

ANÁLISE NUMÉRICA DE PILARES FORMADOS A FRIO DO TIPO RACK COM PERFURAÇÕES DE BORDAS ENRIJECIDAS

Numerical analysis of cold formed rack columns with edge stiffened holes

Diego Martins Gomes ¹, Arlene Maria Cunha Sarmanho ¹, Flávio Teixeira de Souza ²



PALAVRAS CHAVE:

Elementos finitos;
Perfis formados a frio com perfurações;
Furos de bordas enrijecidas;
Pilares tipo rack.

KEYWORDS:

Finite element;
Perforated cold formed profiles;
Edge stiffened holes;
Rack columns.

RESUMO: Os perfis formados a frio constituem uma opção econômica e eficiente de estrutura metálica. Usualmente contêm perfurações para o encaixe de ligações ou passagem de dutos, o que pode alterar seu comportamento estrutural e reduzir sua resistência. Uma alternativa para reduzir esses efeitos negativos é a adoção de enrijecedores nas bordas das perfurações. Este trabalho analisa pilares formados a frio do tipo rack com duas linhas de perfurações, em que pode ocorrer um modo de flambagem localizado entre as perfurações, além da flambagem local na alma das seções. O comportamento das estruturas foi avaliado numericamente, com a análise de flambagem elástica e a análise não linear física e geométrica via elementos finitos no software ANSYS. Verificou-se que as perfurações não enrijecidas aumentam a esbeltez e reduzem a resistência dos pilares. No entanto, ao serem adotados os enrijecedores nas bordas das perfurações estes efeitos são revertidos, aproximando o comportamento e a resistência dos pilares perfurados e não perfurados, indicando a viabilidade da adoção dos enrijecedores de borda nas perfurações como forma de mitigar seus efeitos negativos.

ABSTRACT: Cold formed profiles are an economic and efficient option in steel construction. They often have perforations to fit connections and accommodate electrical and hydraulic installations. These holes may modify the structure behavior and reduce its resistance. The adoption of edge-stiffened perforations may reduce these prejudicial effects. This work analyzes cold formed rack columns with two parallel rows of holes, prone to web local buckling and also buckling between holes. Linear and geometric and material non-linear finite element analysis are carried out by software ANSYS. The non-stiffened perforations increase the slenderness and reduce columns resistance, but edge-stiffened holes may revert these effects, approximating the resistance and behavior of edge-stiffened perforated and non-perforated columns. This may indicate that the adoption of edge-stiffened holes may mitigate bad effect of perforations.

* Contato com os autores:

Publicado em 12 de maio de 2023

¹ e-mail: diego.mg@aluno.ufop.edu.br (D. M. Gomes)

Engenheiro Civil, M.Sc., Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

² e-mail: arlene@ufop.edu.br (A. M. S. Sarmanho)

Engenheira Civil, D.Sc., Professora, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

³ e-mail: flavio.souza@ifmg.edu.br (F. T. Souza)

Engenheiro Civil, D.Sc., Professor, Instituto Federal de Minas Gerais Campus Ouro Preto (UFMG).

1. INTRODUÇÃO

Perfis formados a frio são elementos de aço fabricados à temperatura ambiente a partir do dobramento de chapas de pequena espessura. Esta fabricação pode ser feita de forma contínua, através de perfiladeiras, ou de forma discreta, através de dobradeiras. Os perfis formados a frio constituem uma interessante alternativa na execução de elementos estruturais, pois são leves e econômicos se comparados aos perfis laminados e soldados (Carvalho, Grigoletti e Barbosa, 2014). Além disso, possuem uma diversidade de seções transversais que se adaptam a diversas aplicações.

Em algumas situações, é necessário que os perfis formados a frio possuam perfurações para a acomodação de tubulações elétricas e hidráulicas ou ainda para o encaixe de ligações, conforme apresenta a Figura 1.



FIGURA 1. Perfis formados a frio com perfurações [a] encaixe de ligações; [b] passagem de dutos.
FONTES: Cai e Moen (2016) e Yu (2012).

Devido à pequena espessura de suas chapas, os perfis formados a frio possuem elevada esbelteza, o que faz com que eles estejam sujeitos à flambagem global, por flexão, torção, ou flexo-torção; à flambagem local ou ainda à flambagem distorcional. Estes modos de instabilidade, apresentados na Figura 2 para a seção do tipo rack, alteram o comportamento e reduzem a resistência das estruturas, podendo ter seus efeitos deletérios potencializados quando possuem perfurações.

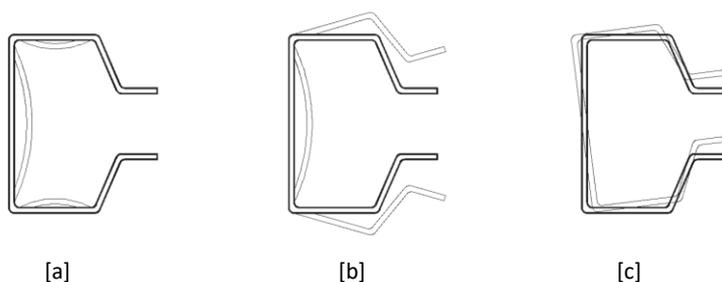


FIGURA 2. Modos de instabilidade em perfis formados a frio do tipo rack: [a] local; [b] distorcional; [c] global.
FONTE: Pinto, Sarmanho e Souza (2021).

Uma estratégia para reduzir os efeitos das perfurações é a adoção de enrijecedores em suas bordas, como apresentado na Figura 1 (b). Estes enrijecedores são adicionados no momento da fabricação, aproveitando-se a rebarba oriunda do processo de punção que dá origem à perfuração, podendo constituir-se em uma solução prática e econômica. No entanto, sua viabilidade técnica ainda é pouco estudada e seus efeitos não são considerados nas normas correntes (ABNT, 2010; AISI, 2016; AS/NZS, 2018).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os perfis formados a frio são estruturas com pequena espessura e, portanto, grande esbelteza. Assim, são estruturas fortemente susceptíveis à flambagem local, distorcional e global. Estes modos podem ocorrer isoladamente ou em interação, reduzindo a resistência à compressão das seções e tornando seu comportamento mais complexo (Hancock, 1997; Silvestre, Camotim e Dinis, 2007).

A introdução de perfurações afeta o comportamento destas estruturas, reduzindo sua capacidade resistente e induzindo modos de instabilidade diferentes dos inicialmente esperados. Parâmetros como o tipo da seção e as dimensões e posição das perfurações apresentam influência relevante no comportamento de perfis formados a frio com perfurações (Moen e Schafer, 2009; Neiva et al, 2018; Souza, Santos e Sarmanho, 2020; Jardim Jr. et al, 2021; Pinto, Sarmanho e Souza, 2021; Oliveira, Sarmanho e Souza, 2022).

Neste contexto, uma possível alternativa para mitigar os efeitos das perfurações é a adoção de enrijecedores em sua borda (Howick, 2020), como apresentado na Figura 3. Como os efeitos destes enrijecedores ainda não são plenamente conhecidos, diversos trabalhos têm avaliado sua viabilidade no aumento da resistência dos perfis formados a frio (Grey e Moen, 2011; Chen et al., 2019, Chen et al., 2020a; Chen et al., 2020b; Uzzaman et al., 2020; Osgouei, Hosseinzadeh e Ahmadi, 2020; Kanthasamy et al., 2021; Nicolau, 2022).

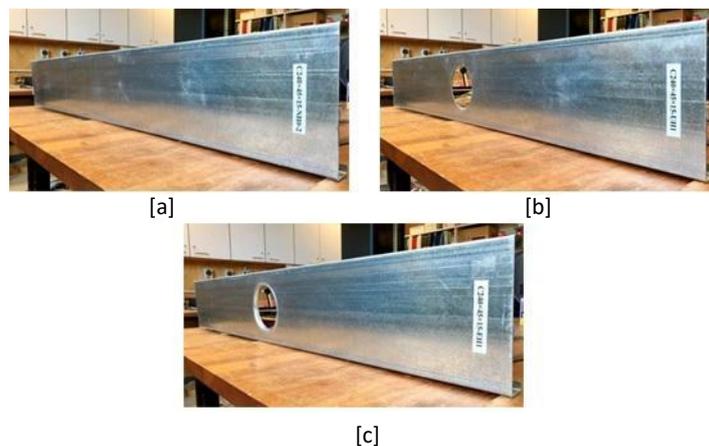


FIGURA 3. Perfil formado a frio: [a] sem perfurações; [b] com perfuração; [c] com perfuração de borda enrijecida.
FONTE: Chen et al. (2020b).

Estes trabalhos, no entanto, abordam perfurações circulares, em detrimento a outras geometrias comuns de perfurações em perfis formados a frio. Um exemplo pode ser visto nos sistemas de armazenagem industrial, em que as perfurações de geometrias diversas são utilizadas para o encaixe de ligações (Souza, Sarmanho e Machado, 2021). Essas perfurações são geralmente dispostas em linhas paralelas e podem induzir a flambagem localizada de placa (Souza, 2013), apresentada na Figura 4, que ocorre na placa entre as perfurações.

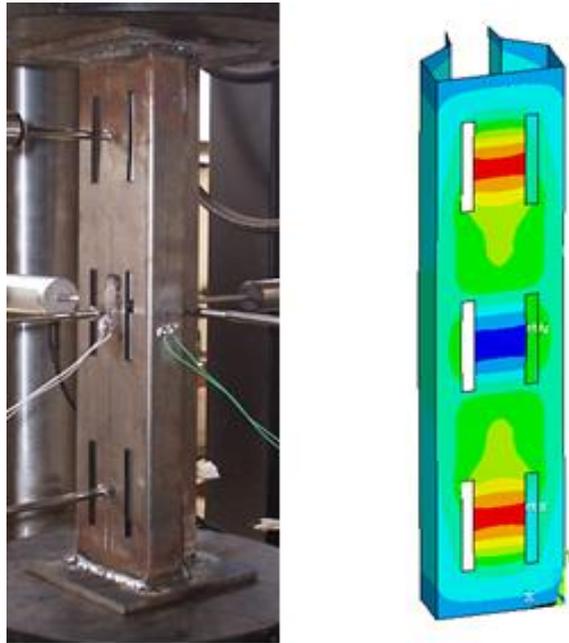


FIGURA 4. Flambagem localizada de placa na seção rack.

FONTE: Souza. (2013).

3. OBJETIVO

Este trabalho tem o objetivo de avaliar numericamente, pelo método dos elementos finitos, a influência de enrijecedores de borda em perfurações retangulares existentes em perfis formados a frio de seção do tipo rack submetidos à compressão, com duas linhas paralelas de furos retangulares. São analisados diferentes comprimentos de perfurações além de diferentes quantidades e dimensões dos enrijecedores de borda.

Este trabalho é justificado pela necessidade da avaliação da viabilidade técnica da adoção de enrijecedores de borda no combate aos modos de instabilidade, uma vez que, por ser uma proposta recente, os estudos ainda são incipientes e não abrangem perfurações de seção retangular, limitando-se a furos circulares.

4. METODOLOGIA

4.1 GEOMETRIA DOS MODELOS

A análise numérica via elementos finitos foi desenvolvida utilizando-se o software comercial ANSYS (ANSYS, 2019). Foram analisadas seções com as dimensões apresentadas nas Figuras 5 e 6. Os comprimentos dos pilares foram 320 mm, para a seção com largura de alma igual a 80 mm e 400 mm para a seção com largura de alma igual a 100 mm. Este comprimento é igual a quatro vezes o comprimento crítico local, determinado com o programa GBTul (Bebiano et al., 2008).

As perfurações têm largura igual a 10% da largura da alma (b_w) e o comprimento igual a uma porcentagem variável de 10% a 80% desse mesmo valor.

A relação entre a distância das bordas das almas laterais (d_{bl}) e a perfuração foi fixada em 20% da largura da alma. Para o espaçamento entres os furos, foi fixado um intervalo equivalente à metade da largura da alma, ou seja, $REL = b_w/2$. Já entre a perfuração próxima a extremidade foi adotada uma distância de borda

(d_b), valor esse diferente para cada protótipo, buscando-se atingir os comprimentos do modelo, fixos para todas as configurações de perfurações.

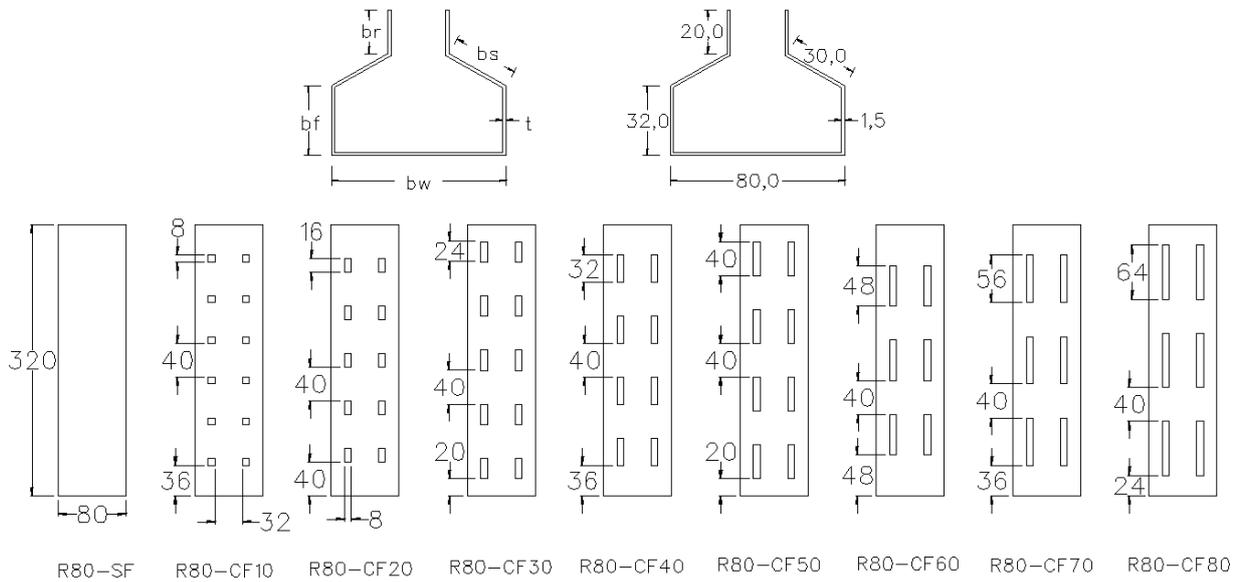


FIGURA 5. Seções tipo rack com $b_w = 80$ mm (Dimensões em mm).

FONTE: Elaboração própria.

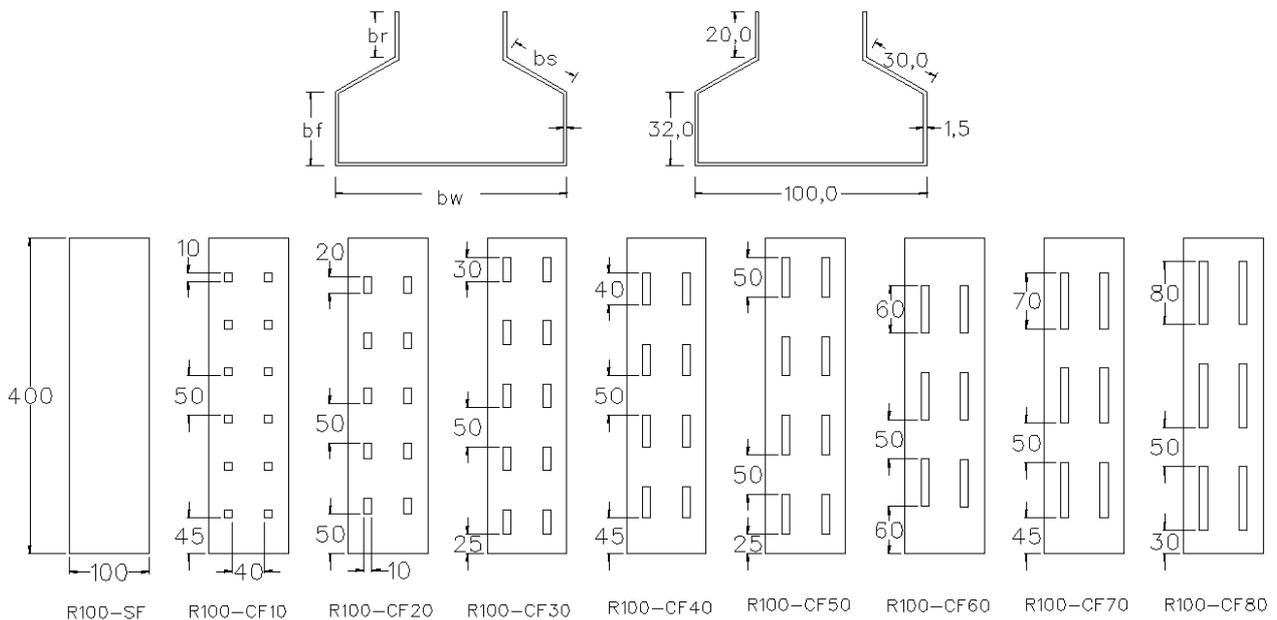


FIGURA 6. Seções tipo rack com $b_w = 100$ mm (Dimensões em mm).

FONTE: Elaboração própria.

Foram analisados pilares sem perfurações e com perfurações convencionais, sem enrijecedores. Além disso, consideraram-se modelos com dois arranjos de enrijecedores nas bordas laterais das perfurações. O primeiro modelo com um enrijecedor lateral na parte interna da alma, com comprimento do enrijecedor igual à largura do furo (LF). No segundo, dois enrijecedores laterais, realizados a partir do corte

central da perfuração com realização dos dobramentos laterais, com comprimentos iguais a $LF/2$, como apresentado na Figura 7, juntamente com a nomenclatura adotada.

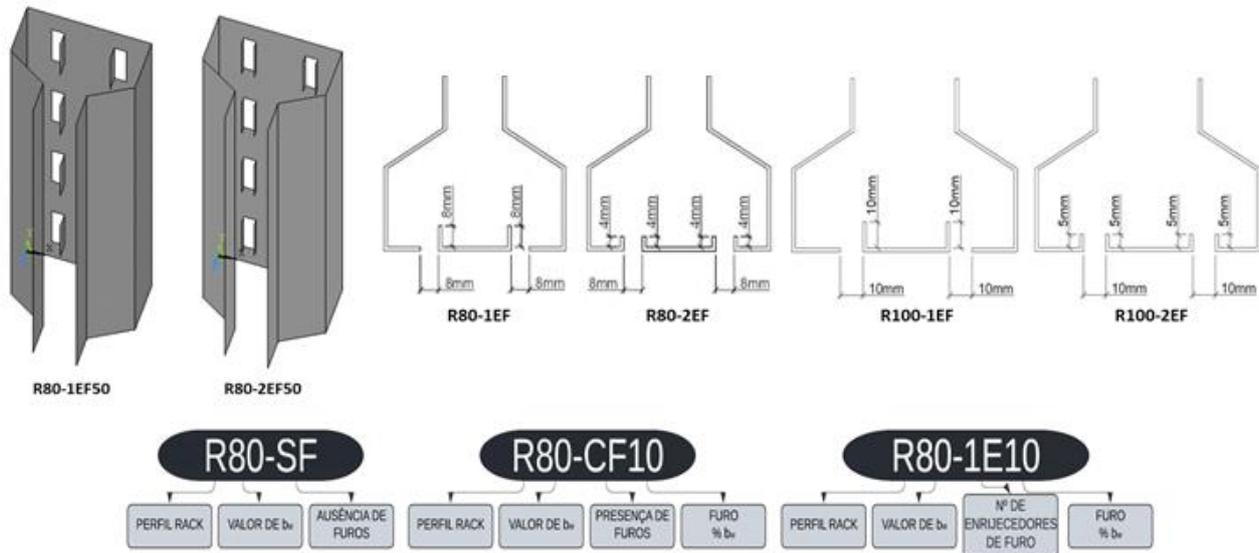


FIGURA 7. Enrijecedores de borda nas perfurações.

FONTE: Elaboração própria.

4.2 MODELO NUMÉRICO

Para a análise dos perfis do tipo rack com perfurações e não enrijecidas submetidos à compressão foram feitas análises via elementos finitos no software ANSYS (ANSYS, 2019). Devido à pequena esbelteza das placas que constituem a seção foram utilizados elementos de casca da biblioteca do software SHELL181 (Souza (2013), Santos (2020), Pinto et al. (2021), Jardim Júnior et al. (2021), Oliveira, Sarmanho e Souza (2022), Nicolau (2022)), com malha quadrilateral de lado igual a 10 % da largura da alma (b_w).

Os pilares gerados via elementos finitos são considerados simplesmente apoiados, com restrição de deslocamento em duas direções ortogonais ao eixo longitudinal. Todos os nós das extremidades têm seus deslocamentos acoplados e, no nó mestre, são aplicadas as restrições ao deslocamento e a carga concentrada. Foi também impedido o deslocamento de corpo rígido, restringindo-se a translação no eixo longitudinal em um nó à meia altura do modelo. Estas condições são apresentadas na Figura 8.

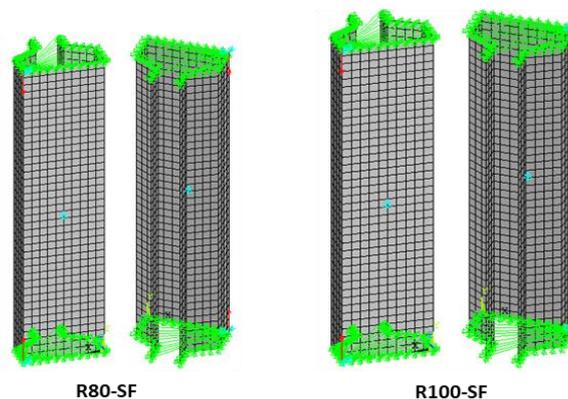


FIGURA 8. Enrijecedores de borda nas perfurações.

FONTE: Elaboração própria.

A primeira etapa da solução consiste na resolução do problema de flambagem elástica, em que são determinados os modos de flambagem críticos para o pilar. A partir desta análise, é feita a atualização da

geometria para a consideração das imperfeições, utilizando um fator igual à metade da espessura da chapa. Em seguida, são introduzidas as propriedades elastoplásticas do aço, a partir de um diagrama tensão-deformação multilinear, apresentado na Figura 9. Foram utilizados quatro tipos de aço para que fossem obtidas diferentes faixas de esbeltez.

- $f_y = 150$ MPa e $f_u = 240$ MPa;
- $f_y = 180$ MPa e $f_u = 288$ MPa;
- $f_y = 200$ MPa e $f_u = 320$ MPa;
- $f_y = 300$ MPa e $f_u = 480$ MPa.

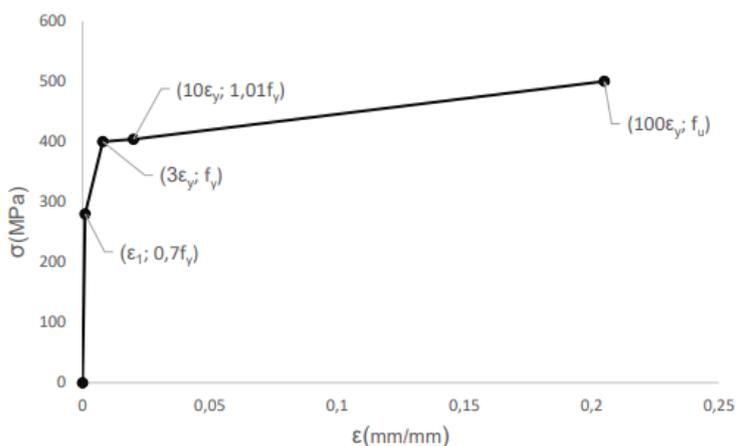


FIGURA 9. Enrijecedores de borda nas perfurações.

FONTE: Faria (2016).

Assim, é realizada a análise não linear física e geométrica, para que seja obtida a trajetória de equilíbrio pós-crítica do pilar, a fim de analisar a influência dos enrijecedores de borda na resistência axial do pilar. A força axial resistente é o valor máximo obtido na trajetória de equilíbrio. Sendo este ponto uma singularidade na solução, podendo comprometer a convergência do modelo, é necessária a adoção de uma estratégia de incremento de carga para que se obtenha o trecho descendente da trajetória de equilíbrio. Foi utilizado o comprimento de arco, com o critério de parada sendo um deslocamento limite igual a 4mm. Neste nível de deslocamentos há o pleno desenvolvimento dos modos de flambagem avaliados até o escoamento do material (Souza, 2013).

5. RESULTADOS

Para o desenvolvimento da análise da influência das perfurações com bordas enrijecidas nos perfis formados a frio do tipo rack foram considerados dois aspectos. O primeiro foi o índice de esbeltez reduzido associado à flambagem local (λ_l), que indica se este modo de instabilidade, apresentado na Figura 2 (a) ocorre no pilar considerado. Foi considerada também a força axial de compressão resistente ($N_{c,Rl}$) dos pilares, avaliando o comportamento dos pilares com perfurações enrijecidas e não enrijecidas com os pilares sem perfurações.

5.1 ÍNDICE DE ESBELTEZ REDUZIDO ASSOCIADO À FLAMBAGEM LOCAL (λ_l)

Foram calculados os índices de esbeltez reduzidos associados à flambagem local (λ_l), utilizando-se a Equação 1, onde N_l é a força axial de flambagem elástica obtida na análise linear via ANSYS.

$$\lambda_l = \left(\frac{A f_y}{N_L} \right)^{0,5} \tag{Eq [1]}$$

A Figura 10 apresenta a variação do índice de esbeltez reduzido associado à flambagem local em função da relação entre a altura do furo (h_f) e a largura da alma (b_w) para os pilares com seção de largura da alma (b_w) igual a 80 mm. Em todos os gráficos a linha vermelha indica o índice de esbeltez limite para a ocorrência da flambagem local ($\lambda_l=0,776$). Pode-se observar que, em todos os casos, a existência de perfurações não enrijecidas leva a índices de esbeltez superiores a este limite. No entanto, à exceção dos pilares com $f_y = 300$ MPa e $f_u = 480$ MPa, pilares sem perfurações ou com perfurações com bordas enrijecidas levam a valores inferiores a este limite.

Nos casos em que não ocorre a flambagem local, a instabilidade concentra-se entre furos. Observa-se ainda, em todos os casos, que a adoção de um enrijecedor de borda leva a maiores reduções do índice de esbeltez reduzido associado à flambagem local do que as outras configurações de perfurações e que, a adoção de dois enrijecedores de borda leva ao índice de esbeltez a valores próximos àqueles das seções sem perfurações, principalmente para pilares com maiores relações h_f/b_w , que são aqueles mais sujeitos à flambagem localizada de placa entre furos, o que indica a eficiência destes enrijecedores no combate a este modo de instabilidade.

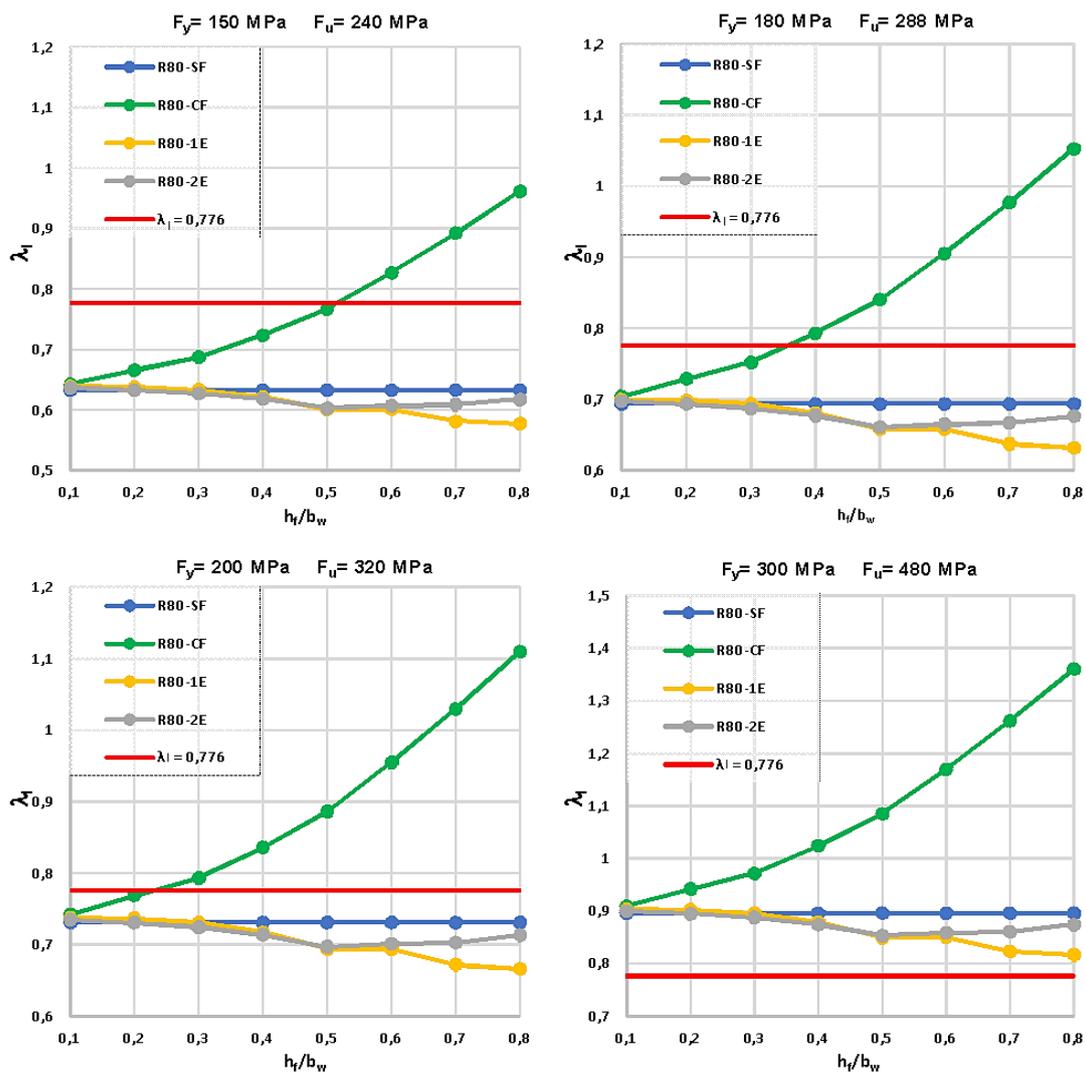


FIGURA 10. Índice de esbeltez reduzido associado à flambagem local (λ_l) - $b_w = 80$ mm.

FONTE: Elaboração própria.

Observa-se ainda que para relações h_f/b_w inferiores a 0,5, é indiferente a adoção de um ou dois enrijecedores de borda, e há decréscimo constante do índice de esbeltez reduzido associado à flambagem local, o que sugere que, para estes valores de h_f/b_w , predomina a flambagem local e os enrijecedores nas perfurações não são eficientes para combatê-la.

A Figura 11 apresenta a variação do índice de esbeltez reduzido associado à flambagem local em função da relação entre a altura do furo (h_f) e a largura da alma (b_w) para os pilares com seção de largura da alma (b_w) igual a 100 mm. Em todos os gráficos a linha vermelha indica o índice de esbeltez limite para a ocorrência da flambagem local ($\lambda_{l1}=0,776$). Pode-se observar que, em todos os casos, com exceção dos pilares com $f_y = 180$ MPa e $f_u = 240$ MPa, os pilares sem perfurações ou com perfurações têm esbeltez acima deste limite, o que indica a ocorrência de flambagem local, devido à maior relação b_w/t na alma.

No entanto, a adoção dos enrijecedores de borda reduz significativamente o índice de esbeltez, aproximando os resultados dos pilares com perfurações àqueles dos pilares sem perfurações. Observa-se ainda que, também nesse caso, para relações h_f/b_w inferiores a 0,5, é indiferente a adoção de um ou dois enrijecedores de borda, e há decréscimo constante do índice de esbeltez reduzido associado à flambagem local, o que sugere que, para estes valores de h_f/b_w , predomina a flambagem local e os enrijecedores nas perfurações não são eficientes para combatê-la.

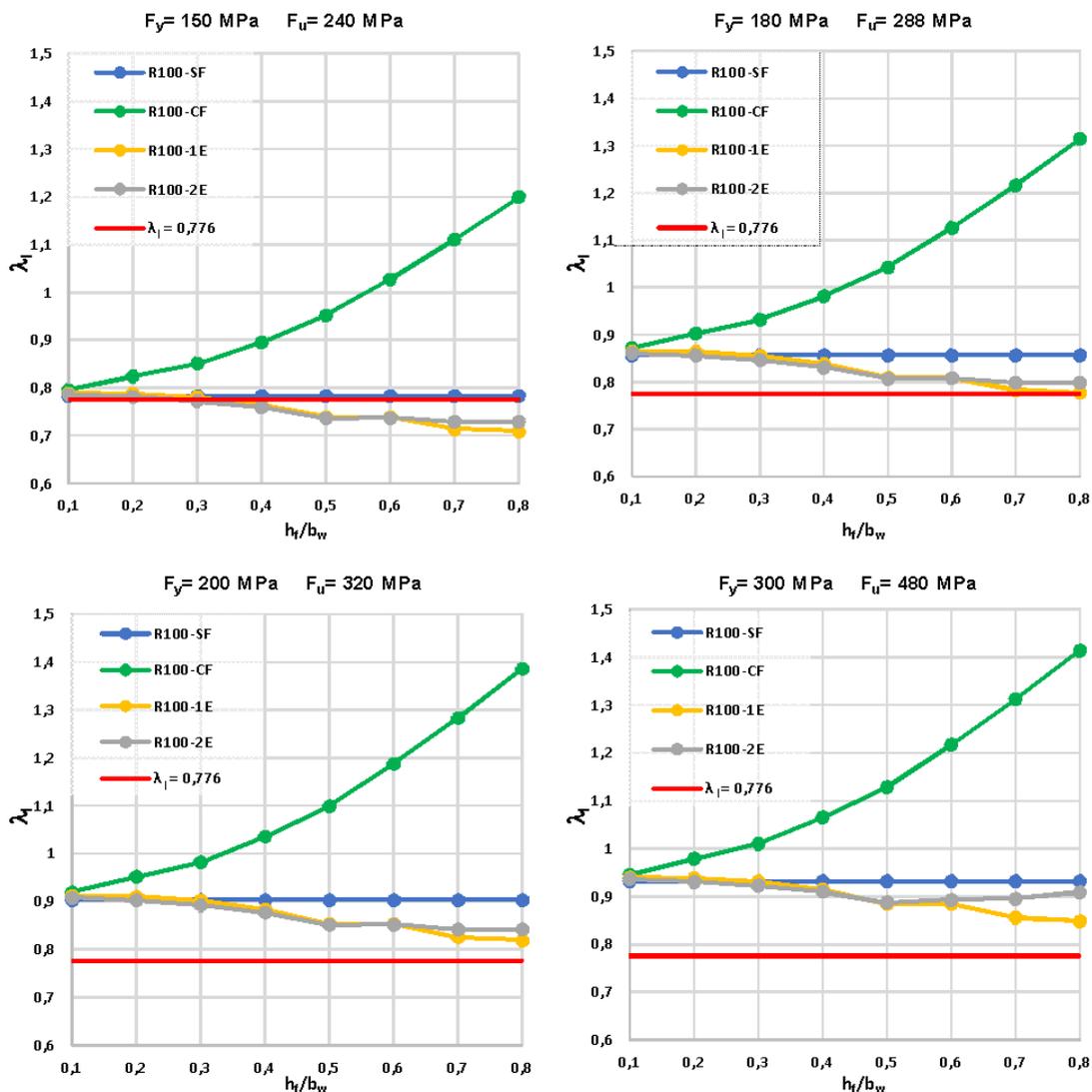


FIGURA 11. Índice de esbeltez reduzido associado à flambagem local (λ_{l1}) - $b_w = 100$ mm.

FONTE: Elaboração própria.

5.2 FORÇA AXIAL DE COMPRESSÃO RESISTENTE ($N_{c,Rl}$)

Os efeitos das perfurações com bordas enrijecidas na força axial de compressão resistente dos pilares foram analisados a partir da relação entre os resultados para os pilares com perfurações (enrijecidas e não-enrijecidas) e os pilares sem perfurações. A Figura 12 apresenta estas relações em função da relação entre a altura do furo (h_f) e a largura da alma (b_w) para os pilares com seção de largura da alma (b_w) igual a 80 mm e 100 mm. De forma geral, pode-se observar que a introdução dos enrijecedores de borda leva ao aumento da resistência dos pilares com perfurações.

Pode-se observar que nas seções em que $b_w=80\text{mm}$, a utilização dos enrijecedores de borda nas perfurações foi mais efetiva que naquelas em que $b_w=100\text{mm}$. Isto ocorre, pois, as seções de $b_w=100\text{mm}$ estão mais sujeitas à flambagem local, enquanto nas de $b_w=80\text{mm}$ a instabilidade concentra-se, predominantemente, entre as perfurações.

Observa-se ainda que nas seções em que o índice de esbeltez reduzido associado à flambagem local é menor que 0,776 o efeito dos enrijecedores é mais relevante, indicando mais uma vez que, se a flambagem concentra-se entre as perfurações, eles podem contribuir para o aumento da resistência de pilares com perfurações.

Para as seções em que o índice de esbeltez reduzido associado à flambagem local é maior que 0,776, principalmente aquelas com $f_y=300\text{ MPa}$, o efeito dos enrijecedores é menor. Isto ocorre pois, como estas seções estão sob forte influência da flambagem local, o efeito dos enrijecedores é menos representativo.

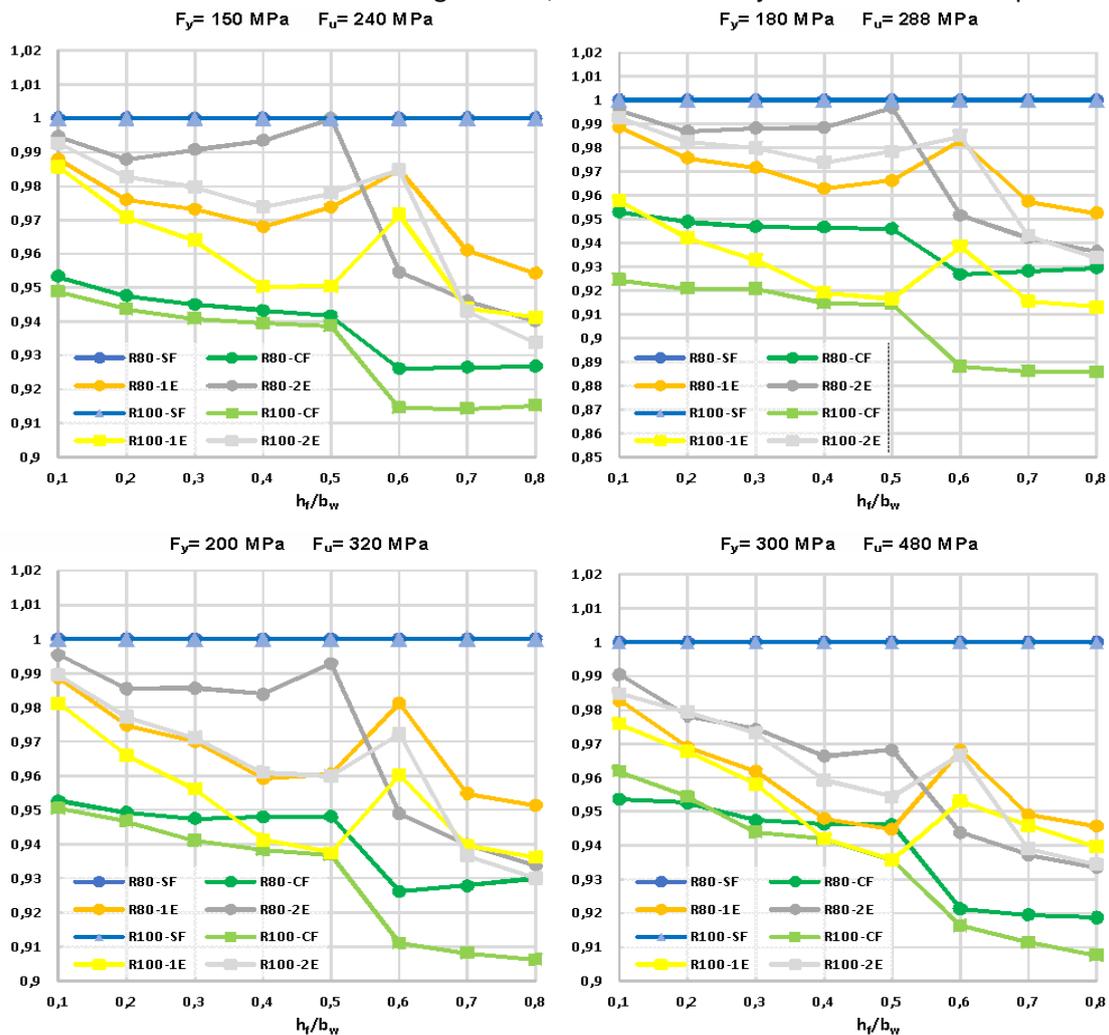


FIGURA 12. Relação entre a força axial de compressão resistente com furos e sem furos.

FONTE: Elaboração própria.

A introdução dos enrijecedores de borda altera este comportamento. Os pilares com furos com dois enrijecedores (R80-2E) passam a apresentar flambagem entre furos a partir da relação $h_f/b_w = 0,6$, tendo para valores menores comportamento similar ao perfil sem perfurações, o que explica a aproximação da resistência entre os pilares com furos com dois enrijecedores e sem perfurações, observada na figura 10. Já nos pilares com um único enrijecedor de borda, a flambagem localizada entre as perfurações é completamente eliminada, levando a maiores resistências para relações h_f/b_w maiores do que 0,5 em todas as análises. No entanto, sua influência para os perfis com relação h_f/b_w menores do 0,5, onde predomina a flambagem local, seu efeito não é tão significativo.

4. CONCLUSÕES

As perfurações em Perfis Formados a Frio podem alterar a resistência e os modos de flambagem. Um exemplo é a ocorrência do modo localizado entre furos, quando são adotadas duas linhas de perfurações paralelas. Estas perfurações aumentam o índice de esbeltez da seção, o que pode ser mitigado com o uso de enrijecedores nas bordas das perfurações. A adoção de dois enrijecedores leva à redução do índice de esbeltez, levando-o próximo aos índices de esbeltez de pilares sem perfurações.

Para pilares com um único enrijecedor de borda a flambagem localizada entre as perfurações é completamente eliminada, levando a maiores resistências para relações h_f/b_w maiores do que 0,5 em todas as análises. No entanto, sua influência para os perfis com relação h_f/b_w menores do 0,5, onde predomina a flambagem local, seu efeito não é tão significativo.

Como a introdução dos enrijecedores é factível do ponto de vista da fabricação, sua adoção tem o potencial de melhorar o comportamento e a resistência de Perfis Formados a frio com Perfurações.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Ouro Preto e ao IFMG Campus Ouro Preto pelo suporte a esta pesquisa.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AISI – American Iron and Steel Institute. **North American Specification (NAS) for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members (AISI-S100-16)**. Washington DC: AISI, 2016

ANSYS. **ANSYS Mechanical, version 19.2**. 2019.

AS/NZS 4600. **“Cold-formed steel structures”**. Joint Technical Committee BD-082, Cold-formed Steel Structures. ISBN (PDF) 978-1-77673-338-5. Standards New Zealand. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14762 - Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio**. Rio de Janeiro. 2010

BEBIANO R., SILVESTRE N., CAMOTIM D. **GBTUL – A code for the buckling analysis of cold-formed steel members”**. **Proceedings of 19th International Specialty Conference on Recent Research and Developments in Cold-Formed Steel Design and Construction** (St. Louis, 14-15/10), R LaBoube, W.-W. Yu (eds.), 61-79. 2008.

CAI, J.; MOEN, C. D. Elastic buckling analysis of thin-walled structural members with rectangular holes using generalized beam theory. **Thin-Walled Structures**, v. 107, p. 274-286, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2016.06.014>

CARVALHO, P. R. M. de; GRIGOLETTI, G.; BARBOSA, G. D. **Curso básico de perfis de aço formados a frio**. 3ª. ed. Porto Alegre: Ed. Porto Alegre. 2014. 371 p.

CHEN, B.; ROY, K.; UZZAMAN, A.; RAFTERY, G.; LIM, J. B. P. Axial strength of back-to-back cold-formed steel channels with edge-stiffened holes, un-stiffened holes and plain webs. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 174, p. 1-22, 2020b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106313>.

CHEN, B.; ROY, K.; UZZAMAN, A.; RAFTERY, G.; LIM, J. B. P. Parametric study and simplified design equations for cold-formed steel channels with edge-stiffened holes under axial compression. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 172, p. 1-27, 2020a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106161>.

CHEN, B.; ROY, K.; UZZAMAN, A.; RAFTERY, G.; NASH, D., CLIFTON, G. C., POULADI, P.; LIM, J. B. P. Effects of edge-stiffened web openings on the behaviour of cold formed steel channel sections under compression. **Thin-Walled Structures**, v. 144, p. 1-21, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106307>

FARIA, Vinícius de Oliveira. **Análise de estabilidade de perfis formados a frio com perfurações**. Dissertação de Mestrado: Universidade Federal de de Ouro Preto. MG. 2016.

GREY, C.N.; MOEN, C.D. Elastic buckling simplified methods for cold-formed columns and beams with edge-stiffened holes. **Proceedings of the Annual Stability Conference Structural Stability Research Council**, Pittsburgh, Pennsylvania, p. 1-12. 2011.

HANCOCK, G. J. Design for distortional buckling of flexural members. **Thin-Walled Structures**, v. 27, n. 1, p. 3-12, 1997.

HOWICK, 2020 Disponível em: <https://www.howickltd.com/>. Acesso em: 2 fev. 2021.

JARDIM JR., F., HELENO, R. P., SOUZA, F. T., SARMANHO, A. M. S. MACHADO, A. P. M. Estudo da viabilidade do método da Resistência Direta em Perfis U enrijecidos formados a frio com perfurações. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 17 n. 1, p. 1-15, 2021.

KANTHASAMY, E., THIRUNAVUKKARASU, K.; POOLOGANATHAN, K.; GATHEESHGAR, P.; TODHUNTER, S.; SUNTHARALINGAM, T., Ishqy, M. F. M. Shear Behaviour of Doubly Symmetric Rectangular Hollow Flange Beam with Circular Edge-stiffened Openings. **Engineering Structures**. 2021. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.113366.

MOEN, C. D.; SCHAFER, B. W. **Direct Strength Design of Cold-Formed Steel members with perforations**: Research Report RP 09-1. Washington: American Iron and Steel Institute – Committee on Specifications for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, 2009.

NEIVA, L. H. SARMANHO, A. M. S.; FARIA, V. O., SOUZA, F. T., STARLINO, J. A. B. Numerical and experimental analysis of perforated rack members under compression. **Thin-Walled Structures**. v. 130. p. 176-193, 2018.

NICOLAU, I. A. N. **Análise numérica do comportamento de perfis formados a frio com perfurações enrijecidas**. 2022. 77 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia das Construções) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

OLIVEIRA, L. C. P. SARMANHO, A. M. C.; SOUZA, F. T. Análise da influência das dimensões das perfurações em pilares compostos por perfis em aço formados a frio do tipo U enrijecido. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, v. 7, n. 1, p. 30-37, 2022. DOI: 10.25286/rep.v7i1.1717.

OSGOUEI, A. J.; HOSSEINZADEH, Y.; AHMADI, H. Local buckling analysis of cold-formed steel webs with stiffened rectangular openings. **Journal of Constructional Steel Research**. 2020. Volume 167, 2020, 105824, ISSN 0143-974X, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105824>.

PINTO, R. A. R., SARMANHO, A. M. C.; SOUZA, F. T. Análise numérica das dimensões e posição das perfurações na resistência à instabilidade distorcional de perfis formados a frio do tipo rack comprimidos. **Revista da Estrutura de Aço**, v. 10, n. 3, p. 333-350, 2021.

PINTO, R. A. R.; SARMANHO, A. M. S.; SOUZA, F. T. Análise Numérica da influência das dimensões e posição das perfurações na resistência à instabilidade distorcional de perfis formados a frio do tipo rack comprimidos. **Revista da Estrutura de Aço**. v. 10. p. 333-350, 2021.

SILVESTRE, N. CAMOTIM, D. DINIS, P. Direct strength method application to cold-formed steel lipped channel columns and beams affected by local-plate/distortional interactive buckling. **Rem: Revista Escola de Minas**. v. 60. p. 341-354, 2007.

SOUZA, F. T. de; SANTOS, E. T. dos; SARMANHO, A. M. C. Análise numérica da influência das dimensões de perfurações em perfis formados a frio do tipo rack submetidos à compressão. **Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão**, Paranaguá, PR, v. 5, n. 5, p. 1-266, 2020. DOI: 10.21575/25254782rmetg2020vol5n51128.

SOUZA, F. T., SARMANHO, A. M. S. MACHADO, A. P. M. Análise via elementos finitos de ligações tipo encaixe em sistemas de armazenamento industrial. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 17 n. 1, p. 16-30, 2021.

UZZAMAN, A.; LIM, J. B. P.; NASH, D.; ROY, K. Cold-formed Steel Channel Sections under End-two-flange Loading Condition: Design for Edge-stiffened Holes, Unstiffened Holes and Plain Webs. **Thin-walled Structures**. 2020. DOI: [10.1016/j.tws.2019.106532](https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106532).

YU, C.; Cold-formed steel flexural member with edge stiffened holes: behavior, optimization, and design. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 71, p. 210-218, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.09.008>.