

ESTUDO ANALÍTICO, NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DE UM PROTÓTIPO DE TRELIÇA PLNA

Jaqueline Marcante¹, Marcelo André Toso², Carlos Alfredo Gracioli Aita³

Resumo: A utilização de estruturas metálicas em projetos do cotidiano apresenta inúmeras vantagens, tais como, maior resistência mecânica e menor peso, além de garantir um alto padrão de qualidade em construções. Um exemplo de estrutura metálica que se pode 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. Sendo assim, a realização de um dimensionamento adequado, o qual garanta a segurança e a resistência da estrutura, além de respeitar normas vigentes é imprescindível. Este trabalho tem por finalidade projetar e confeccionar um protótipo de treliça plana do tipo Pratt, comparando-se os resultados obtidos através de um ensaio experimental com o modelo analítico do software Ftool®, e o modelo numérico, via software SolidWorks®, obtendo-se as deformações desta estrutura ao ser submetida a esforços normais de tração e compressão, possibilitando determinar as seções onde os esforços atuantes são críticos. A treliça analisada apresentou uma tensão máxima de 3,12 MPa para uma carga máxima de 112 kgf, assim, estando abaixo do limite de escoamento do material utilizado para sua construção (205 MPa). Conclui-se também que os elementos estruturais submetidos a compressão não apresentaram instabilidade estrutural quanto a flambagem.

Palavras-chave: Treliça; Análise Estrutural; Extensometria.

1 INTRODUÇÃO

A estrutura é a parte fundamental de uma construção, sendo responsável por absorver e transmitir os esforços que são submetidos para o solo. Deste modo, o aço é uma importante classe de material que, ao ser aplicado a uma estrutura

1 Acadêmica de Engenharia Mecânica, Instituto Federal de Santa Catarina. jaqueline.m13@aluno.ifsc.edu.br

2 Doutor em Engenharia Mecânica, Professor do Instituto Federal de Santa Catarina. marcelo.toso@ifsc.edu.br.

3 Doutorando em Engenharia Mecânica, Professor do Instituto Federal de Santa Catarina. carlos.aita@ifsc.edu.br.

lhe confere 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. Treliças são estruturas metálicas que apresentam estas características. 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. 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. Normalmente, treliças são fabricadas sob medida, possuindo 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 ocorram deslocamentos e vibrações excessivas, que possam comprometer a segurança e a vida útil da estrutura (PFEIL; PFEIL, 2009). 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 estruturais) 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 desta estrutura ao ser submetida a esforços normais de tração e compressão.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Projeto de estruturas reticuladas

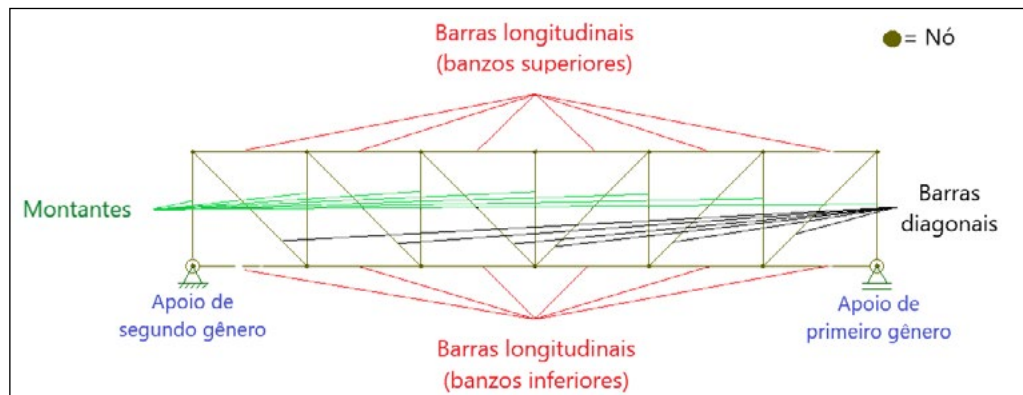
Pravia e Orlando (2001) apresentam dois modelos qualitativos de treliças planas como ferramenta pedagógica, visando contribuir com o entendimento dos conceitos teóricos, aplicados à prática. Os modelos são construídos a partir de materiais de baixo custo e posteriormente, essas estruturas são submetidas a carregamentos nodais. Os resultados obtidos através do ensaio são viabilizados por meio de um modelo matemático, o qual fornece resultados qualitativos dos esforços equivalentes presentes na estrutura. Já Silva et al., (2021), desenvolvem um modelo de treliça com palitos de picolé de madeira. O projeto busca a melhor relação entre carga e peso da estrutura. Para o processo de dimensionamento

e análise dos esforços normais aos quais a estrutura está submetida, utiliza-se o *software* de análise estrutural *Ftool*®. No trabalho de Farias, Jesus e Oliveira (2020), verifica-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, utiliza-se da aplicação de molas à estrutura, fundamentando-se na Lei de Hooke. Desta forma, compara-se os valores experimentais das forças axiais, medidas diretamente pelas deformações nas molas com os dados obtidos pelo “Método dos Nós”. Souza (2002), realiza 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. Observa-se 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 gerar uma ruptura abrupta da estrutura, diferentemente do previsto em projeto.

2.2 Definições e classificação dos tipos de treliças

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. As cargas são aplicadas nos pontos de ligação da estrutura, e não nas barras. Uma estrutura de treliça simples é mostrada na Figura 1, sendo 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 1 - Treliças do tipo Pratt com indicações e nomenclaturas dos elementos estruturais.



Fonte: Autoria própria.

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. Pfeil e Pfeil (2009), definem que no modelo de treliça Pratt, as barras diagonais quando submetidas a cargas da gravidade são tracionadas, já os montantes (perpendiculares ao banzo inferior) são comprimidas. O contrário acontece no caso da treliça tipo Howe, onde as barras diagonais são 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, este modelo de treliça apresenta diagonais que serão comprimidas e partes tracionadas.

2.3 Elementos de ligação de treliças

Os principais tipos de elementos de ligação utilizados na construção de estruturas reticuladas são: Ligações parafusadas que podem ser com parafusos comuns ou com parafusos de alta resistência mecânica. Conforme Pfeil e Pfeil (2009), de modo geral, os parafusos comuns são forjados com aços-carbono de baixo teor de carbono, ou seja, apresentando baixa resistência mecânica, seguindo a norma ASTM A 307. Já os parafusos de alta resistência são aplicados quando há ocorrência de esforços de tração, sendo necessário o aperto dos mesmos com controle de torque, para garantir que não ocorra movimentação entre as partes conectadas, propiciando maior rigidez ao sistema estrutural. 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, além de possuir melhor acabamento final”. No entanto, 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, pode afetar na qualidade desse cordão de solda, além da necessidade da qualificação dos soldadores.

2.4 Classificação dos apoios das estruturas e graus de estaticidade

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: 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. Apoio de 2º Gênero (Rótula): a estrutura é apoiada sobre uma chapa e fixada à mesma. O movimento de translação é impedido nas direções vertical e horizontal, possibilitando somente o movimento de rotação. 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 à grande rigidez ocasionada, todos os movimentos possíveis são impedidos.

Já os graus de estaticidade estrutural podem ser separados em três grupos: hiperestáticos, isostáticos e hipostáticos. Valle, Rovere e Pillar (2009), definem como hiperestáticas, as estruturas restringidas com número de incógnitas maior do que o número de equações de equilíbrio. Já às estruturas hipostáticas não são restringidas, podendo ter o número de incógnitas menor que o número de equações de equilíbrio. 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.” Para calcular os esforços aplicados às treliças, em geral, têm-se três métodos: Método dos Nós; Método das Seções (Ritter); Método Cremona (Maxwell). Neste trabalho é utilizado o Método dos Nós na análise estrutural da treliça plana.

2.5 Método dos Nós

De acordo com Hibbeler (2010), considerando-se que a treliça como um todo encontra-se em estado de equilíbrio, de semelhante modo, todos os nós, elementos de ligação, que formam a estrutura também estão em equilíbrio. Logo, 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. Portanto, é necessário satisfazer a seguinte condição: $\Sigma F_x = 0$ 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 (FARIAS; JESUS; OLIVEIRA, 2020). Detalhes adicionais do Método dos Nós podem ser encontrados em Hibbeler (2010).

2.6 Dimensionamento estrutural 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, desde a construção até sua utilização.

Já considerando esforços de compressão em elementos esbeltos, Hibbeler (2010), afirma que “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. Neste contexto que, define-se o conceito de carga crítica (P_{cr}), na qual representa a carga axial máxima que a coluna/elemento estrutural pode suportar na iminência de sofrer flambagem, podendo ser avaliada de acordo com a Equação (1). Desta forma, qualquer carga que seja acrescentada à mesma fará com que a coluna tenha uma deflexão lateral.

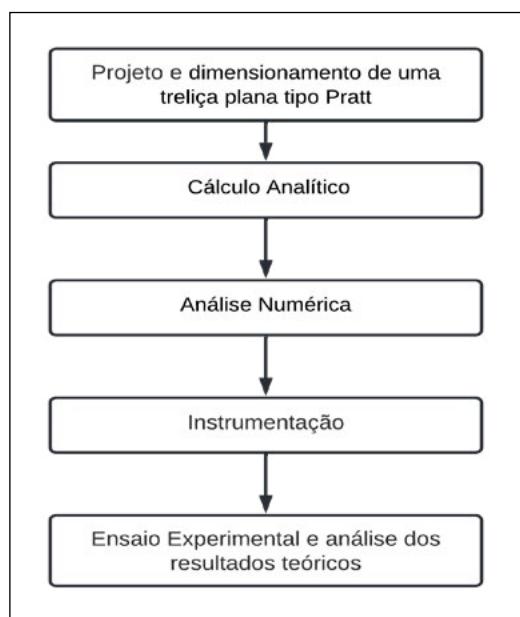
$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (1)$$

Onde: P_{cr} é carga crítica na iminência da coluna sofrer flambagem; E é módulo de elasticidade do material; I é a menor momento de inércia para a área da seção transversal da coluna; L é o comprimento da coluna sem apoio. Para obter-se a equação da tensão crítica, basta dividir a carga crítica pela área da seção transversal da estrutura.

3 METODOLOGIA

Neste trabalho é realizado o dimensionamento e confecção de uma treliça do tipo Pratt. A treliça plana possui 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 são de aço estrutural ASTM A36, e foram unidos pelo processo de soldagem MIG. Seguindo a metodologia, apresentam-se o modelo conceitual da treliça/análise do software Ftool®, o modelo numérico e informações da análise estrutural experimental. Na etapa experimental do trabalho, realizou-se a construção e instrumentação (utilizando-se técnicas de extensometria) do protótipo de treliça plana. Após a realização do teste experimental, foi possível comparar os resultados obtidos considerando três análises: método analítico, numérico e experimental. A Figura 2 apresenta um fluxograma da metodologia deste trabalho.

Figura 2 - Fluxograma do processo metodológico utilizado neste trabalho.



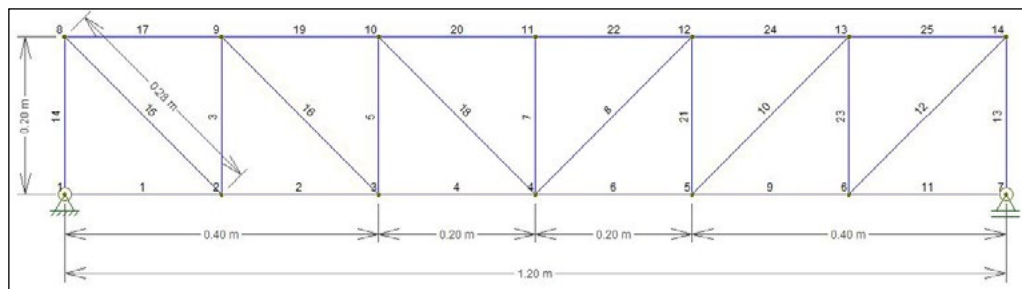
Fonte: Autoria própria.

3.1 Protótipo da treliça plana

Quanto ao modelo conceitual da treliça plana desenvolvida, o mesmo é apresentado na Figura 3. Este modelo foi desenvolvido através do software Ftool®, onde foi possível obter os esforços normais (compressão e tração) nos

elementos da estrutura, possibilitando determinar as seções onde os esforços atuantes serão críticos.

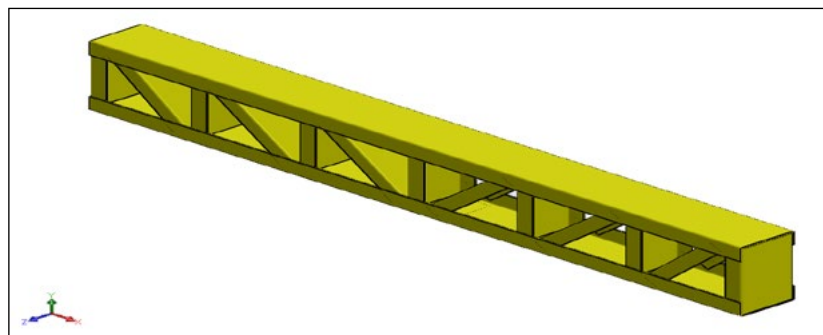
Figura 3 - Projeto conceitual da treliça plana.



Fonte: Autoria própria.

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 4 é demonstrado o modelo da estrutura conforme dimensões predefinidas.

Figura 4 - Modelo 3D da treliça plana.



Fonte: Autoria própria.

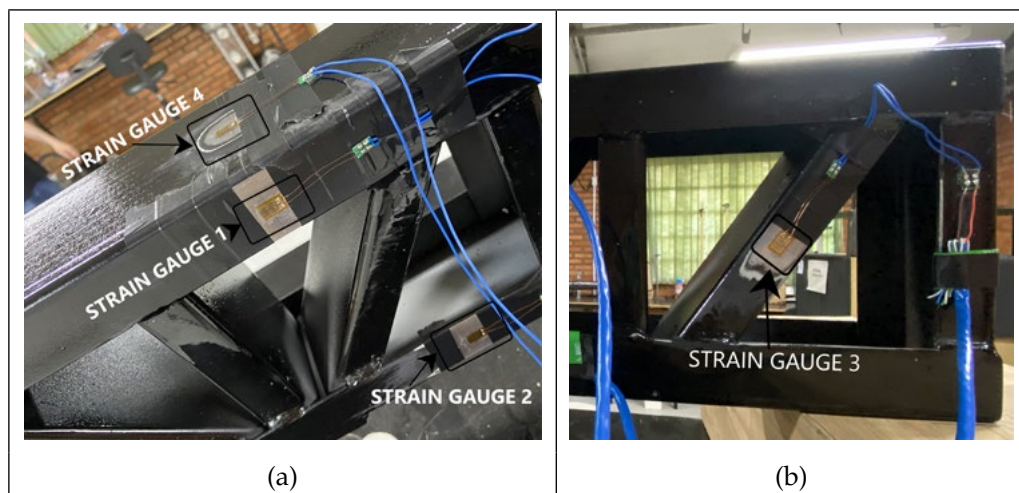
A partir dos resultados dos esforços obtidos por meio do software Ftool® foi realizada uma comparação com os resultados experimentais, mediante a utilização de medidores de deformação (*strain gauges*) com carga máxima aplicada na estrutura de 112 kgf, e com os resultados obtidos pela análise numérica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

3.2 Análise experimental

Para a execução da análise experimental da treliça, a mesma foi posicionada sobre um dispositivo de apoio, desta forma, a estrutura estando biapoiada, vence um vão livre de 1,1m (distância entre os dois pontos de apoio). A carga foi aplicada no centro do vão livre da estrutura, no sentido transversal ao seu comprimento e no mesmo nível das extremidades apoiadas. Para a aplicação das cargas à estrutura, foi utilizado 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 causar deformações permanentes.

Quanto ao processo de fixação dos extensômetros, na etapa inicial, foram lixadas e polidas as áreas onde os mesmos foram colados, visando retirar a camada de tinta e as impurezas e conseqüentemente, rugosidades e imperfeições da superfície. Subseqüentemente, foram aplicados sobre a superfície já polida líquidos de limpeza, os quais têm por finalidade remover as impurezas, oleosidades e oxidações que poderão estar presentes na superfície da estrutura. O modelo de extensômetro utilizado neste trabalho foi PA-09-125YA-120-L com *gauge factor* de 2,12 (Excel® Sensores). A Figura 5, mostra detalhes estruturais assim como a indicação e numeração dos quatro sensores (*strain gauges*) colados na treliça plana.

Figura 5: (a) Extensômetros fixados no banzo longitudinal superior e inferior da estrutura treliçada (b) Extensômetro fixado na diagonal da estrutura treliçada.



Fonte: Autoria própria.

O *Strain Gauge* 01 foi posicionado no banzo longitudinal superior, na aba lateral esquerda do perfil estrutural; o *Strain Gauge* 02 foi posicionado no banzo longitudinal inferior, na aba lateral esquerda do perfil estrutural; o *Strain*

Gauge 03 foi posicionado na barra diagonal, na aba lateral esquerda do perfil estrutural e o *Strain Gauge* 04 foi posicionado no banzo longitudinal superior, no centro do perfil estrutural.

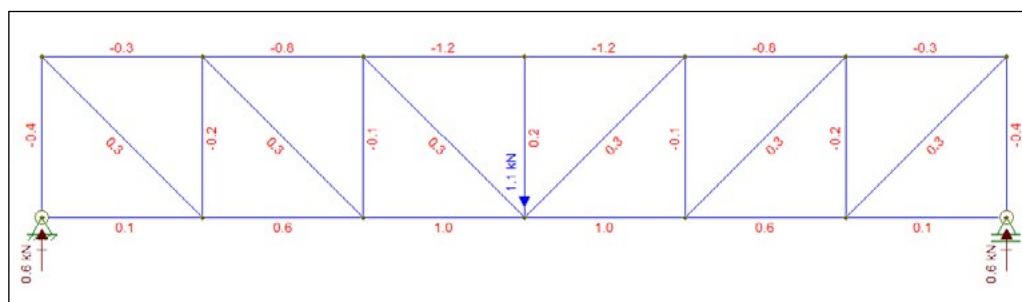
A análise experimental foi realizada por meio da mensuração das deformações dos quatro *strain gauges* colados na estrutura, utilizando um sistema de aquisição de dados, modelo ADS1800 da Lynx® para coletar os sinais transmitidos pelos extensômetros. Esse sistema de aquisição de dados possui taxa de amostragem de 24000 dados por segundo, resolução de 24 bits e 8 canais de medição. Para a aquisição dos dados deste trabalho foi utilizado um modelo com ligação de $\frac{1}{4}$ de ponte de Wheatstone.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados analíticos

A estrutura é submetida a uma carga de 1100 N, aplicada no centro da treliça, como é demonstrado na Figura 6.

Figura 6 – Esforços nos elementos estruturais da treliça.



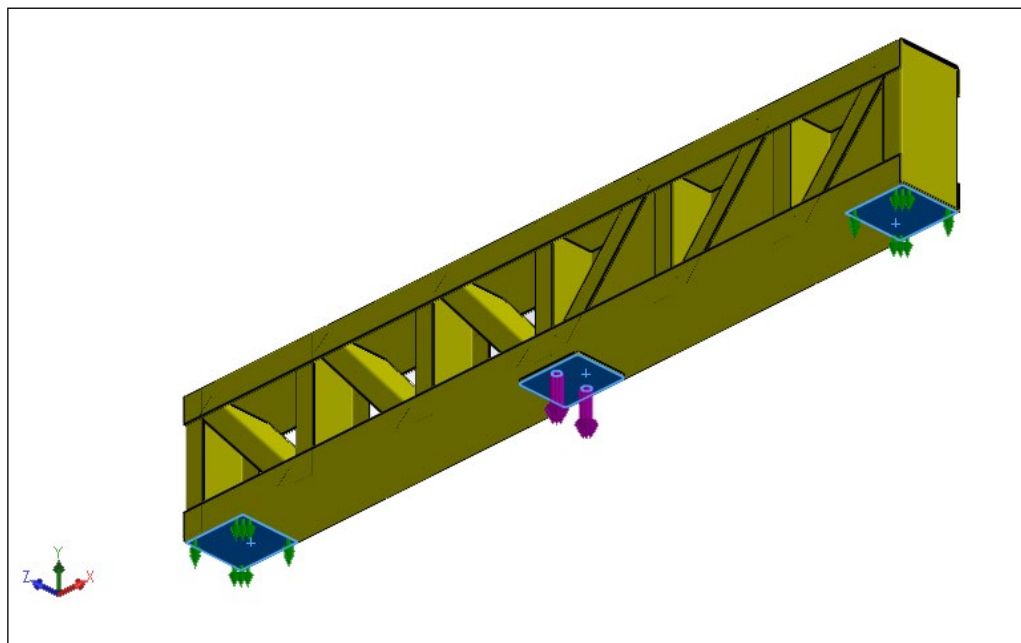
Fonte: Autoria própria.

Analisando os esforços de tração e compressão na treliça, por meio do software Ftool®, verifica-se que o maior valor de esforço para tração é de 1000 N. Considerando o conceito de tensão e a área da seção transversal do elemento, obtém-se 3,12 MPa como tensão máxima de tração presente nos membros estruturais da treliça plana. 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. Já considerando esforços de compressão, os resultados da análise estrutural indicam que o maior esforço de compressão é de 1200 N. Sendo assim, faz-se necessário a avaliação da carga crítica de Euler para comprovar que a estrutura não está sujeita a flambagem. Aplicando-se a Equação (1) obtém-se o valor de 107,57(10⁶) N como carga crítica de Euler. Logo, observa-se que os elementos estruturais não sofrerão flambagem quando submetidos a esforços de compressão.

4.2 Resultados numéricos

Para a realização desta análise, os contatos entre os elementos estruturais são adicionados automaticamente pelo software SolidWorks®, conforme Figura 7. Quanto às condições de contorno, considera-se que a treliça está biapoiada em suas extremidades, e o carregamento de 1100 N é aplicado no vão central da estrutura.

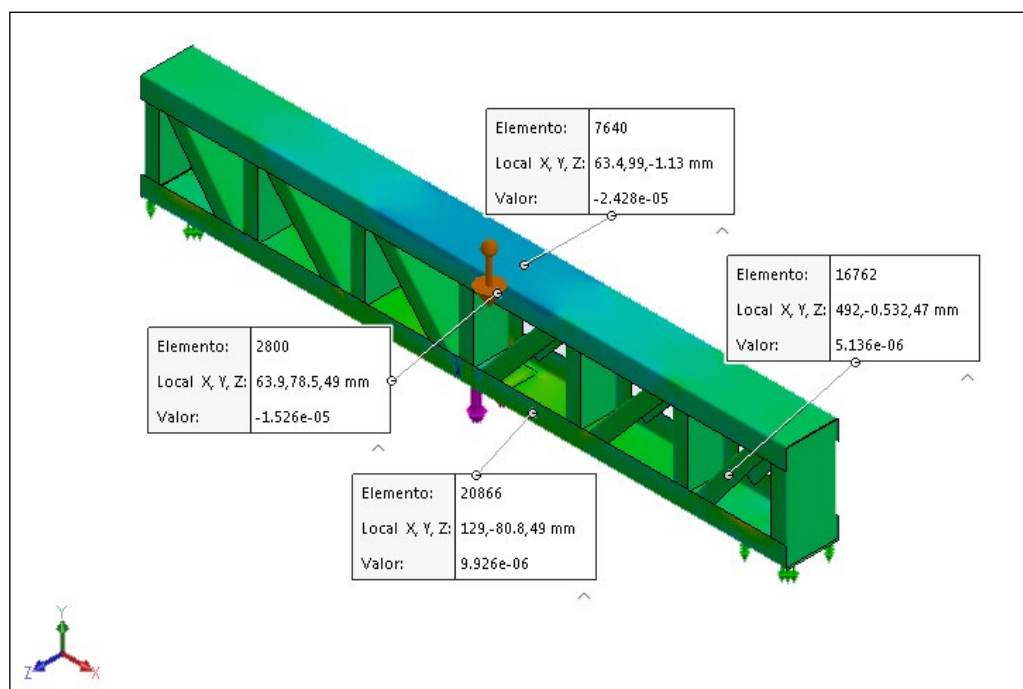
Figura 7 – Estrutura treliçada submetida a esforços de tração e compressão.



Fonte: Autoria própria.

Na simulação computacional, realizaram-se diversos refinamentos da malha de elementos finitos, sendo que a convergência de resultados é 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 são 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 8 apresenta os valores de deformações mensuradas numericamente em quatro pontos cujas posições são pontos idênticos onde são colados os extensômetros durante a análise experimental.

Figura 8 – Deformações em quatro pontos da estrutura treliçada.



Fonte: Autoria própria.

Observa-se que o maior valor de deformação devido a compressão está localizado no banzo longitudinal superior, onde apresenta o maior esforço devido a compressão. De semelhante modo, quanto a deformação pelo esforço de tração, a maior deformação está localizada 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 são posicionadas na estrutura, gradualmente até atingir 112 kg), com taxa de amostragem de 5 Hz, tem-se 200 valores mensurados, cujos valores médios são apresentados na Tabela 1. Destaca-se que os testes “um” e “dois” são realizados sem a presença do *strain gauge* 4 (por isso a ausência de valores na Tabela 1). Este sensor foi colado na estrutura na etapa final da coleta dos dados experimentais.

Tabela 1 – Valores médios de deformações obtidos durante a análise experimental.

Teste	Strain Gauge 01 ($\mu\text{m}/\text{m}$)	Strain Gauge 02 ($\mu\text{m}/\text{m}$)	Strain Gauge 03 ($\mu\text{m}/\text{m}$)	Strain Gauge 04 ($\mu\text{m}/\text{m}$)
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.

4.4 Resumo dos resultados: analítico, experimental e numérico

A Tabela 2 apresenta um resumo dos resultados deste trabalho, tratam-se de resultados de tensão, considerando as análises analítica, experimental e numérica.

Tabela 2 - Comparação das tensões obtidas por meio da aplicação do Método Analítico, 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 (%)
<i>Strain Gauge 01</i>	-3,41	-1,80	-3,19	47,07	11,71	40,05
<i>Strain Gauge 02</i>	2,84	1,25	2,82	55,91	5,66	53,26
<i>Strain Gauge 03</i>	1,01	1,66	1,63	-63,64	-46,03	-12,06
<i>Strain Gauge 04</i>	-3,41	-4,45	-4,87	-30,45	-35,23	3,53

Fonte: Autoria própria.

4.5 Discussão dos resultados

Considerando as informações da Tabela 2, destacam-se os resultados obtidos no *strain gauge* 4. Esse extensômetro é 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 são colados na aba do perfil “U” (conforme mostra a Figura 5), e apresentam valores mais discordantes ao serem comparados aos resultados do cálculo analítico. Após a fabricação da estrutura

treliçada, observou-se que as ligações dos elementos estruturais não convergem para 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 diferenças entre os valores experimentais e analíticos, destacam-se alguns fatores: existem fontes de incerteza, como, por exemplo, eventuais problemas quanto à colagem e posicionamento dos extensômetros, gerando diferenças aos resultados. O processo de soldagem da treliça pode ter levado a pequenas distorções e possível empenamento da estrutura. O suporte onde são posicionadas as massas também pode ser considerado como uma fonte de incerteza, além de incertezas geométricas estruturais. As possíveis incertezas nos valores das propriedades mecânicas do aço utilizado (classificado como ASTM A36) não podem ser descartadas. Considerando a simulação computacional, 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. Diante disso, observa-se que muitos erros aleatórios podem ter contribuído para as diferenças entre os resultados obtidos pelos três métodos de análises.

5 CONCLUSÕES

A partir deste estudo, é possível afirmar que os resultados numéricos, de certa forma, aproximam-se dos resultados analíticos, isso podendo ser confirmado devido à concepção do projeto. Quanto aos resultados experimentais, há 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 pode ter afetado as medições, visto que os dados de deformação obtidos são 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.

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.

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

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.

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.

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

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.

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.

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.

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