação do método e a obtenção dos resultados para as demais barras (Equações 30 e 31).

Figura 35: Detalhamento do nó D.



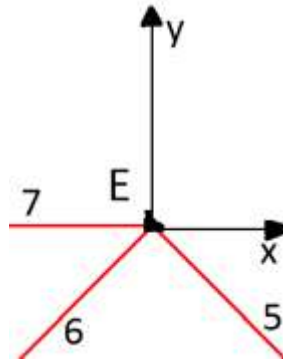
Fonte: Autoria própria (2022).

$$\frac{\sqrt{2}}{2} F_2 - \frac{\sqrt{2}}{2} F_3 = 0 \Rightarrow F_3 = 776,2 \text{ N.} \quad (30)$$

$$-F_7 - \frac{\sqrt{2}}{2} F_3 + \frac{\sqrt{2}}{2} F_2 = 0 \Rightarrow F_7 = 1097,6 \text{ N.} \quad (31)$$

Para o Nó E (Figura 36), também possuindo 3 barras conectadas a ele e com o valor de F_5 já calculado, utiliza-se o Nó D como referência, consegue-se obter por meio da Equação 32 o valor de F_6 .

Figura 36: Detalhamento do nó E.

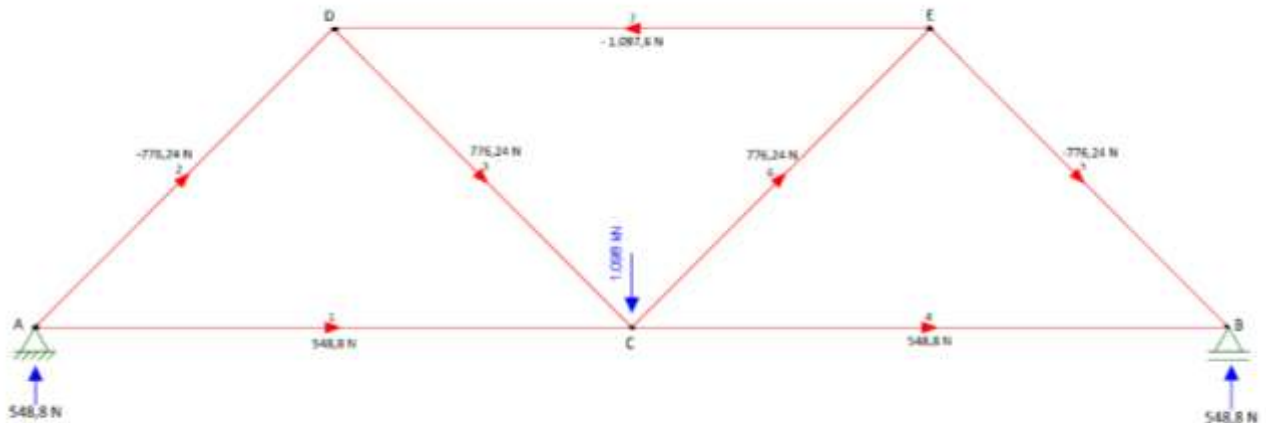


Fonte: Autoria própria (2022).

$$\frac{\sqrt{2}}{2} F_6 - \frac{\sqrt{2}}{2} F_5 = 0 \Rightarrow F_6 = 776,2 \text{ N.} \quad (32)$$

Com todos os esforços calculados pode-se afirmar que as barras da treliça apresentam as seguintes magnitudes de cargas (Figura 37):

Figura 37: Demonstração das forças atuantes em cada barra.



Fonte: Autoria própria (2022).

Tabela 3: Esforços atuantes em cada membro.

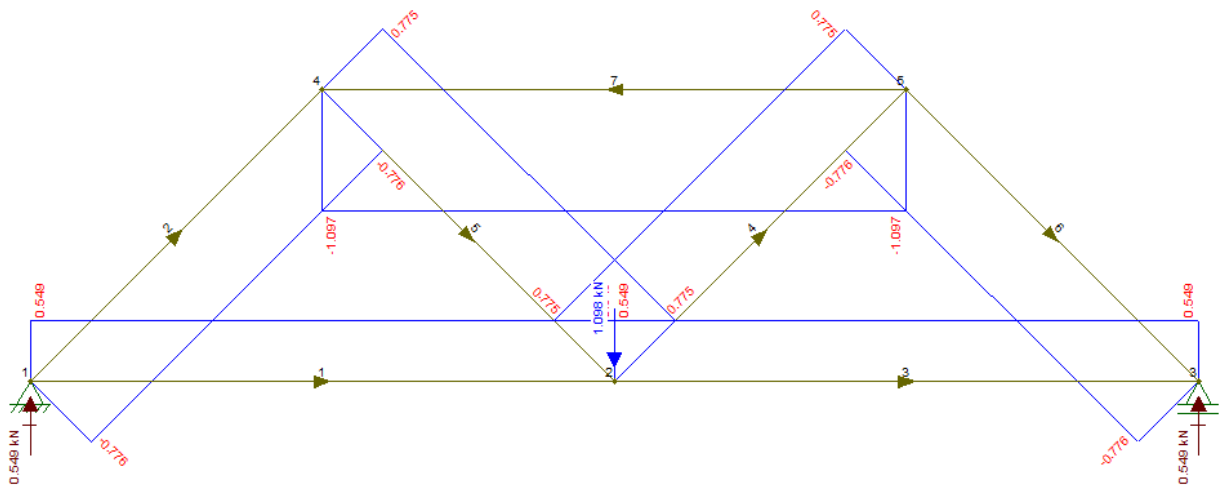
| Membros Estruturais | Magnitude da Força (N) | Esforço Axial |
|---------------------|------------------------|---------------|
| 1 | 548,8 N | Tração |
| 2 | -776,24 N | Compressão |
| 3 | 776,24 N | Tração |
| 4 | 548,8 N | Tração |
| 5 | -776,24 N | Compressão |
| 6 | 776,24 N | Tração |
| 7 | -1097,6 N | Compressão |

Fonte: Autoria Própria (2022).

4.3 Cálculo utilizando o software FTOOL®

Com base na geometria e na carga aplicada foi possível calcular a mesma treliça por meio de seu desenho 2D no software FTOOL®. Na figura 36 estão apresentados os valores adquiridos com o programa.

Figura 38: Projeto e análise pelo software FTOOL®.



Fonte: Autoria Própria (2002).

Como o resultado experimental é baseado em deformação, foi realizada a conversão referente aos dois pontos escolhidos. Sendo assim, para a barra 7 (1097,6 N),

a deformação é aproximadamente $-60,8 \mu\text{m}/\text{m}$, e para a barra 6 com carga de $776,24 \text{ N}$, a deformação aproximada é de $43,1 \mu\text{m}/\text{m}$.

4.4 Obtenção de Resultados por Extensometria

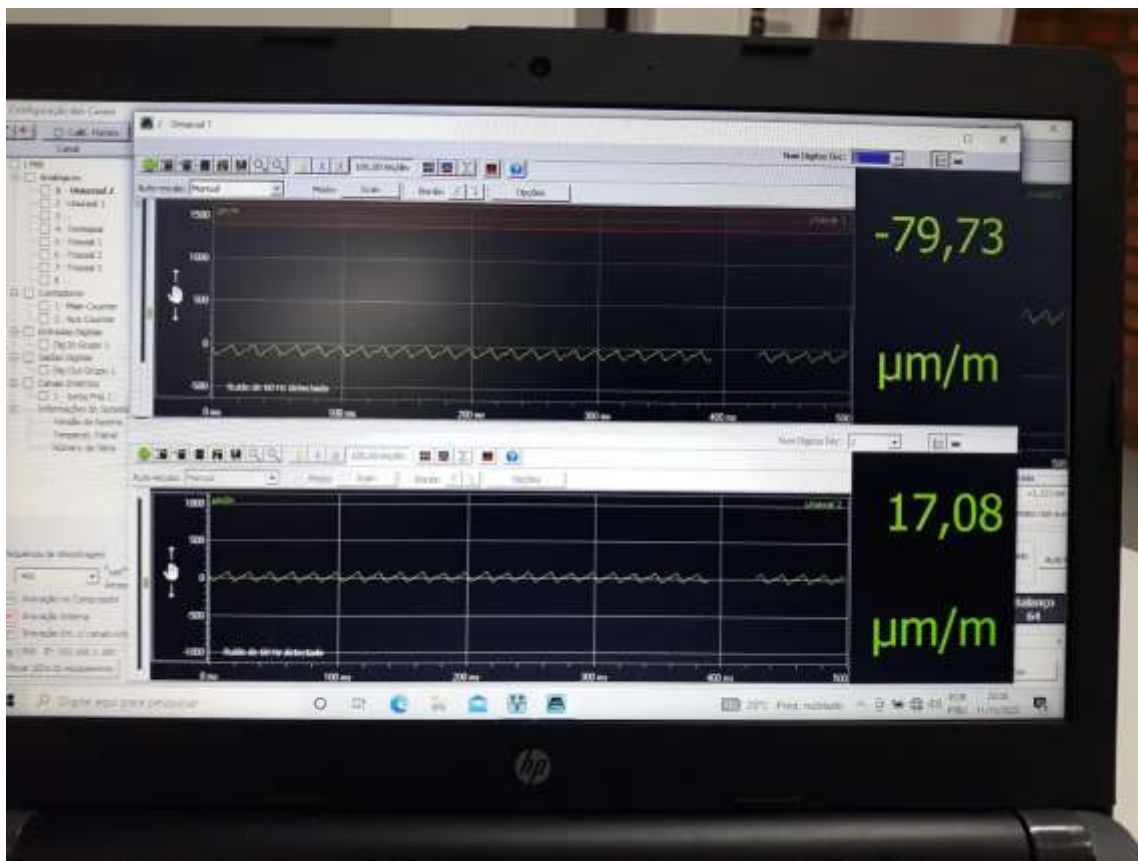
Com os extensômetros já colados e a treliça posicionada sobre a bancada para realização dos testes, iniciou-se a instalação e configuração do sistema de aquisição de dados. Posteriormente, procede-se com a colocação dos anéis de carga cuja massa total já fora determinada anteriormente (112 kg). Assim, ao realizar a gravação dos dados, foi obtida aproximadamente uma deformação de $-79,73 \mu\text{m}/\text{m}$ para barra superior (barra 7, extensômetro 1). Já na barra diagonal (barra 6, extensômetro 2) foi registrada uma deformação de $17,08 \mu\text{m}/\text{m}$. As Figuras 39 e 40 mostram, respectivamente, os locais de colagem dos extensômetros e a tela com os resultados para ambos os extensômetros (o resultado na parte superior da figura representa o do extensômetro 1 e o resultado na parte inferior da figura corresponde ao extensômetro 2).

Figura 39: Treliça posicionada para a aquisição de dados.



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 40: Tela com os resultados obtidos a partir do teste 1 com a carga especificada.



Fonte: Autoria própria (2022).

Para as condições impostas, obteve-se as seguintes deformações experimentais: no ponto (1) -79,73 micrometros/metro no elemento estrutural 7; e para o ponto (2) 17,08 micrometros/metro no elemento 6. Ao serem comparadas aos valores provenientes dos métodos analíticos, obtêm-se módulos de erros relativos de, respectivamente: (1) 30,42%; e (2) 152,34%.

4.4.1 Resultados obtidos no segundo experimento

Buscando valores mais próximos aos resultados obtidos pelo método analítico, um experimento adicional foi realizado, medindo mais dois pontos, que podem ser localizados de acordo com a Figura 41.

Figura 41 - Pontos de medições para o teste 2.



Fonte: Autoria Própria. (2022)

A partir dos pontos selecionados, os resultados se mostraram mais coerentes quando comparados aos resultados analíticos, onde para a barra 7 foram obtidos valores no ponto (1) -50,72 micrometros/metro e ponto (3) -74,93 micrometros/metro; para a barra 6 foram obtidos valores no ponto (2) 37,89 micrometros/metro e ponto (4) 32,70 micrometros/metro (vide Figura 42). Quando comparados com os valores analíticos, obtêm-se módulos de erros relativos de, respectivamente: (1) 19,87%; (2) 13,75%; (3) 18,86%; (4) 31,80%.

Figura 42 - Tela com os resultados obtidos a partir dos experimentos com a carga especificada.



Fonte: Autoria Própria.(2022).

Assim, é possível que tais mudanças obtidas nos experimentos 1 e 2 sejam provenientes de esforços não axiais. Considera-se que seriam necessários novos experimentos para conclusões mais acuradas.

5 CONCLUSÕES

Na comparação entre o método analítico (método dos nós) e o método numérico utilizando computador (*software* FTOOL[®]), a diferença se explica por conta de pequenos arredondamentos. Já quando estes dois métodos são comparados ao método experimental, obtêm-se discrepâncias de grandes magnitudes e algumas bem próximo ao esperado.

Tendo realizado estes dois experimentos, e mesmo assim com discrepâncias indesejadas, uma análise mais aprofundada torna-se necessária com vistas a investigar a origem das referidas discrepâncias. Possíveis verificações são listadas a seguir: necessidade de experimentos e avaliações adicionais, comprovação da veracidade do material de construção repassada pelo fornecedor, avaliação com mais pontos de coletas de dados para análise se estão ocorrendo apenas forças axiais na estrutura.

Assim, fica como sugestão para trabalhos futuros essa nova avaliação. Adicionalmente, de suma importância seria uma análise utilizando o método dos elementos finitos, sendo possível um outro tipo de comparação.

6 REFERÊNCIAS

ANDOLFATO, R.; CAMACHO, J.; BRITO, G. **Extensometria básica**. [s.l.] Universidade Federal Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2004. Disponível: <https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariacivil/nepae/extensometria-basica.pdf>. Acesso em 23 de março de 2022.

BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R.; DEWOLF, J. T.; MAZUREK, D. F. **Mecânica dos Materiais**. 8. ed. Porto Alegre - RS: AMGH Editora Ltda, 2021.

BHUYAN, M. **INSTRUMENTAÇÃO INTELIGENTE, Princípios e Aplicações**. 1. ed. Rio de Janeiro - RJ: Grupo GEN, 2013.

CEAM – UFMG. Nova Metodologia de Ensino na Área de Projeto e Dimensionamento de Estruturas de Aço. Edital PROGRAD 02/2009. Disponível em <https://www.sites.google.com/site/acoufmg/home/historico> Acesso em: 17 Março 2021.

Cerveja, F. Mecânica Vetorial para Engenheiros: Estática. Porto Alegre - RS: parceria entre GRUPO A EDUCAÇÃO S.A. e MCGRAW-HILL EDUCATION. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580556209/> . Acesso em: 17 Mar. 2022.

DE OLIVEIRA, Maxwell Ferreira. Metodologia científica: um manual para a realização de pesquisas em Administração. **Universidade Federal de Goiás. Catalão–GO**, 2011.

DEWALT. **Esmerilhadeiras**. Disponível em: < <https://br.dewalt.global/produtos/ferramentas-el%C3%A9tricas/esmerilhadeiras> >. Acesso em: 28 jul. 2022.

ENCYCLOPEDIA BRITANNICA. **Albert Fink**. Disponível em: <<https://www.britannica.com/technology/truss-bridge>> . Acesso em: 04 de maio de 2022.

Equipamentos Para Soldagem. Disponível em: < https://esab.com/br/sam_pt/products-solutions/search/?brand=ESAB&search_facets=%7B%22custom_fields.brand%22%3A%7B%22ESAB%22%3A%22true%22%7D%2C%22v%22%3A1%7D >. Acesso em: 28 jul. 2022.

FAKURY, R.H.; CASTRO E SILVA, A.L.R.; CALDAS, R.B.; **DIMENSIONAMENTO – De Elementos Estruturais de Aço e Mistos de Aço e Concreto**. 1º ed. Pearson Universidades, 2015.

FREDDI, A.; OLMI, G.; CRISTOFOLINI, L. Experimental Stress Analysis for Materials and Structures: Stress Analysis Models for Developing Design Methodologies. Rome: Springer, 2015.

FIALHO, A. B. **Instrumentação industrial - Conceitos, Aplicações e Análises**. 7º revisad ed. São Paulo: Editora Érica LTDA, 2010.

FUZARO, O.A.I.; **ANÁLISE ESTRUTURAL DE TRELIÇA**. [s.l.]. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, 2019.

GIL, Antonio Carlos. **COMO ELABORAR PROJETOS DE PESQUISA**. 4ª Ed. São Paulo: Atlas, 2002. Disponível em: https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/150/o/Anexo_C1_como_elaborar_projeto_de_pesquisa_-_antonio_carlos_gil.pdf. Acesso em 04 de maio de 2022.

HIBBELER, Russel Charles. **Estática: mecânica para engenharia**. 10ª Ed. São Paulo: Pearson. 2011.

HISTORY OF BRIDGES. **Howe Truss**. Disponível em: <http://www.historyofbridges.com/facts-about-bridges/howe-truss/>. Acesso em 04 de maio de 2022.

MINELA, S. N. **EXTENSOMETRIA: ESTUDO E APLICAÇÃO**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2017.

MODESTI, D. **OTIMIZAÇÃO PARAMÉTRICA DE TRELIÇAS PLANAS E ESPACIAIS CONSIDERANDO RESTRIÇÕES DE FLAMBAGEM E TENSÕES**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), 2019.

MERIAM, James L.; KRAIGE, L G. **Mecânica para Engenharia - Estática** - Vol. 1, 7ª edição. Grupo GEN, 2015. 978-85-216-3040-1. E-book. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-3040-1/> . Acesso em: 30 jun. 2022.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. **Estruturas de Aço - Dimensionamento Prático**. Grupo GEN, 2021. 9788521637974. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521637974/> . Acesso em: 26 abr. 2022.

EVOLVY. **Warren Truss**. Disponível em: <https://www.revolvvy.com/page/Warren-truss>>. Acesso em 25 de abril de 2022.

PUC Rio. **FTOOL**, 2022. Um Programa Gráfico-Interativo para Ensino de Comportamento Estrutural. Disponível em: <https://www.ftool.com.br/Ftool/>. Acesso em: 28 de julho de 2022.

RESNICK, R.; HALLIDAY, D. **FUNDAMENTOS DE FÍSICA - Eletromagnetismo**. 9º ed. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2009. v. 3

Sancho, Philipe Amorim. "Utilização do FTOOL como ferramenta de aprendizado do comportamento de estruturas." (2014).

SILVA, E.L.; MENEZES, E.M.; **METODOLOGIA DA PESQUISA E ELABORAÇÃO DE DISSERTAÇÃO**, [s.l.]. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, 2001.

Soares dos Santos, K.R.; **ESTUDO DE TRELIÇA PLANA VIA MODELAGEM NUMÉRICA**. UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMIÁRIDO – UFERSA, 2020.

THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P. U. B. DE. **SENSORES INDUSTRIAIS Fundamento e aplicações**. 9. ed. São Paulo: Érica, 2020.

HIBBELER, Russel Charles. **Resistência dos materiais**. 7ª Ed. São Paulo: Pearson. 2010.

BARALDI, D. **PROJETO, CONSTRUÇÃO E VALIDAÇÃO DE UMA CÉLULA DE CARGA PARA MEDIR TORQUE**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 2022.

LUZ, Gelson. **Aço SAE 1008 Propriedades Mecânicas e Composição Química**. **Blog Materiais**, [s.l.], 2017. Disponível em: <https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/09/aco-sae-1008-propriedades-mecanicas.html>. Acesso em: 19 de novembro de 2022.

7 APÊNDICES

7.1 Apêndice 1: Desenho dos Elementos Constituintes da Treliça

