



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE ENGENHARIA CIVIL
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

RENNAN MOREIRA DE FIGUEIREDO

ANÁLISE DE ESTABILIDADE ELÁSTICA DE UMA TRELIÇA COM TRAVAMENTOS
NOS BANZOS

Pau dos Ferros
2023

RENNAN MOREIRA DE FIGUEIREDO

ANÁLISE DE ESTABILIDADE ELÁSTICA DE UMA TRELIÇA COM TRAVAMENTOS
NOS BANZOS

Trabalho de conclusão de curso
apresentado a Universidade Federal Rural
do Semiárido como requisito para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Orientador: Matheus Fernandes de Araújo
Silva, Prof. Dr.

Pau dos Ferros
2023

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

FFig
eired
oa

Figueiredo, Rennan Moreira de.
Análise de estabilidade elástica de uma treliça
com travamentos nos banzos / Rennan Moreira de
Figueiredo. - 2023.
38 f. : il.

Orientador: Matheus Fernandes de Araújo Silva.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
2023.

1. Estrutura metálica. 2. Estabilidade. 3.
Travamento. I. Silva, Matheus Fernandes de
Araújo, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Biblioteca Campus Pau dos Ferros
Bibliotecária: Erlanda Maria Lopes da Silva
CRB: 15/966

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

ANÁLISE DE ESTABILIDADE ELÁSTICA DE UMA TRELIÇA COM TRAVAMENTOS NOS BANZOS

Trabalho de conclusão de curso
apresentado a Universidade Federal Rural
do Semiárido como requisito para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Civil.

DATA DE APROVAÇÃO 09/04/2024

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **MATHEUS FERNANDES DE ARAÚJO SILVA**
Data: 17/04/2024 09:01:27-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. MATHEUS FERNANDES DE ARAÚJO
SILVA
Orientador

Documento assinado digitalmente
 **FRANCISCO EDVAR LIMA JÚNIOR**
Data: 17/04/2024 13:47:53-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. FRANCISCO EDVAR LIMA JÚNIOR
1º Examinador

Documento assinado digitalmente
 **LUIZ ALBERTO ARAUJO DE SEIXAS LEAL**
Data: 21/04/2024 00:08:51-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. LUIZ ALBERTO LEAL
2º Examinador

*“É preciso que eu suporte duas ou três
larvas se quiser conhecer as borboletas.”*

Antoine de Saint-Exupéry.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me conceder força, sabedoria e saúde para concluir essa jornada, sendo fundamental para superar obstáculos que surgiram no caminho, e sem a fé e graça nada disso seria possível.

Aos meus familiares, sou imensamente grato, em especial a minha mãe, Maria do Socorro Virgíneo Moreira, que a todo momento me incentivou e me apoiou durante toda essa jornada. Sua presença constante e seus sacrifícios me deram força necessária para superar os desafios e alcançar meus objetivos.

Ao meu orientador, Matheus Fernandes, agradeço pela sua valiosa orientação, amizade e apoio durante todo o desenvolvimento deste trabalho e nas demais atividades de ensino. Sua atenção, disponibilidade, incentivo foram essenciais para o meu crescimento acadêmico e para a conclusão deste projeto. Agradeço por acreditar no meu potencial e por me guiar com tanta sabedoria e dedicação. Agradeço também aos membros da banca examinadora por dedicarem o tempo para avaliar este trabalho e contribuir para o meu crescimento acadêmico.

Também agradeço à minha madrinha de batismo, Martilândia Figueiredo, por sua ajuda fundamental na conclusão dessa etapa. Agradeço ao meu pai, Francisco Ranieri, e ao meu padrasto, Jandilson Vieira, e a minha irmã, Mirelle Virgíneo, pelo apoio e incentivo durante todo o processo.

A minha namorada, Bianca Rolim, agradeço pela presença constante, pelo apoio incondicional, pelas palavras de motivação nas horas difíceis, e por sempre acreditar em mim e no meu potencial.

Aos meus amigos, Abnadabe Ferreira, Francisco Luan, Romulo Antunes, Franklyn Ayran, Gabryel Barros e Bruno Eduardo, agradeço pela ajuda direta e indireta nas diversas etapas do curso. As amizades e o companheirismo foram essenciais para tornar essa jornada mais leve e prazerosa.

A Universidade Federal Rural do Semi-Árido, agradeço por me proporcionar a oportunidade de concluir o curso superior. Agradeço à instituição por todo o conhecimento e suporte que foram oferecidos durante esses anos.

RESUMO

Um projeto de estruturas metálicas é um processo que requer uma série de etapas bem definidas. Inicialmente, é preciso realizar análises detalhadas das necessidades e requisitos do projeto. Além disso, uma etapa fundamental é a análise da estabilidade da estrutura, envolvendo uma avaliação da capacidade da estrutura a resistir a carga externas, visando garantir sua segurança e durabilidade. Dessa forma, esse estudo teve como objetivo analisar a estabilidade elástica de uma treliça com travamentos nos banzos utilizando dois modelos de cálculo diferentes para fins comparativos. De início, foi feita uma revisão bibliográfica tomando como base em alguns livros e artigos científicos. Além disso, utilizando o software Robot Structural®, foi feita uma modelagem numérica de pilares para analisar a estabilidade sob cargas axiais de compressão, para efeitos de comparação com um modelo analítico de cálculo baseado nas equações para carga crítica de Euler, e validar o uso do software. Por fim, foi feita outra modelagem numérica de estrutura metálica composta por treliça e travamentos, a fim de analisar a influência dos travamentos/contraventamentos sobre a estabilidade elástica da estrutura. Os resultados demonstram a importância do travamento lateral como método confiável para aumentar a capacidade de carga de treliças. Além disso, a comparação dos resultados obtidos por ambos os modelos revelou diferenças nas estimativas de resultados, podendo ser atribuídas a simplificações do modelo analítico de cálculo, mostrando ser mais conservador em relação ao modelo numérico.

Palavras-chave: Estrutura metálica. Estabilidade. Travamento.

ABSTRACT

A design of metallic structures is a process that requires a series of well-defined steps. Initially, it is necessary to carry out detailed analyzes of the project's needs and requirements. Furthermore, a fundamental step is the analysis of the stability of the structure, involving an assessment of the structure's ability to resist external loads, aiming to guarantee its safety and durability. Therefore, this study aimed to analyze the elastic stability of a truss with braces in the flanges using two different calculation models for comparative purposes. Initially, a bibliographical review was carried out based on some books and scientific articles. Furthermore, using Robot Structural® software, numerical modeling of columns was carried out to analyze stability under axial compression loads, for comparison purposes with an analytical calculation model based on Euler's critical load equations, and to validate the use of the software. Finally, another numerical modeling of a metallic structure composed of a truss and bracing was carried out, in order to analyze the influence of bracing/bracing on the elastic stability of the structure. The results demonstrate the importance of lateral bracing as a reliable method to increase the load capacity of trusses. Furthermore, the comparison of the results obtained by both models revealed differences in the results estimates, which can be attributed to simplifications of the analytical calculation model, proving to be more conservative in relation to the numerical model.

Keywords: Metallic structure. Stability. Crashe.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	11
2.	OBJETIVOS	13
2.1.	Geral.....	13
2.2.	Específicos.....	13
3.	REVISÃO TEÓRICA.....	14
3.1.	Análise Elástica de Estabilidade de Colunas	14
3.2.	Contraventamentos	18
3.3.	Requisitos para Contensões Laterais.....	21
3.4.	Análise Elástica de Estabilidade Lateral de Treliças.....	22
4.	METODOLOGIA.....	24
4.1.	Modelo Computacional e Teoria de Euler:	25
4.1.1.	Modelo Computacional	25
4.1.2.	Cálculo da carga crítica	27
4.1.3.	Modelagem da treliça metálica	27
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	30
5.1.	Verificação do Modelo Computacional e Modelo analítico de Euler	30
5.2.	Influência dos Travamentos Laterais:.....	32
5.3.	Avaliação da Eficiência dos Travamentos Laterais.....	35
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	37
	REFERÊNCIAS.....	39

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Viaduc de Garabit, Sul da França, Construída em 1884	11
Figura 2 - Componentes de uma Estrutura Metálica	12
Figura 3 - Barra em aço submetida à Compressão Axial	14
Figura 4 - Barra Birrotulada Submetida a Carga Axial de Compressão	15
Figura 5 - Conjunto de Curvas para o Fator de Redução e a Curva Única da NBR 8800:2008	17
Figura 6 - Edifício baixo do tipo Galpão	19
Figura 7 - Esquema do Contraventamento do Banzo Inferior e Superior	20
Figura 8 - Comprimentos de Flambagem dos Banzos Superior e Inferior	20
Figura 9 - Comportamento de Escoras quanto à Capacidade Resistente	21
Figura 10 - Fluxograma Metodológico	25
Figura 11 - Coluna Estrutural com Apoios: Detalhes de Subdivisões e Restrições	26
Figura 12 - Coeficiente de Flambagem por Flexão de Elementos Isolados (Tabela E.1)	27
Figura 13 - Dimensões da Treliça Metálica	28
Figura 14 - Cargas Unitárias nos Nós do Banzo Superior da Treliça	28
Figura 15 - Perfis dos Elementos Estruturais da Treliça metálica	29
Figura 16 - Mão Francesas como Travamento Lateral do Banzo Inferior	29
Figura 17 - Modelagem dos Travamentos Laterais da Treliça	30
Figura 18 - Deformação do Pilar nos Modos 1 e 2 de Flambagem	31
Figura 19 - Resultados da Análise de Flambagem	31
Figura 20 - Modo de Flambagem para a Treliça sem Travamento Lateral	33
Figura 21 - Modo de Flambagem da Treliça com os Travamentos Laterais	33
Figura 22 - Barra mais Comprimida do Banzo Inferior e Travamento Lateral	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Modelo Analítico de Cálculo para Pilares.....	32
Tabela 2 - Carga Crítica de Flambagem – Treliça com e sem Mão Francesa (Modelo Analítico)	34
Tabela 3 - Carga Crítica de Flambagem – Treliça com e sem Mão Francesa (Modelo Numérico).....	34
Tabela 4 - Carga Crítica de flambagem - Treliça com Mão Francesa.....	35
Tabela 5 - Carga Crítica de flambagem - Treliça com Mão Francesa.....	35
Tabela 6 - Requisitos para Contensões Laterais para a mão francesa.....	37

1. INTRODUÇÃO

A construção civil originou-se desde os primórdios da civilização, evoluindo ao longo dos séculos com os avanços tecnológicos. A Revolução Industrial marcou o clímax da evolução, marcando uma transformação significativa, introduzindo novos métodos construtivos e materiais, como o ferro, que posteriormente foi substituído pelo aço, revolucionando a construção de edifícios e pontes, como a mostra Figura 1. Durante o século XX, as estruturas metálicas ganharam muito espaço, por apresentar características de leveza, resistência duradoura e flexibilidade, permitindo construções inovadoras. Atualmente, a construção civil continua a evoluir com novos modelos construtivos, como estruturas pré-moldadas e o estilo Wood Frame, além das estruturas metálicas permanecerem fundamentais, contribuindo para edificações mais seguras e resistentes.

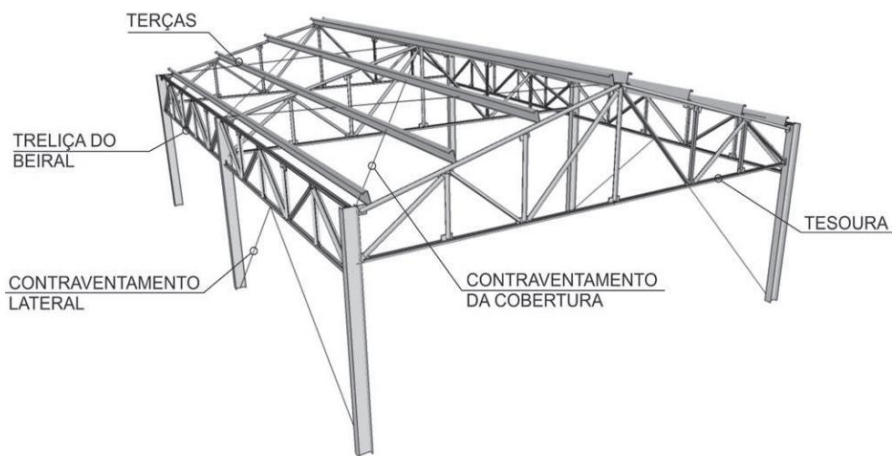
Figura 1 - Viaduc de Garabit, Sul da França, Construída em 1884



Fonte: Pfeil (2009, p. 3).

Os elementos estruturais de aço, entre diversas outras aplicações, são empregados corriqueiramente na composição de treliças, como pilares e vigas, formando contraventamentos, e com barras de pórticos, conforme a Figura 2. Esses elementos são projetados indistintamente submetidos a tensões normais de tração e compressão, pois o aço é um material que se comporta muito bem sob essas duas tensões, embora sob compressão os elementos sejam suscetíveis a problemas de instabilidade (Fakury; Caldas; Silva, 2016).

Figura 2 - Componentes de uma Estrutura Metálica



Fonte: Manual de Construção em Aço (2010).

O projeto estrutural é de suma importância para execução desse tipo de sistema. As estruturas metálicas, frequentemente compostas de aço, oferecem uma série de vantagens, como resistência, leveza e flexibilidade. De mesmo modo, possuem desvantagens como a suscetibilidade a corrosão, elevada condutividade térmica, dificuldades de alterações estruturais, e uma estética limitada.

Um projeto bem elaborado considera não apenas questões físicas da estrutura, como cargas e materiais, mas como também o parâmetro de estabilidade da estrutura. O dimensionamento dos perfis é crucial para garantir esse parâmetro, pois é nessa etapa que são determinadas as seções apropriadas de cada componente da estrutura, desde vigas a colunas, sempre levando em consideração as cargas ali solicitadas. Dessa forma, o projeto visa garantir uma resistência estrutural, para prevenir deformações excessivas, garantir segurança e estabilidade, evitando que a estrutura tenda ao seu estado limite último (ELU).

Diante do exposto, no decorrer desse trabalho serão desenvolvidos modelos numéricos no Robot®, software de elementos finitos, para entender a estabilidade elástica de banzos submetidos a compressão. Dentre esses modelos, serão feitas modelagens numéricas de colunas metálicas, para analisar a sua estabilidade mediante uma carga axial de compressão e validar modelos analíticos de cálculo de carga crítica. Além disso, será feita uma modelagem numérica de uma estrutura metálica para analisar a eficiência de travamentos laterais nos banzos de treliças e a influência da esbeltez de tais elementos, em relação a estabilidade elástica da estrutura.

2. OBJETIVOS

2.1. Geral

Analisar e comparar resultados de estabilidade elástica de banzos comprimidos de uma treliça com contraventamentos (travamentos) pontuais.

2.2. Específicos

- Validar exemplos de colunas no ROBOT®;
- Avaliar a eficiência dos travamentos laterais na estabilidade elástica.

3. REVISÃO TEÓRICA

3.1. Análise Elástica de Estabilidade de Colunas

As colunas são elementos estruturais verticais que tem como principal finalidade receber os esforços oriundos das lajes e vigas, e transferi-los para as fundações, sendo submetidas a solicitações de forças axiais de compressão. Diante disso, sempre que se projeta um elemento estrutural é necessário que ele satisfaça requisitos específicos de resistência, deflexão e estabilidade (Hibbeler, 2009).

Para colunas, a resistência desse elemento é influenciada diretamente pela sua esbeltez, por suas irregularidades geométricas e pelo seu tipo de material. Por serem geometricamente cumpridas e esbeltas, e estarem submetidas a forças axiais de compressão, as colunas tendem a sofrer flambagem. Essa deflexão lateral, dada as devidas proporções, pode acarretar na falha do elemento estrutural, levando a atingir seu Estado Limite Último (ELU), denominado por instabilidade de barra.

A carga axial máxima que uma coluna pode suportar quando está na iminência de sofrer flambagem é denominada carga crítica (P_{cr}). Dessa forma, qualquer carga adicional provocará flambagem na coluna e, portanto, deflexão lateral (Hibbeler, 2009). A Figura 3 apresenta uma barra em aço submetida a uma carga axial de compressão (P) até atingir a carga crítica.

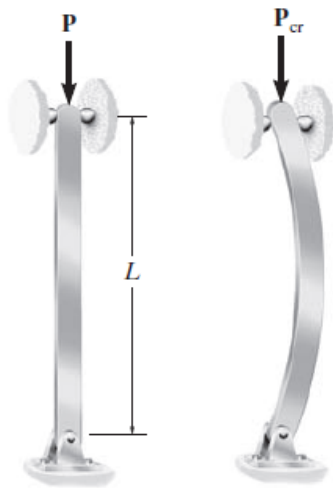
Figura 3 - Barra em aço submetida à Compressão Axial



Fonte: Hibbeler (2009).

Leonhard Euler, matemático e físico suíço do século XVIII, foi o pioneiro nos estudos sobre a relação da flambagem e a redução da capacidade resistente de barras submetidas a compressão axial. Para Euler, a coluna a ser considerada é uma coluna ideal, o que significa uma coluna perfeitamente reta antes da carga, feita de material homogêneo e na qual a carga é aplicada no centroide da seção transversal. Considerou ainda que o material se comporta de maneira linear elástica e que a coluna sofre flambagem ou flexão em um único plano (Hibbeler, 2009). Por meio dessas considerações feitas por Euler, foi possível verificar a carga crítica de flambagem elástica em uma barra birrotulada, como mostra a Figura 4.

Figura 4 - Barra Birrotulada Submetida a Carga Axial de Compressão



Fonte: Hibbeler (2009).

Por meio de conceitos de resistências dos materiais, Euler relacionou o momento fletor em um ponto qualquer da barra, e a curvatura gerada pela carga axial. Assim, chegou-se a seguinte equação:

$$P = \frac{n^2 \pi^2 EI}{L^2} \quad \text{Eq. 01}$$

Nessa equação, o valor de n define a quantidade de curvas que surgem na ocorrência da flambagem. Em $n = 0$, seria o estado zero da barra, onde permanecerá reta. Se $n = 1$, é possível encontrar o primeiro modo de flambagem, modo esse de menor energia. Com $n > 1$, tem-se modos de flambagem com maior energia. O menor valor de P é obtido quando $n = 1$, logo, tem-se a seguinte equação da carga crítica:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad \text{Eq. 02}$$

onde

P_{cr} = carga crítica

E = módulo de elasticidade do material

I = menor momento de inércia

L = comprimento da coluna.

Segundo Fakury, Caldas e Silva (2016), quando as imperfeições geométricas iniciais são desconsideradas, de acordo com a teoria clássica da flambagem, a viga, suposta idealmente com eixo reto, apenas apresenta translação lateral e torção quando o momento fletor de colapso é alcançado. Entretanto, conforme o mesmo autor, as vigas, como todas as barras de aço, sempre apresentam imperfeições geométricas iniciais, entre as quais são importantes para seu comportamento a curvatura lateral e a torção.

Ainda sobre as imperfeições geométricas das colunas metálicas e em relação as exigências de projeto para estabilidade das barras componentes da estrutura, a NBR 8800:2008 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios, estabelece que as imperfeições geométricas iniciais devem ser tomadas na forma de uma imperfeição equivalente global de $L/500$ ou local de $L/1000$, onde L é o comprimento destravado do elemento estrutural analisado.

Além da geometria da coluna, outro fator determinante nas considerações feitas por Euler são as tensões residuais. Surgem no momento da fabricação das peças metálicas, mais precisamente no resfriamento não uniforme, devido ao processo de laminação a quente, dentre outros fatores.

Observa-se que a força axial de compressão resistente nominal da barra depende da distribuição das tensões residuais nos perfis estruturais (Fakury; Caldas; Silva, 2016). Sendo assim, a resistência das peças metálicas está diretamente ligada a amplitude das tensões residuais e quanto maior a intensidade dessas tensões menor será a capacidade de resistência da peça metálica.

Devido a tais fatores, as proposições feitas por Euler não são usuais para elaboração de projetos de estruturas metálicas. Contudo, a NBR 8800:2008 definiu uma curva única de flambagem, em que, relacionando a resistência a compressão e

o índice de esbeltez reduzida, pode-se encontrar um fator de redução para enfim determinar a força axial de compressão resistente de cálculo. Para isso, tem-se as seguintes equações:

- Para $\lambda_0 \leq 1,5$

$$X = 0,658^{\lambda_0} \quad \text{Eq. 03}$$

- Para $\lambda_0 > 1,5$

$$X = \frac{0,877}{\lambda_0^2} \quad \text{Eq. 04}$$

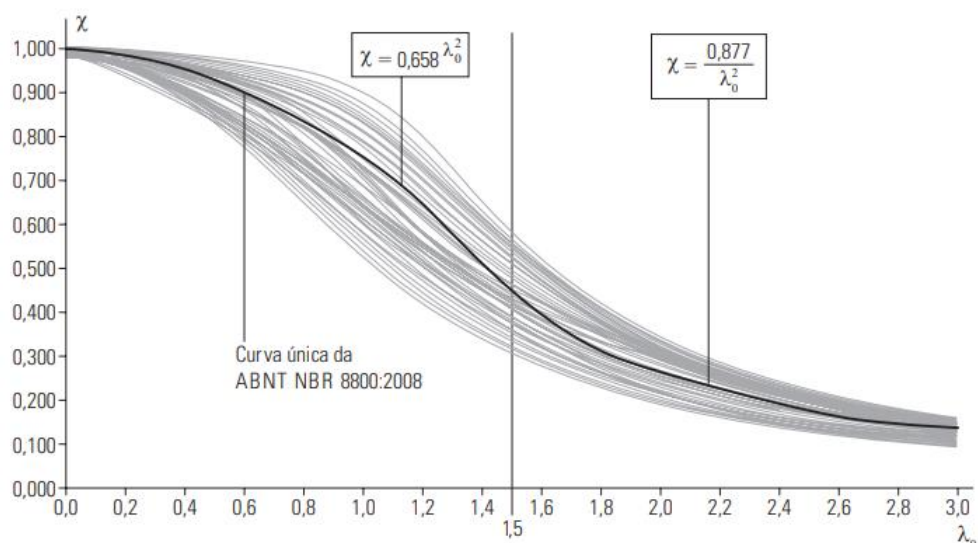
onde

X = fator de redução

λ_0 = índice de esbeltez

Para simplificar o processo de cálculo, a NBR 8800:2008 criou uma curva única para obter um valor do fator de redução, sempre atendendo os limites para segurança estrutural. A Figura 5 demonstra o conjunto de curvas, o fator de redução e a curva única determinada pela NBR 8800:2008.

Figura 5 - Conjunto de Curvas para o Fator de Redução e a Curva Única da NBR 8800:2008



Fonte: Fakury et. al. (2016).

O índice de esbeltez é uma medida que indica a tendência da coluna em sofrer flambagem. Logo, está relacionado com a sua capacidade de suportar cargas de compressão sem deformar lateralmente. Além disso, quanto maior o valor de índice de esbeltez, mais propensa é a coluna de sofrer flambagem. A NBR 8800:2008 indica que o índice de esbeltez das barras comprimidas, tomando como maior relação entre KL e o raio de giração correspondente r , portanto KL/r , onde K é o coeficiente de flambagem e L é o comprimento destravado que não deve ser superior a 200. A equação que define o índice de esbeltez reduzida é dada por:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{A_g \cdot f_y}{N_e}} \quad \text{Eq. 05}$$

onde

A_g = Área bruta do perfil

f_y = Tensão de escoamento do aço

N_e = Carga crítica do perfil

Ainda segundo a NBR 8800:2008, a força axial de compressão resistente de cálculo ($N_{c,Rd}$), de uma barra, associada aos estados-limites últimos de instabilidade por flexão, por torção ou por flexo-torção e de flambagem local, deve ser determinada pela expressão:

$$N_{c,Rd} = \frac{XQ A_g f_y}{\gamma_{al}} \quad \text{Eq. 06}$$

onde

X = Fator de redução das imperfeições do perfil;

Q = Fator de redução da flambagem local do perfil;

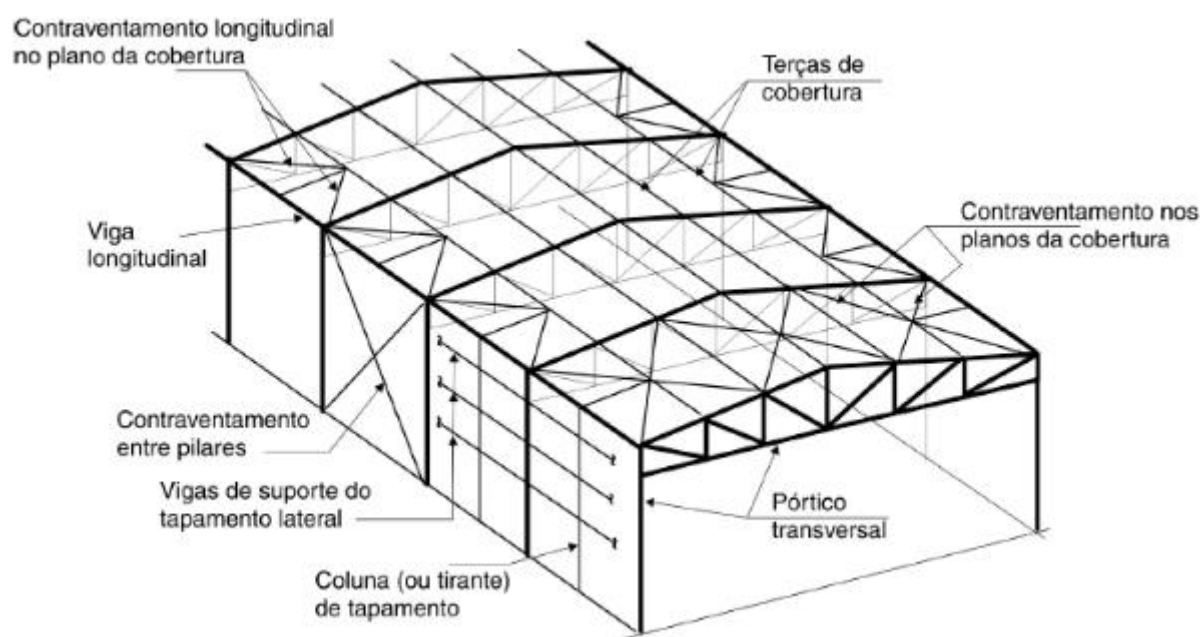
γ_{al} = Fator de ponderação de resistência do perfil;

3.2. Contraventamentos

Estruturas tridimensionais necessitam de subestruturas de contraventamentos para auxiliar na sua estabilidade lateral. Em edificações retangulares são comuns a

utilização de pórticos e contraventamentos, visando garantir a estabilidade da estrutura em todas as direções. A Figura 6 ilustra um galpão em estrutura metálica, destacando os elementos estruturais. Nesse caso, os pórticos auxiliam na estabilidade transversal, enquanto os contraventamentos de cobertura e verticais asseguram a estabilidade longitudinal.

Figura 6 - Edifício baixo do tipo Galpão



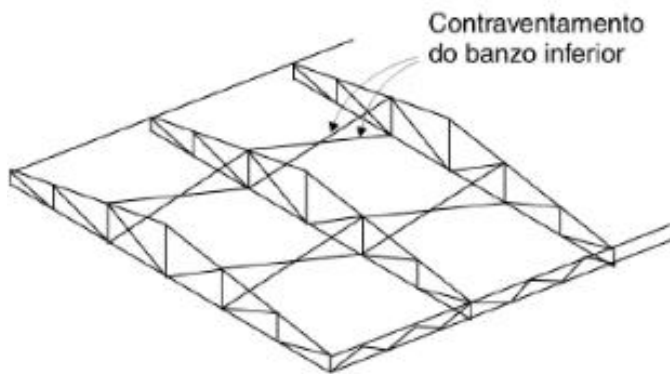
Fonte: Pfeil (2009, p. 33).

Os contraventamentos verticais em galpões direcionam as forças horizontais das fachadas e dos equipamentos para as fundações. O tipo mais usual é em forma de X, e comumente considera apenas as barras tracionadas para equilíbrio de forças, visando uma economia de projeto. Esse tipo de ponderação torna o projeto mais econômico ao evitar a necessidade de barras comprimidas, as quais exigiriam uma menor esbeltez, consequentemente aumentando o consumo de aço da estrutura.

Já os contraventamentos de cobertura transferem as cargas horizontais da cobertura, normalmente oriundas devido as ações do vento, para os contraventamentos verticais, prevenindo-se da flexão excessiva da estrutura treliçada. Embora seja comum a execução dos dois tipos na mesma estrutura, não é regra que ambos ocupem o mesmo vão. Na cobertura, as tesouras dos painéis de contraventamento atuam como banzos, as terças como montantes (ou escoras) e os elementos do contraventamento como diagonais de uma treliça.

É importante ressaltar que, nas treliças, apenas o banzo superior é travado horizontalmente, resultando em problemas de esbeltez na direção perpendicular ao plano da treliça devido o comprimento destravado do banzo inferior ser elevado. Para contornar essa situação, é comum o uso de travamentos laterais em ambos os banzos, como exemplificado na Figura 7, formando por barras inclinadas que ligam uma tesoura a outra, podendo ser do tipo mão francesa ou do tipo treliça.

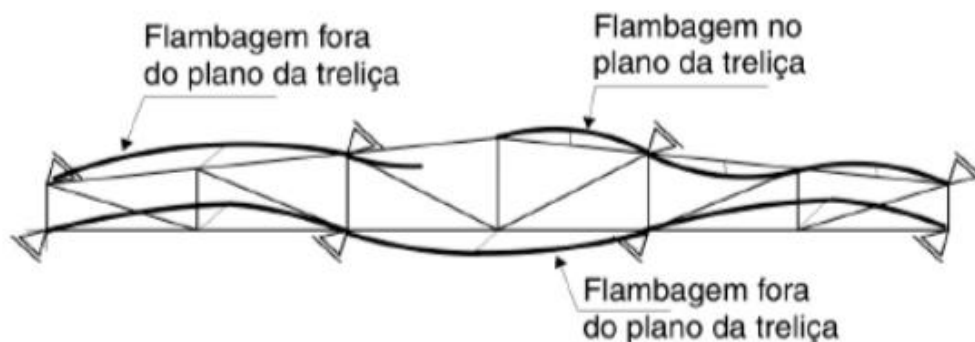
Figura 7 - Esquema do Contraventamento do Banzo Inferior e Superior



Fonte: Pfeil (2009, p. 250).

Em uma situação em que uma estrutura treliçada está exposta à ação do vento, tanto de forma ascendente quanto descendente, os elementos sofrem diferentes tipos de carga. Quando o vento atua de forma descendente, o banzo superior da treliça é comprimido, enquanto o banzo inferior irá tracionar. Já quando o vento é ascendente, ocorre o oposto, onde o banzo inferior irá comprimir e o superior irá tracionar. Essas variações podem levar a treliça à ocorrência de modos de flambagem, conforme ilustrado na Figura 8:

Figura 8 - Comprimentos de Flambagem dos Banzos Superior e Inferior



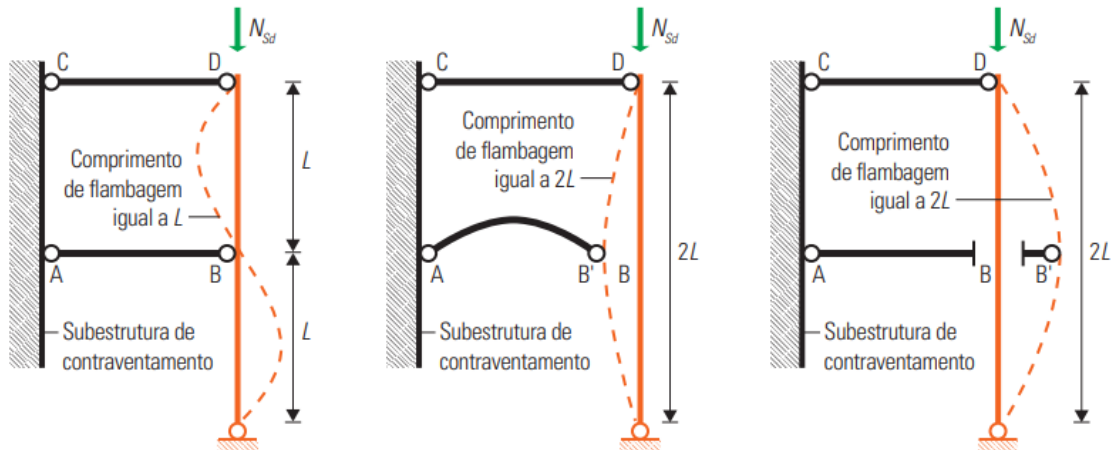
Fonte: Pfeil (2009, p. 250).

Observa-se que os contraventamentos influenciam os comprimentos de flambagem dos banzos inferior e superior. A presença dos contraventamentos limita o comprimento destravado, controlando assim a flambagem e aumentando a estabilidade da estrutura.

3.3. Requisitos para Contensões Laterais

Segundo Fakury et. al. (2016), ao ser feita uma análise de segunda ordem, é importante garantir que as contenções laterais, como escoras e suas conexões, assegurem uma capacidade resistente suficiente para restringir perfeitamente a flambagem dos elementos contraventados. Essa capacidade resistente adequada é crucial para evitar falhas dos elementos contraventados, como é possível visualizar na Figura 9, onde a insuficiência da capacidade resistente das escoras resulta na falha, por exemplo, por instabilidade ou por ruptura, consequentemente vindo a flambar.

Figura 9 - Comportamento de Escoras quanto à Capacidade Resistente



Fonte: Fakury et. al. (2016).

Ainda conforme os autores, para atender ao requisito de capacidade resistente, as contenções laterais devem suportar uma força axial solicitante de cálculo cujo valor, conservadoramente, por ser tomado como igual a:

$$N_{br,Sd} = \alpha_{red}[0,01(\sum N_{cont,Sd})] \quad \text{Eq.07}$$

em que $\sum N_{cont,Sd}$ é o somatório das forças axiais de compressão solicitantes de cálculo nos elementos comprimidos travados, no ponto de travamento. Ainda nessa equação, o fator α_{red} é dado por:

$$\alpha_{red} = \sqrt{0,5 \left(1 + \frac{1}{m}\right)} \quad \text{Eq. 08}$$

onde m é o número de elementos travados.

As equações 07 e 08 demonstram que a força solicitante de cálculo em uma contenção lateral, $N_{br,Sd}$, é determinada como 1% do somatório das forças axiais de compressão solicitantes de cálculo nos elementos travados, reduzidos pelo fator α_{red} .

3.4. Análise Elástica de Estabilidade Lateral de Treliças

O artigo ‘Banzos Comprimidos com Apoios Laterais Elásticos’ dos autores Marcelo Leite Melo, e Leonardo Patrício Chaves, 2020, trata de uma análise estrutural de passarelas do tipo “Ponytruss”, caracterizadas pela ausência de travamentos laterais para os banzos submetidos a compressão. O principal intuito desse estudo é relacionar os dados obtidos pelo método de Holt (1957) com os dados de análises computacionais utilizando o software de elementos finitos SAP2000.

Os resultados obtidos apontam que a análise computacional por meio dos elementos finitos, por proporcionar uma modelagem mais detalhada e uma menor dependência de simplificações, torna-se mais usual para estimar cargas de ruptura. Dito isto, em comparação com o método analítico de Holt (1957), o método de elementos finitos forneceu resultados mais favoráveis a segurança, demonstrando sua precisão para com a análise estrutural.

Um destaque importante no dimensionamento dessas estruturas é a garantia da rigidez necessária das ligações do quadro transversal (montantes e transversinas), que se mostraram fundamentais para a integridade da estrutura.

Conclui-se que é de suma importância a análise para os banzos comprimidos de passarelas do tipo “Ponytruss”, e que o método dos elementos finitos se destaca como um método mais eficiente e seguro para tal estudo, pois produz resultados com uma maior confiabilidade no projeto e execução de tais estruturas.

Já o artigo 'Análise de estabilidade estrutural para uma treliça metálica içadora

de aduelas de concreto para pontes', de autoria de André Durval de Andrade e Carlos Alberto Medeiros, em 2016, utiliza o software ANSYS para realizar uma verificação completa da estabilidade estrutural de uma treliça metálica içadora. Este trabalho desenvolve uma análise por elementos finitos, com o objetivo de verificar a flambagem elástica e inelástica, bem como a sensibilidade às imperfeições geométricas das barras.

Inicialmente, foi feita uma análise preliminar de estabilidade usando o módulo Linear Buckling do software, a fim de identificar a barra mais crítica no modelo. Após a identificação, foram realizados cálculos analíticos para verificar a estabilidade dessa barra, considerando o índice de esbeltez e as tensões de flambagem para diferentes carregamentos. Os resultados indicaram que a barra mais crítica está sujeita à flambagem inelástica. No entanto, ela apresenta um coeficiente de segurança considerado satisfatório contra essa possível falha.

Além disso, o artigo realizou uma análise de sensibilidade às imperfeições geométricas da barra mais crítica, que podem surgir durante a produção do material. Em suma, entende-se que o estudo proporciona uma compreensão ampla sobre a estabilidade estrutural da treliça içadora.

Nirut Konkong, Trakool Aramraks e Kitjapat Phuvoravan, no artigo “Buckling Length Analysis for Compression Chord in Cold-Formed Steel Cantilever Truss”, abordaram também um estudo sobre problemas de estabilidade em estruturas metálicas, utilizando um tipo de treliça em específico. Nesse estudo, os autores desenvolveram um método de análise de comportamento para instabilidade ou colapso da estrutura mediante aplicação de forças, considerando aspectos como a rigidez dos elementos que compõem a treliça. Para isso, usaram de métodos analíticos e de simulações computacionais por meio de elementos de casca para verificar tais comportamentos, além de um modelo experimental.

Como resultados, é possível prever com precisão os modos de flambagem dessa estrutura em função da rigidez do travamento lateral utilizado, comparando os resultados obtidos pela análise experimental e pela simulação computacional. Isso corrobora com a possibilidade de os engenheiros projetarem esse tipo de treliça com mais segurança e eficiência, por entenderem como elas se comportam sob diferentes tipos de carga.

No artigo “Stability of an Imperfect Truss Loaded by Wind”, com autoria de Marcin Krsajewski e Pictor Iwicki, apresentam um estudo numérico sobre a

estabilidade de um tipo de treliça, carregada por ações do vento e com travamentos elásticos nos nós do topo da estrutura. Teve-se como principal objetivo investigar a influência desses travamentos elásticos e das imperfeições geométricas na sua estabilidade. Para isso, realizaram análises lineares e não lineares considerando dois tipos diferentes de imperfeições geométricas. Os resultados demonstram que a rigidez dos travamentos está diretamente ligada a resistência limite da treliça. Nesse caso, a rigidez dos travamentos laterais desempenham um papel importante na estabilidade da treliça sob as condições do vento.

Marcin Krsajewski e Pictor Iwicki também escreveram o artigo “Analysis of Brace Stiffness Influence on Stability of the Truss. Esse estudo foi dedicado a uma pesquisa numérica e experimental da estabilidade de uma treliça com travamentos elásticos laterais na parte superior da estrutura. Essa treliça é um modelo reduzido de uma treliça de tamanho real, escalada por um fator de $\frac{1}{4}$. Foram realizadas análises de escoamento linear e análises estatísticas não lineares. Além disso, o fator de comprimento de flambagem para o banzo superior comprimida foi calculado e a carga crítica para o modelo de casca de treliça imperfeita em relação à rigidez das diagonais foi encontrado.

Os resultados obtidos foram analisados e descobriu-se que a carga de escoamento e a carga limite dependem da rigidez e espaçamento das diagonais. Além disso, foram observadas diferenças significativas entre as cargas críticas obtidas de diferentes imperfeições geométricas, variando em até 40%. Por fim, os resultados experimentais e numéricos não coincidiram completamente, destacando a necessidade de ajustes futuros no método experimental.

4. METODOLOGIA

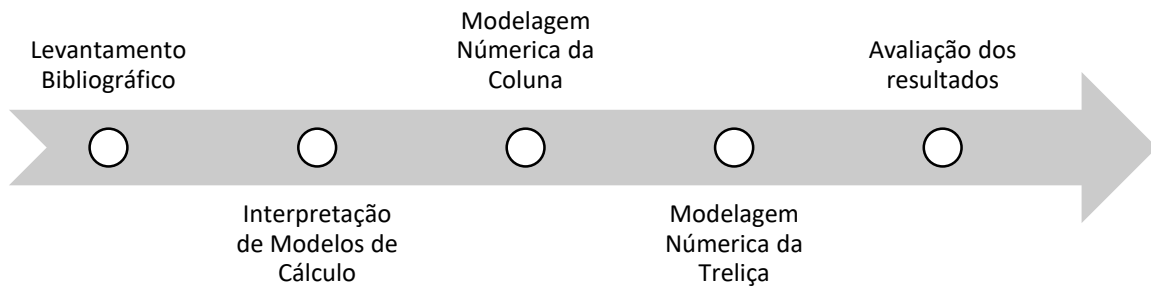
A metodologia adotada está embasada em levantamento bibliográfico, interpretação de modelos de cálculo e criação de modelo numérico utilizando o software Robot Structural Analysis Professional 2024®.

Inicialmente, o projeto compreenderá em uma revisão bibliográfica com base em estudos apresentados por Hibbeler (2009), Fakury et. al. (2016), e em artigos científicos que abordam a análise de estabilidade de treliças.

No Robot®, será realizada uma modelagem numérica de pilares para análise de estabilidade sob cargas axiais de compressão, para efeitos de comparação com

modelos analíticos de cálculo. Além disso, será feita uma modelagem numérica de uma estrutura metálica composta por treliças e pilares, a fim de analisar a influência dos travamentos/contraventamentos e da esbeltez de determinado banzo da treliça sobre a estabilidade elástica da estrutura. Na Figura 10 é apresentado um fluxograma metodológico do desenvolvimento do presente estudo:

Figura 10 - Fluxograma Metodológico



Fonte: Autoria Própria (2023).

4.1. Modelo Computacional e Teoria de Euler:

4.1.1. Modelo Computacional

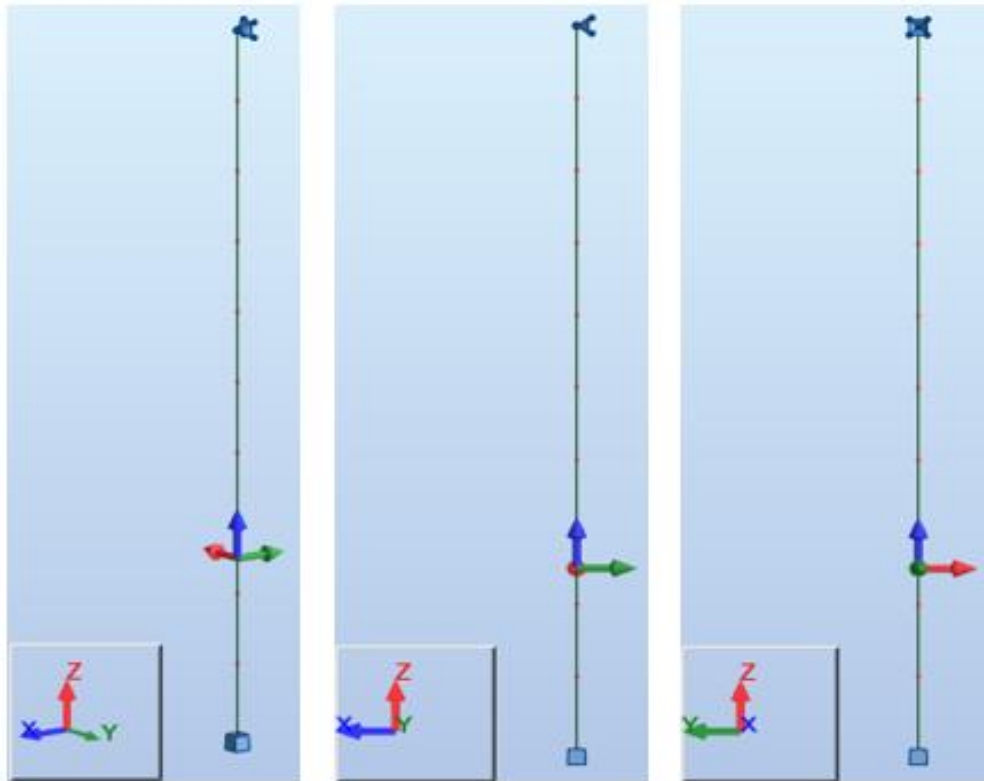
O modelo computacional foi desenvolvido no software Robot®, utilizando uma coluna metálica com perfil CS 250x43. A seleção desse elemento foi baseada na adequação para aplicação da teoria de Euler, levando-se em consideração a ausência de imperfeições geométricas e tensões residuais, o comportamento elástico linear do material, e a aplicação de carga no centroide da seção.

Na elaboração do modelo do elemento, foi estabelecido um comprimento de barra (L) de 3 metros, subdividido em 10 elementos finitos de barra, visando otimizar a precisão dos resultados. Além disso, o pilar foi submetido a uma carga unitária de compressão axial no centroide da sua seção.

O software Robot® é um programa de análise estrutural por elementos finitos, o que significa que permite trabalhar em múltiplos planos. Além disso, devido os apoios no topo e na base, no plano XZ a estrutura está sujeita a restrição na base, impedida de se deslocar em X e livre para deslocamentos em Y. Já no plano YZ, a restrição permanece na base, mas livre no topo, como mostra a Figura 11. Essa disposição

estabelece condições de estabilidade distintas para cada plano, onde no plano XZ a estrutura tende a fletir no eixo Y, enquanto no plano YZ tende a fletir no eixo Z. Dessa forma, foi solicitado ao software um modo de flambagem para cada plano (XZ e YZ).

Figura 11 - Coluna Estrutural com Apoios: Detalhes de Subdivisões e Restrições



Fonte: Autoria Própria (2023).

É importante destacar que o software trabalha com sistema de coordenadas locais e globais. Cada elemento estrutural possui seu próprio sistema de coordenadas local, enquanto o sistema de coordenadas global se refere a estrutura como um todo. Portanto, considerando que a NBR 8800:2008 estabelece o eixo Z como o eixo longitudinal da barra, e que o objetivo da pesquisa é analisar flambagem por flexão, não por torção, adotou-se os eixos X e Y globais. Tal escolha influencia no coeficiente de flambagem por flexão do elemento (K_x e K_y), conforme determinado pela norma NBR 8800:2008, demonstrado na Figura 12:

Figura 12 - Coeficiente de Flambagem por Flexão de Elementos Isolados (Tabela E.1)

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
A linha tracejada indica a linha elástica de flambagem						
Valores teóricos de K_x ou K_y	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0	2,0
Valores recomendados	0,65	0,80	1,2	1,0	2,1	2,0
Código para condição de apoio	Rotação e translação impedidas Rotação livre, translação impedida Rotação impedida, translação livre Rotação e translação livres					

Fonte: NBR 8800 (2008).

4.1.2. Cálculo da carga crítica

Ao desenvolver o modelo computacional conforme proposto no software, é possível obter os valores de carga crítica para o Modo 1 e Modo 2 de flambagem do pilar. Em seguida, para validar o uso correto do software, recorreu-se ao modelo analítico proposto por Euler para cálculo de carga crítica. Esse modelo foi aplicado através do seguinte equacionamento:

$$N_e = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(L \cdot K)^2} \quad \text{Eq. 09}$$

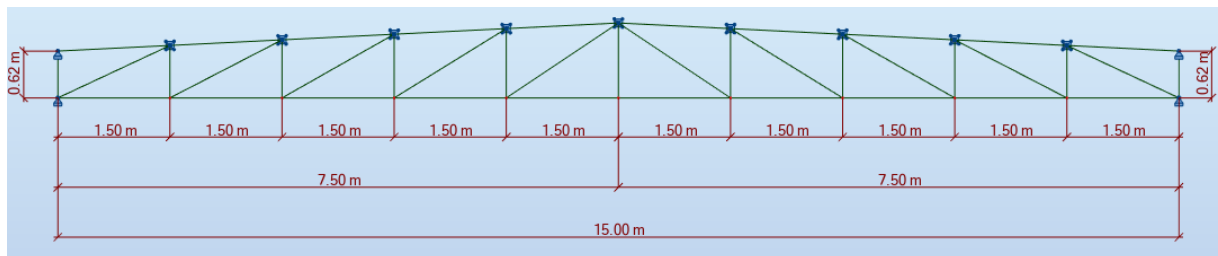
em que E é o módulo de elasticidade do aço, I a inércia do perfil, L o comprimento do pilar e K é o valor do coeficiente de flambagem por flexão.

4.1.3. Modelagem da treliça metálica

A treliça metálica foi concebida simulando uma estrutura de cobertura, com o propósito de oferecer suporte e proteção para uma área específica. A escolha dos elementos estruturais e sua disposição foram determinadas com base em

experiências didáticas e em projetos anteriores, garantindo assim satisfazer as necessidades da pesquisa. O tipo de treliça se assemelha com o estilo Howe, porém, com ambas extremidades do banzo inferior e superior apoiadas em pilares. Além disso, todos os nós do banzo superior também foram apoiados, simulando o que seriam os travamentos laterais, e as extremidades das montantes e diagonais foram rotuladas, impedindo a transferência de momento entre os elementos e permitindo flexão nos eixos locais Y e Z. A Figura 13 ilustra a modelagem inicial da treliça metálica.

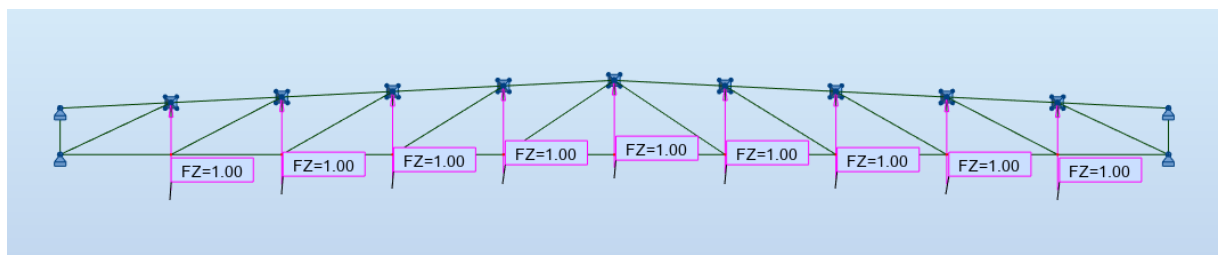
Figura 13 - Dimensões da Treliça Metálica



Fonte: Autoria Própria (2023).

Além disso, foram adicionadas cargas unitárias em todos os nós do banzo superior, exceto nos nós das extremidades, conforme a Figura 14. Essa carga unitária, com sentido positivo para cima, irá comprimir o banzo inferior, simulando o que poderia ser, por exemplo, uma ação de sucção do vento.

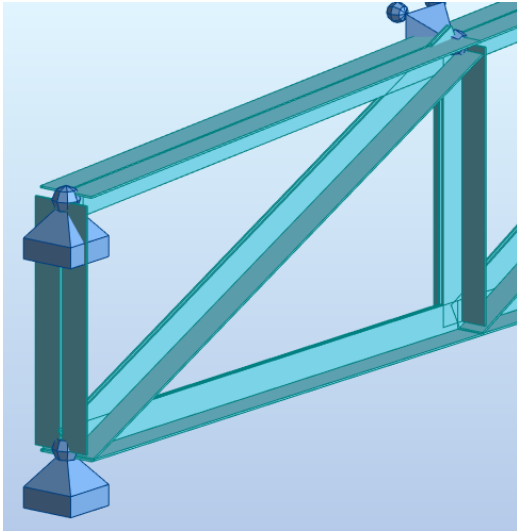
Figura 14 - Cargas Unitárias nos Nós do Banzo Superior da Treliça



Fonte: Autoria Própria (2023).

Já em relação aos perfis da treliça, tanto os banzos, como as diagonais e montantes, foram utilizados perfis laminados dupla cantoneira de abas iguais, do tipo 2L 76x76x5.5 ($B_f \times B_f \times \text{kg/m}$), visto na Figura 15:

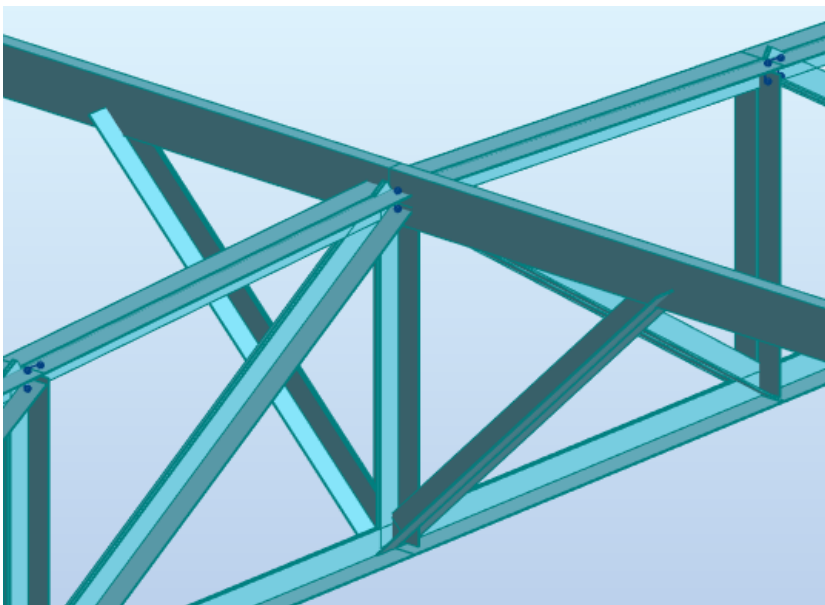
Figura 15 - Perfis dos Elementos Estruturais da Treliça metálica



Fonte: Autoria Própria (2023).

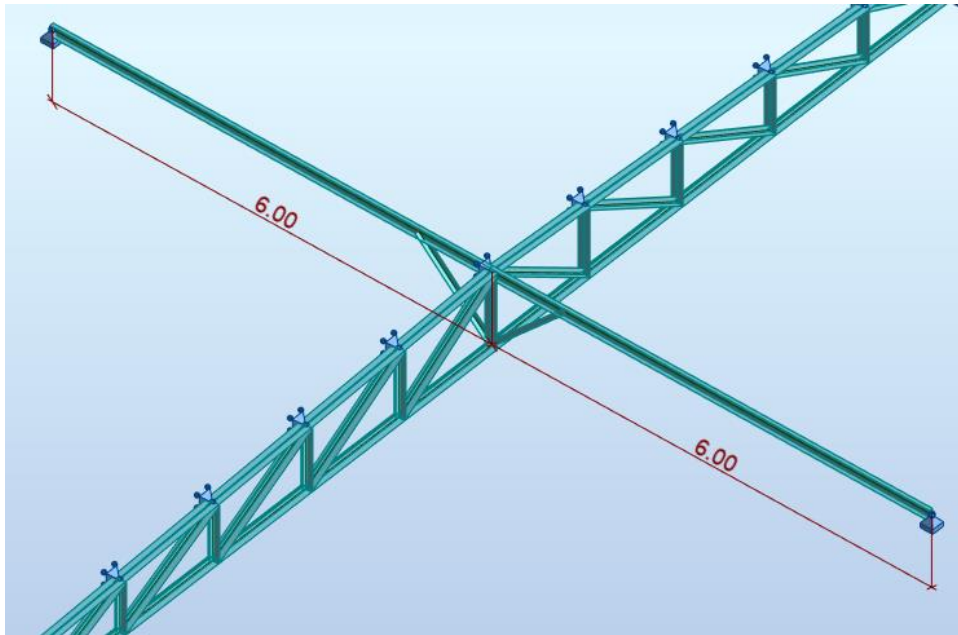
Além disso, para simular a influência dos travamentos laterais, foi decidido incluir mãos francesas no meio da estrutura da treliça metálica. Cada mão francesa, posicionada a 45 graus em relação ao montante, possui inicialmente o mesmo perfil dos demais elementos, utilizando uma dupla cantoneira 2L 76x76x5.5 ($B_f \times B_f \times \text{kg/m}$). Na cumeeira do banzo superior, foi adicionado uma viga (terça), em perfil C 152x12, com comprimento de 12 metros, para auxiliar a mão francesa no travamento lateral do banzo inferior.

Figura 16 - Mão Francesas como Travamento Lateral do Banzo Inferior



Fonte: Autoria Própria (2023).

Figura 17 - Modelagem dos Travamentos Laterais da Treliça



Fonte: Autoria Própria (2023).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

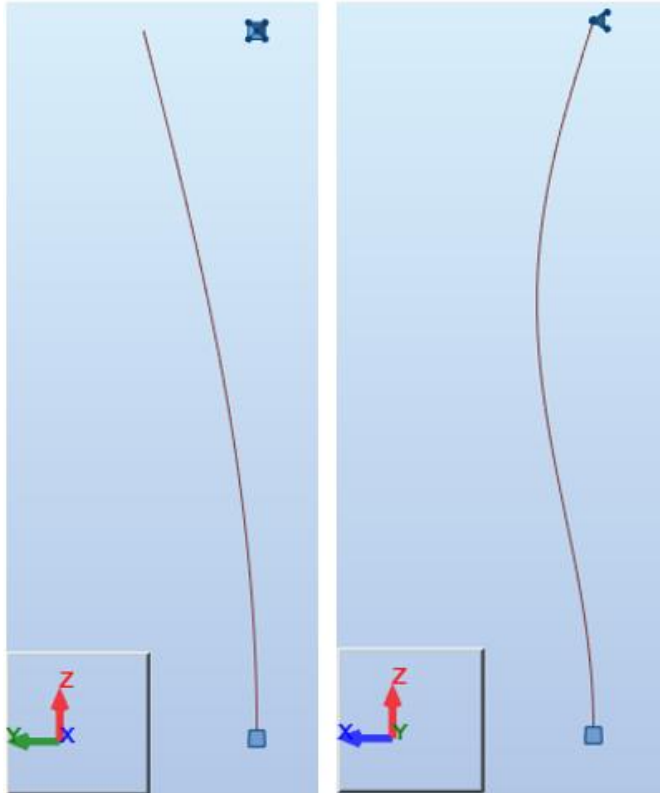
Inicialmente, procedeu-se à análise do modelo computacional simples de um elemento estrutural metálico com o propósito de calcular a carga crítica de flambagem utilizando a teoria de Euler. Esse procedimento visa validar a aplicação apropriada do software Robot®. Em seguida, desenvolveu-se a modelagem da treliça metálica, utilizando o mesmo software, a fim de analisar a influência dos travamentos laterais (mão francesa) no banzo inferior. Essa modelagem permitiu variar parametros como o tipo de perfil, visando compreender seu impacto na estabilidade lateral da treliça.

5.1. Verificação do Modelo Computacional e Modelo Analítico de Euler

Os resultados obtidos pelo software ao solicitar a deformação para os dois modos de flambagem confirma a análise feita para a carga crítica do pilar em questão. No Modo 1 de flambagem, observamos que o pilar fletiu no eixo X global, resultando em movimentos de flexão no plano YZ. Essa resposta estrutural do pilar demonstra uma sensibilidade a flexão em outra direção. Por outro lado, no Modo 2 de flambagem, o pilar demonstrou flexão no eixo Y global, com movimentos de flexão ocorrendo no plano XZ. Esse padrão de instabilidade, tanto no Modo 1 como no Modo 2 podem ser

associados a alguns fatores que afetam a estabilidade estrutural do pilar, fatores esses que não são levados em consideração na teoria de Euler, como a geometria do pilar, condições de contorno, imperfeições geométricas e defeitos.

Figura 18 - Deformação do Pilar nos Modos 1 e 2 de Flambagem



Fonte: Autoria Própria (2023).

Figura 19 - Resultados da Análise de Flambagem

Caso/Modo	Coef. crít.	Precisão
2/ 1	3,58103e+03	1,11619e-0
2/ 2	9,35111e+03	7,83834e-0

Fonte: Autoria Própria (2023).

Após a análise dos modos de flambagem utilizando o software, foram calculadas as cargas críticas para os dois modos de instabilidade estrutural. Este cálculo foi realizado empregando a equação de Euler (Eq. 09), uma abordagem fundamental na teoria de flambagem, levando em consideração os coeficientes de flambagem associados a cada modo específico. Essa verificação através do método analítico oferece uma comparação direta com os resultados obtidos no software,

permitindo validar o uso do software para as próximas análises a serem feitas. Utilizando a Eq. 09, obteve-se os seguintes resultados:

Tabela 1 - Modelo Analítico de Cálculo para Pilares

MODO 1		MODO 2	
E (kN/cm ²)	20000	E (kN/cm ²)	20000
I _x (cm ⁴)	2084	I _y (cm ⁴)	6531
L (cm)	300	L (cm)	300
K _x	0,7	K _x	2
N _{c,Rd} (kN)	3581,04	N _{c,Rd} (kN)	9328,05

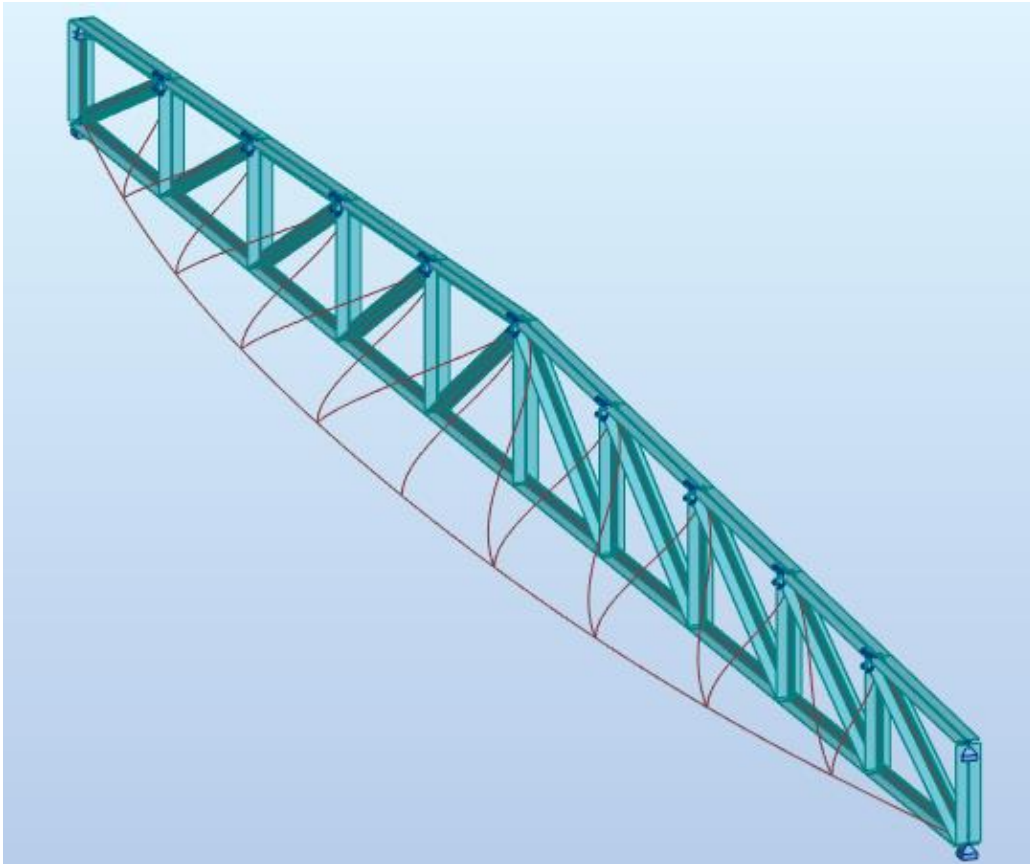
Fonte: Autoria Própria (2023).

A comparação entre os dados obtidos pelo software de análise estrutural e os resultados oriundos do método analítico revelou uma alta concordância, evidenciando uma consistência significativa entre os modelos empregados. Essa proximidade nos resultados sugere que o uso do software foi conduzido de maneira adequada, validando sua capacidade de modelagem e simulação. Dessa forma, os resultados obtidos demonstram a confiabilidade do software como uma ferramenta eficaz para análises estruturais.

5.2. Influência dos Travamentos Laterais

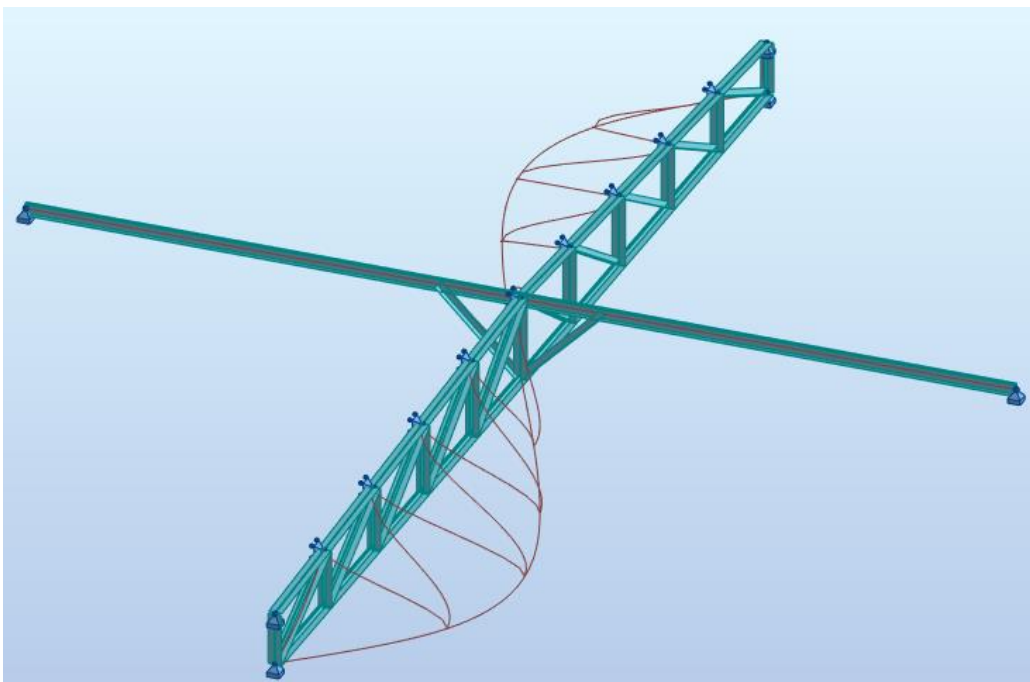
Para a análise de influência dos travamentos laterais do tipo mão francesa no comportamento de flambagem do banzo inferior, foram obtidos resultados que revelam diferenças significativas entre os modelos analítico e numérico. Ao comparar os resultados de carga crítica, observou-se que a utilização das mãos francesas aumentou consideravelmente a carga crítica para ambos os modelos. Ao adicionar a mão francesa no meio do banzo inferior diminuiu-se pela metade o comprimento destravado. A Figura 20 e Figura 21 demonstram os modos de flambagem nas duas situações:

Figura 20 - Modo de Flambagem para a Treliça sem Travamento Lateral



Fonte: Autoria Própria (2023).

Figura 21 - Modo de Flambagem da Treliça com os Travamentos Laterais



Fonte: Autoria Própria (2023).

Para o cálculo da carga crítica de flambagem pelo modelo analítico, foi utilizado a Eq. 09. Conforme mencionado anteriormente, ao adicionar o travamento lateral na treliça, o comprimento destrava se torna metade do vão da treliça. A Tabela 2 e Tabela 3 mostram os resultados obtidos para carga crítica da treliça:

Tabela 2 - Carga Crítica de Flambagem – Treliça com e sem Mão Francesa (Modelo Analítico)

MODELO ANALÍTICO (Euler)			
SEM MÃO FRANCESA		COM MÃO FRANCESA	
E (kN/cm ²)	20000	E (kN/cm ²)	20000
I _y (cm ⁴)	160,65	I _y (cm ⁴)	160,65
L (cm)	1500	L (cm)	750
K _y	1	K _y	1
N _{e,y} (kN)	14,09	N _{e,y} (kN)	56,38

Fonte: Autoria Própria (2023).

Tabela 3 - Carga Crítica de Flambagem – Treliça com e sem Mão Francesa (Modelo Numérico)

MODELO NUMÉRICO (Robot)			
SEM MÃO FRANCESA		COM MÃO FRANCESA	
N _{e,y} (kN)	22,59	N _{c,Rd} (kN)	112,34

Fonte: Autoria Própria (2023).

No modelo numérico, após inserir o travamento lateral no banzo inferior, o aumento da carga crítica foi de aproximadamente 397%. Já para o modelo analítico, o aumento foi de 300%. Esse aumento considerável na carga crítica com a utilização das mãos francesas implica que tais elementos de travamento lateral são eficazes contra a flambagem do banzo inferior em treliças. A uniformidade entre os resultados dos modelos numérico e analítico em relação ao efeito positivo das mãos francesas reforça a validade do modelo adotado.

Entretanto, é possível afirmar que o modelo analítico se mostrou bastante conservador nas suas estimativas, apesar de mostrar resultados semelhantes em comparação com o modelo numérico, porém com uma diferença na magnitude dos valores. Esse conservadorismo nos resultados pode ser atribuído a simplificações do modelo analítico proposto por Euler. A suposição de que o esforço axial normal de

compressão é uniforme em toda a barra do banzo inferior contribui para uma superestimação da capacidade de resistência da estrutura a flambagem. Logo, o modelo analítico não leva em consideração a variação real desse esforço, resultando em estimativas maiores em relação a capacidade resistente de flambagem.

5.3. Avaliação da Eficiência dos Travamentos Laterais

Após a análise da influência do travamento lateral do tipo mão francesa na carga crítica de uma treliça, realizou-se um outro estudo para investigar o efeito da variação dos perfis da mão francesa para a carga crítica da treliça. O objetivo era avaliar a eficácia do travamento lateral sob diferentes configurações de perfis. Para essa nova análise, foram escolhidos quatro perfis diferentes para o travamento lateral, mencionados na Tabela 4. Além disso, a Tabela 4 e Tabela 5 apresentam os resultados obtidos para a carga crítica tanto pelo modelo numérico como pelo modelo analítico.

Tabela 4 - Carga Crítica de flambagem - Treliça com Mão Francesa

MODELO NÚMERICO (ROBOT)	
MÃO FRANCESA	COEF. CRÍTICO (Autovalor)
2L 76X76X5.5	112,3356
L 76X76X5.5	112,3123
L 64X64X6.1	112,3261
L 51X51X2.5	112,2775

Fonte: Autoria Própria (2023).

Tabela 5 - Carga Crítica de flambagem - Treliça com Mão Francesa

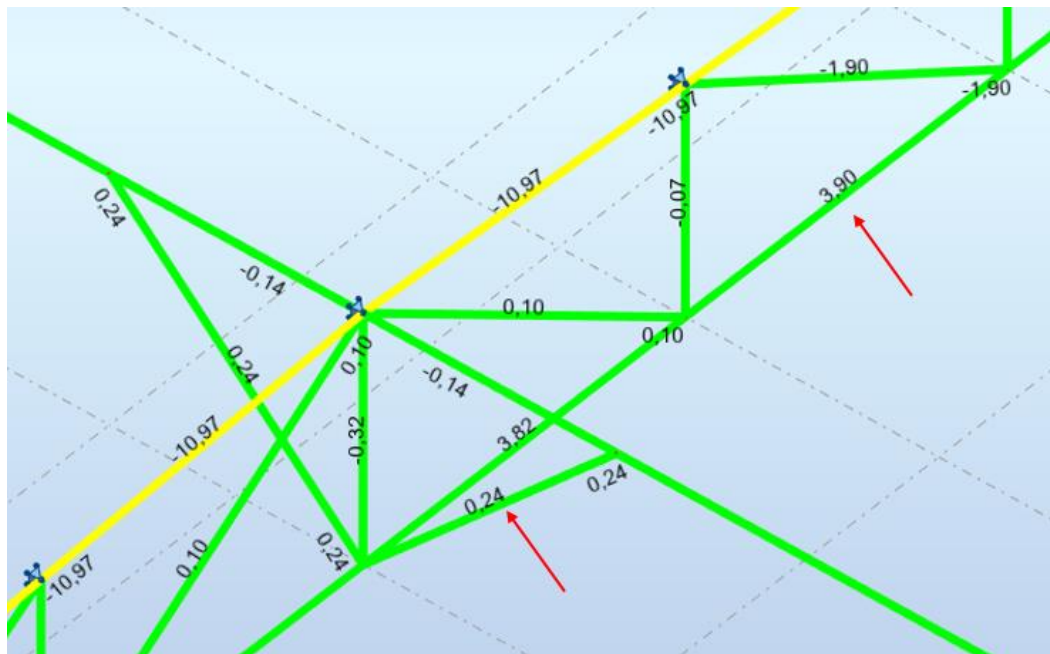
MODELO ANÁLITICO (Euler)				
E (kN/cm ²)	I _z (cm ⁴)	L (cm)	k _x	Nc,Rd (kN)
20000	160,65	750	1	56,38

Fonte: Autoria Própria (2023).

Os resultados obtidos mostram uma consistência na carga crítica da treliça, com variações nas casas decimais para os diferentes tipos de perfil no travamento lateral. Dessa forma, é possível afirmar que a variação dos perfis da mão francesa pouco influenciou na carga crítica da treliça.

Para validar essa afirmação, é importante considerar a capacidade resistente das contenções laterais em restringir a flambagem dos elementos contraventados (banzo inferior). Conforme especificado pelo requisito para contenções laterais, a força solicitante de cálculo nesse elemento ($N_{br,Sd}$) deve ser igual a 1% do somatório das forças axiais de compressão solicitantes de cálculo nos elementos travados. No caso específico analisado, a força solicitante de cálculo da mão francesa foi de 0,24kN, enquanto a força solicitante de cálculo para o banzo inferior foi de 3,9kN, conforme a Figura 22.

Figura 22 - Barra mais Comprimida do Banzo Inferior e Travamento Lateral



Fonte: Autoria Própria (2023).

Utilizando a Equação 07 e Equação 08, foi possível determinar a força axial solicitante de cálculo necessária para que as contenções laterais, como mostra a Tabela 6:

Tabela 6 - Requisitos para Contensões Laterais para a mão francesa

REQUISITOS PARA CONTENÇÕES LATERAIS	
CARGA ÁXIAL DE COMPRESSÃO DO BANZO INFERIOR (kN)	3,95
CARGA ÁXIAL DE COMPRESSÃO DA MÃO FRANCESA (kN)	0,24
COEF. CRÍTICO (Autovalor)	28,44
α_{red}	1,00
$N_{cont,Sd}$	112,34
$N_{br,Sd}$	1,11

Fonte: Autoria Própria (2023).

Logo, a carga solicitante $N_{br,Sd}$ é uma carga bem pequena se comparada com a resistência da mão francesa. Diante do exposto, os resultados corroboram com a análise feita anteriormente, demonstrando a eficácia da mão francesa para o aumento da capacidade de carga da treliça, ressaltando a importância do travamento lateral como uma estratégia eficiente para reforçar estruturas de treliça.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo realizado sobre a influência dos travamentos laterais (mão francesa) na carga crítica de uma treliça revelou resultados significativos para a eficiência desse elemento estrutural junto a treliça metálica. Nas primeiras análises, foi possível observar um aumento substancial na carga crítica da treliça após inserir esse novo elemento na modelagem estrutural, tanto para o modelo analítico como para o numérico. Em suma, para o modelo analítico, a mão francesa aumentou a carga crítica da estrutura em até 300%. Já para o modelo numérico, o aumento foi de 397%, demonstrando a capacidade do travamento lateral em reforçar a treliça e torna-la mais resistente.

Além disso, ao avaliar a eficiência dos travamentos laterais com variações nos perfis, pode-se afirmar que, embora houvesse essa variação, os resultados foram consistentes, indicando uma confiabilidade no travamento lateral em que a carga crítica da treliça não foi comprometida mediante as variações.

A comparação entre os resultados obtidos por meio dos modelos numérico e

analítico revelou diferenças nas estimativas dos resultados, podendo ser atribuída as simplificações dos modelos. Enquanto o modelo analítico fornece um resultado mais conservador, o modelo numérico revela resultados mais consistentes, resultando em uma representação mais detalhada do comportamento da treliça.

Logo, os resultados obtidos demonstram a importância do travamento lateral como método confiável para aumentar a capacidade de carga de treliças, onde tais observações contribuem significativamente para a elaboração de projetos de estruturas treliçadas, contribuindo para o desempenho e segurança dos mesmos.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800 – **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto edifícios - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2008.

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

HIBBELER, Russell Charles. **Resistência dos materiais**. 7.ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2015, 637. p.

FAKURY, Ricardo H.; SILVA, Ana Lydia Reis; CALDAS, Rodrigo Barreto. **Dimensionamento de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto**. 1ª ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016.

ANDRADE, A. D.; MEDEIROS, C. A. **Análise de estabilidade estrutural para uma treliça metálica içadora de aduelas de concreto para pontes**. São Paulo, 2016.

MELO FILHO, M.L., CHAVES, L.P., 2020. **Banzos comprimidos com apoios laterais elásticos**, artigo, Engenharia Estudo e Pesquisa, ABPE, vol. 20, p. 32-38, Rio de Janeiro.

PRODWEB. **Galpões para Usos Gerais** - 4a Edição revisada e atualizada. Disponível em: <<https://www.cbca-acobrasil.org.br/site/biblioteca-detalle.php>>. Acesso em: 26 mar. 2024.

KRAJEWSKI, M.; IWICKI, P. (2015). **Analysis of brace stiffness influence on stability of the truss**. International Journal of Applied Mechanics and Engineering, 20 (1), 97–108. <https://doi.org/10.1515/ijame-2015-0007>.

KONKONG, N.; ARAMRAKS, T.; PHUVORAVAN, K. **Buckling length analysis for compression chord in cold-formed steel cantilever truss**. Int. J. Steel Struct. 2017, 17, 775–787.

KRAJEWSKI M., IWICKI P., 2016, **Stability of an imperfect truss loaded by wind**, Engineering Transactions, 64, 4, 509-516.

Autodesk Robot Structural Analysis Professional, Autodesk Inc, 2024.