



COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE TRELIÇAS LEVES DE PERFIS DE CHAPA DOBRADA DE AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA

Andre M. Daltro

Sebastião A. L. Andrade

andre.daltro@hotmail.com

andrade@puc-rio.br

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Rua Marquês de São Vicente, 225 Gávea, 22453-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Resumo. No presente trabalho é apresentado um estudo numérico e experimental de um sistema estrutural leve, fabricado de modo padronizado, conhecido no mercado como “steel framing”, empregado em construções de edificações de múltiplos andares com fins habitacionais e comerciais. O sistema estrutural estudado consiste em treliças feitas a partir de perfis de chapa dobrada de aço de alta resistência. As vantagens da utilização desse sistema são o baixo peso, a facilidade de montagem e a possibilidade de passagem de dutos e tubos pela alma dessa estrutura. Nesse artigo são apresentados resultados experimentais, realizados no laboratório de Estruturas e Materiais da PUC-Rio, de treliças leves de tamanho real com 400 mm de altura e empregando-se aços de alta resistência. Os objetivos do trabalho foram: avaliação da resistência última, os modos de flambagem, resistência das ligações e o comportamento efetivo à torção. Após os procedimentos experimentais, foi feita a modelagem computacional do comportamento estrutural e foi elaborada uma análise comparativa dos resultados numéricos com os obtidos experimentalmente.

Palavras-chave: Treliças leves, Perfis de chapa dobrada, Aço de alta resistência, Comportamento experimental.

1 INTRODUÇÃO

Os perfis de aço de chapa dobrada, também chamados de perfis conformados a frio têm sido muito utilizados em estudos nos dias atuais. As razões do grande interesse dos pesquisadores atuais por esses tipos de perfis devem-se à facilidade de otimização da seção para cada projeto específico e facilidade de fabricação. Entretanto, a maioria das pesquisas são voltadas para elementos isolados submetidos à compressão, variando-se apenas as condições de contorno e posição do carregamento. Dentre esses estudos pode-se citar o de Chodraui (2006), que mostra que perfis dos tipos U e U enrijecido apresentam resultados próximos aos previstos nas normas brasileira e norte-americana. Outros estudos são os de Young & Ellobody (2007) e Young & Chen (2008) que mostram que muitas vezes as prescrições normativas induzem a erros que tornam os resultados muito conservadores, principalmente quando a esbeltez global é alta.

O estudo atual busca a análise de uma estrutura composta por mais de um perfil de chapa dobrada, ou seja, uma treliça leve (também chamada de *joist*). Esse tipo de estrutura propicia economia devido ao baixo peso, facilita a passagem de dutos e tubulações e ainda facilita os processos de transporte e montagem.

Os fatores negativos, em relação a esse tipo de estrutura são, a maior suscetibilidade a instabilidades e as omissões por parte dos procedimentos normativos atuais referentes ao dimensionamento e verificação, o que pode ser verificado na dissertação de Daltro (2016).

O objetivo deste artigo foi fazer uma comparação entre os resultados de ensaios experimentais de treliças leves, compostas por perfis de chapas dobradas do tipo U enrijecido, com resultados provenientes de um modelo numérico utilizando o método dos elementos finitos. O programa de computador comercial *ABAQUS* foi usado para fazer as modelagens.

2 DESCRIÇÃO DAS TRELIÇAS ESTUDADAS

O presente trabalho está dividido em dois estudos, um experimental referente à dissertação de Daltro (2016) e outro referente à um modelo numérico. O modelo idealizado buscou reproduzir o comportamento de uma das treliças da estrutura do ensaio experimental, ou seja, a que provocou o colapso da estrutura.

As treliças estudadas eram compostas por perfis do tipo U enrijecido e tinham nós excêntricos, tendo comprimento de 4 metros e altura de 40 centímetros, as dimensões longitudinais podem ser vistas na Fig. 1.

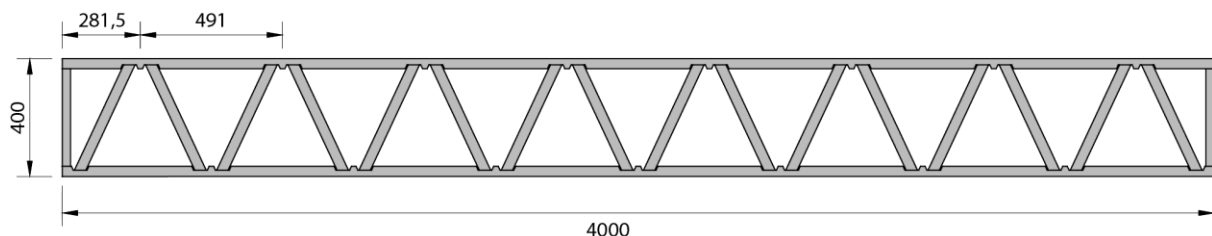


Figura 1. Seção longitudinal padrão das duas treliças do experimento (dimensões em milímetros)

No teste experimental foram usadas duas treliças dispostas em paralelo, biapoiadas e travadas lateralmente entre si nos apoios. O carregamento foi realizado utilizando-se sacas de areia, distribuídas em cima de paletes de madeira que foram posicionados nas cordas superiores. A disposição, o espaçamento e os nomes atribuídos às treliças podem ser vistos na Fig. 2.

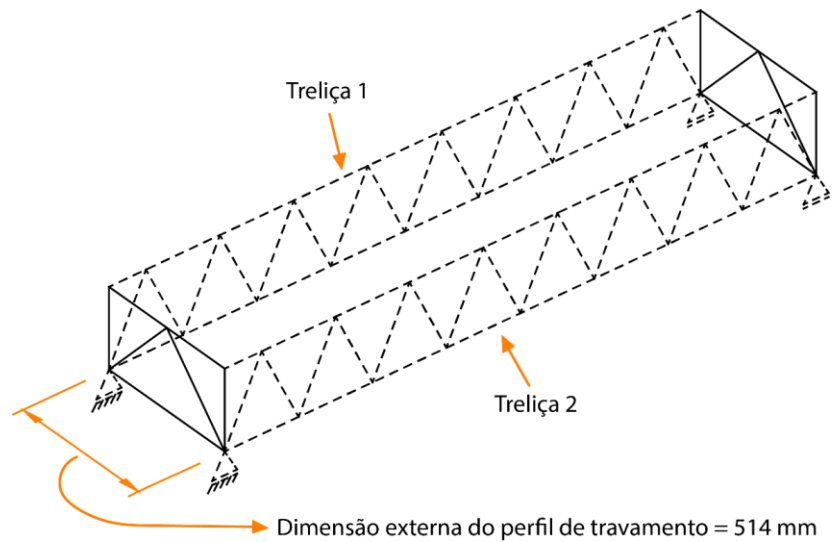


Figura 2. Disposição, espaçamento e nomes das treliças

As treliças 1 e 2 tinham seções transversais iguais, o que pode ser visto na Fig. 3.

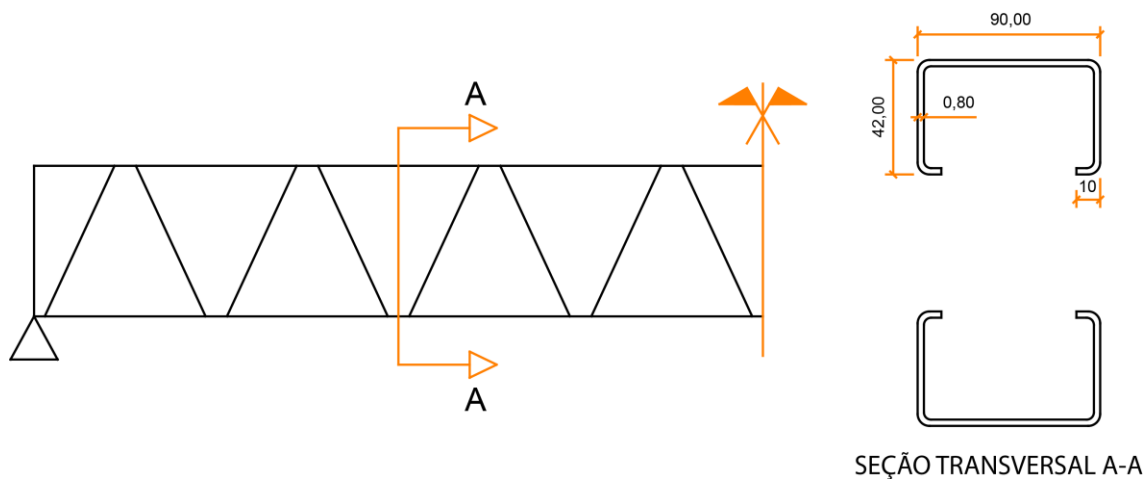


Figura 3. Seção transversal referente às treliças 1 e 2 (dimensões em milímetros)

Um detalhe importante que pode ser percebido na Fig. 4, é que as cordas das treliças tinham cortes nos enrijecedores para possibilitar a ligação com as diagonais, esse detalhe ocasionou grandes deformações nessas regiões.

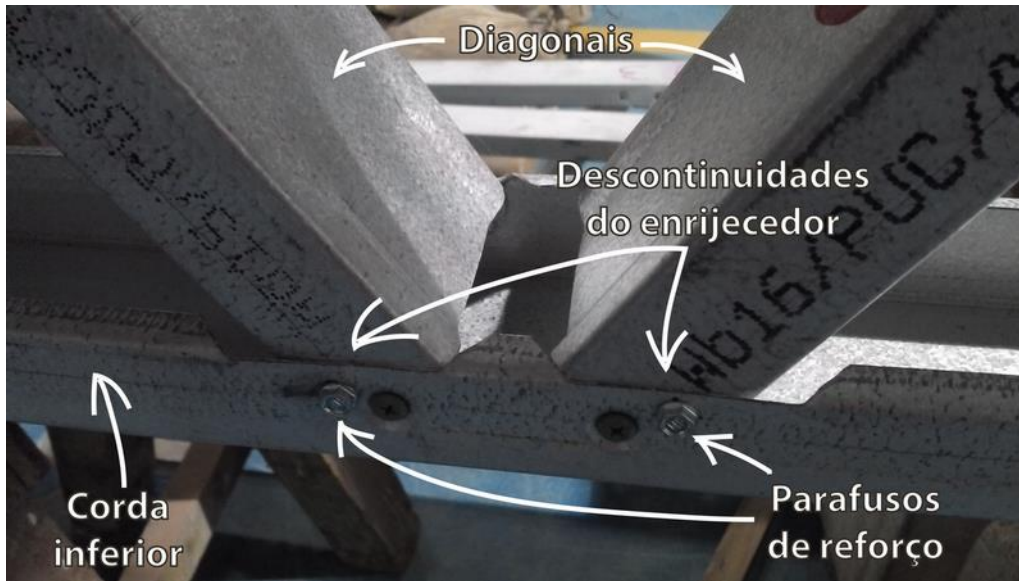


Figura 4. Nó padrão das treliças, mostrando o detalhe dos cortes nos enrijecedores das cordas e os parafusos adicionados para reforçar as ligações entre diagonais e cordas

Foi feito um ensaio teste em um par de treliças, nele a ruína ocorreu por deformação excessiva das chapas dos perfis, culminando na separação dos elementos inicialmente ligados, sem que houvesse ruptura das chapas ou dos parafusos. Após esse ensaio optou-se por reforçar a região das ligações com a inserção de parafusos auto brocantes de alta resistência de 8 mm de diâmetro, que proporcionaram mais rigidez às ligações entre diagonais e cordas.

Os parafusos da estrutura original não sofreram ruína em nenhum ensaio e tinham resistência ao corte e à tração de 8,6 kN e 11,2 kN, respectivamente.

Um resumo das dimensões dos perfis das treliças do estudo experimental, pode ser observado na Tabela 1, onde é possível ver quais perfis foram usados não só nas cordas, mas também nas diagonais e montantes.

Tabela 1. Resumo dos perfis componentes das treliças do teste

Elemento	Perfil
Diagonais e montantes	Ue 88,4 x 42 x 10 x 0,8
Cordas	Ue 90 x 42 x 10 x 0,8

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

No presente trabalho utilizaram-se dados experimentais da dissertação de Daltro (2016), onde foram testadas treliças de chapa fina de alta resistência mecânica. Essa dissertação contou com um programa experimental de 4 etapas, todas realizadas no Laboratório de Estruturas da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Considerando os resultados experimentais obtidos nessa dissertação, foram utilizados no presente trabalho somente os resultados de uma das etapas propostas, no caso a etapa 2. As dimensões e detalhes das treliças ensaiadas nessa etapa serão descritas nos itens seguintes.

3.1 Propriedades do aço utilizado

O aço utilizado nos perfis do presente trabalho foi o CSN ZAR-550, que é um aço galvanizado fabricado pela Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), com tensão limite de escoamento igual a 550 N/mm² (MPa) e tensão de ruptura igual a 570 N/mm² (MPa).

Foram realizados ensaios de tração direta para possibilitar a determinação das propriedades do aço, conforme a ASTM:A370. Foram extraídos corpos de prova dos perfis U que compunham as cordas das treliças estudadas. Ao todo foram feitos seis ensaios de caracterização. As dimensões dos corpos de prova podem ser vistas na Fig. 5.

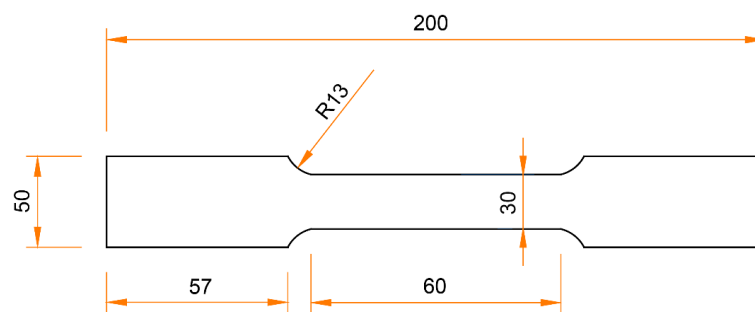


Figura 5. Dimensões dos corpos de prova do ensaio de caracterização do aço (dimensões em milímetros)

Com os resultados dos ensaios de caracterização do aço foi feito um gráfico Tensão x Deformação que está ilustrado na Fig. 6. Nesse gráfico é possível ver uma linha pontilhada que indica a posição de uma deformação de 10%.

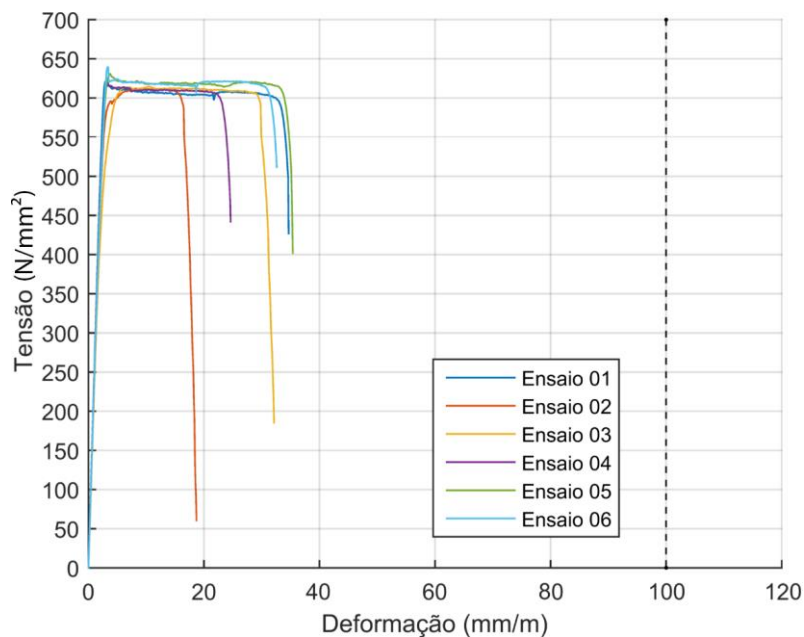


Figura 6. Tensão x Deformação dos seis ensaios de caracterização realizados

Os ensaios mostraram que o aço em questão apresentava comportamento elasto-plástico, sendo necessária a verificação da relação entre a tensão de ruptura e a tensão de escoamento. Os resultados dos ensaios podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2. Resultados dos ensaios de caracterização do aço

Perfil	Posição	F_y (N/mm ²)	F_u (N/mm ²)	F_u/F_y	Alongamento após a ruptura	F_y Sugerido pela AISI S100-12 (N/mm ²)
1	Alma	610,70	620,81	1,02	3,47%	410,00
2	Alma	597,50	612,57	1,03	1,87%	410,00
3	Alma	602,10	614,56	1,02	3,21%	410,00
4	Alma	612,80	623,20	1,02	2,46%	410,00
5	Alma	621,80	630,88	1,01	3,54%	410,00
6	Alma	623,30	639,90	1,03	3,26%	410,00

Analisando-se os resultados da Tabela 2, é possível perceber que o aço verificado não atende as prescrições normativas da AISI S100 (2012), que sugere que $F_u/F_y \geq 1,08$ e o alongamento total não deve ser inferior a 10%. Nesse caso, a referida norma propõe que a tensão limite de escoamento seja determinada pelo menor valor entre $0,75 \times F_y$ e 410 N/mm² (MPa).

A ruptura dos corpos de prova, em todos os casos, apresentou características de ruptura por cisalhamento, como pode ser visto na Fig. 7.

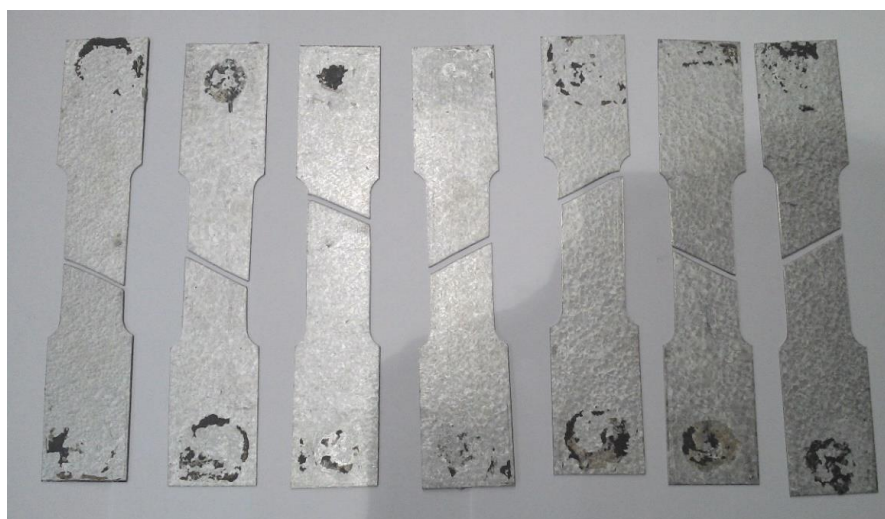


Figura 7. Corpos de prova após o ensaio de tração direta

O módulo de elasticidade longitudinal (E) e o coeficiente de Poisson (ν) utilizados no modelo numérico, foram os relativos à norma ABNT (NBR 14762), iguais a 200.000 N/mm² (MPa) e 0,3, respectivamente.

3.2 Procedimento experimental

Antes do ensaio, uma treliça similar foi testada, apresentando muita deformação na região das ligações, fato que foi contornado com a colocação de um parafuso a mais em cada contato das diagonais com as cordas.

A estrutura foi então posicionada em cima dos apoios (1º e 2º gênero, nas extremidades) e alinhada com o auxílio de uma trena a *laser*. Foram então posicionados paletes de madeira em cima da estrutura com o objetivo de distribuir o carregamento, que foi realizado por sacas de areia. A estrutura com o carregamento aplicado pode ser vista na Fig. 8.



Figura 8. Esquema de distribuição dos carregamentos em paletes de madeira independentes entre si

O carregamento sobre paletes de madeira foi usado para dar mais liberdade de movimentação à estrutura, ou seja, para que os fenômenos de instabilidade global pudessem ocorrer mais livremente, sem travamentos ao longo do vão das treliças. Entretanto, foi verificado durante os ensaios que essas instabilidades não ocorreram, devido aos paletes proporcionarem travamento lateral parcial à estrutura, o que não pôde ser medido.

No modelo numérico foram feitos vários testes com travamentos laterais, considerando os paletes como travamentos, porém os resultados não foram satisfatórios em relação aos obtidos experimentalmente. O modelo final foi feito então, com travamentos somente nas extremidades.

A instrumentação utilizada nesses testes contou com extensômetros nas cordas do topo e também com transdutores de deslocamento nas cordas da base, no meio do vão, como ilustrado na Fig. 9.

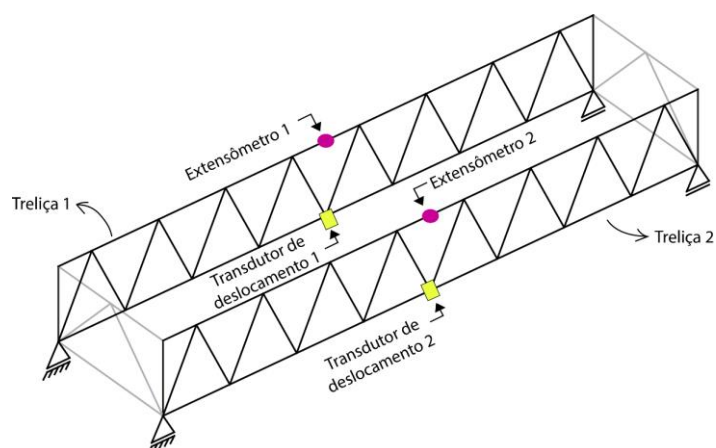


Figura 9. Posicionamento da instrumentação nas treliças 1 e 2, ambas instrumentadas no meio do vão

A aquisição de dados foi realizada por um sistema de aquisição da *National Instruments* e uma rotina feita no software *LabVIEW*. Os dados coletados foram exportados para planilhas, e após os ensaios foram tratados e possibilitaram a confecção de gráficos a partir de rotinas implementadas em *MATLAB*.

3.3 Resultados do programa experimental

Durante o ensaio, a estrutura apresentou flecha máxima de aproximadamente 27 mm no meio do vão nas duas treliças e ao atingir o carregamento de 22,72 kN (soma das cargas de todos os paletes), ocorreu o colapso da treliça 2 por esmagamento de um dos nós, houve então a redistribuição dos carregamentos e ruína da treliça 1 por flambagem do elemento central da corda, pelo fato desse elemento ser mais solicitado à compressão do que os outros. Na Fig. 10 são mostrados os elementos das treliças que provocaram a ruína da estrutura.



Figura 10. Posição e estado dos elementos que provocaram ruína na estrutura

A partir do tratamento dos dados obtidos no teste, foi possível plotar o gráfico Carga Total Aplicada x Deslocamento, o qual pode ser conferido na Fig. 11.

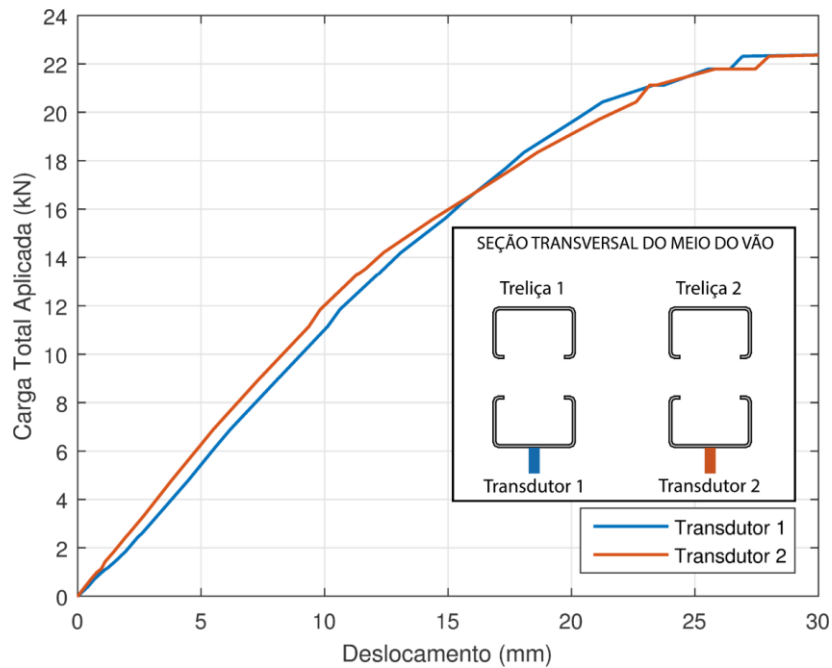


Figura 11. Carga Total Aplicada x Deslocamento, transdutores de deslocamento no meio do vão

As deformações medidas pelos extensômetros elétricos podem ser vistas na Fig. 12, onde é possível perceber que a treliça 2 apresentou deformações maiores, se comparadas com as da treliça 1 e conseqüentemente, maior nível de tensões.

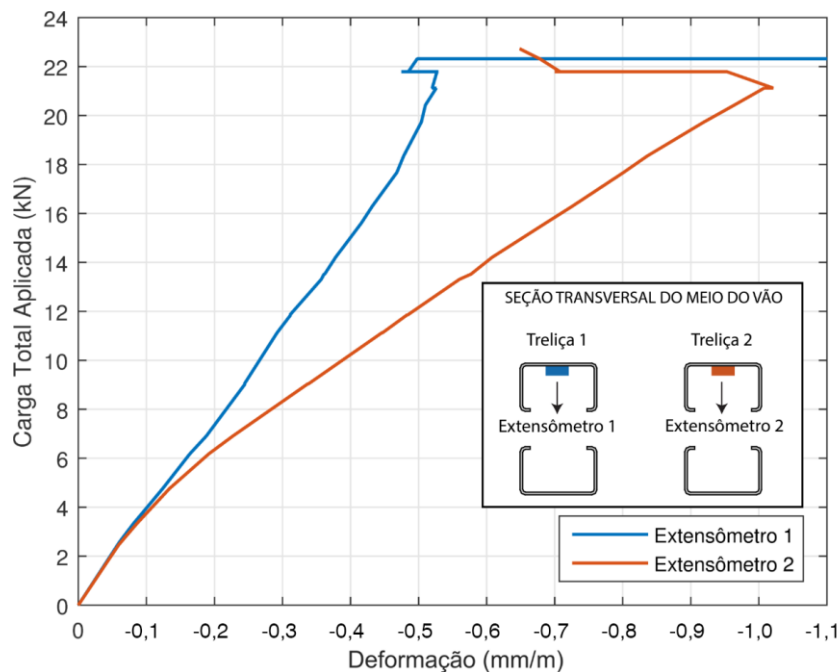


Figura 12. Carga Total Aplicada x Deformação, valores obtidos do meio do vão das cordas comprimidas

Cabe ressaltar que, como não foram utilizadas células de carga (em virtude do tipo de carregamento), o gráfico proposto foi o carga x deformação, ou seja, o carregamento total de

todos os paletes pela deformação no meio do vão das cordas de topo, onde os valores de deformação negativos do gráfico representam deformações de compressão.

Ainda em relação à Fig. 12, é possível perceber a influência da flambagem local nos resultados obtidos pelo extensômetro 1, fato que pôde ser observado durante o ensaio pela ocorrência de flambagem local na região onde o extensômetro foi instalado, o que ocasionou a diferença entre as curvas dos extensômetros 1 e 2.

4 MODELAGEM NUMÉRICA

Para comparação com os resultados experimentais foi feito um modelo em elementos finitos, o qual buscou analisar o comportamento da estrutura estudada considerando as propriedades plásticas do material, para isso foi utilizado o programa comercial *ABAQUS*.

Propriedades do material. Na modelagem numérica foram utilizados os valores das propriedades do aço obtidos no ensaio de caracterização do material. No *ABAQUS*, as propriedades do material são inseridas em termos das tensões e deformações reais (com base na geometria real da estrutura deformada), sendo essas calculadas conforme exposto em SILVA (2006). As propriedades plásticas do material são consideradas com a tensão real e a deformação plástica real associada a essa tensão.

Plasticidade. Como visto em SILVA (2006), o *ABAQUS* utiliza um modelo constitutivo baseado na teoria da plasticidade para as respostas inelásticas. No caso do aço, o modelo de plasticidade mais utilizado é o modelo de encruamento isotrópico e superfície de escoamento de von Mises.

Elementos. Para confecção do modelo considerou-se todos os perfis componentes das treliças como elementos de casca, pelo fato da espessura ser muito pequena e as tensões na direção dessa dimensão serem desprezíveis.

Optou-se pela utilização do elemento S4, por apresentar resultados não-lineares satisfatórios para seções de aço. Esse elemento de casca tem curvatura dupla, quatro nós com interpolação linear de integração completa.

Na Fig. 13 pode ser visto um corte do modelo numérico proposto neste trabalho, onde pode-se observar a malha de elementos finitos utilizada.

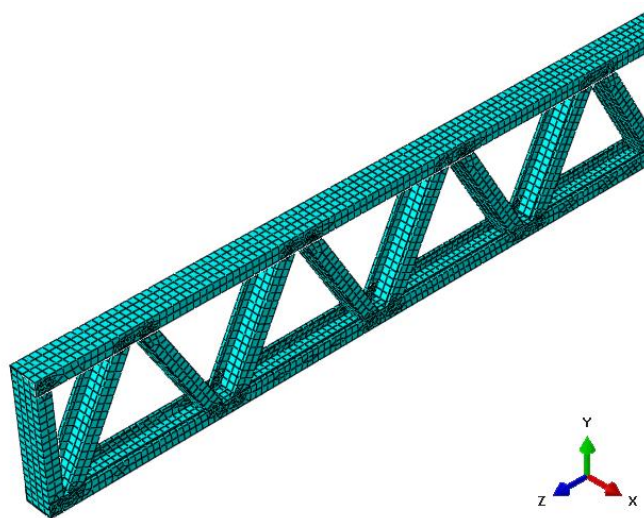


Figura 13. Corte no eixo de simetria do modelo numérico, mostrando a malha utilizada

Quanto às condições de contorno a treliça foi modelada biapoiada nas extremidades (pelas cordas de baixo) e travada lateralmente também nas extremidades, simulando a situação do ensaio experimental.

Ligações. As ligações parafusadas das treliças foram modeladas como restrições do tipo *tie constraint*, que utiliza formulação do tipo *master-slave*. Na Fig. 14 é possível ver alguns nós do modelo, assim como as áreas circulares que foram usadas para as restrições entre os elementos modelados.

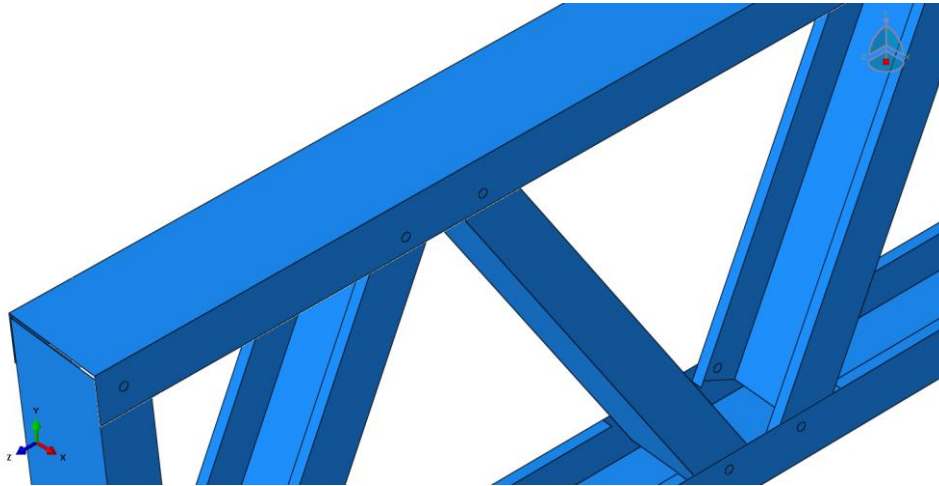


Figura 14. Vista dos nós padrões da treliça modelada.

O carregamento foi aplicado nas cordas superiores, como no experimento realizado, ver Daltro (2016), com valor total de 22,72 kN (carga de ruína).

Resultados. Como esperado, o modelo apresentou grande deslocamento no meio do vão, 25,36 mm, valor próximo ao obtido no ensaio, que foi de aproximadamente 27 mm. Na Fig. 15 são apresentados os deslocamentos verticais na estrutura com a utilização de fator de amplificação de escala de deformação, para melhorar a visualização da estrutura deformada.

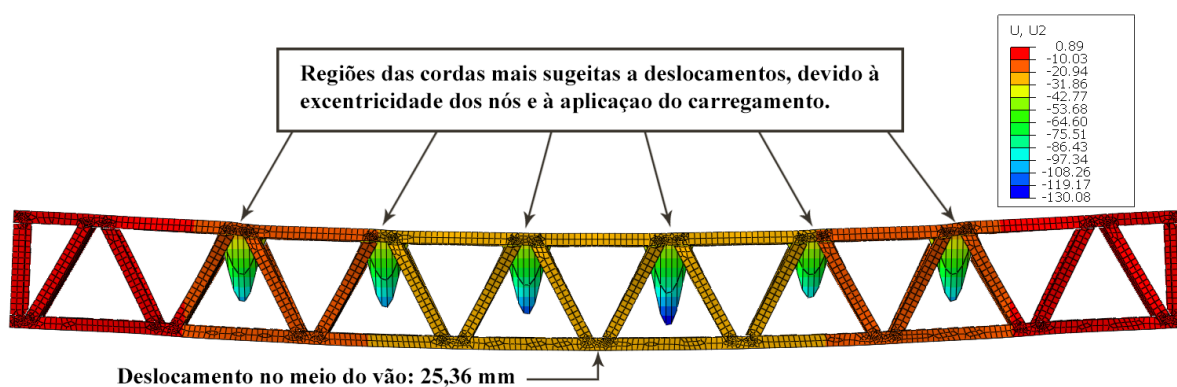


Figura 15. Deslocamento vertical no meio do vão e regiões mais susceptíveis a deslocamentos

É possível observar na Fig. 15, que o nó que ocasionou a ruína da estrutura real, foi o que apresentou maior deslocamento no modelo numérico.

Em relação à deformação medida no meio do vão da corda superior, o modelo numérico apresentou resultado satisfatório em relação ao experimental, com resultados próximos para o mesmo carregamento (de ruína), respectivamente 1,04387 mm/m e 1,005 mm/m. Cabe ressaltar que o valor experimental é o referente à treliça 2, que foi a que ocasionou a ruína da estrutura. Na Fig. 16 é mostrada a região do meio do vão da treliça modelada e o nó onde foi medida a deformação para possibilitar a comparação com o resultado experimental.

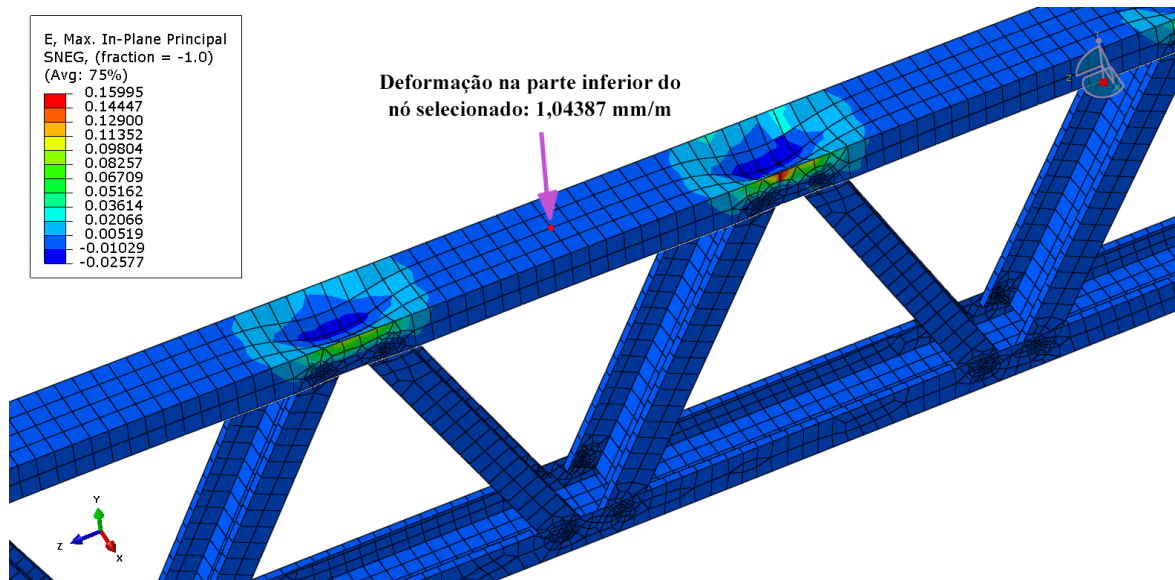


Figura 16. Deformação no meio do vão da corda superior, correspondente à posição do extensômetro instalado no ensaio experimental

As tensões de von Mises podem ser observadas na Fig. 17, onde é possível perceber que as cordas superiores apresentam tensões entre 184,51 N/mm² e 245,85 N/mm² e que o nó destacado apresentou as tensões mais altas, sendo este o mesmo nó que causou a ruína da treliça no experimento.

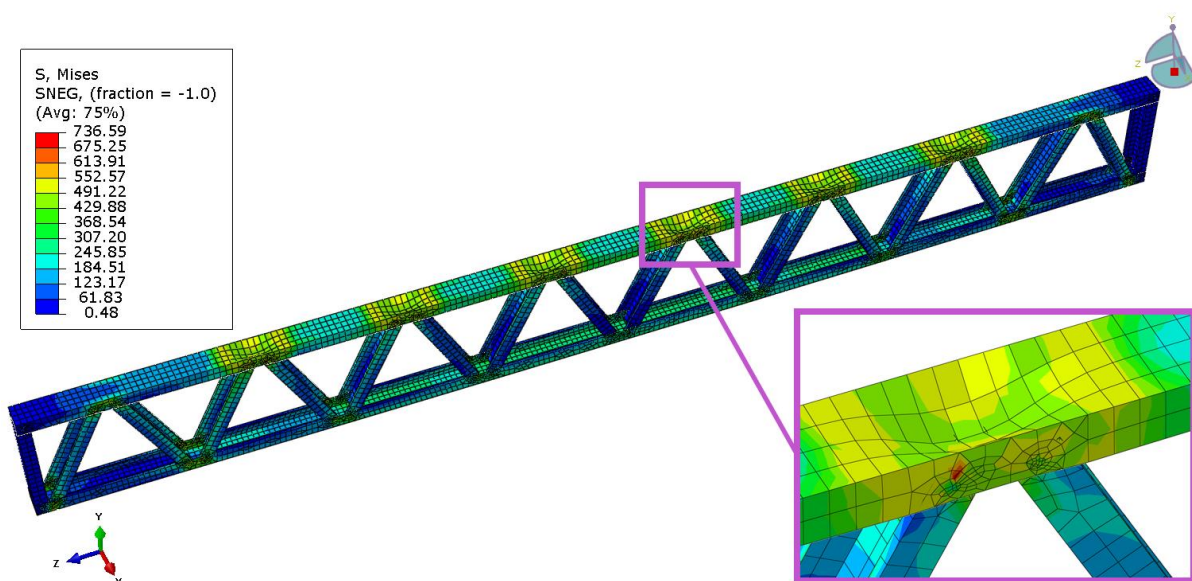


Figura 17. Tensões de von Mises na estrutura (valores em N/mm²)

Outro detalhe que pode ser notado é a configuração deformada que apresentou a região dos nós da treliça, muito semelhante à configuração deformada do ensaio.

5 CONCLUSÕES

Existem muitos estudos experimentais e teóricos que buscam comparar resultados para possibilitar a calibração das fórmulas sugeridas pelos procedimentos normativos atuais de dimensionamento, tais como os de Schafer (2002), Miller & Peköz (1994), entre outros. Por outro lado, no presente trabalho buscou-se a comparação dos resultados experimentais de Daltro (2016) com resultados numéricos de um modelo de elementos finitos, considerando as propriedades do aço utilizado no ensaio experimental. Esse tipo de estudo é importante para a verificação da validade dos resultados dos modelos numéricos e para identificar qual o grau de complexidade que um modelo tal como o que foi ensaiado precisa para apresentar resultados satisfatórios.

Em relação ao modelo numérico, foi possível perceber que a utilização de restrições do tipo *tie constraint* para representar as ligações parafusadas proporcionou bons resultados. Outro fator que influenciou para a obtenção de bons resultados foi a utilização das propriedades reais do material, calculadas a partir das propriedades nominais obtidas no ensaio de caracterização do material.

Os nós excêntricos e a espessura fina dos perfis da treliça foram os principais limitadores da resistência da estrutura, fato que foi identificado também no modelo numérico. O modo de ruína de ambos foi o mesmo, colapso de um dos nós da treliça, porém como visto em Daltro (2016), se esta estrutura fosse dimensionada pelos procedimentos normativos atuais, a resistência da treliça teria sido limitada pela flambagem global elástica por torção, modo que não foi identificado no experimento e nem no modelo numérico.

Com base no deslocamento no meio do vão da corda inferior, que apresentou resultado diferente 6,07%, da deformação no meio do vão da corda superior, que apresentou diferença de aproximadamente 3,72% e do modo de ruína, que foi o mesmo do experimental, pode-se dizer que o modelo numérico em elementos finitos, utilizando elementos de casca do tipo S4 apresentou-se viável tecnicamente, sendo de fundamental importância em complemento ao dimensionamento pelas normas atuais.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- American Iron and Steel Institute. NAS 2012 - AISI S100-12: North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, Washington, DC, 2012.
- American Society for Testing and Materials. ASTM A370: Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products, ASTM International, 2015.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 14762: Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio. Rio de Janeiro, 2010.
- Chodraui, G. M. B., 2006. *Análise Teórica e Experimental de Perfis de Aço Formados a Frio Submetidos à Compressão*. Tese de doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 294 pp.
- Daltro, A. M., 2016. *Análise Teórico-Experimental de Treliças Leves de Perfis de Chapa Dobrada*. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 90pp.
- Miller, T. H., Peköz, T., 1994. Load-Eccentricity Effects on Cold-Formed-Steel Lipped-Channel Columns. *Journal of Structural Engineering*. pp. 805-823, v. 118.
- Schafer, B. W., 2002. Local, Distortional, and Euler Buckling of Thin-Walled Columns. *Journal of Structural Engineering*, ASCE. pp. 524-531, v. 128.
- Silva, A. L. R. C., 2006. *Análise Numérica Não-Linear da Flambagem Local de Perfis de Aço Estrutural Submetidos à Compressão Uniaxial*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. 205 pp.
- Young, B., Chen, J., 2008. Column Tests of Cold-Formed Steel Non-Symmetric Lipped Angle Sections. *Journal of Constructional Steel Research*, pp. 808-815, v. 64.
- Young, B., Ellobody, E., 2007. Design of Cold-Formed Steel Unequal Angle Compression Members. *Thin-walled structures*, pp. 330-338, v. 45.