

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

JAQUELINE MARCANTE

PROJETO, CONSTRUÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE
TRELIÇA PLANA

Xanxerê

2022

JAQUELINE MARCANTE

PROJETO, CONSTRUÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE
TRELIÇA PLANA

Monografia apresentada ao
Curso de Engenharia
Mecânica do Instituto Federal
de Santa Catarina Campus de
Xanxerê para a obtenção do
diploma de bacharel em
Engenharia Mecânica

Orientador: Dr. Marcelo André
Toso.

Xanxerê

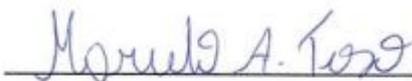
2022

JAQUELINE MARCANTE

PROJETO, CONSTRUÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE
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, 02 de dezembro de 2022.



Prof. Marcelo André Toso, Dr.

Orientador

Instituto Federal de Santa Catarina



Prof. Carlos Alfredo Gracioli Aita, Me.

Instituto Federal de Santa Catarina



Prof. Raphael Basilio Pires Nonato, Me.

Instituto Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTO

Agradeço a Deus, que foi minha maior força nos momentos de angústia e desespero. Sem Ele, nada disso seria possível. A fé que tenho em ti alimentou meu foco, minha força e minha disciplina. Sou grato pelas bênçãos que recaíram não só sobre mim, mas também sobre todos os amigos e familiares.

Agradeço à toda minha família. Em especial aos meus queridos pais, Airton e Sandra, e ao meu irmão, Arthur, que tanto me apoiaram na realização deste projeto. As palavras não podem expressar o quão grato sou a todos vocês. Suas orações me deram forças para continuar e finalizar este trabalho.

Agradeço a meu orientador, Dr. Marcelo André Toso, sem sua assistência e envolvimento, dedicado em todas as etapas do processo, este projeto nunca teria sido realizado. Gostaria também de agradecer aos membros da banca examinadora.

RESUMO

A estrutura é a parte fundamental de uma construção, sendo responsável em absorver e transmitir os esforços que serão submetidos para o solo. Deste modo, a utilização de estruturas metálicas em projetos do cotidiano apresentam inúmeras vantagens, tais como maior resistência e menor peso, além de garantir um alto padrão de qualidade em construções. Um exemplo de estrutura metálica que podemos citar são as treliças. Nesse modelo de estrutura os elementos pertencentes ao conjunto estão em um único plano e sua aplicabilidade se dá, principalmente, na construção de coberturas e pontes, onde há necessidade de se vencer grandes vãos livres. Sendo assim, a realização de um dimensionamento adequado, o qual garanta a segurança e a resistência da estrutura, além de respeitar as normas vigentes é imprescindível. O presente trabalho tem por finalidade projetar e confeccionar um protótipo de treliça plana do tipo Pratt embasado na norma da ABNT NBR 8800:2008, objetivando-se comparar os resultados obtidos através do ensaio experimental do protótipo por meio de extensômetros com o modelo analítico por meio do software Ftool®, e o modelo numérico, via software SolidWorks®, obtendo-se as deformações que essa estrutura sofrerá ao ser submetida a esforços normais de tração e compressão, possibilitando determinar as seções onde os esforços atuantes serão críticos. A estrutura em questão apresentou uma tensão máxima de 3,12 MPa para uma carga máxima de 112 kgf, assim, estando abaixo do limite de escoamento de 205 MPa, do material utilizado para a construção da mesma.

Palavras-chave: Treliça Plana; Análise Estrutural; Extensometria.

ABSTRACT

The structure is the fundamental part of a construction, being responsible for absorbing and transmitting the efforts that will be submitted to the ground. In this way, the use of metallic structures in everyday projects presents numerous advantages, such as greater resistance and lower weight, in addition to guaranteeing a high quality standard in constructions. An example of a metallic structure that we can cite are trusses. In this structure model, the elements belonging to the set are in a single plane and its applicability is mainly in the construction of roofs and bridges, where there is a need to overcome large free spans. Therefore, carrying out an adequate dimensioning, which guarantees the safety and resistance of the structure, in addition to complying with current regulations, is essential. The purpose of this work is to design and manufacture a Pratt-type flat truss prototype based on the ABNT NBR 8800:2008 standard, with the aim of comparing the results obtained through the experimental test of the prototype using *strain gauges* with the analytical model using of the Ftool® software, and the numerical model, via SolidWorks® software, obtaining the deformations that this structure will suffer when subjected to normal tension and compression efforts, making it possible to determine the sections where the acting efforts will be critical. The structure in question presented a maximum stress of 3.12 MPa for a maximum load of 112 kgf, thus being below the yield strength of 205 MPa, of the material used for its construction.

Keywords: Flat Lattice; Structural Analysis; Extensometry.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Representação de uma treliça plana isostática.....	18
Figura 2 - Treliças do tipo Pratt com todas as indicações e nomenclaturas dos elementos estruturais.	19
Figura 3 – Configurações mais usuais de treliças planas	20
Figura 4 - Representação do Apoio de 1º gênero e sua reação estrutural.....	22
Figura 5 - Representação do Apoio de 2º gênero e suas reações estruturais.	23
Figura 6 - Representação do Apoio de 3º gênero e suas reações estruturais.	23
Figura 7 - Representação de estruturas hiperestáticas.....	24
Figura 8 - Representação de estruturas hipostáticas.	24
Figura 9 - Representação de estruturas isostáticas.	25
Figura 10 - Tipos de vínculos e respectivo número de reações.	26
Figura 11 - Treliça simples plana sujeita a força P.....	28
Figura 12 - Diagrama de Corpo Livre para o nó B.....	28
Figura 13 - Elementos esbeltos sujeitos a cargas axiais.....	30
Figura 14 - Flambagem local em colunas simples.	31
Figura 15 - Fator de comprimento efetivo para diferentes tipos de apoio.	33
Figura 16 - Exemplo de aplicação de “strain gauges” em um corpo de prova.	34
Figura 17 - Conjunto de Rosetas de Deformação.	38
Figura 18 – Ponte de Wheatstone.....	39
Figura 19 - Dispositivo de Apoio para a Competição de Pontes de Espaguete e suas dimensões.....	41
Figura 20 - Fluxograma do processo metodológico utilizado neste trabalho.....	42
Figura 21 - Projeto conceitual da treliça plana.	43
Figura 22 - Projeto 3D da treliça plana.....	44
Figura 23 – Colagem dos extensômetros na estrutura treliçada.	45
Figura 24: (a) Sistema de aquisição de dados ADS1800 e (b) Interface do software AqDados ®.....	46
Figura 25 - Estrutura treliçada preparada para a realização dos ensaios experimentais.	47
Figura 26 – Esforços nos elementos estruturais da treliça.....	48
Figura 27 – Estrutura treliçada submetida a esforços de tração e compressão.....	51

Figura 28 – Deformações nos quatro nós da estrutura treliçada.....	52
Figura 29: (a) Extensômetros fixados no banzo longitudinal superior e inferior da estrutura treliçada (b) Extensômetro fixado na diagonal da estrutura treliçada.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação de estruturas reticuladas isostáticas, hipostáticas e hiperestáticas.	26
Tabela 2 – Definição das forças em cada barra da estrutura e seus comportamentos.	50
Tabela 3 – Média das deformações obtidas durante a análise experimental.	53
Tabela 4 - Comparação das tensões obtidas por meio da aplicação do Método Analítico (software Ftool®), Análise Experimental e Tensão Numérica.	54

Sumário

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Justificativa	14
1.2 Problemática da Pesquisa	15
1.3 Objetivos	15
1.3.1 Objetivos gerais	15
1.3.2 Objetivos específicos	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 Projeto de estruturas reticuladas	16
2.2 Classificação dos tipos de treliças	18
2.3 Elementos de ligação de treliças	20
2.3.1 Ligações parafusadas	20
2.3.1.1 Parafusos Comuns	21
2.3.1.2 Parafusos de Alta Resistência	21
2.3.2 Ligações soldadas	21
2.4 Graus de estaticidade estrutural	22
2.5 Tipos de carregamentos estáticos	25
2.6 Método dos Nós	27
2.7 Dimensionamento de elementos sob tração e compressão	29
2.8 Conceito de flambagem: uma breve revisão	30
2.9 Extensometria	34
3 METODOLOGIA	40
3.1 Delimitações da pesquisa	41
3.2 Fluxograma do trabalho	42
3.3 Características do protótipo da treliça plana	42
3.3.1 Metodologia do ensaio experimental	44
3.3.2 Principais processos de fabricação utilizados na construção da estrutura treliçada	46

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
4.1 Resultados Analíticos	48
4.2 Resultados Numéricos	51
4.3 Resultados Experimentais.....	52
4.4 Resumo dos Resultados: Analítico, Experimental e Numérico.....	54
4.5 Discussão dos Resultados	54
5 CONCLUSÃO	56
6 SUGESTÕES PARA PROJETOS FUTUROS	57
REFERÊNCIAS	58
ANEXO A – Detalhamento do protótipo de treliça plana	60

1 INTRODUÇÃO

Os primeiros indícios da utilização do ferro foram no Egito. Nesse período a sua aplicabilidade estava restrita a fins militares e em elementos de decoração nas construções, devido ao seu grande valor agregado. No entanto, a utilização do ferro em escala industrial ocorreu em meados do século XIX, em decorrência do avanço dos processos industriais que se iniciaram na Inglaterra, França e Alemanha (BELLEI; PINHO; PINHO, 2008). Segundo Bellei, Pinho e Pinho (2008), a primeira importante obra construída com ferro foi na Inglaterra, em 1779, a Ponte *Ironbridge* em Coalbrookdale, com um vão livre de 42m. Já em 1851, dá-se início à fabricação de edifícios metálicos, uma obra significativa foi o Palácio de Cristal, em Londres. Contudo, no Brasil a indústria siderúrgica começou a desenvolver-se em 1920 com a criação da Companhia Siderúrgica Belgo Mineira e posteriormente, com outras pequenas fundições, a produção de ferro chegou a 96 mil toneladas ao final da década.

Entre 1940 e 1960, fundou-se a Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), com o propósito de produzir chapas, trilhos e perfis. Mais adiante, as usinas de Usiminas e a Companhia Siderúrgica Paulista (Cosipa) iniciaram suas operações com a produção e comercialização de aços planos laminados a frio e a quente. Posteriormente, a empresa Gerdau Açominas começou suas atividades, a qual se tornaria a maior empresa produtora de aço no Brasil e uma das principais fornecedoras de aços longos e aços especiais no mundo. A abertura dessas indústrias favorece a grande expansão na produção siderúrgica no Brasil, chegando a uma produção de 36 milhões de toneladas de aço. Com isso foi possível dar início a exportação na década de 70, devido a grande produção e o baixo consumo interno desses materiais.

A estrutura é a parte fundamental de uma construção, sendo responsável em absorver e transmitir os esforços que serão submetidos para o solo. Deste modo, o aço é uma importante classe de material que, ao ser aplicado a uma estrutura lhe confere relativamente alta resistência. A utilização de estruturas metálicas em projetos do cotidiano apresenta inúmeras vantagens, tais como, maior resistência e menor peso, redução no tempo de execução do serviço e conseqüentemente, um aumento na produtividade, além de garantir um alto padrão de qualidade em construções

arquitetônicas.

Um exemplo de estrutura metálica que podemos citar são as treliças. Segundo Pfeil e Pfeil (2009), treliças são constituídas por uma junção de segmentos de hastes (barras) através de elementos de ligação, os nós, formando um sistema estrutural geometricamente estável. Já o termo treliça plana advém do fato de que todos os elementos pertencentes ao conjunto estão em um único plano e sua aplicabilidade se dá, principalmente, na construção de coberturas de edifícios, ginásios, indústrias e pontes, onde há necessidade de se vencer grandes vãos livres, além de serem fabricadas sob medida, com uma facilidade de montagem e de fixação, e ainda, apresentarem um baixo peso e um menor valor de custo, sem afetar a eficiência em sua aplicação (SOUZA; RODRIGUES, 2008).

O projeto inicial de estruturas, conforme Bellei, Pinho e Pinho (2008), “é a escolha dos arranjos e dimensões dos elementos estruturais de forma que as cargas de serviço decorrentes do uso e/ou outras ações externas sejam resistidas com segurança e os deslocamentos decorrentes estejam dentro de limites aceitáveis.” Portanto, o objetivo do projeto estrutural é garantir a integridade da estrutura, para que a mesma não entre em colapso e ainda garantir que não haja deslocamentos e vibrações excessivas, que possam comprometer a segurança e a vida útil da estrutura (PFEIL; PFEIL, 2009).

Considerando as informações anteriores, o presente trabalho tem o objetivo de projetar e confeccionar um protótipo de treliça plana do tipo Pratt baseando-se em normas técnicas e literatura disponível. Objetiva-se comparar os resultados obtidos (esforços nos elementos) através de um ensaio experimental do protótipo utilizando-se extensômetros, com o modelo analítico, utilizando o software Ftool®, e o modelo numérico, por meio do software SolidWorks®, demonstrando as deformações que essa estrutura sofrerá ao ser submetida a esforços normais de tração e compressão.

1.1 Justificativa

Este trabalho desenvolve-se sob a perspectiva de estruturas metálicas, apresentando como tema central, treliças planas. Justificando-se pela importância do dimensionamento adequado de uma estrutura treliçada, a qual será submetida a esforços, garantindo segurança e estabilidade, propiciando uma maior vida útil à estrutura e maior segurança estrutural. Além disso, justifica-se a importância e

necessidade da realização de uma análise estrutural experimental em projetos mecânicos. Considerando-se uma metodologia moderna de projeto, esta análise experimental torna-se fundamental para a validação de qualquer projeto mecânico. Neste trabalho utilizam-se técnicas experimentais de extensometria para analisar a treliça plana construída.

1.2 Problemática da Pesquisa

Tendo em vista a importância de um dimensionamento adequado, o qual garanta a segurança e a resistência da estrutura, além de respeitar as normas vigentes, faz-se necessário um estudo elaborado quanto aos esforços e solicitações aos quais a estrutura estará sendo submetida. Possivelmente, na grande maioria das empresas de pequeno porte, as estruturas são construídas de maneira empírica, muitas vezes sendo desconsiderados os critérios técnicos para sua fabricação. Desse modo, o presente trabalho busca dimensionar uma treliça plana, respeitando as normas técnicas e embasado na literatura disponível, para assim, demonstrar a confiabilidade estrutural do sistema e assegurar viabilidade de sua aplicação.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivos gerais

O objetivo geral deste trabalho consiste em projetar, construir e instrumentar um protótipo de treliça plana.

1.3.2 Objetivos específicos

- Projetar e manufaturar um protótipo de treliça plana com base em normas técnicas e literatura disponível.
- Calcular analiticamente os esforços presentes no protótipo da estrutura.
- Analisar numericamente a estrutura utilizada nos ensaios experimentais.
- Instrumentar o protótipo de treliça aplicando técnicas de extensometria.
- Realizar um ensaio experimental e analisar os resultados obtidos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção do trabalho são apresentados os principais conceitos e estudos relacionados ao tema abordado. Em primeiro lugar com a apresentação de trabalhos relevantes sobre treliças e os tipos de elementos de ligação. Na etapa seguinte aborda-se os principais conceitos sobre carregamentos estáticos e quanto ao dimensionamento dos elementos sujeitos a esforços de tração e compressão. Tais conceitos servem de base para a fase metodológica deste trabalho.

2.1 Projeto de estruturas reticuladas

Boll *et al.*, (2017), efetuaram testes com duas treliças planas do tipo *Howe*, em escala real, considerando os requisitos da norma brasileira regulamentadora de estruturas de madeira (NBR 7190), objetivando viabilizar o estudo sobre o comportamento de estruturas submetidas a carregamentos. Para os dois modelos foram utilizadas treliças de madeira, variando-se a forma de ligação dos elementos de fixação. Em um modelo foram utilizadas ligações parafusadas e em outro, ligações pregadas. Em síntese, ambas as treliças apresentaram ótimos resultados de deformação, alcançando carregamentos superiores aos previstos em projeto.

Pravia e Orlando (2001) apresentaram dois modelos qualitativos de treliças planas como ferramenta pedagógica, visando contribuir com o entendimento dos conceitos teóricos, aplicados à prática. Os modelos foram construídos a partir de materiais de baixo custo e posteriormente, essas estruturas foram submetidas a carregamentos nodais. Os resultados obtidos através do ensaio foram viabilizados por meio de modelo matemático, o qual forneceu resultados qualitativos dos esforços equivalentes presentes na estrutura.

Silva et al., (2021), construíram um modelo de treliça com palitos de picolé de madeira. O projeto buscou a melhor relação entre carga e peso da estrutura. Para o processo de dimensionamento e análise dos esforços normais aos quais a estrutura estaria sendo submetida, utilizou-se de saberes teóricos e auxílio do *software* de análise estrutural (*Ftool*®). Desse modo, dimensionou-se a treliça visando obter-se o mais alto coeficiente de eficiência definitivo possível, o qual levou em consideração a carga máxima que a estrutura suportou durante o teste, o peso total da treliça, o peso

dos instrumentos para o teste e os apoios da estrutura.

No trabalho de Farias, Jesus e Oliveira (2020), verificou-se os resultados qualitativos e quantitativos de uma treliça triangular simples construída com propósitos didáticos para o ensino de conceitos de estática. Para a verificação e constatação dos esforços de tração e compressão, utilizou-se da aplicação de molas à estrutura, fundamentando-se na Lei de Hooke. Desta forma, comparou-se os valores experimentais das forças axiais, medidas diretamente pelas deformações nas molas com os dados obtidos pelo “Método dos Nós”. Esse trabalho visou propiciar a utilização da estrutura para fins didáticos.

Souza (2002), realizou um estudo detalhado sobre treliças metálicas, com o intuito de comparar os dados obtidos dos diferentes modelos de estruturas, levando em consideração alguns parâmetros, como: quantidade de nós e barras, consumo de material, além dos deslocamentos máximos e das reações de apoio e os esforços internos máximos nos elementos da treliça. Foi observado que em muitos projetos têm-se utilizado o método teórico de treliça ideal (teoria de primeira ordem), no entanto, salienta-se que há grande probabilidade da distribuição dos esforços não serem lineares, o que ocasionaria uma sobrecarga em algumas barras, podendo ocasionar uma ruptura abrupta da estrutura, diferente do previsto em projeto. Outro ponto importante observado foi sobre o posicionamento e a quantidade dos apoios da estrutura (pilares). O aumento da quantidade de pilares reduziu significativamente os valores para os esforços axiais máximos e de deslocamento dos banzos, respectivamente, uma redução de 60% e 40%. Com base nesse estudo foi possível estabelecer algumas diretrizes para futuros projetos, os quais se assemelham aos parâmetros utilizados no projeto em questão.

Selli (2015) em seu trabalho discorreu sobre o uso de extensômetros elétricos para análises experimentais de tensões em estruturas. Tendo em vista que a utilização destes tipos de ferramentas tem-se destacado no meio da engenharia e com o avanço da tecnologia, mostram-se cada vez mais úteis, no quesito medição de tensões e esforços, desde em pontes, edificações, estruturas metálicas. Para a pesquisa foram realizados ensaios comparativos entre os métodos teóricos e os ensaios práticos. A utilização de *strain gauges*, atualmente, possibilita análises e estudos de boa exatidão quando comparados com outros métodos de obtenção de resultados, além de serem boas opções de equipamentos para conversão de sinais, com preço razoável.

Por fim, cita-se o trabalho de Vieira (2020), na qual analisou a aplicação de treliças para a construção da cobertura da arena Allianz Parque, considerando conceitos teóricos sobre tipos de treliças e sua aplicabilidade em processos construtivos. Conclui-se que treliças apresentam grande vantagem comparadas a outras formas de cobertura, por apresentarem menor peso e custo, além da facilidade na montagem, mas principalmente, sua capacidade em suportar os esforços requeridos e sua concepção arquitetônica.

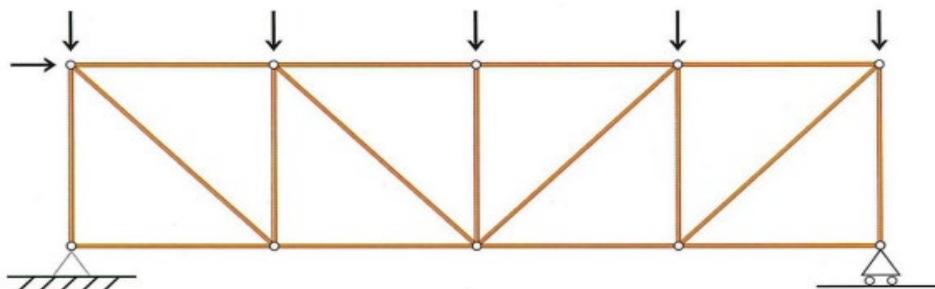
2.2 Classificação dos tipos de treliças

De acordo com Dias (2002), estruturas são definidas como conjuntos de elementos ou partes, que unidos terão como propósito resistir aos esforços aos quais são submetidos, transmitindo essas cargas entre os elementos constituintes através de vínculos, até que as mesmas cheguem à fundação dessa construção.

Valle, Rovere e Pillar (2009), definem que uma estrutura é formada com o intuito de garantir estabilidade e resistência em decorrência dos esforços aos quais é submetida. Para que isso seja possível, realizou-se um estudo para obter um sistema estrutural que se adeque às necessidades do projeto.

Segundo Pfeil e Pfeil (2009), treliças são descritas como uma junção de segmentos de hastes através de elementos de ligação, os nós. Desse modo, constituindo uma estrutura geometricamente estável, apresentando um modelo de base triangular isostática ou hiperestática. As barras que formam essa estrutura, são projetadas para resistir aos esforços a que são submetidas. No entanto, as cargas deverão ser aplicadas nos pontos de ligação da estrutura, e não nas barras. A figura 1 mostra uma representação de treliça plana isostática.

Figura 1 - Representação de uma treliça plana isostática.



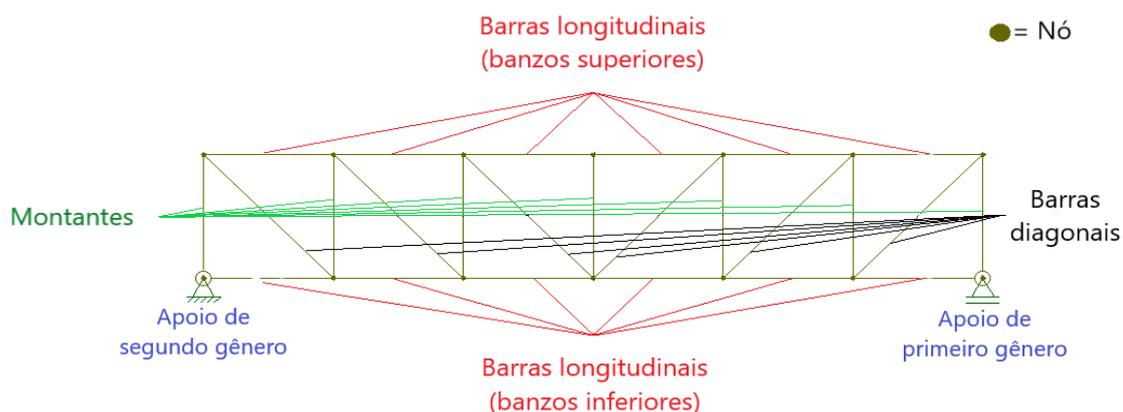
Fonte: Dias (2002)

Segundo Souza (2002), “nos retículos formados por duas ou mais camadas paralelas, o principal esforço interno é a força axial, porém dependendo das características de nó podem surgir momentos fletores, momento de torção e forças cortantes”. E ainda, o acréscimo à estrutura reticulada (treliça) de um ou mais banzos promove o aumento da rigidez da estrutura e limita os deslocamentos máximos da mesma, e possibilitando, a utilização em grandes vão livres.

De acordo com Soriano (2013), a treliça ou estrutura reticulada de nós rotulados, apesar de seus pontos nodais (nós) com as barras bi rotuladas serem parafusados, soldados ou rebitados, considera-se como conectados por meio de pinos. Para que seja possível reduzir os esforços aplicados à estrutura, apenas há esforços normais (tração e compressão), desse modo, não havendo momento fletor nos nós.

A estrutura de uma treliça simples como é mostrada na figura 2, é formada por uma ou mais camadas planas de barras, denominadas por banzos - banzos longitudinais (inferiores e superiores), e as barras utilizadas para a ligação entre os planos - barras diagonais e montantes. Além disso, os elementos de ligação entre os segmentos de barras, denominados de pontos nodais (nós) são os responsáveis por essas conexões (SOUZA, 2002).

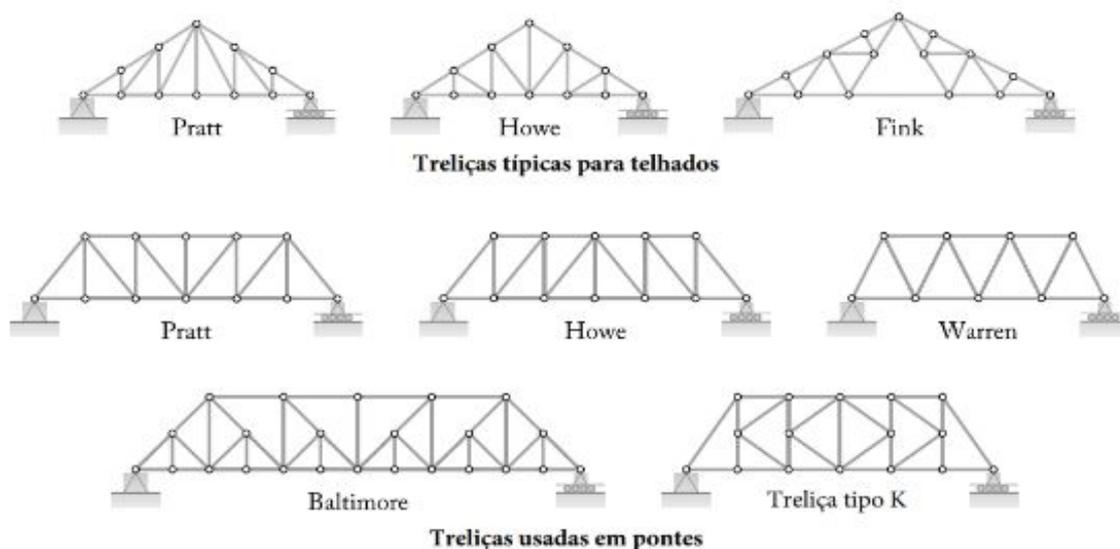
Figura 2 - Treliças do tipo Pratt com todas as indicações e nomenclaturas dos elementos estruturais.



Fonte: Autoria própria (2022)

Quanto à configuração das treliças, as utilizadas em estruturas de coberturas apresentam banzo superior inclinado, já quando utilizadas para pisos e pontes, possuem banzos superiores paralelos (PFEIL; PFEIL, 2009). As configurações de treliças mais usuais são: Pratt, Howe e Warren, como é apresentado na figura 3.

Figura 3 – Configurações mais usuais de treliças planas



Fonte: Adaptado de Botelho (2013)

Pfeil e Pfeil (2009), definem que no modelo de treliça Pratt, as barras diagonais quando submetidas a cargas da gravidade serão tracionadas, já os montantes (perpendiculares ao banzo inferior) serão comprimidas. O contrário acontece no caso da treliça tipo Howe, as barras diagonais serão comprimidas e as montantes tracionadas. Quanto ao modelo de treliça Warren, a mesma tem a configuração de um triângulo isósceles, sem montantes verticais, no entanto, quando é aplicada em grandes vãos, faz-se necessário a colocação de barras montantes. Com isso, apresenta diagonais que serão comprimidas e partes tracionadas.

2.3 Elementos de ligação de treliças

Em seguida, serão apresentados os principais tipos de elementos de ligação utilizados no Brasil na construção de estruturas reticuladas.

2.3.1 Ligações parafusadas

Este tipo de ligação subdivide-se em ligações com parafusos comuns e parafusos de alta resistência mecânica.

2.3.1.1 Parafusos Comuns

Conforme Pfeil e Pfeil (2009), de modo geral, os parafusos comuns são forjados com aço-carbono de baixo teor de carbono, ou seja, apresentando baixa resistência mecânica, seguindo a norma ASTM A 307. Para sua aplicação o mesmo é instalado com aperto, mobilizando o atrito entre as chapas.

Considerando-se que os parafusos comuns apresentam baixa resistência mecânica, sua empregabilidade se dá em peças secundárias, onde não haja uma grande sollicitação de esforços (DIAS, 2002).

2.3.1.2 Parafusos de Alta Resistência

Aplicam-se ligações parafusadas de alta resistência quando há ocorrência de esforços de tração, sendo necessário o aperto dos mesmos com controle de torque. Isso para garantir que não ocorra movimentação entre as partes conectadas, propiciando maior rigidez ao sistema estrutural. Uma vantagem de sua utilização está relacionada a sua maior resistência. Em decorrência disso, é possível reduzir o número de parafusos instalados por ligação, resultando em economia para o projeto (DIAS, 2002).

Há dois tipos de fixação desses parafusos de alta resistência: tipo atrito e do tipo apoio. O uso do tipo atrito, se dá quando há necessidade de “impedir qualquer movimento entre as chapas de conexão, dimensionam-se os parafusos com um coeficiente de segurança contra deslizamento” (PFEIL; PFEIL, 2009). Já quando os esforços de deslizamento são pequenos, então utiliza-se parafusos de alta resistência com ligação do tipo apoio, sendo instalados com aperto normal. Os parafusos de alta resistência são constituídos por aços tratados termicamente, seguindo a especificação da norma ASTM A 325.

2.3.2 Ligações soldadas

De acordo com Dias (2002), a utilização de conexões soldadas propicia “maior rigidez das ligações, redução de custos de fabricação (elimina furações), redução da quantidade de material, pois as conexões são mais compactas do que as ligações parafusadas e melhor acabamento final”.

Conquanto, essas ligações apresentam algumas desvantagens, tais como: dificuldade de se desmontar essas ligações após as mesmas terem sido conectadas e dependendo das posições de soldagem em obra, isso poderá afetar na qualidade desse cordão de solda, além da necessidade da qualificação dos soldadores responsáveis por realizar essa ligação e também, a qualidade dos eletrodos utilizados, variável que influencia diretamente no processo de soldagem.

2.4 Graus de estaticidade estrutural

De acordo com Süsserkind (1981), “para que um corpo submetido a um sistema de forças possa estar em equilíbrio, é necessário que ele não provoque nenhuma tendência de translação nem rotação a este corpo.” Isto é, para que a estrutura esteja em equilíbrio estático é mandatório que a soma de todas as forças e momentos (de modo independente) que atuam nela, em qualquer ponto, sejam nulas.

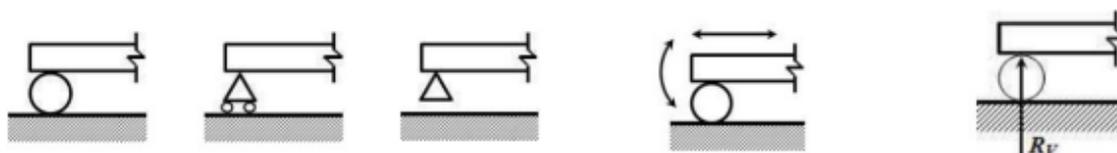
Em toda estrutura é necessário analisar o seu grau de estaticidade, sendo relevantes as reações de apoio (graus de restrição) e as condições de equilíbrio estático (soma das forças e momentos atuantes).

Para evitar a tendência da estrutura em rotacionar ou transladar, devido aos esforços atuantes, é necessário restringir seus graus de liberdade. Essa restrição é possível por meio de apoios. Süsserkind (1981), afirma que os apoios “devem impedir as diversas tendências possíveis de movimento, através do surgimento de reações destes apoios sobre a estrutura, nas direções dos movimentos que eles impedem, isto é, dos graus de liberdade que eles restringem”.

Os apoios podem ser classificados em três gêneros (SÜSSEKIND, 1981):

Apoio de 1º Gênero (*Charriot*): A estrutura é apoiada sobre rolos. O movimento de translação é impedido apenas na direção vertical, possibilitando o movimento na horizontal e a rotação livre. Ou seja, o movimento linear é impedido em uma única direção. Observa-se isso na figura 4, onde é representada uma reação de apoio R_v .

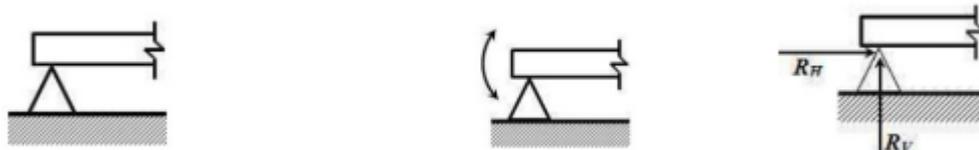
Figura 4 - Representação do Apoio de 1º gênero e sua reação estrutural.



Fonte: Adaptado de Pisano (2020)

Apoio de 2º Gênero (Rótula): A estrutura é apoiada sobre uma chapa e fixada à mesma. O movimento de translação é impedido em ambas as direções, vertical e horizontal, possibilitando somente o movimento de rotação. Ou seja, o movimento linear é impedido nas duas direções. Desse modo, serão representadas duas reações, descritas como R_H e R_V , conforme mostra a figura 5.

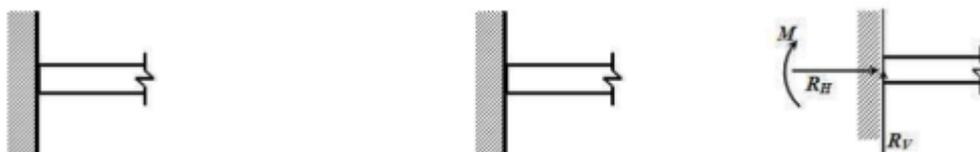
Figura 5 - Representação do Apoio de 2º gênero e suas reações estruturais.



Fonte: Adaptado de Pisano (2020)

Apoio de 3º Gênero (Engaste): A estrutura é inserida em uma chapa e fixada à mesma, considerando a mesma de dimensões infinitas. Desse modo, devido a grande rigidez ocasionada, todos os movimentos possíveis são impedidos. Ou seja, o movimento linear é impedido nas duas direções e de rotação. Este engaste é representado pelas reações R_H , R_V e M , na figura 6.

Figura 6 - Representação do Apoio de 3º gênero e suas reações estruturais.

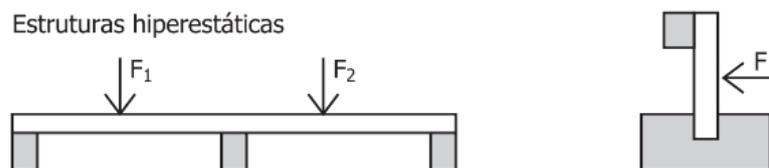


Fonte: Adaptado de Pisano (2020)

Estando estabelecido quais são as condições estáticas da estrutura e suas reações de apoio, é possível classificar a estrutura segundo seus graus de estaticidade.

Os graus de estaticidade são separados em três grupos: hiperestáticos, isostáticos e hipostáticos. Valle, Rovere e Pillar (2009), definem como hiperestáticas, as estruturas restringidas com número de incógnitas maior que o número de equações de equilíbrio, como é mostrado na figura 7. As estruturas restringidas apresentam vínculos que restringem todos os movimentos do corpo rígido, tanto os movimentos de translação, quanto os de rotação.

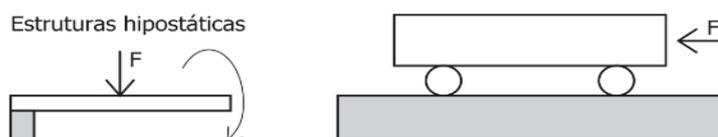
Figura 7 - Representação de estruturas hiperestáticas.



Fonte: Adaptado de Botelho (2013)

Já às estruturas hipostáticas não são restringidas e podendo ter o número de incógnitas menor que o número de equações de equilíbrio, sua representação é descrita pela figura 8.

Figura 8 - Representação de estruturas hipostáticas.



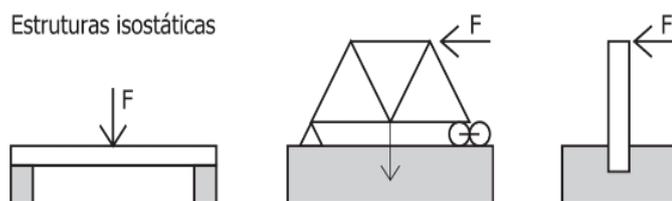
Fonte: Adaptado de Botelho (2013)

De acordo com o critério de Süsskind (1981), para determinar o grau de hiperestaticidade é necessário calcular o grau de hiperestaticidade externa, dado pelo número de incógnitas externas menos o número de equações de equilíbrio externas e internas, mais o grau de hiperestaticidade interna, definido pelo número de incógnitas internas. Sendo que, o equilíbrio pode ser estável, instável ou indiferente.

As incógnitas externas são determinadas pelas reações de apoio ou vínculos, já as internas, são dadas pelos esforços internos. Quantos às equações de equilíbrio, as externas se referem as equações de equilíbrio estático para a estrutura como um todo, já as internas, é o número de equações para a parte da estrutura conhecida, podendo ser um ou mais esforços internos (VALLE; ROVERE; PILLAR, 2009).

De acordo com Farias, Jesus e Oliveira (2020), “a condição isostática da treliça fica estabelecida quando as reações são estaticamente determinadas, e a treliça rígida é impossível de mover-se por translação ou rotação.” Por meio da figura 9 são representadas as estruturas isostáticas.

Figura 9 - Representação de estruturas isostáticas.



Fonte: Adaptado de Botelho (2013)

Conforme o trabalho de Süsskind (1981), para uma estrutura em equilíbrio estável, isostática, “o número de reações de apoio a determinar é igual ao número de equações de equilíbrio disponíveis [...] chegando-se a um sistema de equações determinado que resolverá o problema”.

2.5 Tipos de carregamentos estáticos

As treliças podem ser classificadas como isostáticas, hipostáticas e hiperestáticas, como é apresentado na tabela 01.

Valle, Rovere e Pillar (2009), descrevem as treliças isostáticas como estruturas de movimento restringido, ou seja, possuem um vínculo que restringe o movimento (translação e/ou rotação), e o número de incógnitas é igual ao número de equações de equilíbrio. Já as estruturas hipostáticas não apresentam uma estrutura restringida e o número de incógnitas é menor que o número de equações de equilíbrio estático. Por fim, as treliças hiperestáticas possuem uma estrutura restringida e, portanto, o número de incógnitas é maior que o número de equações de equilíbrio estático.

A classificação para uma treliça isostática é determinada pelas equações de equilíbrio. O número de incógnitas, o qual é obtido pela soma do número de reações (r) e o número de barras (b), e que deverá ser igual ao número de equações de equilíbrio da estática, que é dado pelo número de nós (n) multiplicado por dois (VALLE; ROVERE; PILLAR, 2009).

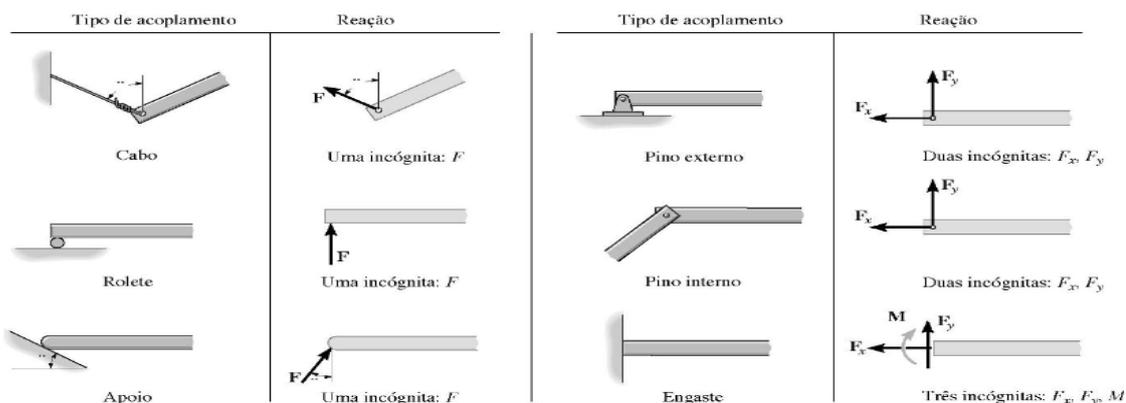
Tabela 1 - Classificação de estruturas reticuladas isostáticas, hipostáticas e hiperestáticas.

Classificação	1ª Condição	2ª Condição
Isostática	Indeslocável	$r + b = 2n$
Hipostática	Deslocável	$r + b < 2n$
Hiperestática	Indeslocável	$r + b > 2n$

Fonte: Adaptado de Valle, Rovere e Pillar (2009).

Para determinar o número de reações, ou seja, quais são os elementos que impedem o deslocamento da estrutura, é preciso definir qual é o tipo de vínculo aplicado à estrutura, como é apresentado na figura 10. Salienta-se que, os deslocamentos podem ser de translação ou de rotação. Para um corpo rígido em um plano, tem-se três graus de liberdade (deslocamento horizontal, vertical e de rotação).

Figura 10 - Tipos de vínculos e respectivo número de reações.



Fonte: Adaptado de Hibbeler (2010)

Segundo Hibbeler (2010), em problemas bidimensionais “podemos determinar o tipo de reação do apoio imaginando que o elemento a ele acoplado está sendo transladado ou está girando em uma determinada direção.” Caso o movimento esteja sendo impedido devido ao apoio em certa direção, a força deverá ser aplicada na mesma direção. Da mesma forma, aplica-se esse conceito em problemas onde o apoio impede o movimento de rotação.

Para calcular os esforços aplicados às treliças, em geral, têm-se três métodos:

1. Método dos Nós;

2. Método das Seções (Ritter);
3. Método Cremona (Maxwell).

Para o trabalho em questão será apresentado de modo mais detalhado o Método dos Nós na sessão subsequente.

2.6 Método dos Nós

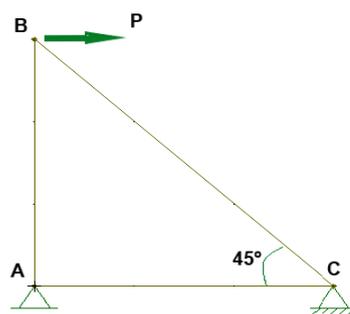
Para a realização de um projeto ou de uma análise estrutural é necessário saber quais são as forças que estão agindo sobre essa estrutura. Assim, para que isso seja possível, um dos métodos que se pode utilizar é o Método dos Nós.

De acordo com Hibbeler (2010), considerando-se que a treliça como um todo está em estado de equilíbrio, de semelhante modo, todos os nós, elementos de ligação, que formam a estrutura também estarão em equilíbrio. À vista disso, representando o diagrama de corpo livre em cada um dos nós, obtém-se as equações de equilíbrio de força, assim sendo possível determinar as forças atuantes sobre a estrutura. “Como os membros de uma *treliça plana* são membros retos de duas forças situadas em um único plano, cada nó está sujeito a um sistema de forças que é *coplanar e concorrente*” (HIBBELER, 2010). Portanto, é necessário satisfazer $\Sigma F_x = 0$ e $\Sigma F_y = 0$ para que o sistema esteja em equilíbrio.

Segundo Farias, Jesus e Oliveira (2020), “a força de ação de uma barra que atua sobre o nó tem a mesma intensidade, a mesma direção, porém em sentidos opostos”. Ou seja, ao aplicar uma força em determinada barra, a mesma poderá estar sujeita ao efeito de tração ou de compressão. A tração é observada quando a força atuante tender a alongar a barra, fazendo-a tracionar. De semelhante modo, quando a força tender a encurtar a barra, o efeito é de compressão e, eventualmente, flambagem. Forças de compressão por convenção são negativas, já as de tração, são admitidas como positivas (FARIAS; JESUS; OLIVEIRA, 2020).

Na figura 11, Hibbeler (2010) apresenta um exemplo de treliça simples de três barras e três nós, sujeita a uma força P , para determinar as forças atuantes no nó B.

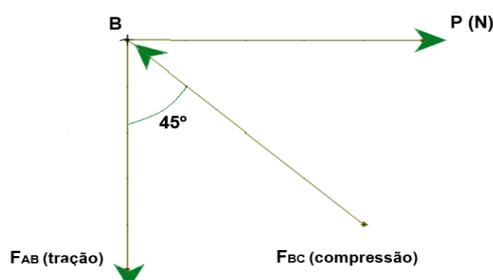
Figura 11 - Treliza simples plana sujeita a força P .



Fonte: Adaptado de Hibbeler (2010)

Para determinar os esforços no nó B , desenha-se o diagrama de corpo livre para esse ponto em estudo, e descreve-se quais forças estão sendo aplicadas, no caso, a força P e as forças exercidas pelos membros AB e BC . Observa-se que, a reação F_{AB} está tendendo a puxar o nó B para baixo, ou seja, o segmento de barra AB está sendo traçado. Já no caso da reação F_{BC} está tendendo a empurrar o nó B para cima, o que significa que o segmento de barra BC está sendo comprimido, como é mostrado na figura 12.

Figura 12 - Diagrama de Corpo Livre para o nó B .



Fonte: Adaptado de Hibbeler (2010)

Este método deverá ser aplicado em cada um dos nós que constitui a treliça, para que desse modo, determine-se todas as forças que estão atuando em cada um dos membros, e ainda, verifique-se quais segmentos estão sujeitos a tração ou compressão.

Hibbeler (2010) sugere ao utilizar o Método dos Nós: “sempre comece em um nó que tenha pelo menos uma força conhecida e, no máximo, duas forças incógnitas [...] Desse modo, a aplicação de $\Sigma F_x = 0$ e $\Sigma F_y = 0$ produz duas equações algébricas que podem ser resolvidas para as duas incógnitas”. Além de ter atenção ao sentido

da força, o efeito de tração tem sentido positivo e o de compressão, sentido negativo.

2.7 Dimensionamento de elementos sob tração e compressão

O projeto estrutural deve contemplar a premissa de resistir aos esforços físicos que serão submetidos durante toda a vida útil da estrutura, deste modo garantindo segurança e estabilidade. Conforme a NBR 8800/2008, deve-se considerar os estados-limites últimos (ELU) e os estados-limites de serviço (ELS), os quais levam em consideração a segurança da estrutura enquanto a mesma estiver sujeita tanto a condições normais, quanto à desfavoráveis durante sua vida útil, isso desde a sua construção à sua utilização.

Esse método do estado-limite para o dimensionamento de estruturas descreve que, “nenhum estado-limite aplicável seja excedido quando a estrutura for submetida a todas as combinações apropriadas de ações. Se um ou mais estados-limites forem excedidos, a estrutura não atende mais aos objetivos para os quais foi projetada” (NBR 8800/2008, 2008).

Segundo Pfeil e Pfeil (2009), os estados-limites últimos estão relacionados a carregamentos excessivos à estrutura, os quais podem ocasionar o colapso da mesma, sendo eles: ruptura de um elemento de ligação, flambagem em regime elástico ou não e até mesmo, ruptura por fadiga. Já quanto ao estado-limite de serviço, o mesmo é relacionado às deformações e vibrações excessivas que a estrutura poderá sofrer.

Para o dimensionamento de estruturas reticuladas, considera-se que a mesma é um conjunto de barras conectadas através de nós. As barras nesse tipo de estrutura são submetidas a esforços em suas extremidades, que estão ligadas aos nós. As forças exercidas sobre as barras podem ser classificadas como tração ou compressão.

Souza e Rodrigues (2008) complementam ainda seu estudo, ao submeter uma viga com as duas extremidades engastadas a esforços de momento fletor. Observa-se um alongamento das fibras em uma das faces da viga, conquanto, na face contrária da viga ocorre um encurtamento, ou seja, parte da barra estará sendo submetida a esforços de tração, enquanto que o lado oposto está sendo comprimido. Com isso, é possível afirmar que o momento fletor irá gerar tensões normais.

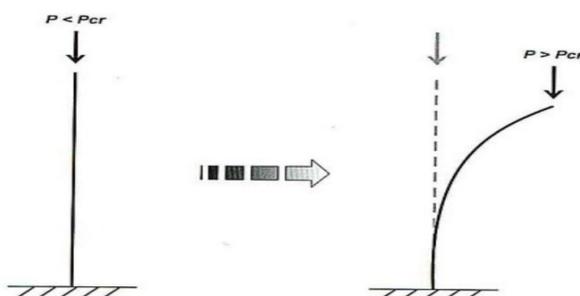
2.8 Conceito de flambagem: uma breve revisão

Conforme Hibbeler (2010), “alguns elementos estruturais podem estar sujeitos a cargas de compressão e, se forem compridos e esbeltos, a carga poderá ser grande o suficiente para provocar uma deflexão ou uma oscilação lateral.” Essa deflexão lateral que ocorre nesses elementos esbeltos é denominada flambagem.

Segundo Dias (2002), aplicando-se uma força axial de compressão em peças esbeltas, a qual ultrapassa determinado valor definido como carga crítica, as mesmas tendem a deslocar-se transversalmente na linha da ação dessa força aplicada, na prática. Isso é descrito como flambagem e é representado na figura 13.

Nesta condição onde ocorre a flambagem dos elementos da estrutura, o equilíbrio é instável, por mais que o conjunto seja isostático ou hiperestático, portanto, deverá ser evitada no projeto, tendo em vista que, um elemento sujeito a flambagem pode acarretar em uma falha da estrutura.

Figura 13 - Elementos esbeltos sujeitos a cargas axiais.

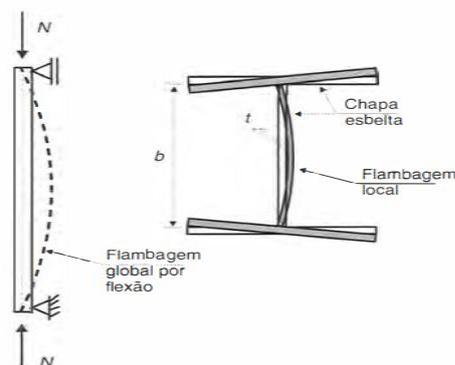


Fonte: Dias (2002)

Elementos constituintes de uma treliça, por serem peças verticais e esbeltas, são sujeitas a flambagem por flexão. Conforme Pfeil e Pfeil (2009) “ao contrário do esforço de tração, que tende a retificar as peças reduzindo o efeito de curvaturas iniciais existentes, o esforço de compressão tende a acentuar esse efeito”, ou seja, peças submetidas à esforços de compressão tendem a diminuir sua capacidade de carga quando comparadas às peças tracionadas.

A figura 14 apresenta a condição de flambagem local, ocasionada por uma instabilidade, gerando um deslocamento transversal da chapa.

Figura 14 - Flambagem local em colunas simples.



Fonte: Adaptado Pfeil e Pfeil (2009)

Quanto à carga crítica (P_{cr}), a mesma representa a carga axial máxima que a coluna poderá suportar na iminência de sofrer flambagem. Com isso, qualquer carga que seja acrescentada à mesma fará com que a coluna tenha uma deflexão lateral.

Leonhardt Euler (1707-1783) foi um dos primeiros a desenvolver um trabalho sobre o equilíbrio de colunas compridas e esbeltas, sujeitas a deformações laterais. Para validação de seu estudo levou-se em consideração, colunas isentas de imperfeições geométricas e sem tensões residuais, de material homogêneo com comportamento linear elástico e com a carga sendo aplicada no centroide da seção transversal da barra, dessa forma, constituindo-se uma coluna ideal (HIBBELER, 2010).

A partir disso, com a coluna inicialmente reta e com as deformações aproximadamente zero, até que a carga aplicada alcance o valor da carga crítica, ou carga de Euler, no momento em que é atingida a carga crítica a coluna está na iminência de sofrer flambagem, e tornar-se instável. A equação 1 descreve a carga de Euler para uma coluna acoplada por pinos:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (1)$$

Onde:

P_{cr} = carga crítica na iminência da coluna sofrer flambagem.

E = módulo de elasticidade do material.

I = menor momento de inércia para a área da seção transversal da coluna (apresenta menor resistência).

L = comprimento da coluna sem apoio (extremidades presas por pinos).

Para obter-se a equação da tensão crítica, basta dividir-se a carga crítica pela área A da seção reta da barra, apresentada na equação 2:

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{(L/r)^2} \quad (2)$$

Sendo:

σ_{cr} = tensão crítica, tensão média na coluna imediatamente antes da flambagem.

E = módulo de elasticidade para o material.

L = comprimento da coluna sem apoio (extremidades presas por pinos).

r = menor raio de giração da coluna, determinado por $r = \sqrt{I/A}$

Na equação anterior, o termo (L/r) representa o índice de esbeltez da coluna, sendo uma relação geométrica do comprimento entre os pontos de apoio lateral e o menor valor de raio de giração da seção transversal, mensurando-se desta forma a flexibilidade da coluna. Conforme Hibbeler (2010), quanto maior o índice de esbeltez, mais deformável será a coluna e onde ocorrerá a flambagem. Logo, a máxima tensão que irá atuar será a tensão crítica de flambagem e não mais a tensão de escoamento do material.

Segundo Pfeil e Pfeil (2009), após ser ultrapassado o valor da carga crítica não é mais possível manter o equilíbrio desta estrutura, devido às deformações laterais e pela coluna estar sujeita à flexocompressão.

Como é observado na equação 1, a carga crítica é independente da resistência do material, estando intrinsecamente ligada às dimensões da coluna (I e L) e a rigidez do material (E). Em consoante ao que Hibbeler (2010) explica, “no que diz respeito à flambagem elástica, colunas feitas, por exemplo, de aço de alta resistência, não oferecem nenhuma vantagem em relação às feitas de aço de resistência mais baixa, uma vez que o modelo de elasticidade para ambos os materiais é aproximadamente o mesmo.”

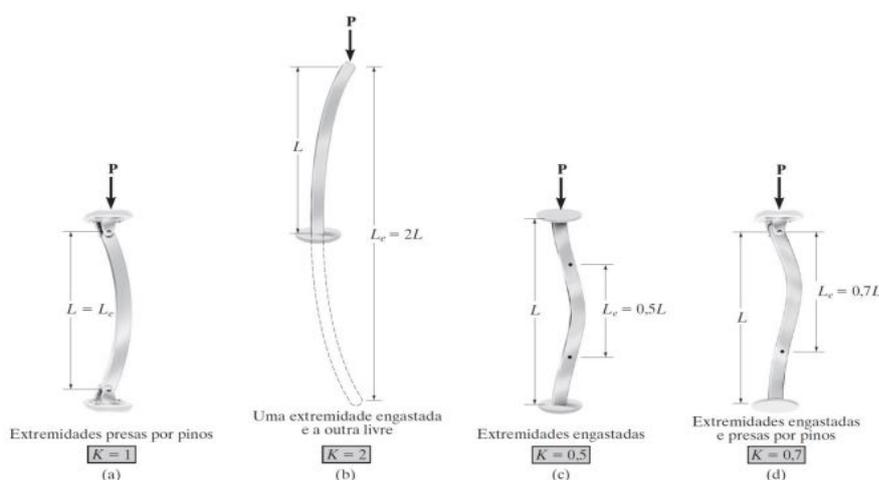
Outra observação importante é que aumentando o momento de inércia da seção transversal da peça, aumentará a capacidade de carga que a mesma suportará. “Colunas eficientes são projetadas de modo que a maior parte da área da seção transversal da coluna esteja localizada o mais longe possível dos eixos principais do

centróide da seção” (HIBBELER, 2010). Assim, peças com abas largas e ou tubos, são mais eficientes quando comparadas a barras maciças para a fabricação de um determinado componente.

Já no caso de coluna com vários tipos de apoios, de semelhante modo, é realizado o cálculo da carga e da tensão crítica. No entanto, leva-se em consideração o fator de comprimento efetivo, o qual é um coeficiente adimensional denominado de “K”. Para diferentes formas de apoios, considera-se o comprimento efetivo “L”, o qual representa a distância entre pontos de momento nulo, mas ao invés de se especificar esse comprimento, utiliza-se a generalidade através da seguinte equação: $L_e = KL$.

Na figura 15, observa-se os diferentes valores admitidos para K, relacionados aos tipos de apoio de cada estrutura.

Figura 15 - Fator de comprimento efetivo para diferentes tipos de apoio.



Fonte: Hibbeler (2010)

Quanto às fórmulas de Euler, as mesmas podem ser reescritas conforme demonstrado nas equações 3 e 4:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \quad (3)$$

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} \quad (4)$$

Na equação anterior, o termo (KL/r) representa o índice de esbeltez efetivo da coluna. Segundo a NBR 8800/2008, recomenda-se que o índice de esbeltez das

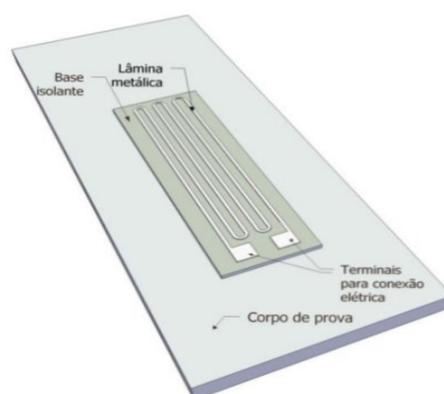
barras compridas, "tomado como a maior relação entre o produto KL e o raio de giração correspondente r , portanto KL/r , onde K é o coeficiente de flambagem [...] e L é o comprimento não restringido, não deve ser superior a 200".

2.9 Extensometria

A utilização de sensores elétricos e mecânicos, juntamente aos ensaios de resistência de materiais, tem-se tornado cada vez mais usual no meio da engenharia, na realização de projetos mecânicos e também no meio acadêmico visto que, a determinação das tensões e deformações de estruturas é muito importante durante o processo de dimensionamento e a aplicação de técnicas como a extensometria, agrega nos estudos teórico-práticos.

Segundo Hibbeler (2010), "a deformação normal em um corpo de prova de tração pode ser medida com a utilização de um extensômetro de resistência elétrica, que consiste em uma grade de filamentos ou um segmento de lâmina de metal ligado ao corpo de prova". Na figura 16 é demonstrado um modelo simplificado de fixação dos *strain gauges* em um corpo de prova.

Figura 16 - Exemplo de aplicação de "strain gauges" em um corpo de prova.



Fonte: Guadagnini, Rocha e Barlette (2011)

De acordo com Guadagnini, Rocha e Barlette (2011), "a medição de força mecânica por extensometria de resistência elétrica baseia-se na aplicação de um elemento transdutor, chamado extensômetro (*strain gauge*), que é sensível à deformação produzida sobre um corpo elástico devido a força a ser medida". Ou seja, conforme é aplicada uma força, a qual gera uma determinada deformação, o

transdutor resistivo (*strain gauges*), varia sua resistência elétrica, e essa variação da resistência elétrica possibilita estimar o grau de deformação e a força que foi aplicada.

Quanto ao funcionamento do extensômetro, “aplica-se a força a ser medida sobre o corpo de prova, no qual o extensômetro encontra-se colado. A força aplicada produz uma deformação nesse corpo, a qual é transmitida à base do extensômetro e, em seguida, à fita metálica, que é o elemento ativo” (GUADAGNINI; ROCHA; BARLETTE, 2011).

Com relação às especificações dos materiais para o extensômetro, de modo geral, “apresentam elevada sensibilidade (K_G) e resistividade (ρ), boa soldabilidade e resistência a corrosão. Além disso, é muito importante que o material apresente alta tensão de escoamento, baixa histerese e baixa sensibilidade a variações térmicas” (MILENA, 2017).

O valor K_G é definido como o fator de sensibilidade e é considerado constante caso a deformação permaneça no regime elástico do material. Podendo ser descrita como a variação relativa da resistência linearmente relacionada pela variação relativa do comprimento. Observa-se essa expressão na equação 5.

$$K_G = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta L}{L}} \quad (5)$$

Sendo:

ΔR = variação da resistência elétrica do fio (Ω)

R = resistência elétrica do fio (Ω)

Quanto à definição da resistência elétrica R , conforme a Segunda Lei de Ohm, considerando a resistência elétrica de um condutor homogêneo a qual é proporcional ao seu comprimento e inversamente proporcional à área de sua secção reta (PASCHOAL, 2019), como é apresentado na equação 6.

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (6)$$

Sendo que $\rho = (\Omega.m)$ constante de proporcionalidade do material, denominado como resistividade elétrica. Quanto menor for a resistividade elétrica, menor será a oposição do material à passagem da corrente elétrica, ou seja, será um

bom condutor elétrico devido à baixa resistividade.

Para o cálculo da resistência elétrica do extensômetro, “condutores metálicos mudam sua resistência elétrica com a aplicação de uma tensão mecânica, pela aplicação de forças de alongamento ou compressão, e a variação relativa da resistência é proporcional à magnitude da deformação resultante” (GUADAGNINI; ROCHA; BARLETTE, 2011). Com base nisso, calcula-se a variação relativa da resistência elétrica do sensor, utilizando a equação 7.

$$\Delta R = \varepsilon k R \quad (7)$$

Para determinação da constante k , definida como fator do extensômetro, mede-se a variação da resistência na fita metálica devido a deformação, sendo assim, o fator do extensômetro está relacionado a sensibilidade do equipamento. De acordo com Guadagnini, Rocha e Barlette (2011), quanto a fabricação de extensômetros “são preferíveis materiais que não apresentam alterações significativas de resistividade com a deformação na região elástica, o que implica, nesta aproximação, que o fator do extensômetro depende somente do coeficiente de Poisson do material”, podendo assim ser calculado segundo a Equação 8.

$$k = 1 + 2\nu \quad (8)$$

Já quanto a variação do comprimento. Ao aplicar-se uma força axial, podendo ser de tração ou compressão, tem-se uma variação no comprimento da peça. Desse modo, é possível calcular a deformação, a qual se dá pela razão entre a variação do comprimento da peça submetida a uma força axial e o comprimento original. A deformação longitudinal ou axial é mostrada na equação 9.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (9)$$

Onde:

$$\varepsilon = \text{deformação (m/m)}$$

Ao submeter a fita metálica à esforço de tração, a mesma irá sofrer alterações em sua configuração, à medida que for sendo alongada devido ao esforço aplicado,

sua espessura e largura se contraem. A média dessa variação indicará à deformação lateral (ε_l).

Destaca-se que, a razão entre a deformação lateral e a deformação axial define o Coeficiente de Poisson, o qual é uma constante adimensional e positiva. Quando um corpo é submetido a uma força de tração, ocasionando uma deformação, tanto longitudinal, fazendo com que seja alongado longitudinalmente, e ao mesmo tempo, contraindo-se lateralmente. A equação do Coeficiente de Poisson é evidenciada na equação 10.

$$\nu = \frac{\varepsilon_l}{\varepsilon} \quad (10)$$

Essa relação linear entre a tensão e a deformação para uma barra em tração ou compressão dentro da região elástica é conhecida como Lei de Hooke, expressa na equação 11.

$$\sigma = E\varepsilon \quad (11)$$

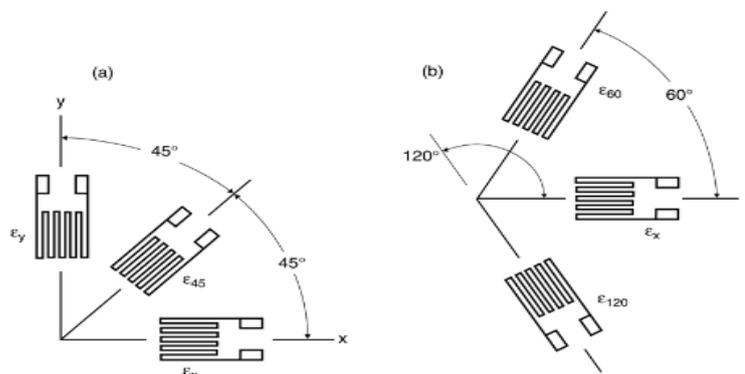
Onde:

E = Constante de proporcionalidade, denominado Módulo de elasticidade (Módulo de Young).

Segundo Hibbeler (2010) sobre a Lei de Hooke, a mesma “representa a equação da *porção inicial* em *linha reta* do diagrama tensão-deformação até o limite de proporcionalidade. Além disso, o módulo de elasticidade representa a *inclinação* dessa reta”. E ainda, o módulo de elasticidade é uma das mais importantes propriedades mecânicas, caso o material apresente um comportamento linear elástico. Seus valores são relativamente altos para materiais mais rígidos, já no caso de materiais mais flexíveis, o valor do módulo de elasticidade é mais baixo.

Para a determinação de deformações normais em corpos de prova, usualmente são utilizados três extensômetros, formando um padrão específico, esse agrupamento é denominado "roseta de deformação". Essa configuração de sensor é mostrada na figura 17.

Figura 17 - Conjunto de Rosetas de Deformação.



Fonte: Dowling (2018)

2.9.1 Ponte de Wheatstone

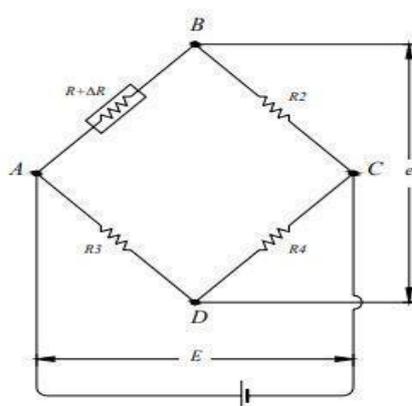
Quanto ao processo de medição realizado pelos extensômetros elétricos, separa-se em dois estágios: medição e processamento de sinal. O primeiro estágio se dá pela deformação elástica devido a uma força aplicada sobre a peça, resultando assim em uma variação da resistência elétrica no extensômetro. Já quanto ao segundo estágio, o mesmo se refere a etapa de aquisição dos dados durante o processo de carregamento. Nessa etapa será importante amplificar os sinais medidos, visto que, as deformações lidas são de ordem muito baixa (MILENA, 2017).

De modo geral, os extensômetros estão ligados a um circuito de ponte de Wheatstone, sendo “alimentado por uma dada tensão elétrica (V), a qual fornece a variação ocorrida no sinal elétrico (ΔV). A razão entre a variação de tensão elétrica ($\Delta V/V$) é igualmente proporcional à razão existente entre a variação de resistência elétrica ($\Delta R/R$)” (MILENA, 2017, apud WEBER, 2008).

Portanto, o extensômetro funciona do seguinte modo: uma força é aplicada à peça com os transdutores (*strain gauges*) fixados, que fazem a leitura da variação dimensional por meio da variação da resistência elétrica causada pela deformação. Essa variação dimensional e a deformação podem ser descritas pelo fator de sensibilidade, o qual foi apresentado na equação (5), e através do circuito da ponte de Wheatstone é possível medir a variação da tensão elétrica, como forma de resposta a carga que foi aplicada à peça (MILENA, 2017). A variação dessa tensão de saída da ponte, por conta do reequilíbrio, é transportada até um amplificador de voltagem, onde é possível ler essas informações por meio de uma placa de aquisição de dados,

Usualmente são empregados circuitos elétricos para determinação de deformações através do uso de extensômetros, de modo que seja possível medir a variação da resistência no circuito elétrico. Este circuito é denominado ponte de Wheatstone, como é apresentado na figura 18. Nesta estrutura é feita a comparação de medição das variações das resistências (ANDOLFATO; CAMACHO; BRITO, 2004).

Figura 18 – Ponte de Wheatstone.



Fonte: Andolfato, Camacho e Brito (2004)

Segundo Milena (2014) explica, “a resistência R_1 representa o extensômetro ativo, fixado sobre a estrutura a qual se deforma. R_2 é um extensômetro que tem como função compensar, ou seja, eliminar ou atenuar efeitos de origem térmica [...] R_3 e R_4 são denominadas resistências elétricas puras.” A ponte funciona devido a uma diferença de potencial, representada por E , voltagem aplicada no circuito da ponte entre os pontos A e C, sendo essa diferença dividida entre as resistências R_1 , R_2 , R_3 e R_4 . A resistência de cada braço contribui para que a ponte de Wheatstone mantenha o equilíbrio, desse modo, é viável relacionar a diferença de potencial entre a saída e a entrada pela equação de equilíbrio.

Ainda quanto à medição da deformação, tem-se 4 modelos de ligação da ponte de Wheatstone, sendo: ligação de $\frac{1}{4}$ de ponte, ligação de $\frac{1}{2}$ de ponte, ligação de ponte completa e ligação de $\frac{1}{2}$ de ponte diagonal. A escolha do tipo de ligação está relacionada ao estado de tensão do local em que será feita a fixação do extensômetro e o número de extensômetros a serem utilizados.

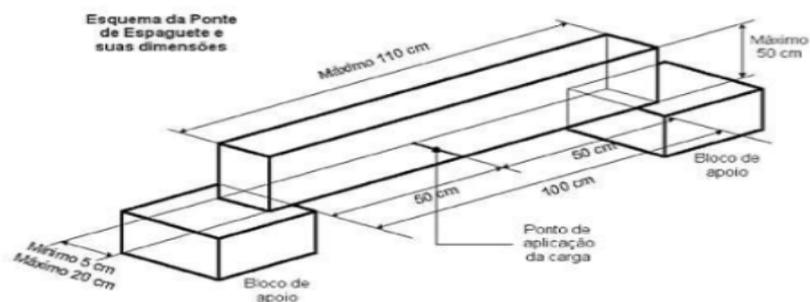
3 METODOLOGIA

No presente trabalho é realizado o dimensionamento de uma treliça plana do tipo Pratt, embasado nas literaturas disponíveis e na norma da ABNT NBR 8800:2008, para que fosse possível realizar o projeto e a construção desta estrutura. Quanto ao projeto e às dimensões, a treliça plana apresenta 1,2 metros de comprimento, com elementos de aço estrutural constituídos por Perfil “U” - Simples (100 x 40 x #2mm) para os banzos longitudinais (superior e inferior) e Perfil “U” - Simples (92 x 30 x #2mm) para as barras diagonais, conforme ABNT NBR 6355:2003. Todos os elementos que compõem a treliça foram unidos pelo processo de soldagem MIG/MAG.

Na sequência, seguindo a metodologia, serão apresentados: os elementos que formam a treliça e sua geometria, os esforços resultantes obtidos com o uso do software Ftool®, o pré-dimensionamento dos banzos e das diagonais (resistência à tração e à compressão); a parte experimental (análise estrutural experimental), e por fim, a realização de uma análise numérica na treliça desenvolvida.

Quanto à etapa experimental do projeto, sucedeu-se a construção e instrumentação do protótipo da treliça, visando verificar as capacidades de carga da estrutura. O ensaio foi realizado por meio de um dispositivo de análise de estruturas treliçadas disponível no Instituto Federal de Santa Catarina - IFSC, Câmpus Xanxerê, onde a estrutura foi apoiada, possibilitando a realização do ensaio experimental. O dispositivo de apoio é apresentado na Figura 19. Este dispositivo é comumente utilizado nas Competições de Pontes de Espaguete realizadas na Instituição. Após a realização do teste experimental e com treliça plana instrumentada, possibilitou-se fazer a comparação dos resultados obtidos considerando três análises: Método Analítico, Numérico e Análise Experimental.

Figura 19 - Dispositivo de Apoio para a Competição de Pontes de Espaguete e suas dimensões.



Fonte: Adaptado de Trampusch *et al* (2018)

3.1 Delimitações da pesquisa

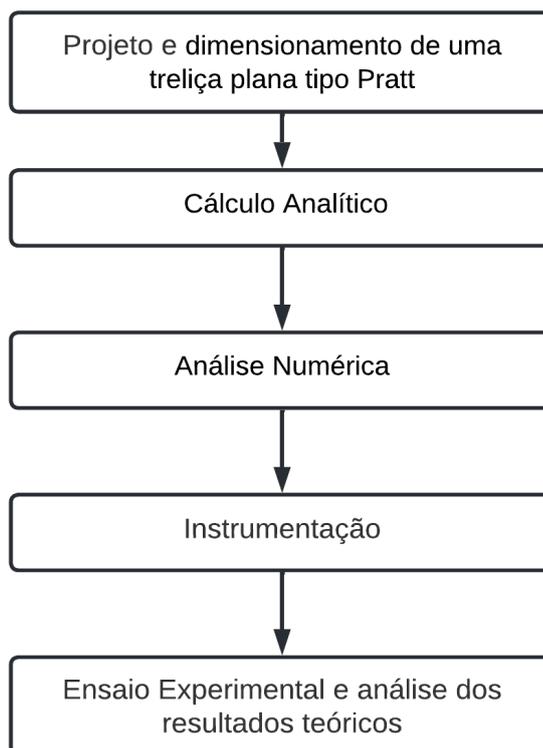
Neste Capítulo são abordados os aspectos que delimitam a pesquisa. Do ponto de vista da natureza da pesquisa o projeto em questão caracteriza-se como uma pesquisa básica, tendo em vista que, o objetivo do projeto é, por meio de métodos teóricos e experimentais, obter resultados mais precisos quanto às tensões e deformações que essa estrutura sofrerá ao ser submetida a esforços normais. Salientando-se que, regionalmente as estruturas treliçadas tem sua construção de maneira empírica, o aperfeiçoamento do dimensionamento de tais estruturas corrobora para a execução de projetos mais seguros. No que diz respeito a forma de abordagem do problema, a pesquisa classifica-se como sendo quantitativa, por utilizar de métodos teóricos e instrumentações, para que assim seja possível mensurar e comparar os resultados obtidos.

Já considerando o ponto de vista dos objetivos, a pesquisa é descritiva, pois objetiva descrever como deve ser realizado o dimensionamento de uma estrutura treliçada, embasado na fundamentação teórica. Por fim, do ponto de vista dos procedimentos técnicos a pesquisa configura-se como bibliográfica, fundamentada em normas técnicas e trabalhos já publicados, os quais abordam o assunto em questão.

3.2 Fluxograma do trabalho

As etapas a serem desenvolvidas neste trabalho encontram-se descritas no fluxograma da Figura 20.

Figura 20 - Fluxograma do processo metodológico utilizado neste trabalho.



Fonte: Autoria própria (2022)

3.3 Características do protótipo da treliça plana

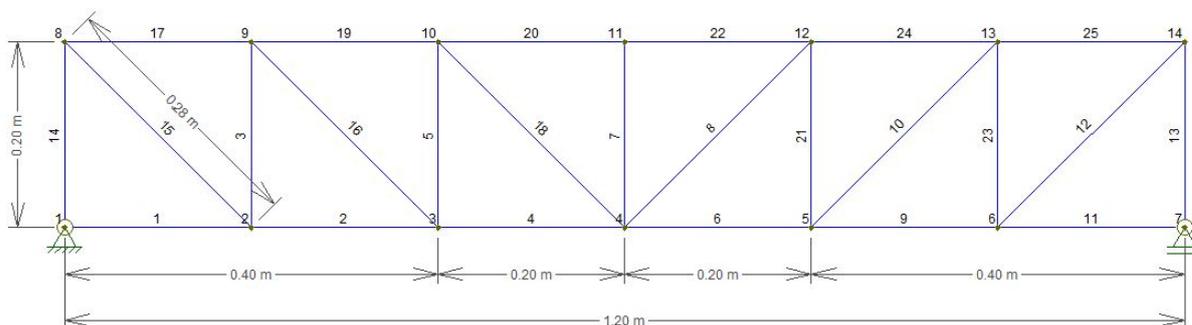
O protótipo da treliça plana do tipo Pratt foi confeccionado em uma metalúrgica de pequeno porte instalada em Xanxerê. Já para as análises experimentais (instrumentação e testes), fez-se uso dos laboratórios disponibilizados pelo Câmpus. A seguir são apresentadas algumas especificações da estrutura treliçada:

- Material da estrutura: aço estrutural ASTM A36;
- Dimensões: 1,2 m de comprimento, 0,2 m de altura e 0,1 m de largura;
- Seção transversal: 0,000352 m²;
- Massa total da treliça: 14,14 kg;

- Carga máxima aplicada no ensaio experimental: 112 kgf;
- Módulo de elasticidade: 205 GPa;
- Limite de escoamento (mínimo): 250 MPa;
- Limite de ruptura (mínimo): 400 MPa.

Quanto ao modelo conceitual da treliça plana desenvolvida, o mesmo é apresentado na Figura 21. Este modelo foi desenvolvido através do software Ftool®, com suas dimensões predefinidas, as seções, os apoios e as propriedades do material constituinte, deste modo, obtendo-se os esforços normais (compressão e tração) nos elementos da estrutura e possibilitando determinar as seções onde os esforços atuantes serão críticos. Na figura 21, observa-se a denominação dos pontos nodais da estrutura.

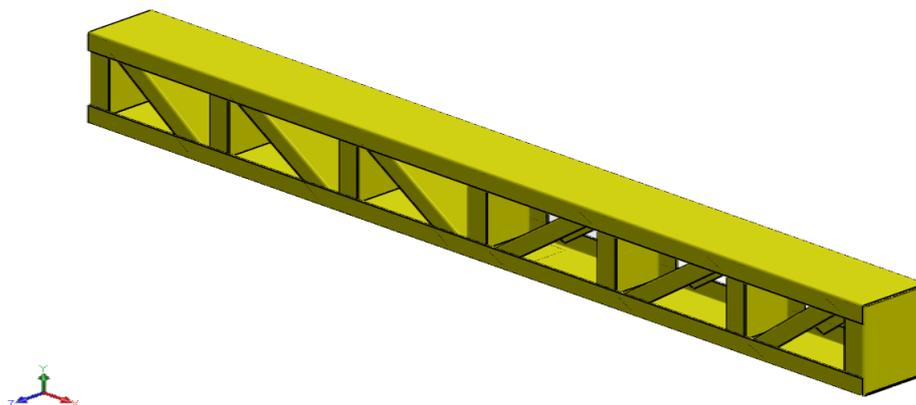
Figura 21 - Projeto conceitual da treliça plana.



Fonte: Autoria própria (2022)

Da mesma forma, foi realizado o modelamento da estrutura via software SolidWorks®, visando a verificação das tensões e deformações da estrutura ao ser submetida ao carregamento no vão central. Na figura 22 é demonstrado o modelamento da estrutura conforme dimensões predefinidas. O detalhamento da estrutura abaixo encontra-se no Anexo 1 do trabalho.

Figura 22 - Projeto 3D da treliça plana.



Fonte: Autoria própria (2022)

A partir dos resultados dos esforços obtidos por meio do software Ftool® foi realizada uma comparação com os resultados experimentais, mediante a utilização de medidores de deformação (*strain gauges*) com carga máxima aplicada na estrutura de 112 kgf, e com os resultados obtidos pela análise numérica (utilizando o software SolidWorks®). No cálculo analítico verificou-se a resistência dos elementos da estrutura aos esforços de compressão e tração.

3.3.1 Metodologia do ensaio experimental

Para a execução da análise experimental da treliça, a mesma foi disposta sobre um dispositivo de apoio, o qual é utilizado para teste de carregamentos em Competições de Pontes de Espaguete, na própria instituição (IFSC Câmpus Xanxerê). A estrutura estando biapoiada, vence um vão livre de 1,1m (distância entre os dois pontos de apoio), apresentando um carregamento ao centro do vão livre, no sentido transversal ao seu comprimento e no mesmo nível das extremidades apoiadas. Para a disposição das cargas à estrutura, foi utilizada uma haste metálica (vergalhão) de barra de aço de 8 mm de diâmetro, as cargas foram aumentadas gradativamente até que a estrutura atinja a carga de projeto considerada para a realização do experimento sem ocasionar deformações permanentes.

Quanto ao processo de fixação dos extensômetros, em primeiro lugar foram lixadas e polidas as áreas onde os mesmos seriam colados, visando retirar a camada de tinta e as impurezas e conseqüentemente, as rugosidades da superfície. Para essa etapa foram utilizadas lixas com granulometria de 120 até 600 (norma ANSI).

Consequente modo, foram aplicados sobre a superfície já polida os líquidos de limpeza, os quais têm por finalidade remover as impurezas, oleosidades e oxidações que poderão estar presentes na superfície da peça. Deste modo, a estrutura estará pronta para aplicação do extensômetro.

O modelo de extensômetro utilizado neste trabalho foi PA-09-125YA-120-L com *gauge factor* de 2,12 (fabricante Excel Sensores). A figura 23 mostra os extensômetros colados na treliça.

Figura 23 – Colagem dos extensômetros na estrutura treliçada.



Fonte: Autoria própria (2022)

A análise experimental foi realizada por meio da mensuração das deformações dos quatro *strain gauges* colados na estrutura, conforme indicado na figura 23. A instrumentação eletrônica de determinado componente, exige o uso de equipamentos adequados para a medida e o registro das grandezas de interesse (deformação). Neste trabalho, foi utilizado o sistema de aquisição de dados ADS1800 da Lynx® para coletar os sinais transmitidos pelos extensômetros. Esse sistema possui taxa de amostragem de 24000 dados por segundo, resolução de 24 bits e 8 canais de medição. O ADS1800 tem a função de microcontrolador, processando e transmitindo as informações mensuradas pelo extensômetro para o computador, onde está instalado o software AqDados. A figura 24 apresenta o sistema de aquisição de dados e a interface do software, respectivamente.

Figura 24: (a) Sistema de aquisição de dados ADS1800 e (b) Interface do software AqDados ®.



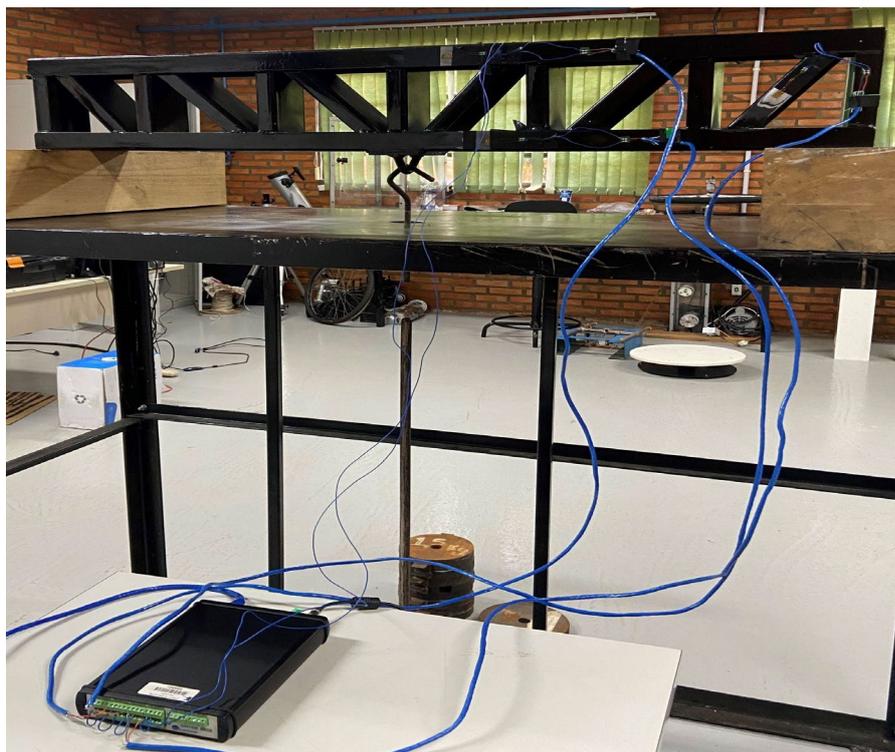
Fonte: LYNX TECNOLOGIA (s.d).

Ressalta-se que, no trabalho em questão para a aquisição dos dados foi utilizado o modelo com ligação de $\frac{1}{4}$ de ponte de Wheatstone.

3.3.2 Principais processos de fabricação utilizados na construção da estrutura treliçada

Quanto ao processo de fabricação da treliça plana, a mesma foi cortada com auxílio de uma serra de corte Policorte, conforme os tamanhos já previamente definidos. Para os banzos superior e inferior, ambos com comprimento de 1,2 m. Já as barras diagonais, foram cortadas com 0,2m de comprimento e os montantes com 0,28m de comprimento. A forma de ligação dos elementos constituintes foi realizada com o uso do processo de soldagem MIG/MAG. Na figura 25 é mostrada a treliça plana já montada e preparada para a realização dos ensaios experimentais

Figura 25 - Estrutura treliçada preparada para a realização dos ensaios experimentais.



Fonte: Autoria própria (2022)

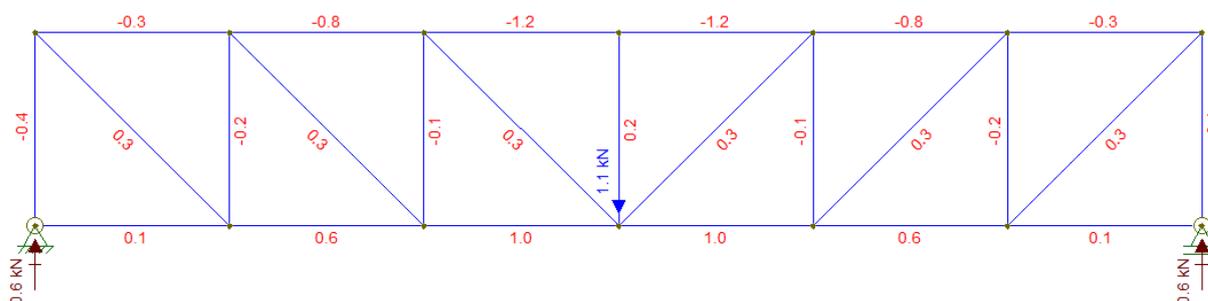
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados os resultados analíticos, numéricos e experimentais obtidos nos ensaios do protótipo da treliça plana.

4.1 Resultados Analíticos

Conforme descrito na seção 3.3, a estrutura será submetida a uma carga de 1100 N, aplicada no centro da treliça, como é demonstrado na figura 26.

Figura 26 – Esforços nos elementos estruturais da treliça.



Fonte: Autoria própria (2022)

Para a análise dos esforços de tração e compressão na treliça, por meio do software Ftool®, foi constatado que o maior valor para tração foi de 1000 N. Enquanto que, considerando esforços de compressão, o maior valor foi de 1200 N, conforme apresentado na tabela 2. Nesta tabela, o número de cada membro da treliça está ordenado conforme disposto na figura 21.

Considera-se, o valor da força para 1100 N e a área de seção transversal 0,000352 m², temos que a tensão máxima nestes elementos, conforme a equação 12, é:

$$\sigma_{m\acute{a}x.} = \frac{F}{A} \quad (12)$$

$$\sigma_{m\acute{a}x.} = 3,12 \text{ MPa}$$

Com esse resultado de tensão, é possível afirmar que a carga aplicada está muito abaixo do limite de escoamento de 205 MPa, do material que foi utilizado para a confecção da estrutura.

Na análise da compressão por flambagem, o maior esforço de compressão devido a atuação das cargas foi de 1200 N, como pode ser evidenciado na figura 26. Sendo assim, faz-se necessário a avaliação da carga crítica de Euler para comprovação de que a estrutura não estará sujeita a flambagem. Para isso, temos a equação 13 para a carga crítica na iminência da coluna sofrer flambagem, considerando-se uma estrutura com as extremidades engastadas ($k = 0,5$):

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \quad (13)$$

$$P_{cr} = 107,57(10^6) \text{ N}$$

Ao comparar o maior valor da carga de compressão (1200N presente nos elementos do banzo longitudinal superior) com o valor da carga crítica de Euler 107,57 (10^6) N, observa-se que o elemento estrutural não sofrerá flambagem.

Tabela 2 – Definição das forças em cada barra da estrutura e seus comportamentos.

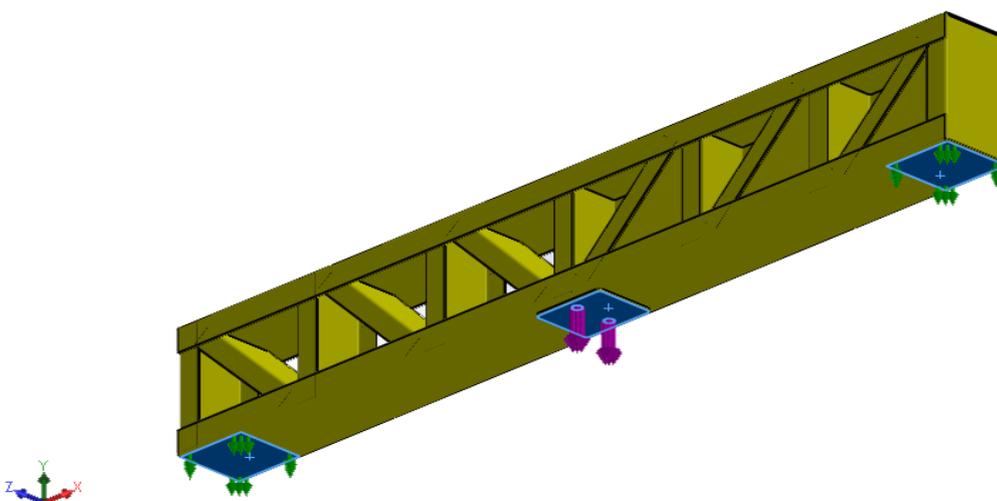
Barras	Nº do Membro (b)	Força nas hastes (F_b)	Comportamento
Barras Longitudinais (Banzo Superior)	16	$F_{16} = -0,3$ kN	Compressão
	17	$F_{17} = -0,8$ kN	Compressão
	19	$F_{19} = -1,2$ kN	Compressão
	21	$F_{21} = -1,2$ kN	Compressão
	23	$F_{23} = -0,8$ kN	Compressão
	25	$F_{25} = -0,3$ kN	Compressão
Barras Longitudinais (Banzo Inferior)	1	$F_1 = 0,1$ kN	Tração
	2	$F_2 = 0,6$ kN	Tração
	4	$F_4 = 1,0$ kN	Tração
	6	$F_6 = 1,0$ kN	Tração
	8	$F_8 = 0,6$ kN	Tração
	10	$F_{10} = 0,1$ kN	Tração
Barras Diagonais	14	$F_{14} = 0,4$ kN	Tração
	15	$F_{15} = 0,3$ kN	Tração
	7	$F_7 = 0,3$ kN	Tração
	20	$F_{20} = 0,3$ kN	Tração
	22	$F_{22} = 0,3$ kN	Tração
	24	$F_{24} = 0,4$ kN	Tração
Montante	13	$F_{13} = -0,4$ kN	Compressão
	3	$F_3 = -0,2$ kN	Compressão
	5	$F_5 = -0,1$ kN	Compressão
	18	$F_{18} = 0,2$ kN	Tração
	9	$F_9 = -0,1$ kN	Compressão
	11	$F_{11} = -0,2$ kN	Compressão
	12	$F_{12} = -0,4$ kN	Compressão

Fonte: Autoria própria (2022)

4.2 Resultados Numéricos

Para a realização desta análise, os contatos entre os elementos estruturais foram adicionados automaticamente pelo software SolidWorks®, conforme figura 27. Quanto às condições de contorno, considerou-se que a treliça está biapoiada em suas extremidades, e o carregamento de 1100N foi aplicado no vão central da estrutura.

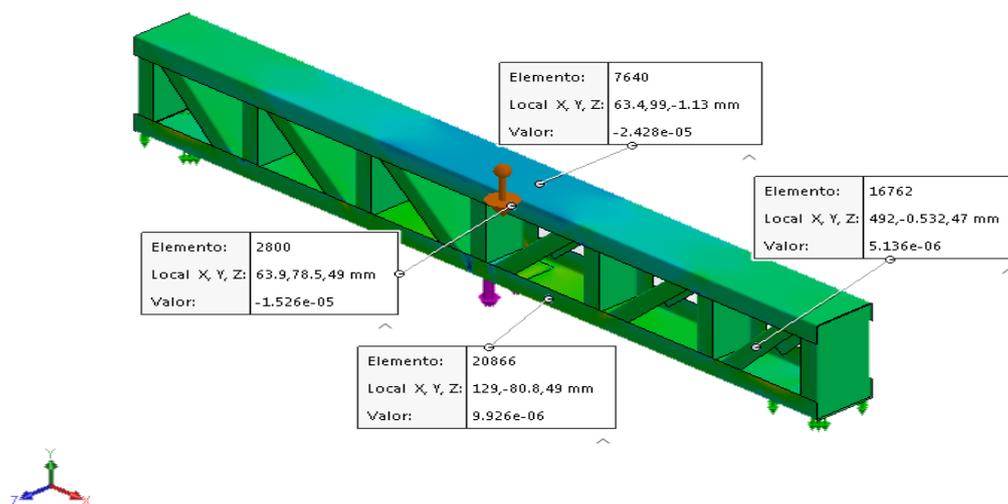
Figura 27 – Estrutura treliçada submetida a esforços de tração e compressão.



Fonte: Autoria própria (2022)

Na simulação computacional, realizaram-se diversos refinamentos da malha de elementos finitos, sendo que a convergência de resultados foi obtida com tamanho de elemento de 7 mm. Este estudo de convergência de malha (considerando a mensuração de deformações, analisada nos quatro pontos da estrutura onde foram colados extensômetros) é realizado para verificar a influência que os diferentes números de elementos finitos da malha têm sobre o resultado final da simulação computacional. A figura 28 apresenta os valores de deformações mensuradas numericamente em quatro pontos cujas posições são pontos idênticos onde foram colados os extensômetros durante a análise experimental.

Figura 28 – Deformações nos quatro nós da estrutura treliçada.



Fonte: Autoria própria (2022)

Observa-se por meio da figura 28, que o maior valor de deformação devido a compressão está localizado no banzo longitudinal superior, onde apresentou a maior esforço devido a compressão, conforme já apresentado na figura 25. De semelhante modo, quanto a deformação pelo esforço de tração, a maior deformação foi no banzo longitudinal inferior, no ponto identificado com o maior esforço de tração.

4.3 Resultados Experimentais

Considerando-se a realização de quatro ensaios experimentais (onde massas foram posicionadas na estrutura, gradualmente até atingir 112kg), com taxa de amostragem de 5 Hz, tem-se 200 valores mensurados, cuja média é apresentada na tabela 3. Destaca-se que os testes um e dois foram realizados sem a presença do *strain gauge* 4 (por isso a ausência de valores na tabela 3). Este sensor foi colado na estrutura na etapa final da coleta dos dados experimentais.

Tabela 3 – Média das deformações obtidas durante a análise experimental.

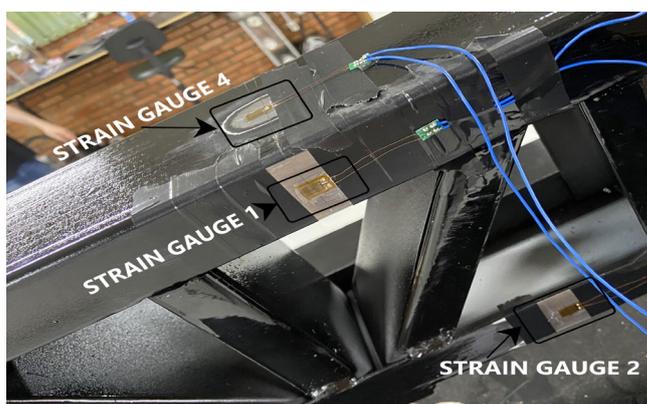
Teste	<i>Strain Gauge</i> 01 ($\mu\text{m/m}$)	<i>Strain Gauge</i> 02 ($\mu\text{m/m}$)	<i>Strain Gauge</i> 03 ($\mu\text{m/m}$)	<i>Strain Gauge</i> 04 ($\mu\text{m/m}$)
1	-8,64	6,66	8,00	-
2	-8,74	6,17	8,07	-
3	-9,21	5,50	8,15	-21,48
4	-8,61	6,11	8,15	-21,91
Média	-8,80	6,11	8,09	-21,69

Fonte: Autoria própria (2022)

Para a realização dos testes, inicialmente a estrutura foi posicionada de modo a estar centralizada sob o suporte de apoio. Por conseguinte, foram realizadas as ligações dos *strain gauges* ao sistema de aquisição de dados ADS1800.

A figura 29, mostra a indicação e numeração dos quatro sensores colados na estrutura.

Figura 29: (a) Extensômetros fixados no banzo longitudinal superior e inferior da estrutura treliçada (b) Extensômetro fixado na diagonal da estrutura treliçada.



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria (2022)

Sendo:

- **Strain Gauge 01:** Posicionado no banzo longitudinal superior, na aba lateral esquerda do perfil estrutural;

- **Strain Gauge 02:** Posicionado no banzo longitudinal inferior, na aba lateral esquerda do perfil estrutural;
- **Strain Gauge 03:** Posicionado na barra diagonal, na aba lateral esquerda do perfil estrutural;
- **Strain Gauge 04:** Posicionado no banzo longitudinal superior, no centro do perfil estrutural.

4.4 Resumo dos Resultados: Analítico, Experimental e Numérico

A tabela 4 apresenta um resumo dos resultados deste trabalho, trata-se de resultados de tensão, considerando as análises analítica, experimental e numérica.

Tabela 4 - Comparação das tensões obtidas por meio da aplicação do Método Analítico (software Ftool®), Análise Experimental e Tensão Numérica.

	Tensão Analítica (MPa)	Tensão Experimental (MPa)	Tensão Numérica (MPa)	Diferença Analítica x Experimental (%)	Diferença Analítica x Numérica (%)	Diferença Numérica x Experimental (%)
Strain Gauge 01	-3,41	-1,80	-3,19	47,07	11,71	40,05
Strain Gauge 02	2,84	1,25	2,82	55,91	5,66	53,26
Strain Gauge 03	1,01	1,66	1,63	-63,64	-46,03	-12,06
Strain Gauge 04	-3,41	-4,45	-4,87	-30,45	-35,23	3,53

Fonte: Autoria própria (2022)

A discussão dos resultados da tabela 4 será realizada na sessão subsequente.

4.5 Discussão dos Resultados

Considerando as informações da tabela 4, destaca-se os resultados obtidos no *strain gauge* 4. Esse extensômetro foi posicionado na região central do perfil “U” do membro estrutural. Para esse extensômetro, os resultados experimentais obtidos são mais próximos quando comparados aos resultados analíticos. Já os *strain gauges* 1, 2 e 3 foram colados na aba do perfil “U” (conforme mostra a figura 29), e apresentaram

valores mais discordantes ao serem comparados aos resultados do cálculo analítico. Após a fabricação da estrutura treliçada, observou-se que a ligação dos elementos estruturais não converge em um único ponto (premissa essa utilizada no conceito teórico da definição de treliça), podendo essa ser uma das causas para os diferentes resultados obtidos, comparando-se os resultados analíticos e experimentais. Tendo em vista que, na resolução dos cálculos analíticos pelo software Ftool®, todas as ligações dos elementos estruturais convergem em um único ponto de ligação.

Ainda quanto a interpretação dos resultados e diferença entre os valores experimentais e analíticos, destacam-se alguns fatores: existem algumas fontes de incerteza, como, por exemplo, eventuais problemas quanto à colagem e posicionamento dos extensômetros, agregando diferenças aos resultados. O processo de soldagem da treliça também pode implicar em distorções e possível empenamento da estrutura. O suporte dos pesos (vergalhão) também pode ser considerado como uma fonte de incerteza, além de incertezas geométricas estruturais. Também deve-se mencionar as possíveis incertezas nos valores das propriedades mecânicas do aço utilizado (classificado como ASTM A36). Considerando a simulação computacional, também há aspectos a serem analisados, quanto a correta representação das condições de contorno da análise, a aplicação da carga, a adição de contato nos membros estruturais que foi realizado automaticamente pelo software, a representação dos apoios, o tipo de elemento finito utilizado entre outros, além das propriedades mecânicas do material utilizado na simulação, estas são algumas das variáveis que influenciam diretamente nos resultados da análise numérica.

5 CONCLUSÃO

Diante das informações dispostas, é possível afirmar que os resultados numéricos, de certa forma, aproximam-se dos resultados analíticos, isso podendo ser confirmado devido à concepção do projeto.

Já quanto aos resultados experimentais, houveram diferenças considerando os diversos sensores, isso podendo ser justificado devido às variáveis envolvidas no momento dos ensaios experimentais. Essa diferença pode estar relacionada à grande robustez da estrutura treliçada quando comparada a carga utilizada nos testes experimentais, visto que, a mesma está muito abaixo do limite de escoamento do material. Outra questão é, quanto aos ruídos decorrentes da rede elétrica e os demais equipamentos eletroeletrônicos próximos a área de teste, isso poderá ter afetado as medições, em razão de que os dados de deformação obtidos foram relativamente de pequena magnitude. Observou-se também durante os ensaios experimentais que essas influências diminuiriam com o aumento da carga aplicada na estrutura.

Quanto aos resultados, de modo geral, considerando os quatro *strain gauges* fixados na estrutura, e comparando os valores do método analítico ao experimental, o sensor que apresentou melhor resultado foi o *strain gauge 4*, posicionado na parte central do perfil “U” no banzo longitudinal superior.

6 SUGESTÕES PARA PROJETOS FUTUROS

Algumas sugestões para projetos futuros, seria a aplicação de cargas superiores à aplicada neste trabalho, ao menos metade da tensão máxima de escoamento, esse aumento na carga propicia valores de deformações mais significativas, além de diminuir a influência dos ruídos nos sinais mensurados.

Outra sugestão para sequência de trabalhos é quanto à colagem dos demais extensômetros na área central do perfil, assim podendo-se fazer uma análise mais realista quanto as deformações em diferentes pontos da estrutura.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 8800:2008. **Projeto de estrutura de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. 2. ed. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2008.

BELLEI, I. H.; PINHO, F. O.; PINHO, M. O. **Edifícios de múltiplos andares em aço**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2008.

BOLL, L. T. et al. Projeto, construção e teste de duas treliças *Howe* em madeira. Trabalho apresentado no II Congresso Latinoamericano de Estruturas de Madeira. Argentina, 2017. Disponível em: <<https://clem-cimad2017.unnoba.edu.ar/papers/T6-19.pdf>>. Acesso em: 01 abr. 2022.

BOTELHO, M. H. C. **Resistência dos materiais** - Para entender e gostar. 2. ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 2013. Disponível em: <<https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521207504/>>. Acesso em: 28 jul. 2022.

DIAS, L. A. M. **Estruturas de aço**: Conceitos, técnicas e linguagem. 4. ed. São Paulo: Zigate Editora, 2002.

DOWLING, N. E. **Comportamento Mecânico dos Materiais**: Análises de engenharia aplicadas a deformação, fratura e fadiga. 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018. Disponível em: <<https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595153493/>>. Acesso em: 28 jul. 2022.

FARIAS, R. B.; JESUS, V. L. B.; OLIVEIRA, A. L. Uma maquete da estrutura em treliças simples triangulares para o ensino de estática. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol. 42, 2020.

GUADAGNINI, P. H.; ROCHA, F. S.; BARLETTE, V. E. Projeto de um sensor eletrônico baseado em extensometria para medição de força. **Latin-American Journal of Physics Education**, v. 5, n. 4, p. 753-762, 2011.

HIBBELER, R. C. **Estática**: Mecânica para Engenharia. 12. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

LYNX TECNOLOGIA. ADS 1800. [s.d.]. Página inicial. Disponível em: <https://www.lynxtec.com.br/prod_ads1800.htm>. Acesso em: 25 de nov. de 2022.

MINELA, S. N. **Extensometria**: Estudo e Aplicação. Dissertação (Bacharelado) - Curso de Engenharia Automotiva, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2017.

PASCHOAL, C. F. **Eletricidade básica**: Fundamentos, e elementos utilizados em circuitos. 1. ed. Editora Saraiva, 2019. Disponível em: <<https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536531779/>>. Acesso em: 22 out. 2022.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de aço**: dimensionamento prático de acordo com a NBR 8800:2008. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

PISANO, R. **Barras Isostáticas**: Resistência dos Materiais (REMA). Universidade Paulista - UNIP, 2020. Disponível em: <<https://www.passeidireto.com/arquivo/77884253/barras-isostaticas-rema>>. Acesso em: 28 jul. 2022.

PRAVIA, Z. M. C.; ORLANDO, D. Modelos qualitativos de treliças planas: Construção e aplicação no ensino da análise e comportamento estrutural. Universidade de Passo Fundo, Rio Grande do Sul: Cobenge, 2001.

SELLI, R. **Análise experimental de estruturas utilizando extensômetros elétricos**. 2015. Dissertação (Bacharelado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, 2015.

SILVA, I. L. A., et al. Treliça de palitos de picolé: projeto, fabricação e ensaio. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 5, p. 44277-44292, 2021.

SORIANO, H. L. **Estática das Estruturas**. 3. ed. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2013.

SOUZA, A. N. **Análise do projeto de estruturas metálicas espaciais**: ênfase em coberturas. 2002. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

SOUZA, M.; RODRIGUES, R. **Sistemas estruturais de edificações e exemplos**. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo - Departamento de Estruturas UNICAMP, Campinas, 2008.

SÜSSEKIND, J. C. **Curso de Análise Estrutural** – Estruturas Isostáticas. Vol. 1. 6. ed. Rio de Janeiro: Editora Globo, 1981.

TRAMPUSCH, J. M. T., *et al.* Projeto e construção de dispositivo para análise de estruturas treliçadas. Trabalho apresentado no 7º Seminário de Ensino, Pesquisa, Extensão e Inovação do Instituto Federal de Santa Catarina, 2018.

VALLE, Â.; ROVERE, H. L.; PILLAR, N. M. P. **Apostila**: Análise Estrutural I. Universidade Federal de Santa Catarina - Departamento de Engenharia Civil. 2009.

VIEIRA, L. C. **A utilização de treliças na construção civil**. 2020. Dissertação (Bacharelado) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Taubaté. Taubaté, 2020.

ANEXO A – DETALHAMENTO DO PROTÓTIPO DE TRELIÇA PLANA

