

# Formulação do coeficiente de flambagem local da seção completa para perfis formados a frio do tipo Rack

Bianca Vieira Ávila<sup>1\*</sup>, Bernardo de Matos Silva Melo<sup>2\*</sup>, Jorge Fernando Reis<sup>3\*</sup>, Laura Araujo Nogueira<sup>4\*</sup>, Hermes Carvalho<sup>5\*</sup>

*\*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*

*<sup>1</sup>biancavieiraavila@gmail.com*

*<sup>2</sup>bernardodematossilva@gmail.com*

*<sup>3</sup>reisjorgef@gmail.com*

*<sup>4</sup>laura.nogueira2@hotmail.com*

*<sup>5</sup>hermes@dees.ufmg.br*

**Resumo.** A grande flexibilidade de fabricação e montagem atribuída aos Perfis Formados a Frio (PFF's) possibilita a composição de uma variedade de seções transversais, o que facilita seu emprego em diversas aplicações na construção civil. Devido a sua concepção esbelta, os PFF's tornam-se mais leves e econômicos, porém, essa característica torna o elemento susceptível à instabilidade e redução gradativa de sua rigidez. O dimensionamento desses perfis é descrito na ABNT NBR 14762:2010, sendo que um dos procedimentos de cálculo adotado é o Método da Seção Efetiva (MSE), que considera a flambagem local por meio de propriedades geométricas efetivas da seção transversal completa das barras. Na formulação proposta por esta norma brasileira, o perfil Rack é considerado apenas com abas retas. Nesse trabalho, apresenta-se um estudo para a obtenção da formulação do coeficiente de flambagem local que também aborde o perfil Rack com abas inclinadas submetido à compressão uniforme. Para isso, uma simulação numérica e paramétrica do perfil em questão foi desenvolvida por meio do software de elementos finitos ABAQUS, de forma a determinar a tensão crítica de flambagem local. A partir da análise numérica, foi também realizado um estudo comparativo do perfil Rack consoante à norma brasileira, de modo a verificar a consistência da aplicação desta formulação ao perfil Rack.

**Palavras-Chaves:** perfis formados a frio, perfil Rack, método da seção efetiva, coeficiente de flambagem local.

## 1 Introdução

Perfis de aço formados a frio apresentam características como elevada relação resistência-peso específico, ampla versatilidade e variabilidade na concepção de seções transversais, fácil manuseio e transporte, características estas que propiciam uma montagem ágil quando comparada a outros sistemas estruturais. No entanto, decorrente das pequenas espessuras adotadas, os elementos estruturais formados a frio apresentam tendência de desenvolverem efeitos de instabilidade local, isto é, a flambagem local de um ou mais elementos individuais da seção transversal. Além disso, barras sob compressão podem também apresentar modos de flambagem distorcional, global ou misto (interação entre modos local e global).

A norma brasileira ABNT NBR 14762:2010 [1] descreve três processos de cálculo para barras de perfis formados a frio, sendo um deles o Método da Seção Efetiva (MSE), que prevê a consideração dos efeitos de flambagem local por meio de propriedades geométricas efetivas. Tais propriedades devem ser calculadas diretamente por equações e tabelas para casos específicos de geometrias da seção, com a determinação do coeficiente de flambagem local ( $k_l$ ). Para a situação de compressão centrada, esta norma prevê o cálculo do coeficiente para quatro grupos de perfis, entre eles a seção Rack. Sendo assim, o presente estudo aborda numericamente o comportamento de perfis Rack com abas retas e inclinadas, situação essa não prevista pela norma brasileira. Salienta-se que em modelagens de flambagem local devem ser consideradas as capacidades e limitações do modelo teórico empregado [2].

## 2 Metodologia de cálculo

A ABNT NBR 14762:2010 [1] considera os seguintes métodos para estudo da flambagem local: Método da Largura Efetiva (MLE) com base no cálculo de larguras efetivas dos membros total ou parcialmente comprimidos; Método da Seção Efetiva (MSE) que utiliza propriedades geométricas efetivas da seção transversal do elemento; e o Método da Resistência Direta (MRD) descrito com base nas propriedades geométricas da seção bruta.

O cálculo da força crítica de flambagem por meio do MSE se dá a partir de três etapas: na primeira etapa, calcula-se o efeito de flambagem global obtido a partir da formulação de Winter; posteriormente o efeito da flambagem local considerando a interação com a flambagem global é obtido; e por fim a força crítica pode ser calculada [3].

Segundo a norma brasileira ABNT NBR 14762:2010 [1], a equação que descreve a força axial de flambagem local elástica é dada por:

$$N_l = k_l \frac{\pi^2 E}{12 (1 - \nu^2) b_w / t^2} A. \quad (1)$$

Onde:  $k_l$  é o coeficiente de flambagem local;  $E$  e  $\nu$  são o módulo de Young e o coeficiente de Poisson do aço, respectivamente;  $b_w$  é a largura da alma;  $t$  a espessura do elemento; e  $A$  é a área da seção transversal.

O coeficiente de flambagem local é um fator geométrico que depende das relações  $\eta = b_f/b_w$  e  $\mu = D/b_w$ , e do tipo de solicitação do perfil. A norma brasileira supracitada fornece o coeficiente de flambagem local ( $k_l$ ) para alguns tipos de perfis, o qual pode ser calculado a partir de equações ou obtido de tabelas. Ambas as formas foram elaboradas com base em estudos computacionais por meio de análise de flambagem elástica [3, 4]. Alguns dos perfis estudados por Batista [3] são ilustrados na Fig. 1.

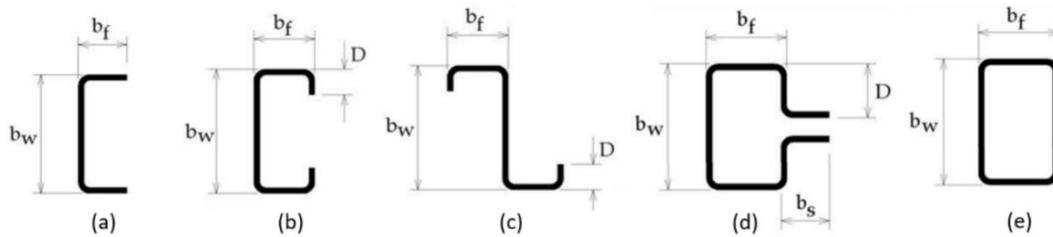


Figura 1: Seções de perfis formados a frio: (a) U simples, (b) U enrijecido, (c) Z enrijecido, (d) Rack, (e) Tubular retangular. (Adaptado de [1]).

O perfil Rack (Fig. 1.d) apresentado na ABNT NBR 14762:2010 [1] se restringe apenas a enrijecedores de abas retas, sendo o coeficiente de flambagem para esse tipo de seção dado pela eq. 2.

$$k_l = 6,5 - 3,0\eta + 2,8\eta^2 - 1,6\eta^3. \quad (2)$$

Ressalta-se que a equação é válida para as seguintes relações:

$$0,1 \leq \eta \leq 1,0 ; 0,1 \leq \mu \leq 0,3 ; e 0,1 \leq b_s/b_w \leq 0,4$$

## 3 Metodologia numérica

Por meio do programa ABAQUS [5], baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF), foi desenvolvido um estudo numérico a fim de avaliar o comportamento de flambagem local do perfil Rack e propor uma formulação para obtenção do coeficiente de flambagem local ( $k_l$ ), referente à seção transversal do perfil submetido à tensões de compressão uniforme.

Para o estudo desse comportamento, foi realizada uma análise de flambagem elástica. No ABAQUS [5], essas análises são 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 representam os modos de flambagem do perfil. Esse estudo pode ser realizado considerando somente as propriedades elásticas do material. Nesse caso, foram adotados os valores 200 GPa para o módulo de elasticidade longitudinal ( $E$ ) e 0,3 para o Coeficiente de Poisson.

### 3.1 Geometria dos modelos numéricos

Para a definição da equação que é capaz de descrever o comportamento de  $k_1$ , foi realizado um estudo paramétrico contendo 360 modelos, no qual variou-se a largura, a espessura e a inclinação dos elementos. Nesse sentido, o estudo possibilitou a determinação de uma formulação que abrange diferentes configurações geométricas do perfil estudado. A Figura 2 apresenta as nomenclaturas adotadas para os elementos do perfil Rack.

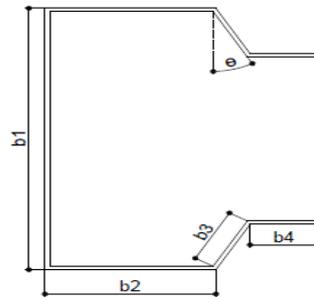


Figura 2. Perfil Rack

Os modelos foram elaborados considerando duas dimensões para a altura do perfil: 150 e 300 milímetros. Para cada altura, variou-se a espessura e o ângulo formado entre os elementos  $b_2$  e  $b_3$ , conforme Tab. 1, com o intuito de compreender a influência desses parâmetros no comportamento de flambagem local do perfil. Os valores para o elemento  $b_2$  variaram de acordo com a altura, conforme intervalo proposto no MSE da ABNT NBR 14762:2010 [1]. Além disso, foram adotadas larguras idênticas para os elementos  $b_3$  e  $b_4$ .

Como o objetivo do trabalho é avaliar somente o comportamento de flambagem local, o comprimento do perfil ( $a$ ) foi igualado à sua altura. Dessa forma, evita-se a ocorrência de instabilidades não desejadas dentro do objetivo do presente trabalho, tais como a flambagem global.

Tabela 1. Definição dos parâmetros utilizados no estudo paramétrico

Variáveis	Valores Adotados
$b_1$ (mm)	150; 300
$b_2/b_1$	0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5; 0.6; 0.7; 0.8; 0.9; 1.0
$b_3/b_1$	0.1; 0.2
Espessura (mm)	1.5; 2.0; 2.5; 3.0
Inclinação	0°; 15°; 30°; 45°
$a/b_1$	1

### 3.2 Definição da 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.* [7], 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. Nesse sentido, os perfis foram modelados com malha de tamanho variado e elementos quadriláteros de integração reduzida, S4R, e completa, S4. Ao final desse estudo, concluiu-se que o elemento S4R apresentou resultados monotônicos para malhas iguais e inferiores a 5.0 mm, sendo essa dimensão adotada para os modelos numéricos deste trabalho.

### 3.3 Condições de contorno e carregamento

Para o estudo das instabilidades locais, foi definida uma força unitária concentrada no centro geométrico do perfil. Por meio da restrição *coupling*, estabeleceu-se uma conexão entre o ponto de referência do centroide e os demais nós da seção transversal (face 1), distribuindo a força uniformemente ao longo desta seção.

As condições de contorno foram aplicadas nas seções transversais da extremidade, conforme Fig. 3 e Tab. 2.

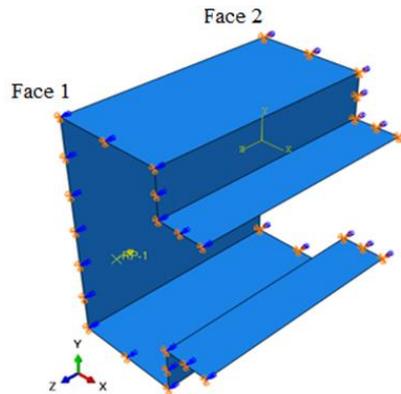


Figura 3. condições de contorno e carregamento do perfil rack

Tabela 2. Detalhe das condições de contorno

	$U_x$	$U_y$	$U_z$	$\theta_x$	$\theta_y$	$\theta_z$
Face 1	1	1	0	0	0	1
Face 2	1	1	1	0	0	1

0 – Grau de liberdade Livre      1 – Grau de liberdade Restringido

### 3.4 Validação do modelo numérico

O modelo numérico foi validado a partir dos resultados obtidos no programa CUFSM [8], baseado no Método das Faixas Finitas (MFF). Os resultados de força crítica foram comparados para ambas alturas do perfil. Foram considerados enrijecedores ( $b_3$ ) sem inclinação e espessura de 1.5 mm, conforme Tab. 3. A Figura 4 apresenta os modos de flambagem obtidos no CUFSM [8] e no ABAQUS [5], referente à altura de 150 mm. Comparando ambos procedimentos, percebe-se que o modelo numérico elaborado apresenta comportamento adequado, com erro máximo de 2.31%.

Tabela 3. Comparação dos resultados do Abaqus em relação ao CUFSM

$b_1$	$b_2/b_1$	$b_3/b_1$	Ncr - CUFSM (kN)	Ncr - Abaqus (kN)	Erro (%)
150	0.3	0.2	59.36	59.50	0.24
300	0.5	0.1	27.30	27.93	2.31

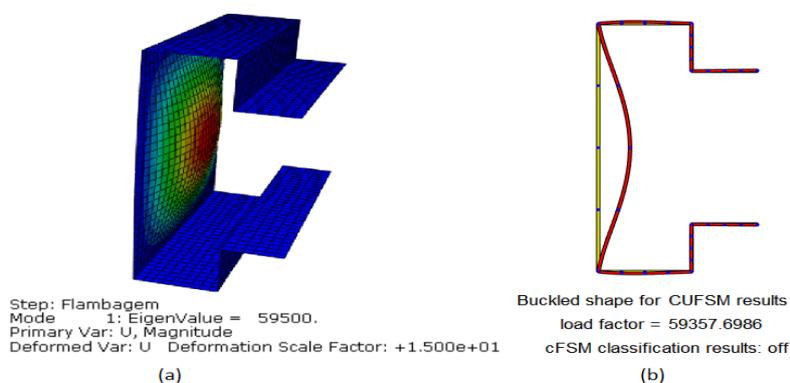


Figura 4. Primeiro modo de flambagem, para a relação  $b_2/b_1 = 0.3$ , obtidos no (a) ABAQUS; (b) CUFSM.

## 4 Resultados e discussão

Inicialmente, para a proposição de uma formulação que descreva o coeficiente de flambagem local para o perfil Rack, avaliou-se a influência da espessura, da inclinação do enrijecedor e da largura da mesa e alma no coeficiente de flambagem local. Os gráficos apresentados nas Fig. 5, 6, 7 e 8 relacionam o  $k_l$  com a razão  $\eta$  para a grandeza avaliada.

Para o estudo da influência da espessura (Fig. 5), optou-se por apresentar o gráfico correspondente à altura da alma ( $b_1$ ) de 150 mm e inclinação  $0^\circ$ . É possível observar que esse parâmetro não tem grande influência no valor de  $k_l$ , uma vez não há grandes variações desse coeficiente com a alteração da espessura, para uma mesma relação de  $\eta$ . Observa-se também que quanto maior a largura da mesa ( $b_2$ ), menor é a influência da espessura.

Quanto a análise da inclinação do enrijecedor, a Fig. 6 apresenta o gráfico correspondente à altura da alma ( $b_1$ ) de 150 mm e espessura de 1.5 mm. Observa-se que a inclinação não alterou significativamente o comportamento do  $k_l$ , sendo que para valores de  $\eta$  superiores a 0,4 a convergência é ainda mais acentuada.

Em relação a análise da altura, a Fig. 7 apresenta o gráfico correspondente à espessura ( $t$ ) de 1.5 mm e inclinação de  $0^\circ$ . Nota-se que a altura não influencia nos valores de  $k_l$ .

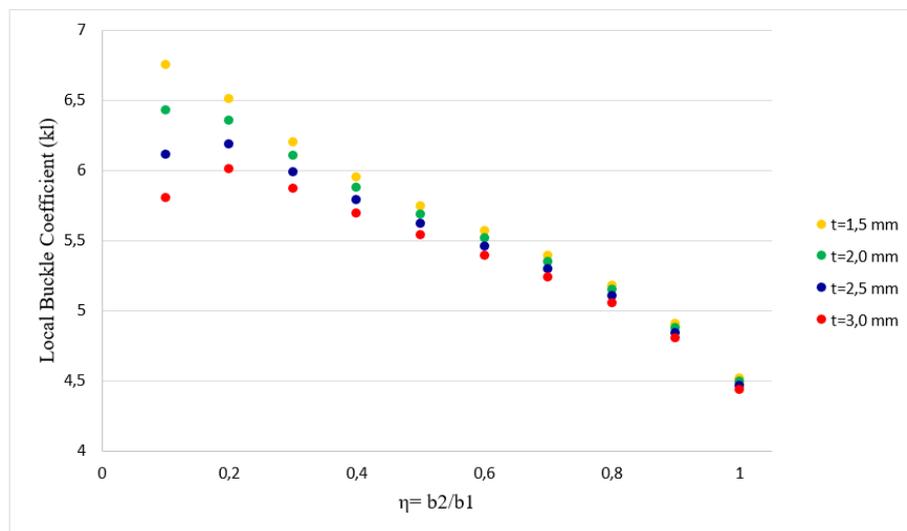


Figura 5. Influência da espessura ( $t$ ).

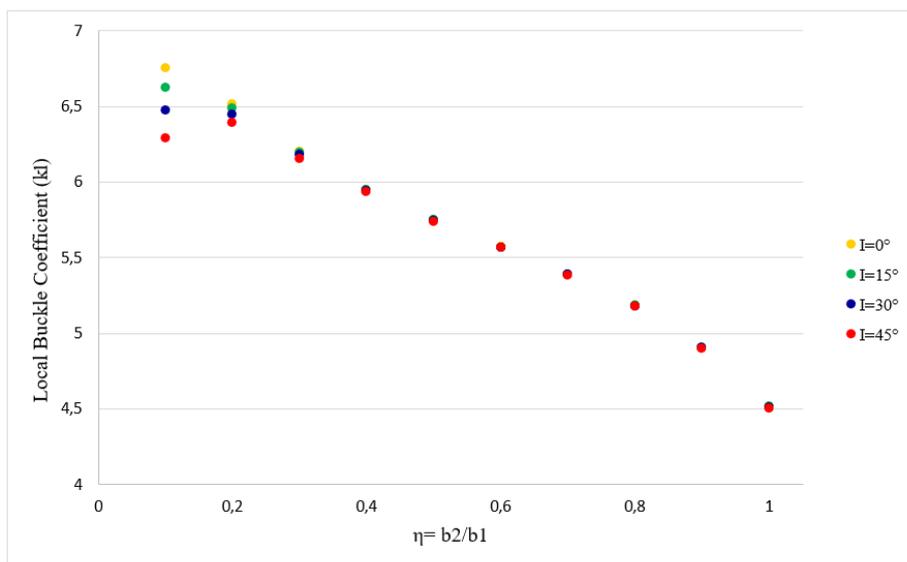


Figura 6. Influência da inclinação do enrijecedor ( $I$ ).

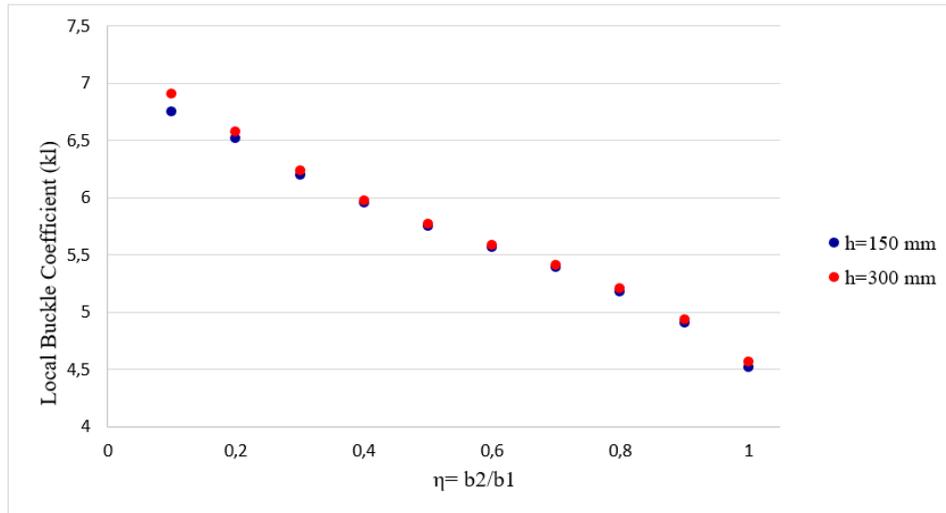


Figura 7. Influência da altura do perfil (h).

A partir dos resultados apresentados, pode-se afirmar que, para geometrias avaliadas, a espessura, a variação da inclinação do enrijecedor e a altura da alma não são parâmetros relevantes para definição de uma formulação que descreva o comportamento local do perfil Rack. Sendo assim, a eq. 3 foi proposta em função da variável  $\eta$ , semelhante ao previsto na ABNT NBR 14762:2010 [1], sendo válida para  $0,1 \leq \eta \leq 1,0$ ,  $0^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$  e considerando padrão fixo para os enrijecedores. O coeficiente de correlação linear ( $R^2$ ) obtido foi satisfatório, uma vez apresentou valor próximo a 1. A Figura 8 apresenta o comparativo entre a curva proposta pela norma brasileira e a obtida neste estudo numérico do perfil Rack. Nota-se que a curva da norma é mais conservadora até o valor de  $b_2/b_1$  igual a 0.8. Isso ocorre devido ao início da flambagem local da mesa em perfis com relação  $b_2/b_1$  acima de 0.8, diferente do comportamento observado nos demais modelos, nos quais têm-se a ocorrência da flambagem local da alma.

$$k_l = -0,65\eta^3 + 0,04\eta^2 - 1,30\eta + 6,45 \quad (3)$$

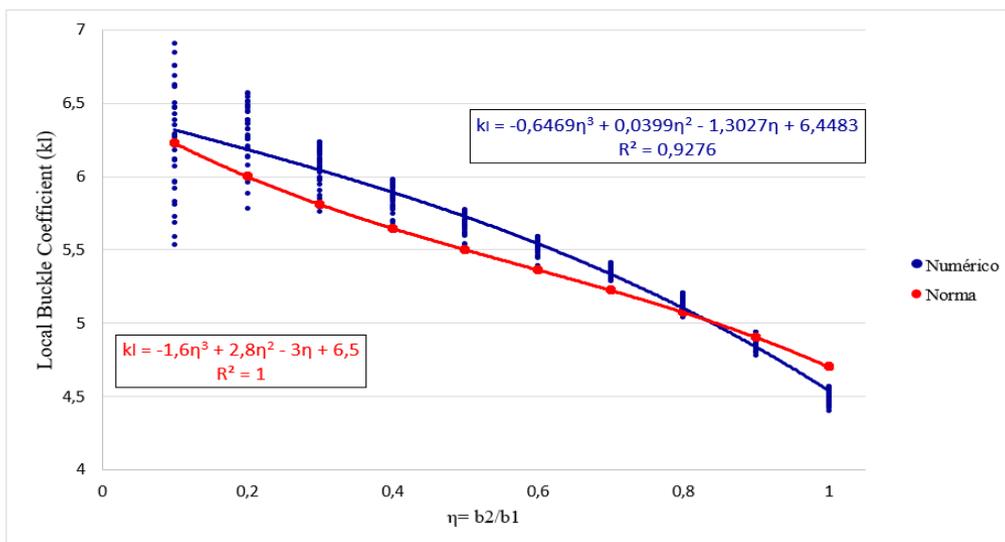


Figura 8. Formulação do coeficiente de flambagem ( $k_l$ ).

## 5 Conclusão

A partir de uma análise paramétrica considerando diferentes dimensões e inclinações dos elementos do perfil Rack, observaram-se comportamentos locais padronizados, exceto para valores extremos de  $b_2/b_1$ . Relações pequenas resultaram em larguras da mesa inferiores às dimensões dos enrijecedores, o que levou a um comportamento atípico. Já para grandes relações, a ocorrência da flambagem local se iniciou no elemento da mesa, o que reduziu o valor do coeficiente de flambagem local. Ressalta-se que esses valores excepcionais para as relações extremas de  $b_2/b_1$  não comprometem a formulação proposta neste trabalho, uma vez que tais perfis não apresentam aplicação convencional.

Os resultados demonstraram que a espessura, a inclinação do enrijecedor e a altura da alma não interferem significativamente no comportamento de flambagem local da seção Rack. Por outro lado, a relação  $b_2/b_1$  tem efeito preponderante na variação do coeficiente  $k_l$ , conforme esperado e indicado pela norma brasileira.

Por fim, o estudo resultou em uma formulação que define o comportamento de flambagem local para uma gama de perfis do tipo Rack. Estudos complementares devem ser desenvolvidos para aprimorar a formulação proposta por meio da consideração de parâmetros geométricos mais abrangentes, considerando dimensões variáveis para os enrijecedores e maior quantidade de alturas para os perfis estruturais.

**Agradecimentos.** Os autores agradecem o apoio financeiro em forma de fomento à pesquisa concedido pela CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior).

**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] Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 14762. Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2010.
- [2] B. W. Schafer, Z. Li, C. D. Moen, "Computational modeling of cold-formed steel". *Thin-Walled Structures*, vol. 48, pp 752-762, 2010.
- [3]. E. M. Batista. "Effective section method: A general direct method for the design of steel cold-formed members under local-global buckling interaction." *Thin-Walled Structure*, vol. 48, pp. 345-356, 2010.
- [4]. I. Pierin, V. P. Silva, H. L. "Forças Normais e Momentos Fletores Críticos de Perfis Formados a Frio". *Revista da Estrutura do aço*, vol. 2, n 1, pp. 21-40, 2013.
- [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] 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.
- [8] B. W. Schaefer. CUF5M 5.01 Software. User Manual and Tutorials. 2018.