

Estudo numérico de vigas casteladas em flexão pura quanto à interação entre os modos de flambagem global e local

Christovam M. Weidlich¹, Daniel C.T. Cardoso¹, Elisa D. Sotelino¹

¹*Dep. de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
Marquês de São Vicente St., Nº 225, Gávea, 22451-900, Rio de Janeiro/RJ, Brasil
weidlich@aluno.puc-rio.br, dctcardoso@puc-rio.br, sotelino@puc-rio.br*

Resumo. Esse trabalho investiga a interação entre os modos de flambagem lateral com torção (FLT) e flambagem local da seção “tê” comprimida (FT) de vigas casteladas por meio de análises numéricas. São realizadas análises lineares de flambagem elástica e não lineares de material com imperfeições geométricas iniciais pelo método dos elementos finitos (MEF). São modeladas 12 vigas casteladas com diferentes especificações geométricas comerciais e variando em suas tensões de escoamento dos aços. Os modelos das vigas são biapoiados com as mesas livres sob flexão pura e as técnicas de modelagem são validadas com teste experimental de referência. Assim, são computados os momentos críticos de flambagem global e local, através das análises de autovalor, bem como as correspondentes esbeltezes relativas. A carga última resistente é obtida por meio das análises não lineares e comparada com a previsão da normatização para vigas casteladas quanto à flexão. Tendo em vista os resultados obtidos, é possível notar que quando o modo de falha predominante é o de plastificação, a normatização consegue realizar uma boa aproximação do momento último resistente. Entretanto, quando ocorre a interação entre os modos, e/ou o modo local é o dominante, a diferença entre a resistência prevista e as obtidas nas análises numéricas é acentuada, chegando até a 40%. Foi possível constatar a queda na capacidade resistente das vigas em função da interação entre os modos, de forma que quanto maior a interação, maior a queda de resistência. Vigas com FLT como modo de falha dominante apresentaram diferenças inferiores a 10%, porém a normatização sobrestima suas resistências.

Keywords: Vigas casteladas, interação, flambagem global, flambagem local, elementos finitos.

1 Introdução

O processo de fabricação de vigas casteladas, o qual foi patenteado em 1939 por Boyd [1], consiste na criação de um novo elemento estrutural a partir de um perfil I convencional por meio separação e união. Desse modo, é realizado um corte na alma em determinado padrão, separadas as duas metades, eliminadas as sobras nas extremidades e novamente unidas por meio de solda criando uma nova seção com aproximadamente o dobro de sua altura original. Ao realizar esse processo, são criados os furos, a região do *webpost* e a seção “tê”, localizada acima e abaixo dos furos. O corte em padrão hexagonal configura as vigas casteladas e o corte circular, as celulares. Essa solução aumenta a rigidez do elemento estrutural sem o acréscimo de material e possibilita a integração de técnicas modernas de construção ao permitir a passagem de dutos e tubulações entre suas aberturas, o que proporciona reduzir a altura entre pavimentos e vencer maiores vãos. Dessa forma, as vigas casteladas constituíram uma solução eficiente e amplamente utilizada nas últimas décadas, encorajadas principalmente pela automação das técnicas de fabricação.

A figura 1. apresenta a geometria das vigas casteladas do tipo Litzka. A principal característica desse tipo de vigas casteladas é a relação entre suas grandezas geométricas: A razão entre a altura total (H) e a altura do furo (h) é igual a 1,5; a distância entre os furos é equivalente à altura total (H); e o ângulo do furo é igual a $63,5^\circ$.

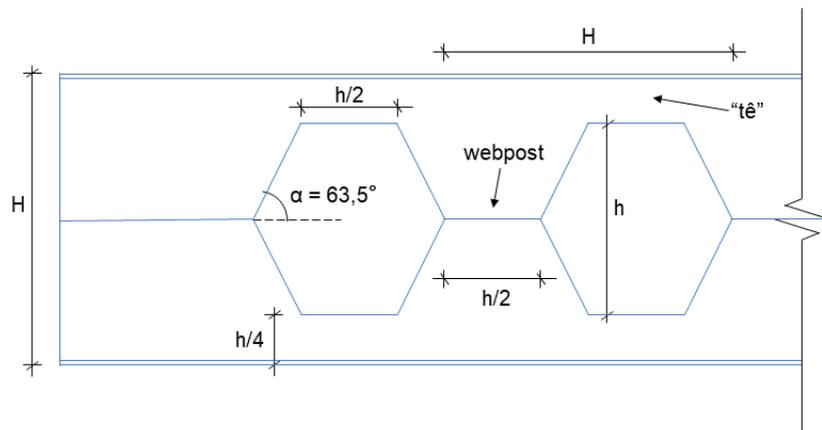


Figura 1. Geometria da viga castelada do tipo Litzka

Entretanto, ao modificar o perfil original, criando a viga castelada, novos mecanismos surgem no seu comportamento estrutural, principalmente ligados à sua estabilidade devido à maior esbelteza. Diversos estudos foram realizados para entendimento desses novos mecanismos, contudo a interação entre os modos de flambagem foi pouco abordada, tendo em vista os poucos trabalhos que tratam do tema. Além disso, os guias de dimensionamento e normatizações abordam os modos de falha com pouca clareza quanto à consideração da possível interação.

Sonck e Belis [2] investigaram o modo de falha de flambagem lateral com torção (FLT) em vigas casteladas sob ação de momento constante por meio de testes experimentais e simulações numéricas por elementos finitos levando em consideração tensões residuais e verificaram as expressões para estimativa de suas cargas críticas e seu dimensionamento. Estudos de Ellobody [3] consideraram a interação entre os modos de flambagem lateral com torção e flambagem distorcional, demonstrando que quanto maior a interação, menor a capacidade resistente da viga castelada. Oliveira et al. [4] também evidenciaram a incidência da flambagem local do “tê” comprimido (FT), principalmente em vigas formadas por aços de elevada resistência, sugerindo equações explícitas para estimativa da sua tensão crítica de flambagem.

A interação, ou seja, o acoplamento entre os modos de flambagem é observado, conforme tratam Chilver [5] e Budiansky [6], quando os momentos críticos coincidem ou apresentam proximidade. De modo geral, as estruturas que exibem esse fenômeno possuem grande sensibilidade às imperfeições podendo exibir cargas de pico inferiores

até a metade de sua carga crítica, conforme informam os trabalhos de Goltermann e Møllmann [7] e Wade e Gardner [8]. Portanto, sistemas estruturais constituídos por paredes finas com cargas críticas coincidentes tendem a apresentar grande sensibilidade às imperfeições e acoplamento dos modos [9].

Assim sendo, esse trabalho busca investigar a interação entre os modos de flambagem global (lateral com torção - FLT) e flambagem local do “tê” comprimido (FT), sua influência na capacidade resistente de vigas casteladas biapoiadas sob flexão pura e verificar a adequação da normatização atual, o Design Guide 31 [10]

2 Modelagem numérica

2.1 Modelo de elementos finitos

Baseando-se no catálogo de vigas casteladas do fabricante, foram gerados 12 modelos de vigas casteladas do tipo Litzka no programa de elementos finitos ABAQUS por meio de um *script* em linguagem de programação *Python*. Os parâmetros geométricos e de material dos modelos são descritos abaixo na tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros de material e geométricos dos modelos

Modelo	H [mm]	tf [mm]	tw [mm]	bf [mm]	bw [mm]	L [mm]	Fy [MPa]
1	304.50	11.00	7.20	203.00	50.75	3349.50	345
2	376.50	5.30	4.80	101.00	62.75	4141.50	345
3	403.50	22.10	13.50	259.00	67.25	4438.50	345
4	462.00	15.40	9.90	305.00	77.00	5082.00	345
5	535.50	18.30	10.50	255.00	89.25	4819.50	345
6	786.00	10.90	9.00	207.00	131.00	7074.00	345
7	228.00	7.10	5.80	152.00	38.00	1368.00	345
8	448.50	9.50	11.00	306.00	74.75	4933.50	690
9	448.50	6.90	11.00	306.00	74.75	4036.50	690
10	454.50	7.10	13.10	308.00	75.75	4090.50	460
11	462.00	8.40	9.90	305.00	77.00	3234.00	965
12	675.00	5.70	7.60	152.00	112.50	4050.00	1210

A modelagem de elementos finitos foi constituída por elementos de casca com funções de interpolação quadráticas a fim de apresentarem melhor aproximação dos resultados. A malha de elementos foi constituída por elementos quadrilaterais do tipo S8R5 com 8 nós e 5 graus de liberdade por nó com integração reduzida. Nas regiões ao lado dos furos e suas extremidades, foram inseridos elementos triangulares do tipo STRI65 com 6 nós e 5 graus de liberdade por nó, também com integração reduzida. Os elementos triangulares realizam uma transição na malha e possuem melhor adequação na geometria tendo em vista as possíveis concentrações de tensões nas imediações dos furos. A figura 2. ilustra os elementos, bem como a malha típica e o sistema de referência.

As condições de contorno consistiram em apoios do segundo gênero com deslocamento axial livre em uma das extremidades nos pontos médios da seção, configurando a viga simplesmente apoiada. Apenas a rotação em torno de “z” foi restringida, como ilustra a figura 2. Quanto ao carregamento, para simular a situação de flexão pura, foram utilizadas restrições MPC (*Multi Points Constraints*) do tipo mestre-escravo as quais relacionaram os nós das almas nas extremidades com o nó central, tornando-os numericamente equivalentes. Dessa maneira, ao aplicar o momento concentrado no ponto médio (mestre) ele é distribuído nos nós ao longo da alma garantindo também que as mesas estejam livres para rotacionar, evitando tensões devido às restrições e considerando o empenamento da seção. A seguir, a figura 2. exibe a malha de elementos finitos e as condições de contorno empregada nos modelos.

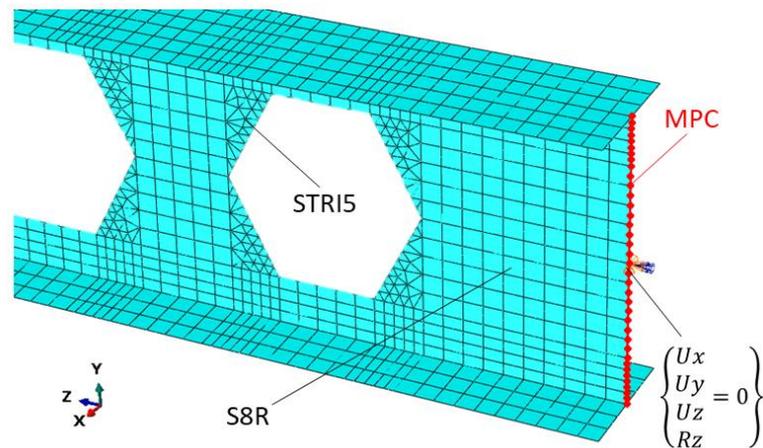


Figura 2. Malha e condições de contorno dos modelos de elementos finitos

Foi realizado um estudo de convergência de malha com o intuito de definir a densidade generalizada dos elementos de forma que os resultados entre as malhas apresentassem diferença de resultados inferior a 1%.

Quanto às análises pelo método dos elementos finitos, primeiramente, foram realizadas análises lineares de flambagem elástica. Dessa forma, são obtidos os momentos críticos global e local, assim como os respectivos modos de flambagem para cada um dos modelos. Em seguida, foram realizadas análises não lineares de material com imperfeições geométricas iniciais. As imperfeições são geradas a partir dos modos de flambagem das análises lineares com amplitudes iguais a $L/1000$ [2] para global e $H/500$ [11] para local. O modelo constitutivo do material foi elástico-perfeitamente plástico e tensões residuais não foram consideradas.

As análises não lineares foram realizadas através do método de Riks modificado com passos adaptativos sendo necessário, portanto, definir os comprimentos de arco mínimo e máximo, assim como o número de incrementos. Em ambas extremidades foram considerados elementos elásticos lineares nas fileiras dos primeiros 5 elementos da seção para que a plastificação nas regiões dos apoios não interferisse nos resultados e também para que as análises não fossem interrompidas precocemente.

2.2 Validação

Com a finalidade de validar as técnicas de modelagem empregadas nos modelos anteriormente descritas, foi tomado como referência o trabalho de Sonck e Belis [2]. Assim, as condições de contorno e carregamento foram reproduzidas conforme a configuração dos ensaios experimentais dos autores e as técnicas de modelagem seguindo as especificações informadas em 2.1. Os testes consistiram em vigas casteladas simplesmente apoiadas com restrições ao deslocamento fora do plano nas mesas das extremidades e sujeitas a cargas pontuais verticais para avaliar o comportamento de flambagem lateral com torção (FLT).

Portanto, foi selecionada a viga “CS1_L3” a qual possui comprimento destravado igual a 3150 mm com 15 furos e tendo como perfil de origem o “IPE160”. A tensão de escoamento do aço foi considerada equivalente a 345 MPa por ser o valor médio medido pelos autores nos elementos da viga (alma e mesas). A altura da seção (H) foi de 220 mm, espessuras da alma (tw) e mesa (tf) de 5,5 mm e 7,3 mm, respectivamente. Demais informações se encontram disponíveis no trabalho original [2].

Assim sendo, foram realizadas as análises lineares para obtenção das cargas críticas e os correspondentes modos de flambagem. Foram inseridas imperfeições geométricas globais com amplitude $L/1000$ para as análises não lineares, de acordo com a metodologia e configurações anteriormente descritas. A seguir, a figura 3. exibe o resultado da análise não linear referente ao modelo de validação, bem como as condições de contorno inseridas.

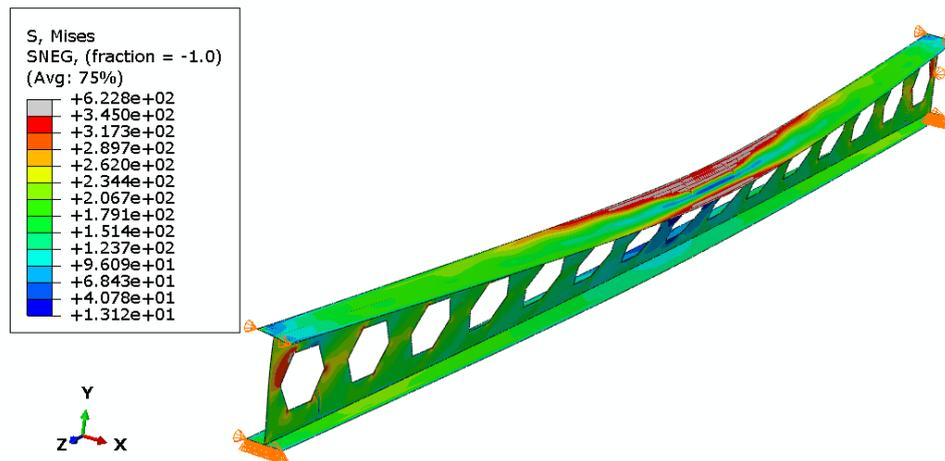


Figura 3. Resultado da análise não linear para a validação

A carga resistente constatada pelos autores nos experimentos foi equivalente a 25,92 kN e a obtida pela modelagem numérica desse trabalho de 25,44. Portanto, a diferença entre os valores foi de 1,9%, sendo assim considerada a adequação e validação das técnicas de modelagem do presente trabalho. A diferença relativa é calculada com o valor de referência obtido pelos autores no teste experimental e seus valores são informados na tabela 2.

Tabela 2. Validação

	F [kN]	dif.
Sonck e Belis [2], experimento	25,92	-
Sonck e Belis [2], modelagem	24,29	6,7%
Trabalho atual	25,44	1,9%

3 Resultados e discussão

3.1 Resultados das análises de elementos finitos

A partir das análises de autovalor, foram obtidos os momentos críticos global ($M_{cr,g}$) e local ($M_{cr,l}$) e os respectivos modos de flambagem. O momento de plastificação (M_p) foi calculado por meio dos princípios de resistência dos materiais considerando a plastificação total da seção com o furo. Portanto, é possível determinar as esbeltezes relativas global (λ_g) e local (λ_l), as quais são definidas pela Eq. 1.

$$\lambda_{g,l} = \sqrt{M_p/M_{cr,g,l}} \quad (1)$$

Com as análises não lineares de material com imperfeições globais e locais, foram obtidos os momentos resistentes de todos os modelos, ou seja, seu momento último (M_u) e a resposta do incremento de carga em função do deslocamento. Foi possível capturar o pico de carregamento em todas as vigas com sucesso, entretanto para cada modelo foi necessário determinar os parâmetros necessários das análises, tais como: comprimentos de arcos e número de incrementos. O parâmetro LPF (*Load Proportionality Factor*) corresponde ao fator de proporcionalidade de carga em relação ao momento aplicado (momento crítico). O LPF nas análises não chegou a atingir o valor de 1 em função das imperfeições impostas, as quais ocasionaram em uma redução na capacidade de carga. A seguir, na figura 4. é apresentado o resultado não linear do modelo 5 o qual possui modo de falha dominante de FLT, para fins de exemplificação. O deslocamento “Ux” é o deslocamento fora do plano medido no

ponto médio da mesa superior no centro do vão. As áreas em cinza indicam que as tensões de Von Mises são superiores à tensão de escoamento. Os valores dos momentos críticos, esbeltezes e momento último são exibidos na tabela 3.

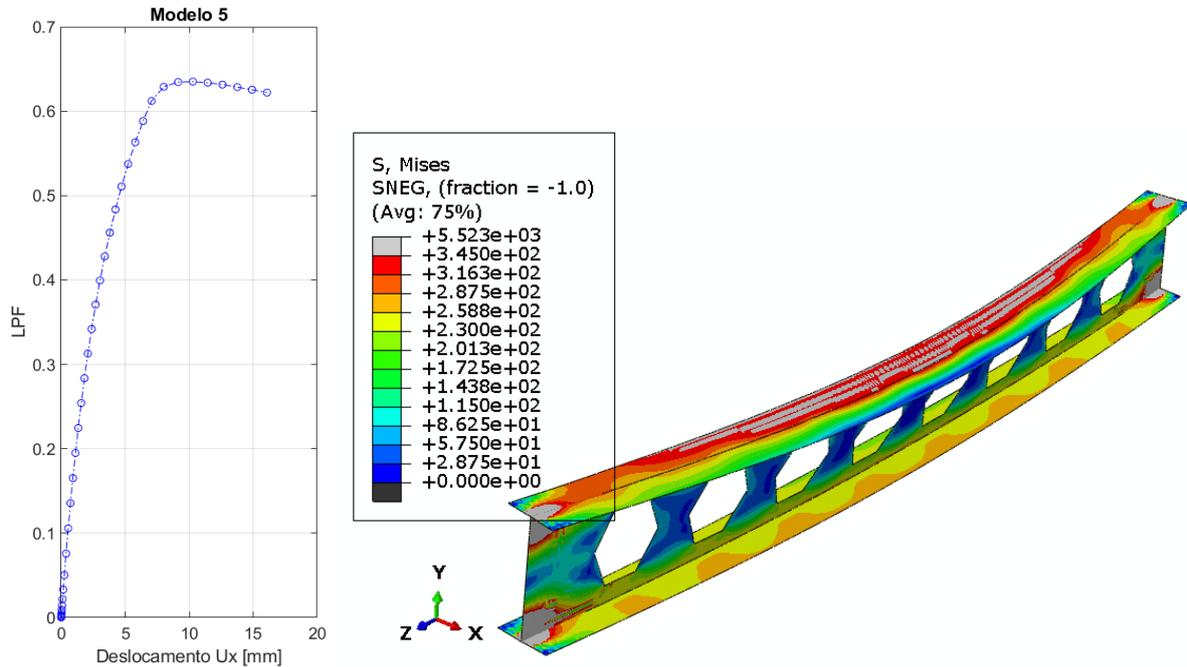


Figura 4. Resultado da análise não linear do modelo 5

3.2 Comparação com o Design Guide 31

Os resultados de momento último (M_u) das análises de elementos finitos foram comparados com a previsão do momento nominal da capacidade de carga de vigas casteladas quanto à flexão do Design Guide 31 [10], ($M_{n,DG}$). O guia de dimensionamento, o qual está de acordo com a normatização norte americana *ANSI/AISC 360-16* [12], estabelece que o dimensionamento quanto à flexão segue as especificações do capítulo “F” da normatização e ainda informa que as propriedades da seção sem o furo podem ser utilizadas para a verificação de FLT. A seguir, na tabela 3., são apresentados os resultados das análises numéricas e a comparação com a previsão do Design Guide 31. A diferença foi calculada em relação ao M_u e os momentos encontram-se todos em Nmm.

Tabela 3. Resultados e comparação

Modelo	M_p	$M_{cr,g}$	$M_{cr,l}$	λ_g	λ_l	M_u	$M_{n,DG}$	dif.
1	2.50E+08	4.43E+08	8.83E+08	0.75	0.53	2.31E+08	2.42E+08	4.7%
2	9.79E+07	2.44E+07	2.45E+08	2.00	0.63	2.29E+07	2.39E+07	4.2%
3	8.19E+08	1.55E+09	7.02E+09	0.73	0.34	7.94E+08	8.13E+08	2.3%
4	8.01E+08	1.37E+09	2.43E+09	0.77	0.57	7.31E+08	7.67E+08	5.0%
5	9.43E+08	1.27E+09	4.93E+09	0.86	0.44	8.04E+08	8.61E+08	7.1%
6	8.44E+08	2.86E+08	1.90E+09	1.72	0.67	2.62E+08	2.81E+08	7.4%
7	9.36E+07	4.65E+08	2.71E+08	0.45	0.59	9.44E+07	9.03E+07	4.4%
8	1.06E+09	8.64E+08	8.15E+08	1.11	1.14	6.66E+08	7.38E+08	10.7%
9	8.32E+08	9.19E+08	4.32E+08	0.95	1.39	4.48E+08	2.67E+08	40.5%
10	6.04E+08	9.78E+08	5.37E+08	0.79	1.06	4.38E+08	3.27E+08	25.4%
11	1.37E+09	1.75E+09	6.01E+08	0.88	1.51	7.69E+08	4.40E+08	42.7%
12	1.25E+09	1.54E+08	5.80E+08	2.85	1.47	1.57E+08	1.28E+08	17.9%

4 Conclusões

Tendo em vista os resultados obtidos por meio das análises de elementos finitos de vigas casteladas biapoiadas sob flexão pura em comparação com a previsão seguindo os procedimentos das normatizações para esses elementos estruturais quanto à flexão, é possível realizar as seguintes conclusões.

As vigas casteladas que apresentaram esbeltez relativa local (λ_l) maior que 1 (modelos 8 a 12), demonstraram modo de falha correspondente à interação entre os modos de FLT e FT. É possível constatar uma grande queda na capacidade resistente desses modelos, sendo alguns valores de M_u bem inferiores ao M_{cr} , demonstrando sua sensibilidade às imperfeições. Vigas com aços de elevadas tensões de escoamento (maior que 460 MPa) tendem a apresentar esse comportamento. O Design Guide 31 apresenta uma maior diferença nesses casos em que o modo de falha de FT torna-se relevante, como observado no modelo 11 com diferença de 42,7% em relação ao M_u .

Nos modelos em que o momento último (M_u) se aproxima do momento de plastificação (M_p), modelos 1, 3, 4, 5 e 7, ou seja, plastificação como modo de falha dominante, a previsão do Design Guide 31 demonstrou estar em boa concordância, com diferenças inferiores a 7%.

Quanto às vigas casteladas que exibem elevada esbeltez relativa global (λ_g), maior que 1,5, e esbeltez relativa local (λ_l) menor que 1, modelos 2 e 6, os quais possuem modo de falha de flambagem lateral com torção (FLT) dominante, o Design Guide 31 apresenta diferença inferior a 10% quando comparado com o M_u . Porém, a normatização sobrestima sua resistência, talvez em virtude da utilização das propriedades da seção sem considerar o furo para essa verificação.

Reconhecimentos. O primeiro autor desse trabalho gostaria de agradecer ao Sr. Felipe C.T.T. Souza pelo apoio e também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico (CNPq) pelo financiamento.

Authorship statement. The authors hereby confirm that they are the sole liable persons responsible for the authorship of this work, and that all material that has been herein included as part of the present paper is either the property (and authorship) of the authors, or has the permission of the owners to be included here.

Referências

- [1] BOYD, G.M. Patent: **Improvements in Built-up Structural Members** - Geoffrey Murray Boyd. GB498281. 4 jan. 1939, United Kingdom, UK.
- [2] SONCK, D.; BELIS, J. Lateral-torsional buckling resistance of castellated beams. **Journal of Structural Engineering (United States)**, v. 143, n. 3, p. 1–9, 2017.
- [3] ELLOBODY, E. Interaction of buckling modes in castellated steel beams. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 67, n. 5, p. 814–825, 2011.
- [4] DE OLIVEIRA, J. P.; CARDOSO, D. C. T.; SOTELINO, E. D. Elastic flexural local buckling of Litzka castellated beams: Explicit equations and FE parametric study. **Engineering Structures**, v. 186, n. November 2018, p. 436–445, 2019.
- [5] CHILVER, A. H. Coupled modes of elastic buckling. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, v. 15, n. 1, p. 15–28, 1967.
- [6] BUDIANSKY, B. Theory of buckling and post-buckling behavior of elastic structures. In: **Advances in applied mechanics**. Elsevier, 1974. p. 1–65.
- [7] GOLTERMANN, P.; MÖLLMANN, H. Interactive buckling in thin-walled beams-II. Applications. **International Journal of Solids and Structures**, v. 25, n. 7, p. 729–749, 1989.
- [8] WADEE, M. A.; GARDNER, L. Cellular buckling from mode interaction in I-beams under uniform bending. **Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 468, n. 2137, p. 245–268, 2012.
- [9] BAŽANT, Z. P.; CEDOLIN, L. **Stability of Structures: Elastic, Inelastic, Fracture and Damage Theories**. Singapore: World Scientific Publishing Company, 2010. 1011 p. ISBN 978-9814317030.
- [10] FARES, S. S.; COULSON, J.; DINEHART, D. W. “**Steel Design Guide 31 - Castellated and Cellular Beam Design**”, Am. Inst. Steel Constr., 2016
- [11] LINHARES, D. A. **Mapping of Failure Modes and Resistance of Castellated Beams under Flexure**. 2018. Dissertação (Mestrado pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.
- [12] AISC, “**ANSI / AISC 360-16, Specification for Structural Steel Buildings**”, Am. Inst. Steel Constr., p. 676, 2016.