

Avaliação da influência da espessura de almas e comprimento da barra em elementos de aço comprimidos de seção I

Bernardo de Matos Silva Melo^{1*}, Jorge Reis^{2*}, Ana Lydia Reis de Castro e Silva^{3*}, Rodrigo Barreto Caldas^{4*}, Hermes Carvalho^{5*}

**Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais*

Av. Antônio Carlos, 6627 - Escola de Engenharia - Pampulha, Belo Horizonte, 31270-901, Minas Gerais, Brasil

¹bernardomatossilva@gmail.com

²reisjorgef@gmail.com

³lydia@dees.ufmg.br

⁵caldas@dees.ufmg.br

⁴hermes@dees.ufmg.br

Resumo. Barras de aço comprimidas de seção transversal I estão presentes em sistemas estruturais como vigas, pilares, treliças e contraventamentos. Podem apresentar como modos de falha uma instabilidade global, flambagem local ou plastificação da seção. Normas técnicas como a brasileira ABNT NBR 8800:2008 e a americana ANSI/AISC 360-16 estabelecem o dimensionamento desses elementos à compressão, fazendo considerações sobre as imperfeições geométricas, as tensões residuais, a instabilidade e a flambagem local, de modo a garantir a segurança das estruturas. O objetivo desse trabalho é realizar um estudo acerca da força crítica e última de barras de seção transversal I por meio das normas ABNT NBR 8800:2008 e ANSI/AISC 360-16 e do programa computacional ABAQUS, baseado no Método dos Elemento Finitos. Para tanto, foram utilizadas barras com diferentes espessuras da alma e com comprimento variado, de modo a avaliar a influência desses parâmetros no comportamento da estrutura. Por fim chegou-se a um modelo que levou a resultados similares aos normativos, reproduzindo o comportamento de instabilidade de perfis do tipo I.

Palavras-chave: força crítica de flambagem, capacidade resistente, aço, ANSI/AISC 360-16, ABNT NBR 8800:2008

1 Introdução

Barras de aço com seção transversal do tipo I sob compressão axial podem ser utilizadas em treliças, estruturas de suporte e contraventamentos. Ao serem submetidas às tensões de compressão, essas barras estão sujeitas a problemas de instabilidade que reduzem a resistência dessas peças. Na prática, as barras de aço possuem imperfeições iniciais geométricas caracterizadas por pequenos desvios ao longo do comprimento. Essas imperfeições induzem deslocamentos laterais com a aplicação da força e influenciam na capacidade resistente, sendo um fator relevante no comportamento da barra [1]. Além das imperfeições geométricas, os perfis também possuem tensões residuais provenientes do processo de fabricação.

Dependendo das dimensões da estrutura e das condições em que está submetida, um dos possíveis modos de falha é a plastificação da seção transversal. A flambagem é um outro modo de falha presente no comportamento da barra, associado a deslocamentos localizados ou generalizados que levam a redução da capacidade, podendo ocorrer em toda a estrutura (flambagem global) ou de forma isolada em elemento específico (flambagem local).

As normas brasileira ABNT NBR 8800:2008 [2] e americana ANSI/AISC 360-16 [3] descrevem processos de cálculo com abordagens distintas para o dimensionamento de barras submetidas a compressão, fazendo considerações pertinentes desse comportamento.

2 Fundamentação teórica

2.1 Força crítica de flambagem

O estudo de flambagem elástica teve início com o matemático suíço, Leonhard Euler. Este, por meio da teoria de pilares, foi o primeiro a reconhecer que a força de compressão axial atuante em uma barra perfeitamente reta, em dado momento, provoca deslocamentos laterais, caracterizando a alteração da configuração geométrica da estrutura [4]. Contudo, a formulação proposta para o cálculo de tensão crítica não considera a presença da flambagem local e de imperfeições, sendo expressa na eq. (1).

$$N_e = \frac{p^2 EI}{KL^2} \quad (1)$$

onde: E é o módulo de elasticidade longitudinal; I é o momento de inércia associado aos eixos da seção transversal; KL é o comprimento de flambagem relativo aos eixos da seção transversal.

2.2 Força axial de compressão resistente - ABNT NBR 8800:2008

A força axial responsável pela falha é a força máxima suportada pela barra, que depende das imperfeições e das reduções associadas à flambagem global e local. Para efeito de dimensionamento, a norma brasileira ABNT NBR 8800:2008 [2] estabelece o cálculo da força axial de compressão resistente, $N_{c,Rk}$, por meio da eq. (2).

$$N_{c,Rk} = c Q A_g f_y \quad (2)$$

onde: Q é o fator de redução total relativo ao fenômeno da flambagem local; χ é o redutor da capacidade resistente, considerando os efeitos das imperfeições; A_g é a área bruta da seção transversal; f_y é a resistência ao escoamento do aço.

2.3 Força axial de compressão resistente – ANSI/AISC 360-16

A norma americana ANSI/AISC 360-16 [3] possui diretrizes similares à ABNT NBR 8800:2008 [2], uma vez que a primeira é referenciada pela brasileira, sendo a maior diferença a consideração da área efetiva devido a flambagem local, tanto para elementos da seção transversal com as duas extremidades apoiadas - AA ou com uma extremidade livre e outra apoiada - AL. A força resistente, N_{rk} , é calculada a partir da eq. (3).

$$N_{rk} = c A_e f_y \quad (3)$$

onde: χ é o coeficiente de redução; A_e é a área efetiva da seção transversal; f_y é a resistência ao escoamento do aço.

3 Análise numérica

Por meio do programa ABAQUS [5], baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF), foi desenvolvido um estudo numérico considerando a variação da espessura da alma e do comprimento no comportamento de barras de seção transversal I, submetidas à compressão. Para esse estudo, foram realizadas análises de flambagem elástica e de capacidade resistente última. No ABAQUS [5], essas análises de flambagem podem ser tratadas como perturbações lineares, obtendo-se autovalores e autovetores. Segundo Ferreira Filho [6], os primeiros são multiplicadores utilizados para calcular a força crítica e os últimos são relacionados aos modos de flambagem do perfil.

Já as análises de comportamento último podem ser realizadas por meio do método de Riks, sendo possível obter resultados considerando a não linearidade física e geométrica da estrutura. Segundo Grilo [7], o princípio de Riks é baseado no método do comprimento do arco, no qual condições de equilíbrio estático são obtidas na fase instável da estrutura. Considerou-se para o comportamento elástico do aço os valores de 200 GPa para o módulo de elasticidade longitudinal e 0,3 para o Coeficiente de Poisson. Já na definição do regime plástico do material,

foi considerado o comportamento elasto-plástico perfeito, sendo adotado o valor de 345MPa para a resistência ao escoamento do aço.

Alguns autores como Bathe [8] e Maiorana *et al.* [9] concluíram que as imperfeições iniciais geométricas do modelo não linear podem ser inseridas por meio dos menores modos de flambagem associados ao colapso da estrutura. Nesse sentido, para os modelos em que ocorreu a flambagem local da alma, foram considerados os modos local e global com amplitudes equivalentes à razão largura da alma $h/200$ e comprimento da barra $a/1000$, respectivamente. Para os casos em que a flambagem global foi o primeiro modo observado, considerou-se apenas a amplitude $a/1000$. Quanto as tensões residuais, utilizou-se as condições adotadas por Castro e Silva [4] referentes aos perfis I soldados.

3.1 Geometria do modelo numérico

Para os modelos numéricos desenvolvidos, foram consideradas variações na espessura da alma (t_w) e no comprimento a fim de avaliar a influência desses parâmetros no comportamento da estrutura. A Figura 1 apresenta as nomenclaturas adotadas para os elementos da barra de seção transversal do tipo I, enquanto a Tab.1 mostra as dimensões adotadas para cada elemento.

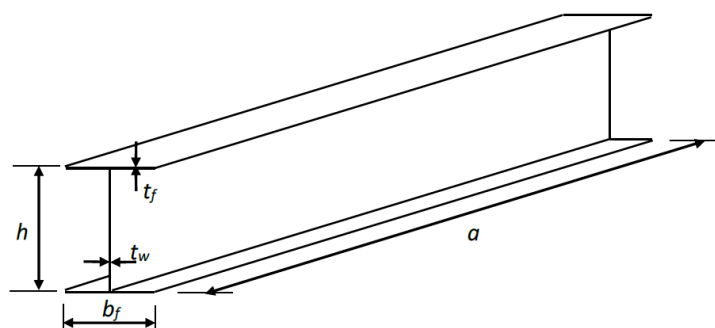


Figura 1. Nomenclatura dos elementos da seção transversal.

Tabela 1. Definição das dimensões da seção transversal consideradas no modelo.

Elementos	Valores (mm)
t_w	8 a 25
t_f	25
h	800
b_f	400
a	5000, 6000, 7500, 10000, 12000, 15000, 20000

3.2 Carregamento e condições de contorno

Em relação às condições de contorno, foram realizados testes a fim de encontrar técnicas para aplicar as restrições que melhor representam o comportamento real de barras de seção transversal I biapoiadas, submetidas à compressão. Por fim, a alma de ambas extremidades tiveram a translação na direção X e a rotação em torno do eixo longitudinal restritas (Fig. 2). Para as duas faces extremas, as mesas e o ponto central da alma foram impedidos de rotacionar na direção Z e de deslocar na direção Y, respectivamente. Além disso, o ponto central da seção transversal da alma, localizada no meio do vão, foi restrito na direção longitudinal, evitando o movimento de corpo rígido nesse eixo.

Em relação à força, tanto na análise linear de flambagem elástica, quanto na análise não linear, foi aplicada carga concentrada no centro de gravidade de ambas seções transversais extremas, sendo distribuída uniformemente por meio da interação *coupling* (Fig. 2). No entanto, o valor da força aplicada nas duas análises foi distinto, sendo unitário na análise de flambagem elástica e equivalente à força crítica na análise de comportamento último.

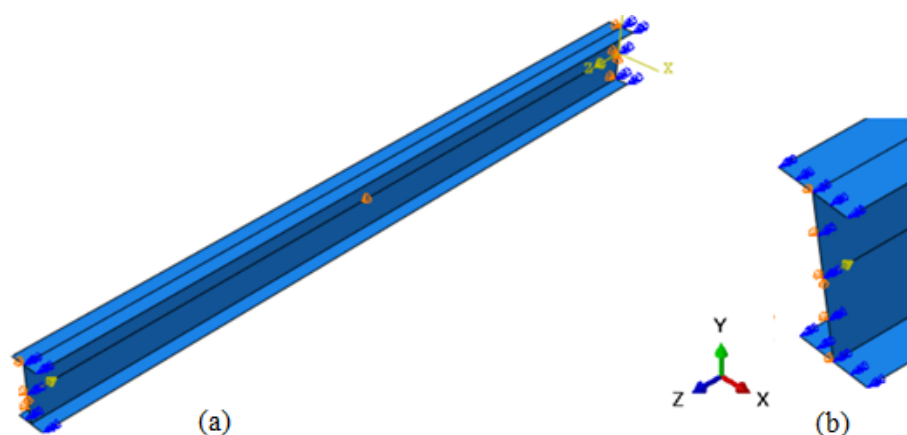


Figura 2. a) Condições de contorno e aplicação da força na barra b) Detalhe das condições de contorno.

3.3 Malha

Como o perfil é formado por elementos cujas espessuras são muito menores que as demais dimensões, foram considerados elementos de casca para constituir a malha. Segundo Truong *et al.* [10], esses elementos possuem seis graus de liberdade por nó, sendo três rotações e três translações. Com o intuito de adotar uma dimensão que conduza a resultados satisfatórios e ao mesmo tempo tenha um custo computacional razoável, foi desenvolvido um estudo de sensibilidade de malha. Ao final desse estudo, adotou-se o elemento de casca quadrilateral S4, constituído por 4 nós e 4 pontos de integração, com lados de 100 mm.

3.4 Validação

O modelo numérico elaborado foi validado em duas etapas. Primeiramente, o comportamento foi verificado para a análise de flambagem elástica por meio dos valores de força crítica (N_{cr}) calculados a partir da equação de flambagem de Euler, conforme Tab. 2. Posteriormente, os valores de força axial de compressão resistente (N_u) obtidos no modelo de análise não linear foram comparados aos resultados obtidos por meio dos procedimentos das normas ABNT NBR 8800:2008 [2] e ANSI/AISC 360-16 [3], como representado na Tab. 3. Para perfis com espessura de alma superior ou igual a 10 mm, foi constatada predominância de flambagem global, sendo a diferença máxima de 0,8% para a força crítica de Euler, 2,4% em comparação com a força axial de compressão resistente dada pela norma brasileira e 8,4% em relação a norma americana. No entanto, os perfis com espessura inferior a 10 mm tiveram influência da flambagem local, apresentando grandes diferenças se comparado a força crítica de Euler, que não prevê interferência desse fenômeno. A Figura 3 apresenta os dois modos de flambagem observados nos modelos.

Tabela 2. Validação do modelo para a análise linear de flambagem para comprimento de 10.000 mm.

t_w (mm)	N_{cr} ABAQUS (kN)	N_{cr} Euler (kN)	Diferença N_{cr} (%)
8	3465,0	5264,4	51,9
9	4493,1	5264,7	17,2
11	5223,5	5265,5	0,8
13	5232,5	5266,6	0,7
15	5240,1	5268,1	0,5
17	5246,8	5270,1	0,4
19	5253,0	5272,5	0,4
21	5259,0	5275,6	0,3
23	5265,1	5279,3	0,3
25	5271,5	5283,7	0,2

Tabela 3. Validação do modelo para a análise de capacidade resistente última com comprimento de 10.000 mm.

t_w (mm)	N_u - ABAQUS (kN)	N_u - ABNT NBR 8800:2008 (kN)	N_u - ANSI/AISC 360-16 (kN)	Diferença ABNT NBR 8800:2008 (%)	Diferença ANSI/AISC 360-16 (%)
8	4379.3	4202.4	4043.9	-4.0	-7.7
9	4436.4	4248.4	4120.4	-4.2	-7.1
11	4407.2	4342.1	4292.5	-1.5	-2.6
13	4429.1	4431.7	4473.8	0.1	1.0
15	4460.8	4510.5	4645.4	1.1	4.1
17	4487.3	4573.1	4788.4	1.9	6.7
19	4508.9	4615.7	4879.9	2.4	8.2
21	4524.9	4626.7	4904.3	2.2	8.4
23	4532.0	4629.9	4854.3	2.2	7.1
25	4551.0	4633.8	4713.0	1.8	3.6

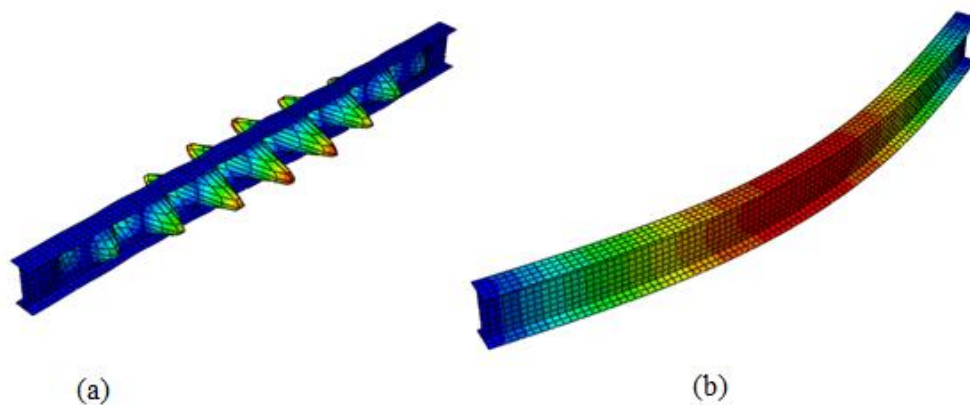


Figura 3. Modos de flambagem local para barra com comprimento de 10.000 mm: a) modo de flambagem local, $t_w = 9$ mm b) modo de flambagem global, $t_w = 10$ mm

4 Resultados

A partir dos resultados obtidos, identifica-se que a espessura da alma e o comprimento da barra são fatores preponderantes para a ocorrência da flambagem local ou global. Analisando as barras de comprimento equivalente a 10.000 mm, observou-se que todos os modelos com espessura da alma maior que 9 mm apresentaram flambagem global.

Foram elaboradas curvas para avaliar a influência do comprimento nos valores de força crítica em função da relação largura da alma (h) sobre espessura desse elemento (t_w), conforme Fig. 4. A norma brasileira especifica uma razão $(b/t)_{lim}$, que representa o limite para a ocorrência de flambagem local do elemento, resultando em um valor de 35,875 para o aço utilizado nesse trabalho. Para os perfis com comprimentos a partir de 12.000 mm, todos os modelos apresentaram flambagem global pura, independente da relação b/t . A medida que o comprimento diminuiu, observou-se o efeito da flambagem local na maioria dos perfis, incluindo alguns de maior espessura.

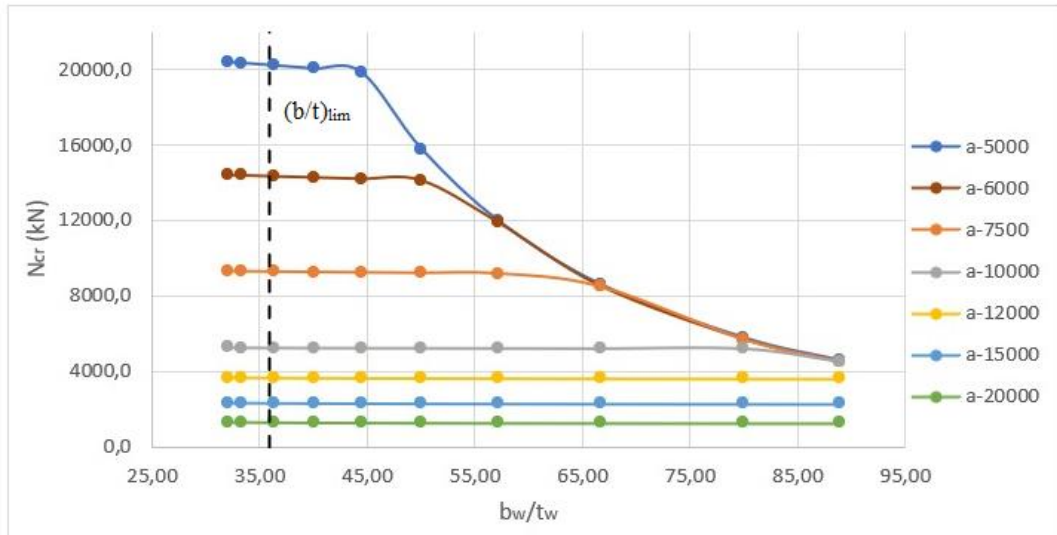


Figura 4. Influência do comprimento no comportamento crítico dos modelos.

A Figura 5 apresenta o comportamento de alguns modelos referentes à razão força última (N_u)/força crítica (N_{cr}) em função da relação deslocamento lateral (U_1)/espessura da alma (t_w) para o comprimento de 10.000 mm. Foi observado que para uma mesma relação de força, as barras de menor espessura com comportamento de flambagem global alcançaram maiores deslocamentos laterais, uma vez que quanto maior a espessura da alma, maior a rigidez da estrutura em relação a esses deslocamentos. Além disso, é possível constatar que todos os modelos com flambagem global atingiram um pico semelhante de razão N_u/N_{cr} , de aproximadamente 0,85, porém, para relações U_1/t_w distintas. O mesmo comportamento não acontece para os perfis com ocorrência de flambagem local, pois estes apresentam força crítica menor à medida que a espessura da alma diminui, tornando-se mais suscetíveis a reduções provocadas por esse efeito.

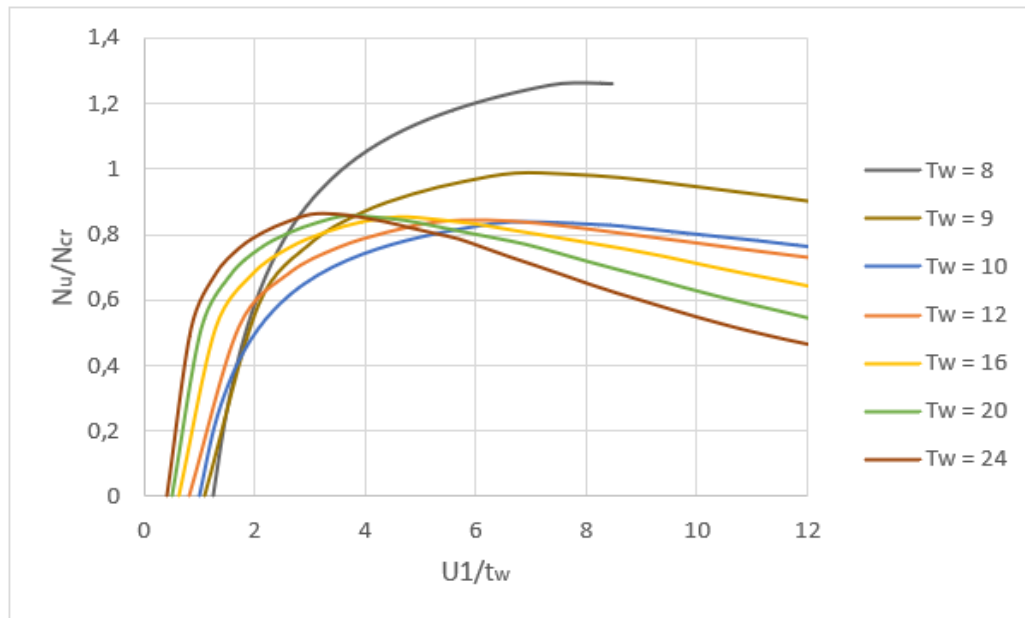


Figura 5. Gráfico relação força/força crítica x deslocamento/espessura para barras de comprimento de 10000 mm

5 Conclusão

A partir dos resultados obtidos, conclui-se que o modelo numérico elaborado no programa ABAQUS [5] conduz a resultados satisfatórios para a faixa de estudo, sendo observado predominantemente modo de flambagem local para os menores valores de espessura da alma ou comprimento, enquanto que para os demais valores desses parâmetros foi constatada a ocorrência apenas de flambagem global.

No caso de perfis mais longos, verificou-se a predominância do modo de flambagem global, independente da relação b/t . Ao analisar as barras com os menores comprimentos, foram encontrados os maiores valores de força crítica, os quais reduziram em função do efeito da flambagem local.

Os modelos com ocorrência de flambagem global apresentaram para a força axial de compressão resistente um valor próximo a 85% da força crítica, sendo que após esse pico, as barras continuaram deslocando lateralmente com decréscimo da força. Para os casos em que a flambagem local ocorreu, observou-se valores de força crítica inferiores aos da força resistente.

Estudos complementares podem ser desenvolvidos para compreender a abrangência do modelo e a influência de outros parâmetros da seção transversal, como a altura da alma e as larguras e espessuras das mesas.

Agradecimentos. Os autores agradecem ao apoio financeiro em forma de fomento à pesquisa concedido pela CAPES, FAPEMIG, CNPq e à UFMG.

Declaração de autoria. Os autores confirmam que são os únicos responsáveis pela autoria deste trabalho, e que todo o material aqui incluído como parte do presente trabalho é propriedade (e autoria) dos autores, ou tem a permissão dos proprietários a serem incluídos aqui.

Referências

- [1] T.T.Nguyen; T.M.Chan; J.T.Mottram. "Influence of boundary conditions and geometric imperfections on lateral-torsional buckling resistance of a pultruded FRP I-beam by FEA". *Composite Structures*, vol. 100, pp.233-242, 2013.
- [2] ABNT NBR 8800:2008. Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, Brasil, 2008.
- [3] ANSI/AISC 360-16. Specification for structural steel buildings. American Institute of Steel Construction. Chicago, EUA, 2016.
- [4] A.L.R. Castro e Silva. "Análise numérica não-linear da flambagem local de perfis de aço estrutural submetidos à compressão uniaxial". 2006. Tese (doutorado), Universidade Federal de Minas Gerais - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas, Belo Horizonte, 2006.
- [5] SIMULIA. Abaqus/CAE User's Guide. 2014.
- [6] J. O. F. Filho. "Estudo numérico sobre o comportamento de vigas de aço com almas esbeltas enrijecidas longitudinalmente". Dissertação (mestrado), Universidade Federal de Minas Gerais - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas, Belo Horizonte, 2019.
- [7] L.F.Grilo. "Formulação para determinação da força cortante resistente de flambagem do montante de alma em vigas celulares de aço". Tese (doutorado), Universidade Federal de Minas Gerais - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas, Belo Horizonte, 2018.
- [8] K. Bathe. "Finite element procedures". Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1996.
- [9] E. Maiorana.; C. Pellegrino; C. Modena. "Imperfections in steel girder webs with and without perforations under patch loading". *Journal of Constructional Steel Research*, v.65, p.1121-1129, 2009.
- [10] V. H. Truong; G. Papazafeiropoulos; V.T. Pham; Q.V. Vu. "Effect of multiple longitudinal stiffeners on ultimate strength of steel plate girders". *Structures*, vol. 22, pp. 366-382, 2019.