

Tema: oficial de submissão

ANÁLISE DE ESTABILIDADE ESTRUTURAL PARA UMA TRELIÇA METÁLICA IÇADORA DE ADUELAS DE CONCRETO PARA PONTES*

André Durval de Andrade¹
Carlos Alberto Medeiros²

Resumo

O uso de treliça metálica para a operação de içamento de aduelas de concreto durante a fase construtiva de pontes é preferencialmente empregado em situações onde a aplicação do cimbramento convencional não é possível. E durante as operações de içamento, as barras da treliça ficam submetidas a elevados esforços, tanto de tração quanto de compressão, tendo este último grande papel na estabilidade da estrutura. O presente trabalho desenvolve uma análise de elementos finitos com o programa *ANSYS* para verificação de estabilidade estrutural em uma treliça metálica içadora de aduelas de concreto para pontes. Serão abordados tópicos de estabilidade estrutural referentes à flambagem elástica e inelástica de barras e de sensibilidade à imperfeição geométrica que devem ser observados no desenvolvimento de projetos estruturais de treliças metálicas destinadas ao içamento de aduelas.

Palavras-chave: Treliça metálica; Estabilidade estrutural; Elementos finitos.

ANALYSIS OF STRUCTURAL STABILITY FOR A STEEL TRUSS EMPLOYED IN ERECTION OF PRECAST BRIDGE SEGMENTS

Abstract

The application of steel truss system in erection operation of precast bridge segments during constructive phases of bridges is mainly adopted in situation where conventional workforms is not feasible. During the erection operation of precast bridge segments, the steel truss members are subjected to high efforts, tensile as well as compressive, being the last one of great importance in the stability of the structure. This paper aims to perform a finite element analysis with *ANSYS* software to study structural stability for a steel truss system employed in erection operations of precast bridge segments. Subjects of structural stability such as linear buckling and sensitivity to imperfections are here discussed, where they shall be considered in the structural design of steel truss systems employed in erection operation of precast bridge segments.

Keywords: Steel truss; Structural stability; Finite Elements.

¹ Engenheiro Mecânico, Engenharia Nacional, Mills Infraestrutura, São Paulo, São Paulo e Brasil.

² Engenheiro Civil, Mestre, Professor, Núcleo de Ciências Exatas, Universidade de Mogi das Cruzes, São Paulo, São Paulo e Brasil.

* Contribuição tecnológica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A treliça içadora de aduelas (Figura 1) é um equipamento utilizado na construção de pontes onde a aplicação de cimbramento convencional não é possível [4].



Figura 1 – Treliça içadora de aduelas.

Estruturas de treliças destinadas ao içamento de aduelas durante as fases construtivas de pontes estão sujeitas a elevados esforços, tanto de tração quanto de compressão, sendo este último de grande relevância para a estabilidade da estrutura. Outro aspecto a ressaltar é que a presença de imperfeições geométricas influencia substancialmente a capacidade de resistência de uma estrutura [6]. Dessa forma, o desenvolvimento de projetos estruturais para treliças içadora de aduela de pontes deve se atentar para os aspectos mencionados anteriormente de forma a garantir segurança contra falhas por perda de estabilidade.

Uma estrutura quando submetida a cargas compressivas pode falhar por perda de estabilidade de equilíbrio, ou seja, ocorrência do fenômeno de flambagem, ou por plastificação da seção resistente [6]. E o emprego de análises de elementos finitos constitui uma forma versátil e confiável para verificação e avaliação de estruturas sujeitas a cargas compressivas [5].

LARSEN [7] apresenta uma análise de elementos finitos desenvolvida para avaliar a estabilidade estrutural em um sistema de lançamento de segmentos de pontes, conhecido como MSS (Movable Scaffolding Systems). Nesse trabalho foi realizada uma análise não linear de elementos finitos com o programa ANSYS [1] com o objetivo de estudar a ocorrência de falhas em placas por flambagem local e com a consideração de imperfeições geométricas.

O presente trabalho desenvolve uma análise de elementos finitos com o programa ANSYS para avaliar a estabilidade estrutural de uma treliça içadora de aduelas de concreto para pontes, abordando aspectos de flambagem elástica e de flambagem inelástica de barras. Adicionalmente, também é apresentado um estudo de sensibilidade à imperfeição geométrica inicial devido à falta de alinhamento da barra.

* Contribuição tecnológica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Equipamento treliça içadora de aduelas para pontes

O equipamento treliça içadora de aduelas de concreto para pontes é composto pelos elementos identificados na Figura 2.

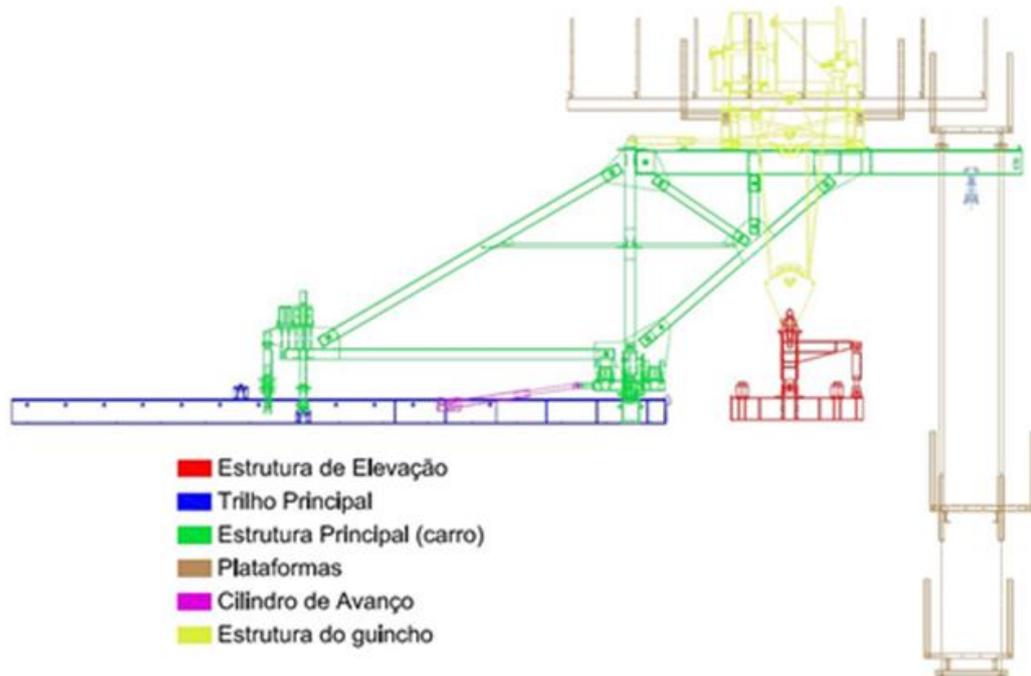


Figura 2 – Identificação dos elementos da treliça içadora de aduelas.

A estrutura da treliça içadora de aduelas, conforme descrita na Figura 3, é constituída basicamente por perfis de tubos de aço de material ASTM A572 Grau 42.

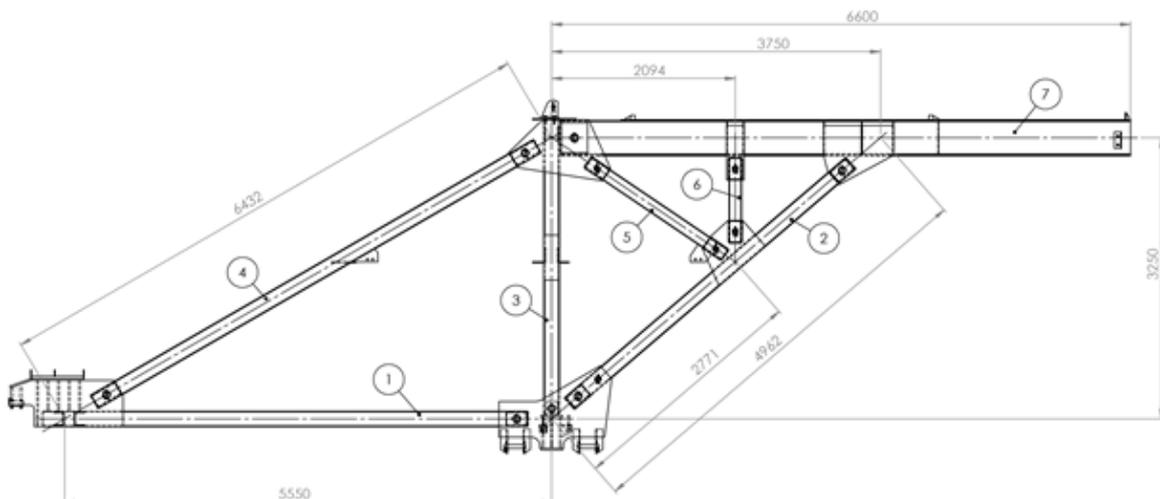


Figura 3 – Estrutura da treliça içadora de aduelas.



A Tabela 1 lista um resumo das propriedades geométricas dos perfis de aço presentes na estrutura da treliça içadora de aduelas.

Tabela 1 – Propriedades geométricas dos perfis.

ITEM	NOME	ÁREA	INÉRCIA	PERFIL
1	S101	7.6000e+003 mm ²	3.8653e+007 mm ⁴	RETANGULAR
2	S102	7.6000e+003 mm ²	3.8653e+007 mm ⁴	RETANGULAR
3	S103	7.6000e+003 mm ²	3.8653e+007 mm ⁴	RETANGULAR
4	S104	6.8000e+003 mm ²	3.2867e+007 mm ⁴	RETANGULAR
5	S105	6.1200e+003 mm ²	2.0010e+007 mm ⁴	RETANGULAR
6	S106	6.1200e+003 mm ²	2.0010e+007 mm ⁴	RETANGULAR
7	S107'	1.7376e+004 mm ²	4.3391e+008 mm ⁴	PERFIL W
7	S107	1.1392e+004 mm ²	3.6416e+008 mm ⁴	PERFIL W

2.2 Carregamento

Para a análise de estabilidade da estrutura da treliça içadora de aduelas foi considerado apenas um carregamento, denominado de carregamento crítico $Fd1$, sendo este definido a partir da combinação última normal prescrita pela norma NBR 8800 [2], conforme a seguinte expressão:

$$Fd1 = \gamma g_1 \times Fg_1 + \gamma q_1 \times Fq_1 + \gamma q_2 \times \varphi_0 \times Fq_2$$

Onde:

Fg_1 é o valor característico das ações permanentes de peso próprio de estruturas metálicas;

Fq_1 é o valor característico da ação variável de condição de içamento da aduela;

Fq_2 é o valor característico da ação variável de vento lateral atuante na aduela durante a operação de içamento;

γg_1 é o coeficiente de ponderação para as ações permanentes e de valor igual a 1,25;

γq_1 é o coeficiente de ponderação para as ações variáveis de condição de içamento da aduela e de valor igual a 1,5;

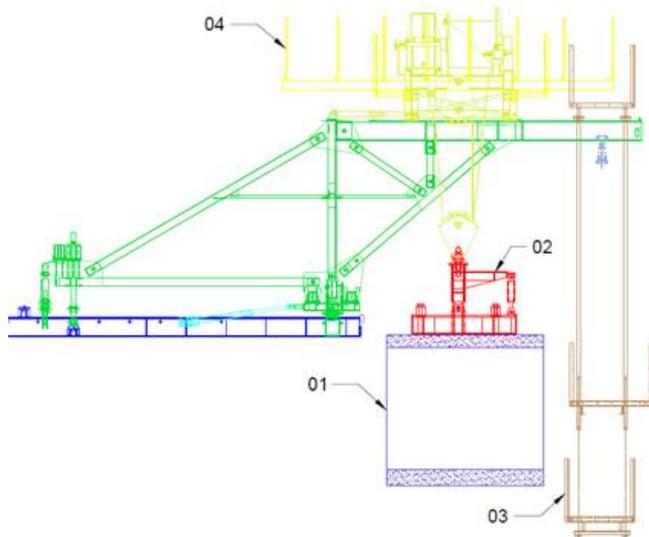
γq_2 é o coeficiente de ponderação para as ações variáveis de pressão do vento lateral na aduela durante a operação de içamento e de valor igual a 1,4;

φ_0 é o fator de combinação para as ações variáveis de valor igual a 1,0.

Para a ação variável de condição de içamento de aduela (Fq_1) também foi considerado um coeficiente impacto dinâmico de valor de 1,3, estabelecido conforme a norma NBR 8400 [3].

Na Figura 4 são listados os valores de pesos dos conjuntos de equipamentos presentes na estrutura da treliça içadora de aduelas e que foram usados na definição do carregamento crítico atuante.

* Contribuição tecnológica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.



Item	Conjunto	Peso (kgf)
1	Aduela	117.000
2	Yoke (unitário)	2.000
3	Plataformas frontais	5.000
4	Plataformas Superiores e Guinchos	26.450

Figura 4 – Pesos dos conjuntos presentes no equipamento da treliça içadora de aduelas.

2.3 Modelagem de elementos finitos

Um modelo tridimensional de elementos finitos foi desenvolvido com o programa ANSYS [1] para a análise de estabilidade da estrutura da treliça içadora de aduelas. Primeiramente, foi construído um modelo geométrico num programa CAD (Computer Aided Design) e que foi importado para o ANSYS, como ilustrado na Figura 5, aonde foram definidas as seções transversais dos perfis de aço. Em seguida, foi gerada uma malha com o elemento de barra BEAM188 do ANSYS, como apresentada na Figura 6.

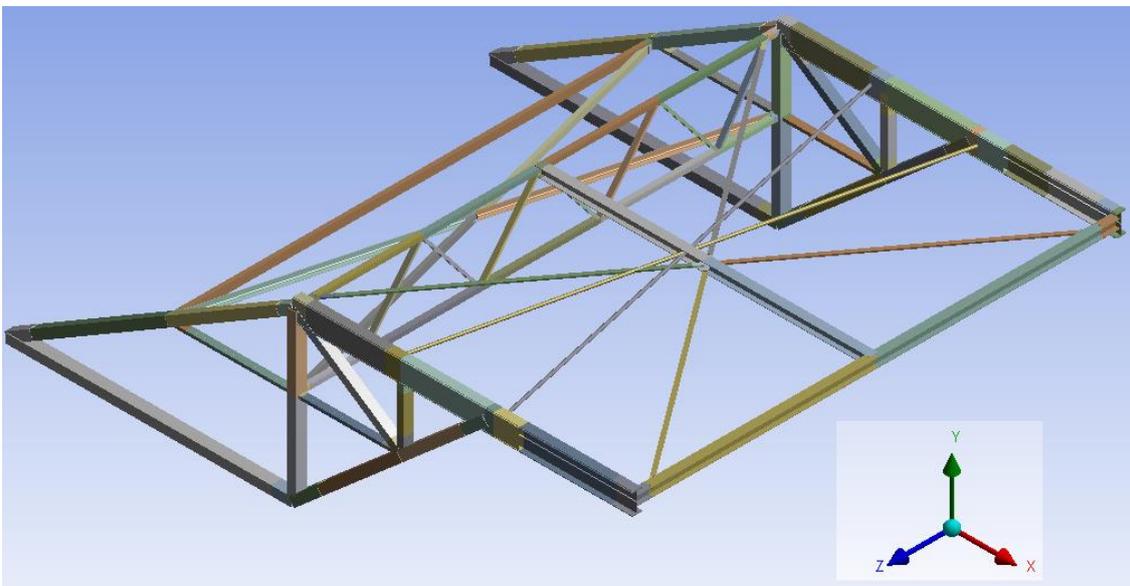


Figura 5 – Modelo geométrico da treliça içadora de aduelas.

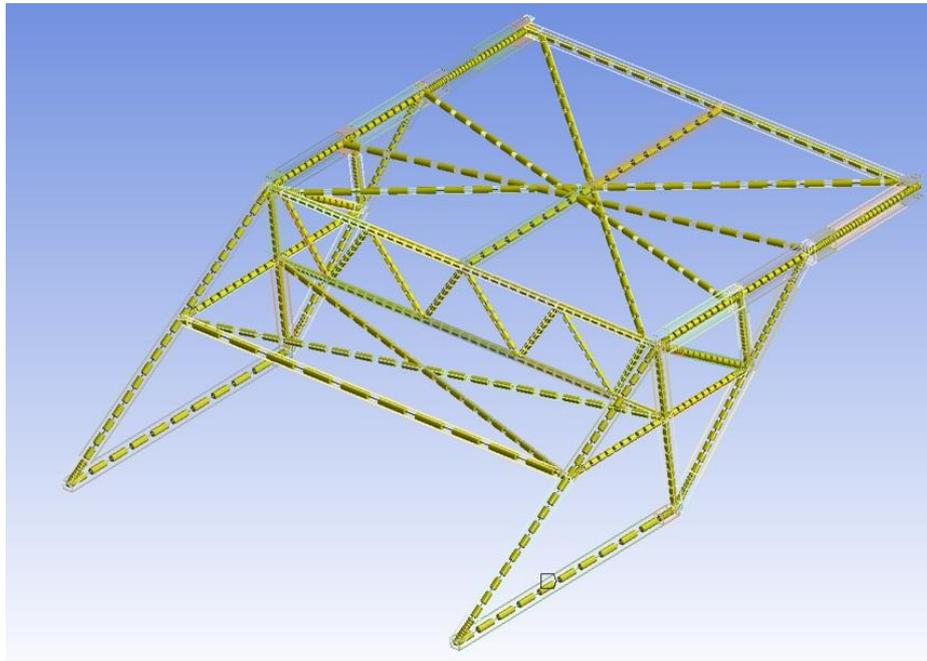


Figura 6 – Malha de elementos finitos da treliça içadora de aduelas.

A Figura 7 apresenta as condições de contorno que foram aplicadas ao modelo de elementos finitos da estrutura da treliça içadora de aduelas.

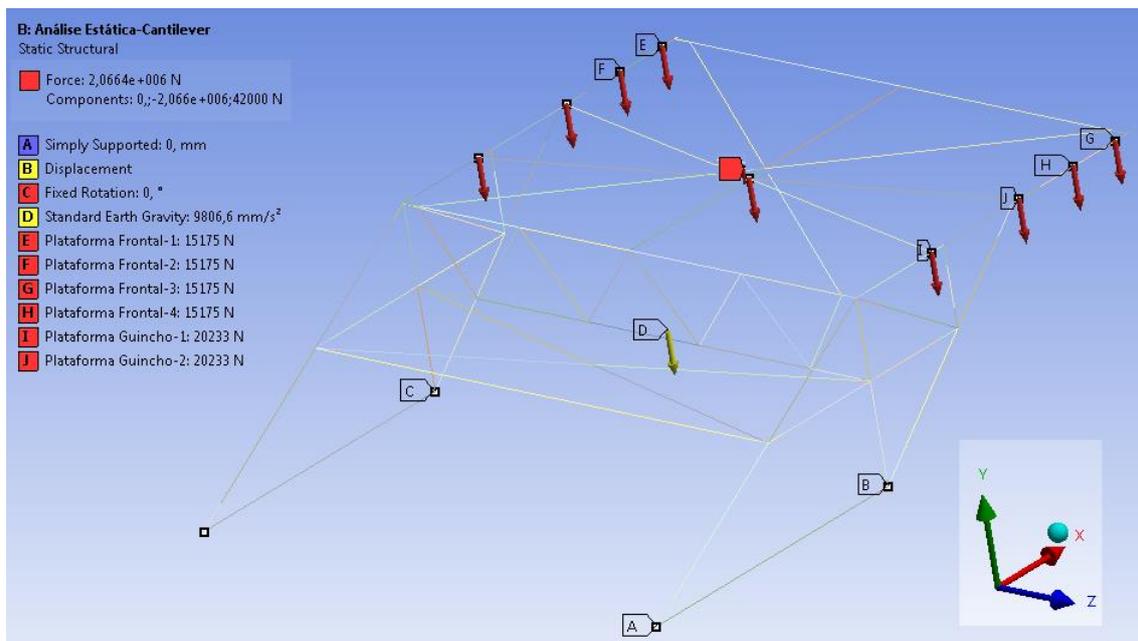


Figura 7 – Condições de contorno aplicadas ao modelo de elementos finitos da treliça içadora de aduelas.

2.4 Análise Estrutural

A análise estrutural para a treliça içadora de aduelas para pontes foi realizada com o objetivo de verificar o atendimento aos critérios de estados limites últimos por perda de estabilidade de equilíbrio, ou seja, ocorrência do fenômeno de flambagem elástica, ou por escoamento de parte da seção transversal sem ocorrer perda de estabilidade e que caracteriza o fenômeno de flambagem inelástica.

Inicialmente foi realizada uma análise preliminar de estabilidade para a estrutura da treliça içadora de aduelas por meio de uma análise de flambagem [5] com o módulo *Linear Buckling* do programa de elementos finitos ANSYS [1].

Essa análise de flambagem consiste na solução do problema de autovalor generalizado apresentado na Equação 1:

$$[K] + \lambda_i[S]\{\psi\} = 0 \quad (1)$$

Onde, $[K]$ é a matriz de rigidez elástica e $[S]$ é a matriz de rigidez geométrica.

Na solução desse problema são obtidos autovalores (λ_i), onde cada autovalor representa um fator de carga de flambagem, e um respectivo autovetor $\{\psi\}$ que corresponde ao modo de flambagem.

A análise de flambagem executada com módulo *Linear Buckling* do programa ANSYS foi aqui realizada para identificar a barra crítica da estrutura da treliça içadora de aduelas.

A análise estrutural para a barra crítica da treliça içadora de aduelas foi desenvolvida por meio de um cálculo analítico de flambagem global por flexão em colunas [8].

O seguinte procedimento foi adotado para esse cálculo:

1. Determinação do índice de esbeltez (λ) da barra crítica da treliça pela expressão:

$$\lambda = \frac{l}{i} \quad \text{para: } i = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (2)$$

2. Determinação dos índices de esbeltez λ_r e λ_{pl} pelas expressões:

- Índice de Esbeltez para o limite superior da tensão de escoamento:

$$\lambda_{pl} = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{f_y}} \quad (3)$$

- Índice de Esbeltez relativo à tensão de limite de proporcionalidade:

$$\lambda_r = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{0,7 \times f_y}} \quad (4)$$

* Contribuição tecnológica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

E considerando as seguintes propriedades mecânicas do aço ASTM A572 Grau 42 da estrutura da treliça içadora de aduelas:

- Modulo de Elasticidade $E = 200000$ MPa
- Tensão de Escoamento $f_y = 290$ MPa
- Tensão de Ruptura $f_u = 415$ MPa

O índice de esbeltez para o limite superior da tensão de escoamento vale:

$$\lambda_{pl} = \sqrt{\frac{\pi^2 \times 200000}{290}} = 82,5$$

E o índice de esbeltez relativo à tensão de limite de proporcionalidade vale:

$$\lambda_r = \sqrt{\frac{\pi^2 \times 200000}{0,7 \times 290}} = 98,6$$

3. Verificação da ocorrência de flambagem elástica ou de flambagem inelástica.

- Para valores de $\lambda > \lambda_r$, tem-se a flambagem elástica.
- Para valores de $\lambda_{pl} < \lambda < \lambda_r$, tem-se a flambagem inelástica.

A Figura 8 ilustra as regiões do domínio da flambagem elástica e da flambagem inelástica, e que ficam delimitadas em função dos índices de esbeltez λ_r e λ_{pl} .

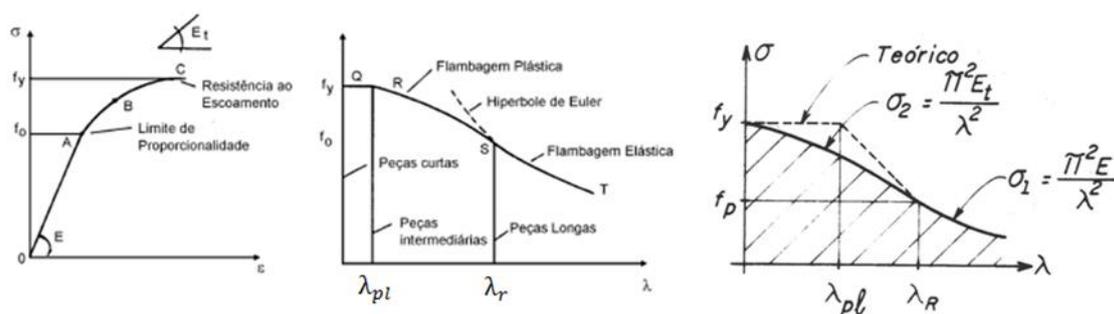


Figura 8 – Delimitação da ocorrência de flambagem elástica e de flambagem inelástica em função dos índices de esbeltez λ_r e λ_{pl} .

4. Determinação da tensão crítica de flambagem

- Situação de flambagem elástica

A tensão crítica é obtida pela equação de Euler [9] dada pela expressão:

$$\sigma_{fl} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad (5)$$

- Situação de flambagem inelástica

Para a situação de flambagem inelástica, a determinação da tensão crítica pode ser feita pela Teoria do Módulo Tangente [9], ou pela Teoria do Duplo Módulo [9] ou por fórmulas empíricas baseadas em ensaios experimentais [8]. No presente trabalho, a tensão crítica para a situação de flambagem inelástica foi obtida pela fórmula empírica de Tetmajer [8], quando aplicada ao aço alemão St. 50 e que corresponde ao aço estrutural ASTM A572.

E essa fórmula empírica é dada pela expressão:

$$\sigma_{fl} = 329 - 0,63 \times \lambda \quad (6)$$

5. Coeficiente de Segurança a flambagem

O coeficiente de segurança a flambagem foi obtido pela seguinte relação:

$$CS = \frac{\sigma_{fl}}{\sigma_{FEA}} \quad (7)$$

Onde:

- σ_{fl} corresponde à tensão crítica a flambagem dada pela equação (5) ou pela equação (6).
- σ_{FEA} corresponde à tensão normal atuante na barra crítica da treliça içadora de aduelas proveniente da análise estática de elementos finitos.

6. Avaliação de segurança contra falhas por flambagem

- Para a situação de flambagem elástica

Caso $CS < 1,0$, implica que a barra crítica da treliça içadora de aduelas falha por flambagem elástica, ou seja, a barra falha perda de estabilidade de equilíbrio.

- Para a situação de flambagem inelástica

A referência [8] aconselha um coeficiente de segurança maior que 2,0 devido ao fato da grande dispersão de resultados observada durante os ensaios experimentais. Dessa forma, para um $CS < 2,0$ implica que a barra crítica da treliça içadora de aduelas falha por flambagem inelástica, ou seja, parte da seção transversal da barra escoou sem ocorrer à perda da estabilidade.

* Contribuição tecnológica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.



2.5 Estudo de Sensibilidade a Imperfeição Geométrica

Defeitos de fabricação como a falta de alinhamento geométrico da barra e possíveis excentricidades (problemas de 2ª ordem) podem influenciar o comportamento real de elementos comprimidos, possibilitando o surgimento de flambagem inelástica. Dessa forma, também foi desenvolvido um estudo de sensibilidade à presença de imperfeição geométrica inicial, proveniente da falta de alinhamento da barra crítica da treliça içadora de aduelas, com o objetivo de avaliar a possibilidade da ocorrência de falhas por flambagem inelástica.

Para desenvolvimento desse estudo, inicialmente foi elaborado um submodelo de elementos finitos para a barra crítica da treliça içadora de aduelas.

Os seguintes passos foram realizados:

1. A forma da imperfeição geométrica inicial foi adotada como sendo a forma deformada referente ao primeiro modo de flambagem e com a consideração de um valor de desvio de eixo da barra.
2. Uma força axial compressiva foi aplicada ao submodelo. O valor dessa força axial foi igual ao resultado da máxima força de compressão atuante na barra crítica da treliça içadora de aduelas e obtido a partir da análise estática linear.
3. Processamento de uma análise não linear com grandes deslocamentos para cada proposta de estudo de imperfeição geométrica inicial para a barra crítica.

Um gráfico de “Coeficiente de Segurança *versus* Desvio de eixo da barra” foi elaborado para avaliar a segurança da barra crítica da treliça içadora de aduelas quanto à possibilidade de vim a sofrer falhas por flambagem inelástica.

Esse coeficiente de segurança foi calculado pela seguinte relação:

$$CS = \frac{\sigma_{Admissivel}}{\sigma_{Total}} \quad (8)$$

Onde:

- $\sigma_{Admissivel}$ corresponde à tensão crítica a flambagem inelástica dada pela equação (6).
- σ_{Total} corresponde à tensão total atuante na barra crítica da treliça içadora de aduelas composta da soma da tensão normal (σ_{FEA}) com a tensão de flexão ($\sigma_{Flexão} = \frac{M \times y}{I}$).

E o coeficiente de segurança (CS) deve ser maior que 2 de modo a garantir segurança estrutural da barra crítica da treliça içadora de aduelas contra falhas por flambagem inelástica, conforme explicitado no item 2.4.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 9 descreve o fluxograma de análises de elementos finitos realizadas no programa ANSYS [1] para o estudo de estabilidade estrutural para a treliça içadora de aduelas.

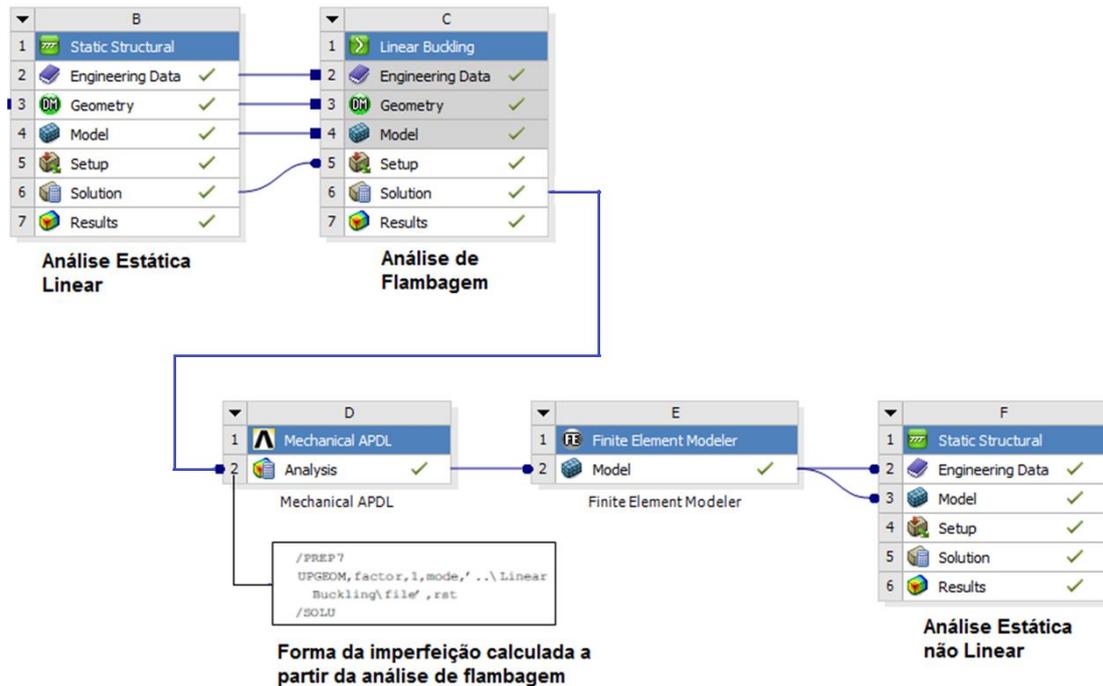


Figura 9 – Fluxograma de análises de elementos finitos realizadas no programa ANSYS.

3.1 Análise Estrutural

A Figura 10 apresenta o resultado do primeiro autovalor de $\lambda_1 = 3,6047$ obtido da análise de flambagem para a estrutura da treliça içadora de aduelas. Esse resultado identifica a barra crítica da estrutura da treliça içadora de aduelas.

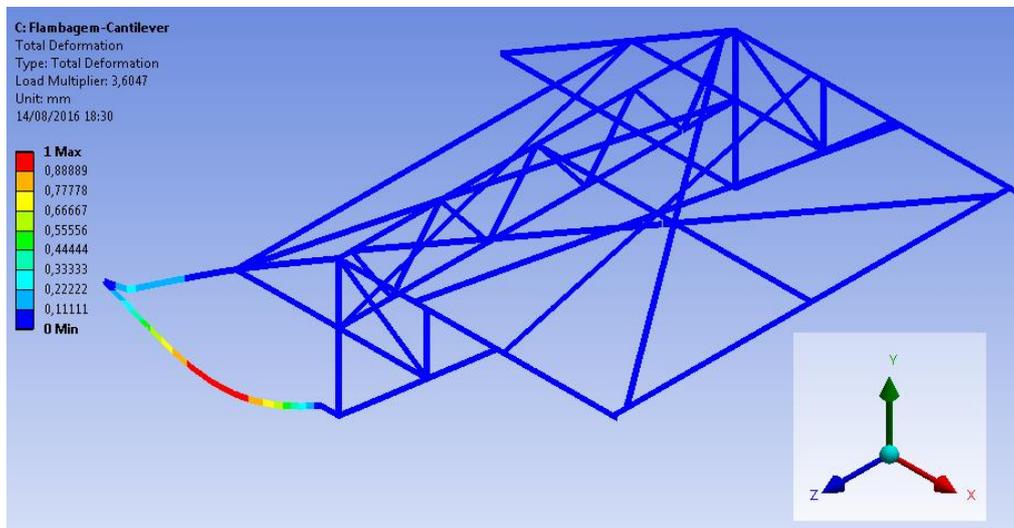


Figura 10 – Resultado do primeiro autovalor de $\lambda_1 = 3,6047$.

A Figura 11 mostra que a barra crítica da treliça içadora de aduelas ficam sujeita a uma força de compressão máxima de 100 tf.

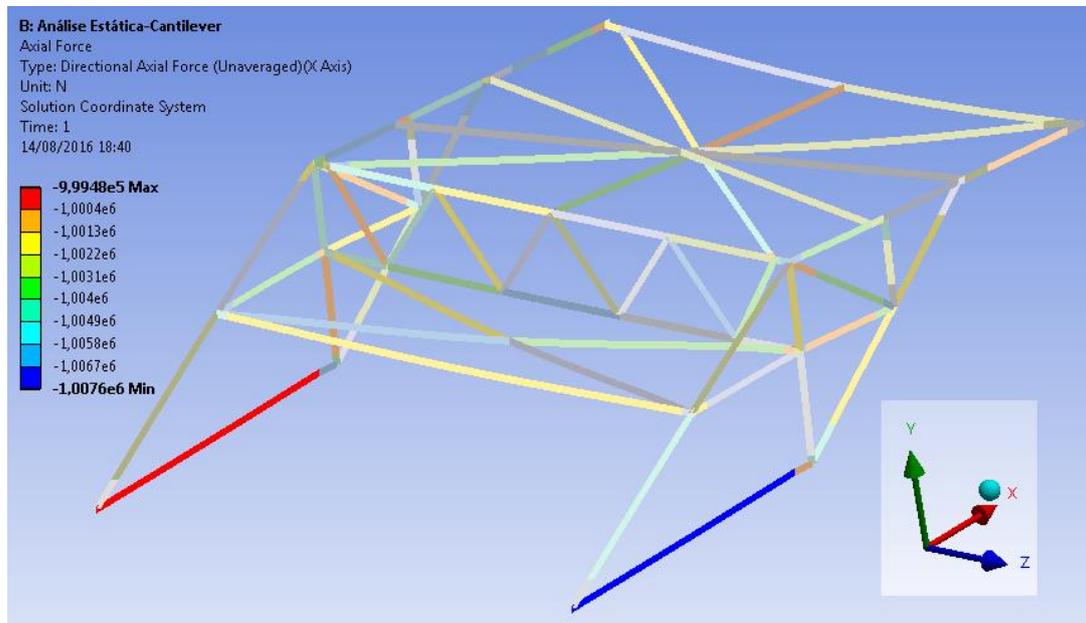


Figura 11 – Força de compressão atuante na barra crítica da treliça içadora de aduelas.

A Figura 12 apresenta o resultado de momento fletor para a barra crítica da treliça içadora de aduelas. Percebe-se que o máximo momento fletor é de 1615,5 N.m. Esse valor de momento é baixo, podendo-se assim afirmar que a barra crítica da treliça içadora de aduelas trabalha predominantemente submetida a esforços de compressão.

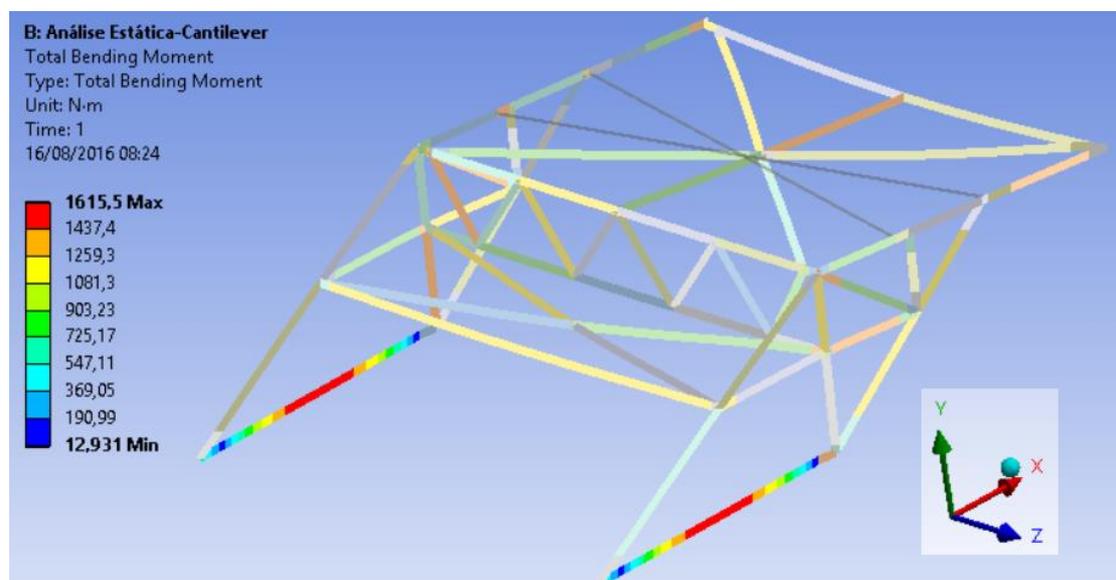


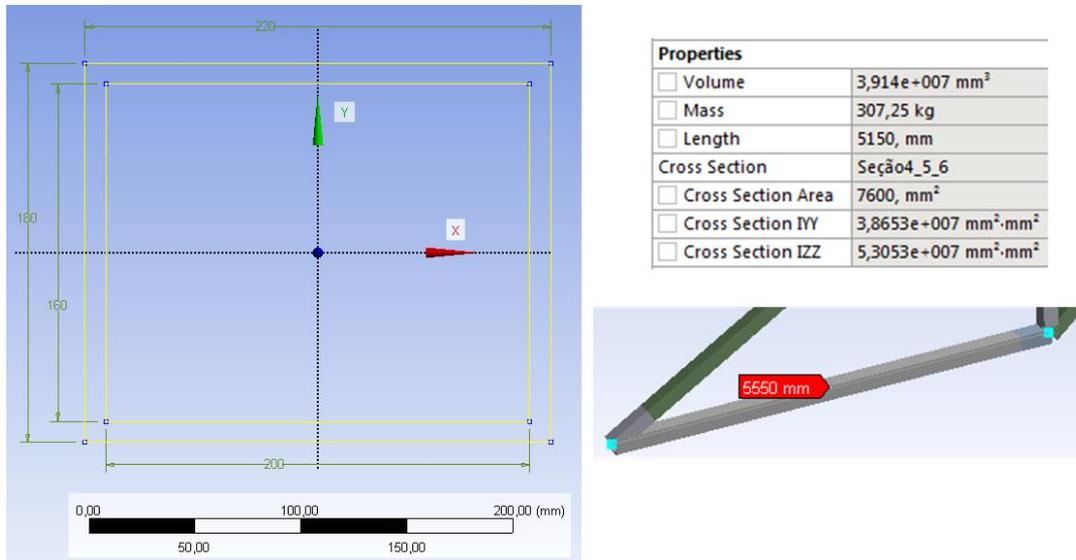
Figura 12 – Momentos fletores atuantes na barra da treliça içadora de aduelas.



3.1.1 Cálculos analíticos de verificação de flambagem

Determinação do Índice de Esbeltez (λ) para a barra crítica da treliça içadora de aduelas:

- Dados geométricos da barra crítica da treliça içadora de aduelas:



Índice de Esbeltez da barra (λ):

$$\lambda_1 = \frac{l}{\sqrt{\frac{I}{A}}} = \frac{5600}{\sqrt{\frac{3,8e7}{7600}}} = 79,2 \quad \text{e} \quad \lambda_2 = \frac{l}{\sqrt{\frac{I}{A}}} = \frac{5600}{\sqrt{\frac{5,3e7}{7600}}} = 67,1$$

Como o maior índice de esbeltez da barra crítica da treliça içadora de aduelas ($\lambda_1 = 79,2$) é próximo ao valor do índice de esbeltez obtido para o limite superior da tensão de escoamento do material ($\lambda_{pl} = 82,5$), admite-se aqui uma situação de flambagem inelástica.

A tensão crítica de flambagem obtida pela equação (6) vale:

$$\sigma_{fl} = 329 - 0,63 \times 79,2 = 279,1 \text{ MPa}$$

A tensão de compressão atuante na barra crítica da treliça içadora de aduelas devido ao carregamento externo vale:

$$\sigma_{FEA} = \frac{\text{Força}}{\text{Area}} = \frac{1e6 \text{ N}}{7600 \text{ mm}^2} = 131,6 \text{ MPa}$$

Logo, tem-se como coeficiente de segurança:

$$CS = \frac{\sigma_{fl}}{\sigma_{FEA}} = \frac{279,1 \text{ MPa}}{131,6 \text{ MPa}} = 2,12$$

3.2 Estudo de Sensibilidade a Imperfeições Geométricas

Para a realização do estudo de sensibilidade à imperfeição geométrica inicial da barra crítica da estrutura da treliça içadora de aduelas foi desenvolvido um submodelo de elementos finitos, como ilustrado na Figura 13.

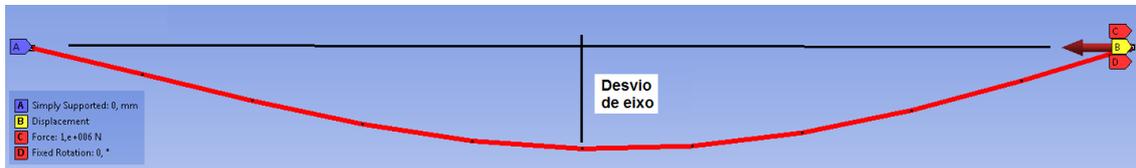


Figura 13 – Submodelo de elementos finitos da barra crítica da treliça içadora de aduelas.

As seguintes condições de contorno foram aplicadas ao submodelo:

- Foi aplicada uma força axial compressiva de 100 tf (Figura 11).
- Uma das extremidades da barra foi engastada.
- Enquanto para a outra extremidade da barra foi apenas permitida a translação na direção do eixo horizontal da barra.

A Tabela 2 lista os resultados de momento fletor, tensão de flexão, tensão axial, tensão total e de coeficiente de segurança (*FS*), referentes a cada valor de desvio de eixo da barra crítica da treliça içadora de aduelas. Ressalta-se que o coeficiente de segurança foi calculado considerando valores de esforços solicitantes coletados para o meio do vão da barra crítica da treliça.

Tabela 2 – Resultados de momento fletor, tensão de flexão, tensão axial, tensão total e de coeficiente de segurança.

Desvio de Eixo (mm)	Momento Fletor (N.m)	Tensão de Flexão (MPa)	Tensão Axial (MPa)	Tensão Total (MPa)	FS
0	1615,50	3,34	131,6	135,36	2,07
10	4076,10	8,44	131,6	141,09	1,99
20	8153,10	16,87	131,6	150,58	1,88
30	12229,00	25,31	131,6	160,07	1,78
40	16307,00	33,75	131,6	169,57	1,69
50	20385,00	42,19	131,6	179,06	1,61
60	24463,00	50,63	131,6	188,56	1,53

Sendo:

$$\sigma_{Flexão} = \frac{M \times y}{I} = \frac{M \times 0,08}{3,8653e7}; \quad \sigma_{Axial} = \sigma_{FEA} \quad e \quad \sigma_{Total} = \sigma_{Flexão} + \sigma_{Axial}$$

Tensão admissível $\sigma_{Admissível} = 279,1 \text{ MPa}$

* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.



A Figura 14 apresenta os resultados de força axial e de momento fletor atuantes na barra crítica da treliça içadora e referentes à condição de imperfeição geométrica inicial de desvio de eixo da barra de 10 mm.

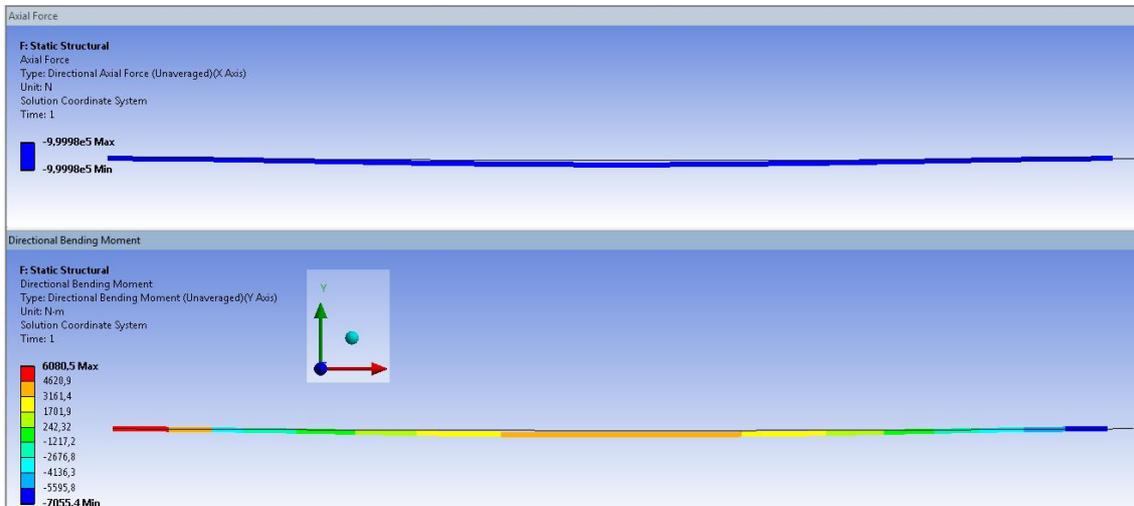


Figura 14 – Resultados de força axial e de momento fletor atuantes na barra crítica da treliça içadora de aduelas - Condição de desvio de eixo da barra de 10 mm.

A Figura 15 apresenta o gráfico de “Coeficiente de Segurança *versus* Desvio de eixo da barra” adotado para o estudo de sensibilidade a presença de imperfeições geométricas iniciais para a barra crítica da treliça içadora de aduelas.

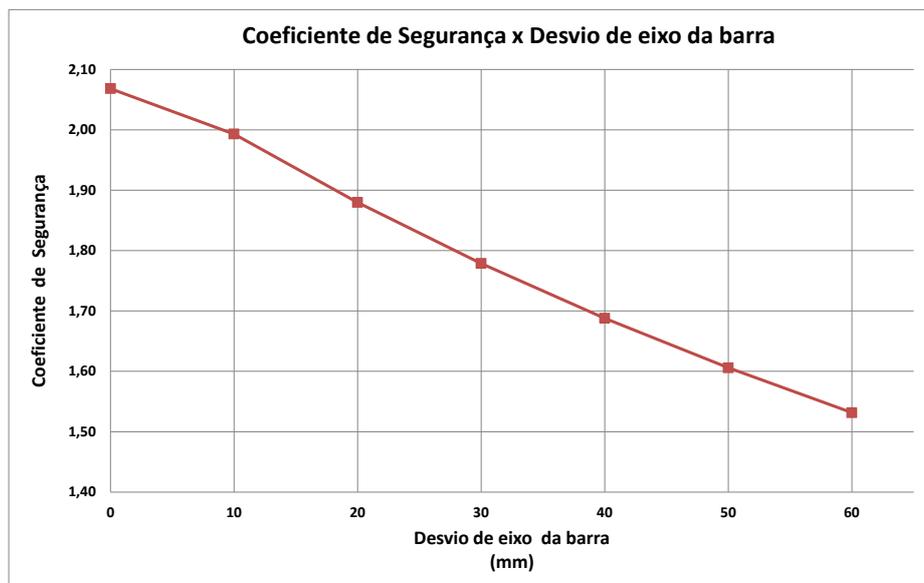


Figura 15 – Gráfico de Coeficiente de Segurança *versus* Desvio de eixo da barra.

Observando os resultados do gráfico da Figura 15, constata-se que para valores de desvio de eixo da barra superiores a 10 mm, a barra crítica da treliça içadora de aduelas não é segura contra falhas por flambagem inelástica.

4 CONCLUSÃO

Da análise de flambagem para a estrutura da treliça içadora de aduelas realizada com o módulo *Linear Buckling* do programa ANSYS, foi identificada a barra crítica da treliça para o resultado do autovalor de 3,6047. Também foi observado que essa barra crítica trabalha predominantemente a compressão e que fica submetida a uma força máxima de compressão de 100 tf.

Da verificação de flambagem global por flexão realizada para a barra crítica da treliça içadora de aduelas, constatou-se que essa barra se encontra em situação de flambagem inelástica. E na verificação de segurança da barra crítica contra falhas por flambagem inelástica foi obtido um resultado de coeficiente de segurança de valor igual a 2,12 e que é superior ao valor mínimo de 2,0.

Em relação ao estudo de sensibilidade a imperfeições geométricas iniciais para a barra crítica da treliça içadora de aduelas, constatou-se que para valores de desvio do eixo da barra superiores a 10 mm, a barra crítica da treliça içadora de aduelas falha por flambagem inelástica.

REFERÊNCIAS

- [1] ANSYS: Engineering Analysis System - Release 16, 2015.
- [2] 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.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR8400: Cálculo de equipamento para levantamento e movimentação de carga. Rio de Janeiro, ABNT, 1984.
- [4] BENAÏM, R. The Design of prestressed concrete bridges: concepts and principles. Taylor & Francis, New York, 2008.
- [5] FALZON, B., HITCHINGS, D. An Introduction to Modelling Buckling and Collapse. NAFEMS, Birniehill, East Kilbride, Glasgow, 2007.
- [6] KINDMANN, R., KRAUS, M. Steel Structures Design Using FEM. Ernest & Sohn, Berlin, Germany, 2011.
- [7] LARSEN, T. M. Plate buckling in Movable Scaffolding Systems. Langesund, Oslo, 2011. Master of Science Thesis, University of Oslo, 2011.
- [8] ÁVILA, J. A., GUIMARÃES, H. C. F. Peças Comprimidas pelos Topos, Pilares e Escoras – Flambagem. Instituto Militar de Engenharia – IMEA. Notas de aula. <http://aquarius.ime.eb.br/~moniz/resmat/CAP_IX_FLAMBAGEM.pdf>.
- [9] ASSAN, A. E. Resistências dos Materiais. Editora UNICAMP. Campinas, São Paulo, 2013.