



Avaliação via método dos elementos finitos da flambagem local em pilares em aço formados a frio do tipo rack com furos com bordas enrijecidas

Guilherme Henrique Ferreira*; Arlene Maria Cunha Sarmanho*; Flávio Teixeira de Souza**.

*Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP, Brasil.

**Instituto Federal de Minas Gerais – Campus Ouro Preto-IFMG, Brasil.

*Autor para correspondência e-mail: flavio.souza@ifmg.edu.br

Palavras-chave

Perfis formados a frio do tipo rack
Elementos finitos
Furos com bordas enrijecidas
Flambagem local

Keywords

Cold-formed steel rack sections
Finite elemento
Edge-stiffened holes
Local buckling

Resumo: Os perfis de aço formados a frio constituem uma alternativa técnica e economicamente viável na construção de pilares. No entanto, por serem formados por chapas de pequena espessura, possuem elevada esbeltez, o que os torna suscetíveis à flambagem local, distorcional e global. Além disso, para acomodar a passagem de dutos ou permitir o encaixe de ligações, é usual que estes perfis tenham perfurações, que tornam ainda mais complexo o seu comportamento e redundam na redução da resistência dos pilares. Uma alternativa para mitigar a influência das perfurações é a adoção de enrijecedores em suas bordas. Nesse contexto, esse trabalho tem o objetivo de avaliar a eficiência da adoção de enrijecedores nas bordas laterais de perfurações retangulares, posicionadas na alma de pilares do tipo rack, no combate aos efeitos da flambagem local. Foram avaliados, via Método dos Elementos Finitos pelo programa ANSYS, pilares sem perfurações, com furos sem enrijecedores, com furos com enrijecimento simples, na borda lateral interna, e com enrijecimento duplo, nas duas bordas laterais. Os resultados indicaram que a adoção dos enrijecedores é eficiente na inibição da ocorrência da flambagem local na região entre os furos, para perfurações de comprimento até 20% maiores que a largura da alma, para os enrijecedores simples, e 30% para enrijecedores duplos. Devido à pequena diferença entre as duas situações, considerando o tipo de encaixe de ligações, conclui-se que a adoção de enrijecedores simples pode ser uma alternativa viável em situações práticas.

Finite element analysis of local buckling in cold-formed steel rack columns with edge-stiffened holes.

Abstract: Cold-formed steel sections are an efficient and economical way to build structural columns. They have high slenderness due to their low thickness, thus are prone to global, local and distortional buckling. They usually have holes to fit connections or instalations, that may reduce their resistance and make their behaviour more complex. To reduce its holes bad effects, their edges may be stiffened. This work analyzes the efficiency of edge-stiffened rectangular holes in cold-formed rack colums under web local buckling. Finite Element analysis by software ANSYS was used to evaluate colums without holes, with non-stiffened holes, with holes containing one lateral edge stiffened end with holes containing tho lateral edges stiffened. Results indicated that adoption of one edge-stiffened lateral holes avoided local buckling between holes with lenght up to 20% higer than colums web width, and the two edge-stiffened holes up to lenght 30% higer than colums web width. Due to similar efficiency and considering the usual assemblage of industrial storage systems, a one edge-stiffened hole may be a reccomendation to practical uses.

Recebido em: 04/2024

Aprovação final em: 06/2024



Introdução

Os perfis em aço formados a frio são aqueles obtidos pelo dobramento de chapas de aço à temperatura ambiente. Normalmente são empregadas chapas de pequena espessura, o que faz com que os perfis tenham peso e custo inferiores aos dos perfis de aço soldados e laminados, nos quais são empregadas chapas de maiores espessuras.

A vantagem econômica, aliada à boa resistência, ao fácil manuseio e à grande variedade de seções transversais disponíveis, faz com que estes perfis tenham ampla aceitação no mercado da construção civil, sendo utilizados em obras de todos os portes. Sua utilização é prevista na norma NBR 14762 (ABNT, 2010), que trata de seu comportamento e dimensionamento. Normas internacionais como a norte-americana AISI S100 (2016) também são importantes referências para a sua utilização, principalmente em aspectos ainda não abordados pela norma nacional.

Como exemplo, a norma NBR 14762 (ABNT, 2010) não aborda a existência de furos utilizados em perfis de aço formados a frio para a passagem de dutos ou encaixe de ligações, como mostrado na Figura 1. Estes furos cumprem importante função técnica, no entanto modificam o comportamento estrutural dos perfis de aço formados a frio e podem reduzir a sua resistência (FREITAS; FREITAS; SOUZA, 2005; MOEN; SCHAFER, 2011; NEIVA *et al.* 2018; SOUZA; SANTOS; SARMANHO, 2020; JARDIM JR. *et al.* 2021; PINTO; SARMANHO; SOUZA, 2021; OLIVEIRA; SARMANHO; SOUZA, 2022; PEREIRA; SARMANHO; SOUZA, 2023).

Figura 1 - Perfurações em perfis formados a frio: (a) para encaixe de ligações; (b) para a passagem de eletrodutos.



(a)

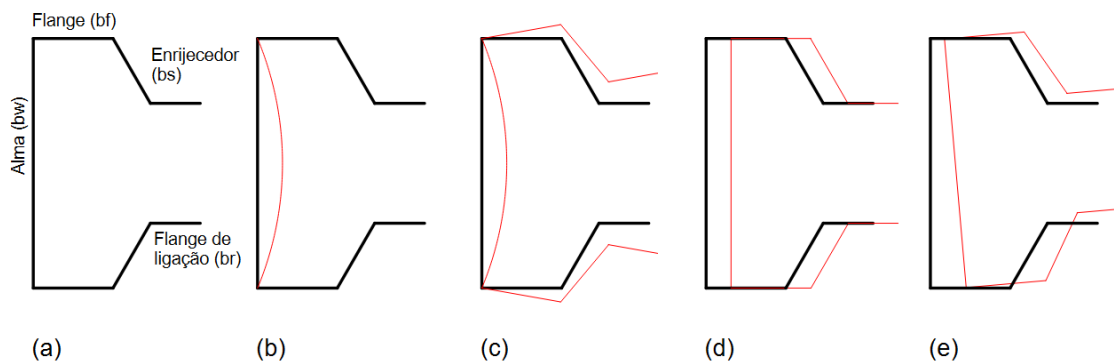
(b)

Fontes: (a) Águia Sistemas (2024); (b) Solara engenharia.

Em geral, os perfis de aço formados a frio estão sujeitos a modos de instabilidade global, que podem ocorrer por flexão, torção, ou flexo-torção; local, quando se concentra em uma placa, sem que ocorram alterações nos ângulos da seção (SCHAFER, 2002) e distorcional, quando se alteram os ângulos da seção (HANCOCK; KWON; BERNARD, 1994). A Figura 2 apresenta a seção do tipo rack, com a nomenclatura de seus elementos e os modos de instabilidade local e distorcional.



Figura 2 - Seção rack: (a) Elementos; (b) Flambagem local na alma; (c) Flambagem distorcional; (d) Flambagem global por flexão; (e) Flambagem global por flexo-torção.

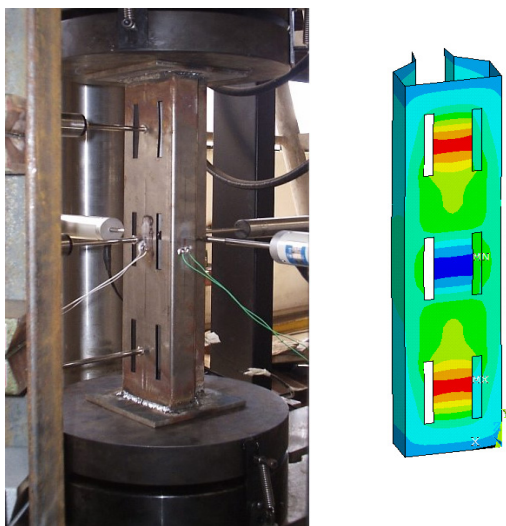


Fonte: Elaboração própria.

A introdução das perfurações pode precipitar a ocorrência destes modos de instabilidade e, dependendo de sua disposição, pode até alterar a forma de sua ocorrência. Como exemplo, cita-se a situação em que há perfurações paralelas na alma do perfil formado a frio do tipo rack. Souza (2013) observou que, nesse caso, a flambagem local fica concentrada entre as perfurações, trazendo um comportamento que não é previsto pelas normas correntes de dimensionamento, conforme mostra a Figura 3.

Uma alternativa para reduzir a influência destas perfurações em perfis formados a frio é a adoção de enrijecedores nas bordas dos furos, criados a partir do processo de estampagem e perfuração das chapas (GREY E MOEN, 2011; YU, 2012; CHEN *et al.*, 2019; CHEN *et al.*, 2020a; CHEN *et al.*, 2020b; NICOLAU, SARMANHO; SOUZA, 2023), conforme apresentado na Figura 4. A utilização destes enrijecedores tem se mostrado promissora, com melhoria na resistência e no comportamento dos perfis formados a frio. No entanto, a amplitude de possibilidades de geometria das perfurações faz com que novas análises sejam desenvolvidas, uma vez que a maioria dos estudos realizados aborda furos de geometria circular.

Figura 3 - Flambagem localizada entre furos.



Fonte: Souza (2013).

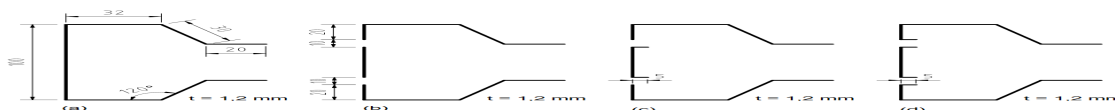
**Figura 4 - Vigas com furos com borda enrijecida.**

Fontes: Yu (2012); Chen et al (2020a).

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é a avaliação via Elementos Finitos da influência das dimensões e do enrijecimento de borda de perfurações no comportamento de pilares curtos do tipo rack. Foram consideradas duas perfurações paralelas, com bordas convencionais e enrijecidas, na alma dos pilares submetidos à compressão centrada. Foram avaliados o desenvolvimento do modo de flambagem local, a força axial de compressão resistente associada à flambagem local e a força axial de compressão resistente de cálculo dos pilares em relação às dimensões das perfurações adotadas.

Metodologia

Para a avaliação do desenvolvimento da flambagem entre furos em perfis do tipo rack, foram realizadas análises via Método dos Elementos Finitos por meio do programa comercial ANSYS (2013). Foram simulados perfis do tipo rack. Quatro configurações de perfurações na alma foram consideradas. Na primeira, foi avaliado o pilar sem perfurações e, em seguida, o pilar com perfurações sem enrijecedor de borda, que é o procedimento corrente. Para avaliar a influência dos enrijecedores de borda no desenvolvimento da flambagem entre furos, foram avaliadas duas situações com esses enrijecedores: em uma das arestas laterais do furo e em ambas as arestas laterais. Essas quatro hipóteses analisadas estão apresentadas na Figura 5.

Figura 5- Seções estudadas com dimensões em mm: (a) Sem furo; (b) Furo não enrijecido; (c)

Fonte: Elaboração própria.

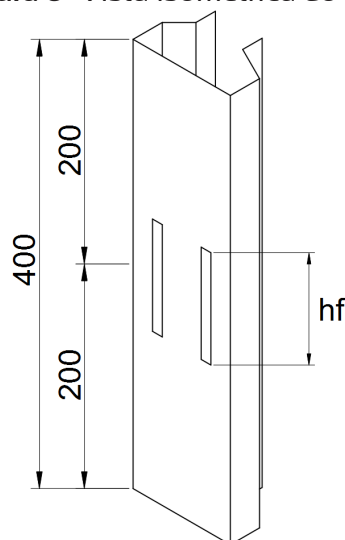
Foram considerados pilares com altura igual a 400 mm. Esse comprimento foi escolhido para assegurar o pleno desenvolvimento do modo local, sem a influência dos efeitos de extremidade, que, em geral, inibem a formação das meia-ondas. A partir de análises via Teoria Generalizada de Vigas por meio do programa GBtul (BEBIANO *et al.* 2008), foi constatado que, para a seção sem perfurações apresentadas na Figura 5 (a), esse comprimento permite a formação de cinco meias ondas.

Em cada pilar, foram considerados dois furos, em posição equidistante à linha média da alma. As



perfurações foram posicionadas sempre a meia altura do pilar, conforme mostra a Figura 6, uma vez que, nessa região, ocorre a formação de uma meia-onda com os maiores deslocamentos ocorridos no pilar. Para cada arranjo, foram simulados 20 comprimentos de perfurações (h_f), variando de 10 mm a 200 mm.

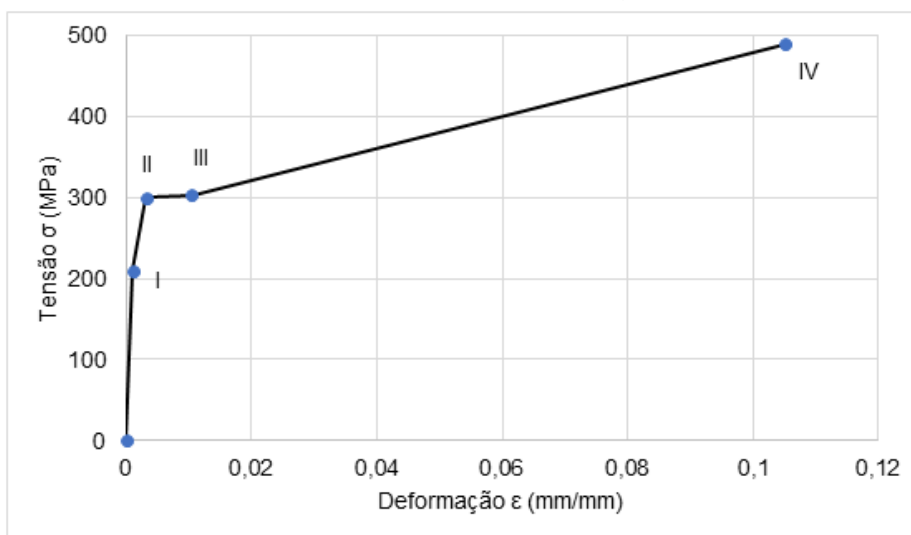
Figura 6- Vista isométrica do pilar.



Fonte: Elaboração própria.

As propriedades do aço foram inseridas a partir de um diagrama tensão x deformação multilinear, ou seja, uma aproximação em que o diagrama real é representado por segmentos de reta, conforme mostra a Figura 7.

Figura 7- Diagrama tensão x deformação multilinear.



Fonte: Elaboração própria.

Foram utilizadas as propriedades nominais do aço CF30, previsto na norma NBR 14762 (2010):
Módulo de Elasticidade: $E = 200$ GPa;
Tensão de Escoamento: $f_y = 300$ MPa;
Tensão Última: $f_u = 490$ MPa.



Os pontos utilizados na geração do diagrama multilinear são (FARIA, 2016):

I (ε_y ; $0,7 f_y$)

II ($3\varepsilon_y$; f_y)

III ($10\varepsilon_y$; $1,01f_y$)

IV ($100\varepsilon_y$; f_u)

Sendo $\varepsilon_y = f_y/E$.

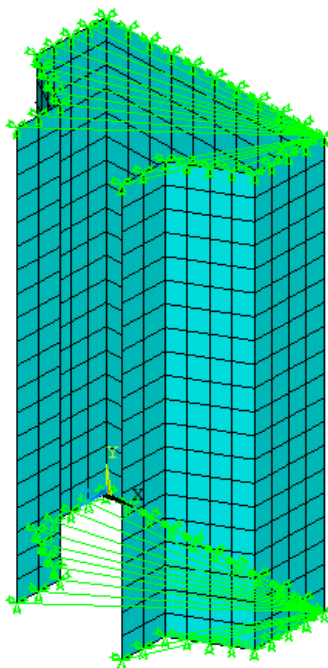
Para a simulação do pilar, foram utilizados elementos de casca do tipo SHELL181 da biblioteca do ANSYS. Esse elemento possui boa eficiência computacional e precisão neste tipo de análise. Foi adotada, em todos os modelos, a malha quadrilateral com lado do elemento igual a 10% da largura da alma, conforme indicado por Souza (2013) e Faria (2016).

Os nós das extremidades tiveram os deslocamentos perpendiculares ao eixo do modelo restringidos, assim como a rotação em relação ao eixo longitudinal. Os nós das extremidades tiveram todos os graus de liberdade acoplados. Assim, os deslocamentos e os carregamentos foram aplicados de forma concentrada no nó mestre do acoplamento, e seus efeitos se distribuíram uniformemente em toda a extremidade do pilar. Um nó situado à meia altura do modelo teve sua translação impedida na direção axial, para combater o movimento de corpo rígido na direção do carregamento. A Figura 8 apresenta as condições de contorno.

Foram realizadas dois tipos de análise. Primeiramente foi feita a análise de flambagem elástica dos pilares. Nesse caso, obtiveram-se as cargas críticas de flambagem e os modos a elas associados. Nesta etapa, foi aplicada uma carga de compressão unitária nas extremidades do pilar e o material foi considerado elástico.

Em seguida, a partir do modo de flambagem fundamental obtido na análise de flambagem elástica, foram introduzidas as imperfeições geométricas no pilar a partir da multiplicação dos deslocamentos por um fator de imperfeição igual à metade da espessura da chapa (0,6 mm). Nesta etapa foram inseridas as propriedades elastoplásticas do material apresentadas na Figura 7, e foram obtidas as forças axiais de compressão resistentes dos pilares estudados.

Figura 8- Condições de contorno adotadas.



Fonte: Elaboração própria.



Considerando as três configurações de perfurações e as variações das dimensões dos furos, 61 modelos foram avaliados. Para cada um deles foram realizadas as análises linear e não-linear.

O modelo foi validado a partir da comparação de seus resultados com valores teóricos. Para a análise de flambagem elástica, os valores foram comparados com resultados obtidos pela Teoria Generalizada de Vigas (GBT) obtidos via GBTul para a seção sem furos. O modelo em estudo indicou a força axial de compressão resistente associada à flambagem local $N_l = 49,90$ kN, enquanto o valor de referência via GBT foi de 49,71 kN, com uma diferença de 0,38%, o que indica a viabilidade do modelo para a análise de flambagem elástica.

Para a análise não linear, o resultado numérico foi comparado ao resultado obtido via Método da Resistência Direta considerando o modo local isoladamente:

$$N_{crI} = A f_y \quad \text{se } \lambda_l \leq 0,776 \quad (\text{Eq. 1})$$

$$N_{crI} = \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_l^{0,8}}\right) \left(\frac{N_{cre}}{\lambda_l^{0,8}}\right) \quad \text{se } \lambda_l > 0,776 \quad (\text{Eq. 2})$$

Sendo:

$$\lambda_l = \left(\frac{A f_y}{N_l}\right)^{0,5} \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde A é a área bruta da seção transversal da barra; f_y é a tensão de escoamento do aço; N_{cre} é a força axial de compressão resistente associada à flambagem global; N_l é a força axial de compressão resistente associada à flambagem local; λ_l é o índice de esbeltez reduzido associado à flambagem local.

O modelo numérico forneceu a força axial de compressão resistente igual a 65,33 kN, enquanto o resultado teórico foi de 64,85 kN. A diferença de 0,74% indica a adequação do modelo numérico na previsão da resistência dos pilares.

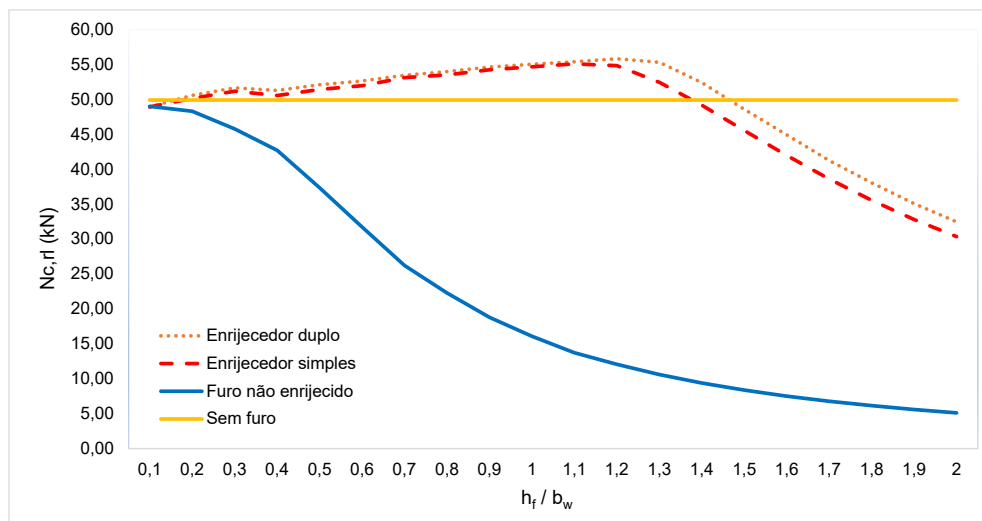
Resultados e discussão

Neste item serão apresentados e analisados os resultados dos modelos numéricos dos pilares do tipo rack com perfurações. Primeiramente, será apresentada a análise de flambagem elástica, com ênfase no desenvolvimento dos modos de flambagem e posteriormente a análise não linear, onde será avaliada a influência das perfurações na resistência dos pilares.

Análise de flambagem elástica

A análise de flambagem elástica foi desenvolvida para a avaliação da influência das dimensões das perfurações no desenvolvimento dos modos de flambagem e na força axial de compressão resistente associada à flambagem local. A Figura 9 apresenta os valores para os quatro tipos de seções avaliadas em função da relação entre o comprimento do furo (h_f) e a largura da alma (b_w).

Considerando como referência a força axial de compressão resistente associada à flambagem local do pilar sem perfurações, pode-se observar que a adoção de furos não enrijecidos leva a uma redução na resistência à flambagem com o aumento do comprimento dos furos. A Figura 10 apresenta os modos de flambagem observados para os pilares com furos sem enrijecedores. Pode-se notar uma uniformidade dos modos de flambagem, o que explica a relação direta entre o aumento do comprimento do furo e a redução da força axial de compressão resistente associada à flambagem local apresentada na Figura 9.

**Figura 9** - Forças axiais de flambagem elástica em função das dimensões dos furos.

Fonte: Elaboração própria.

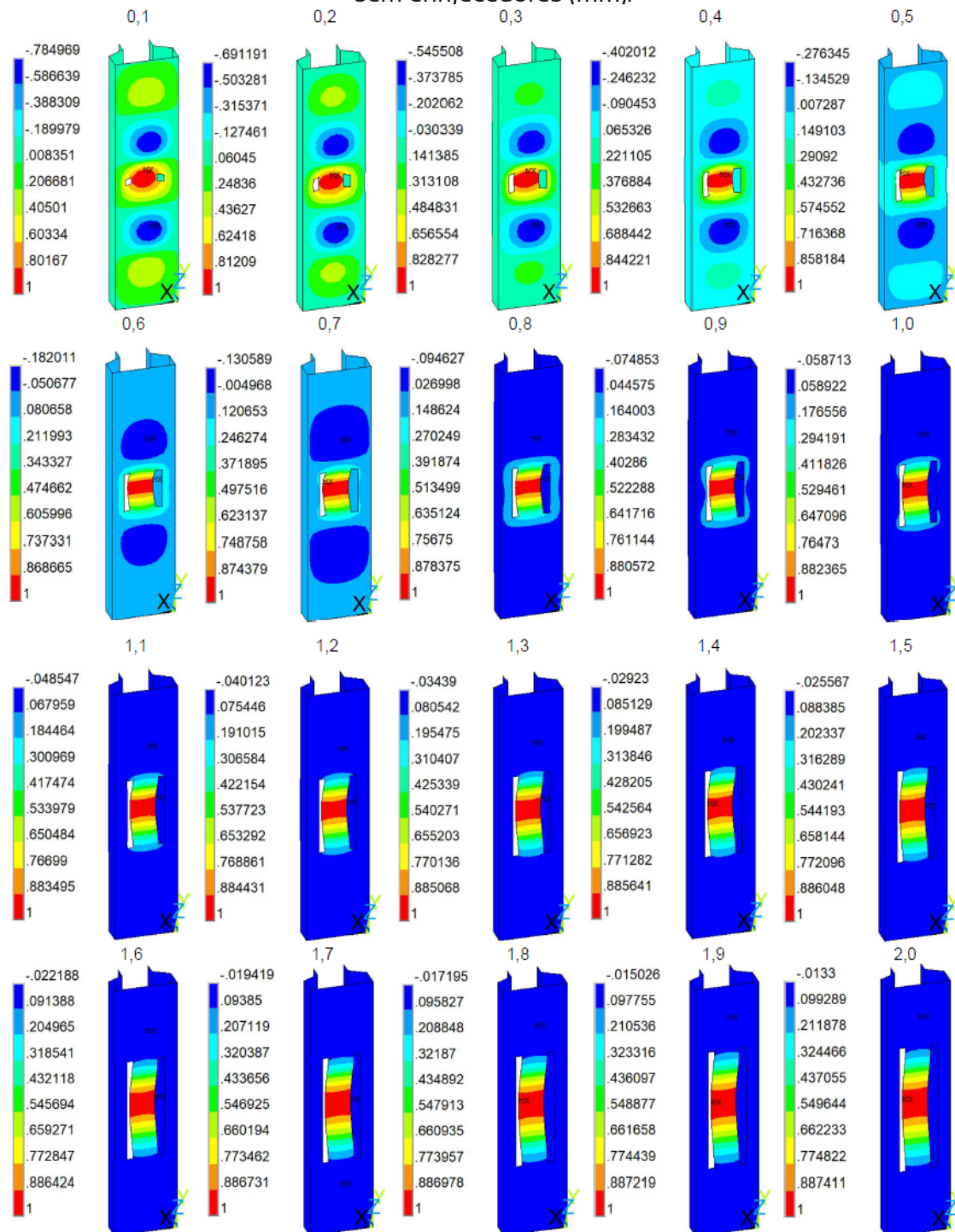
No entanto, a adoção de enrijecedores nas bordas laterais das perfurações reverte esta tendência. Para pilares com furos com enrijecedor simples, observam-se resistências à flambagem superiores às do pilar sem perfurações para furos de comprimento até 30% maiores que a largura da alma ($h_f/b_w = 1,3$); para pilares com furos com enrijecedor duplo, este efeito é observado para furos com comprimento até 40% maiores que a largura da alma ($h_f/b_w = 1,4$). Pode-se ainda observar que, em pilares com furos com enrijecedor simples, os valores são crescentes até a relação $h_f/b_w = 1,2$, e com enrijecedores duplos, os valores da força axial de compressão resistente associada à flambagem local aumenta até $h_f/b_w = 1,3$.

A Figura 11 apresenta os deslocamentos na alma para os pilares com furos com enrijecedores simples. Pode-se observar que, no trecho em que a resistência à flambagem é crescente, ou seja, até a relação $h_f/b_w = 1,2$, a existência dos enrijecedores nas bordas laterais internas das perfurações inibe o desenvolvimento da flambagem entre os furos, indicando assim a eficiência dos enrijecedores e explicando a sua eficiência no aumento da resistência à flambagem elástica dos pilares. A partir da relação $h_f/b_w = 1,3$, o enrijecedor simples perde a sua eficiência e a flambagem concentra-se na região entre as perfurações, levando a um decréscimo da resistência à flambagem a partir deste valor. Ainda assim, como foi apresentado na Figura 9, mesmo a partir da relação $h_f/b_w = 1,3$, a inclusão do enrijecedor simples leva a um considerável aumento da resistência se forem considerados os furos convencionais, sem enrijecedores, apesar de não evitarem a redução da resistência em relação ao caso sem perfurações.

Análise semelhante pode ser feita quando se consideram pilares com enrijecedores duplos, em ambas as bordas laterais dos furos, conforme apresenta a Figura 12. Nesse caso, o trecho crescente é até a relação $h_f/b_w = 1,3$, em que se observa a efetividade dos enrijecedores na inibição à flambagem entre perfurações. A partir da relação $h_f/b_w = 1,4$, as conclusões são similares às aquelas para os pilares com perfurações com enrijecedores simples.



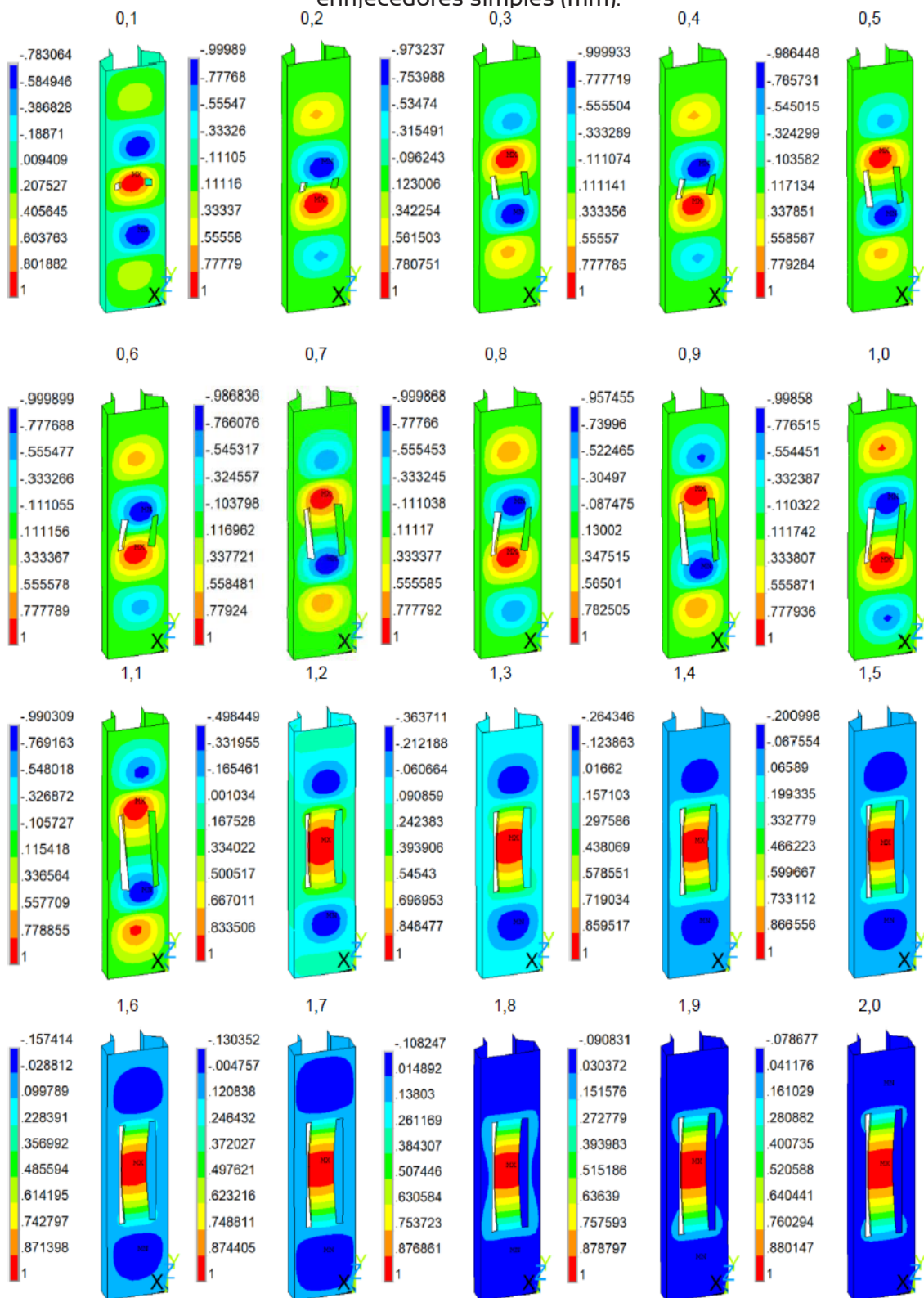
Figura 10 - Deslocamentos devidos à flambagem local elástica na alma dos pilares com furos sem enrijecedores (mm).



Fonte: Elaboração própria.

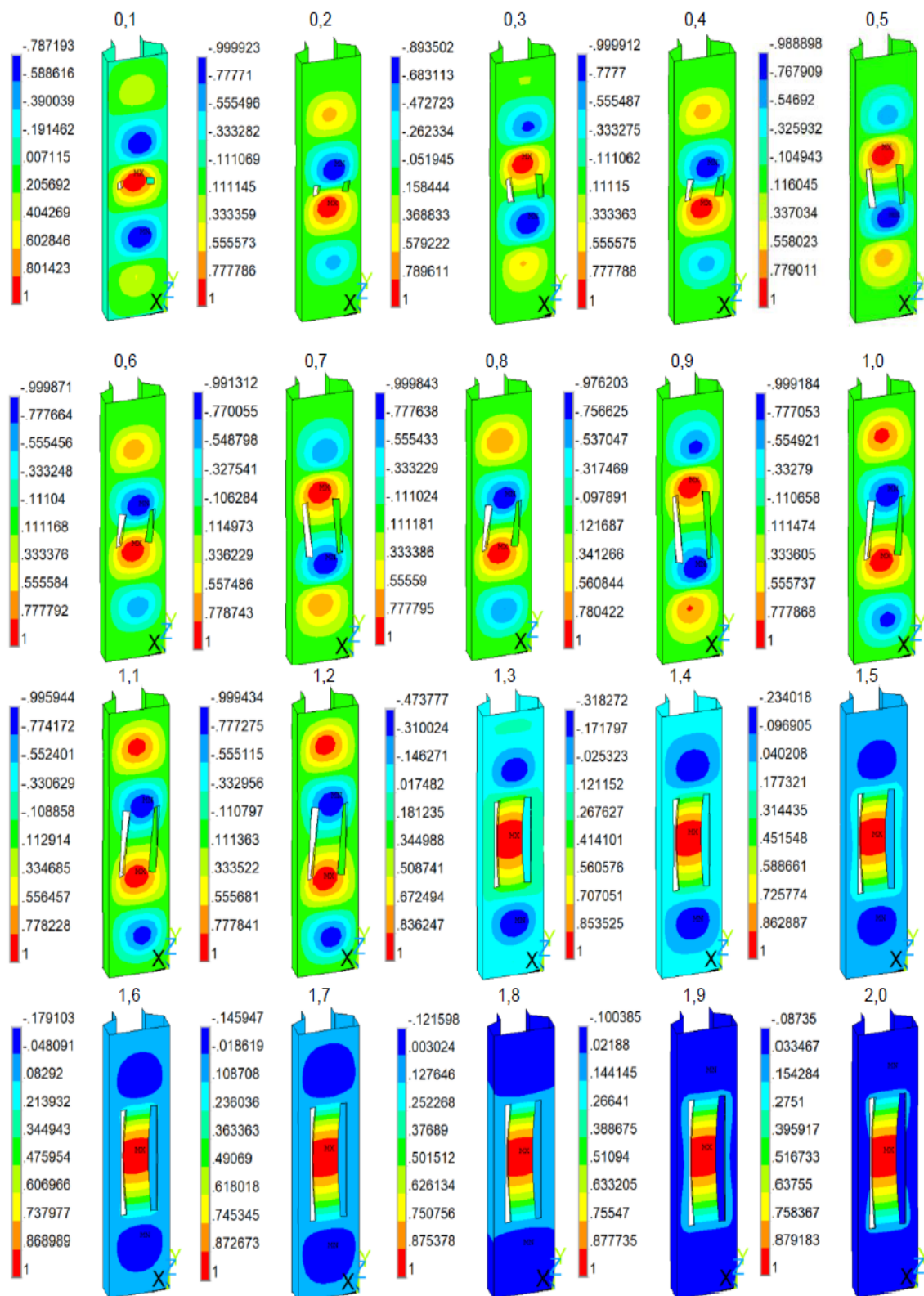


Figura 11 - Deslocamentos devido à flambagem local elástica na alma dos pilares com furos com enrijecedores simples (mm).



Fonte: Elaboração própria.

Figura 12 - Deslocamentos devidos à flambagem local elástica na alma dos pilares com furos com enrijecedores simples (mm).



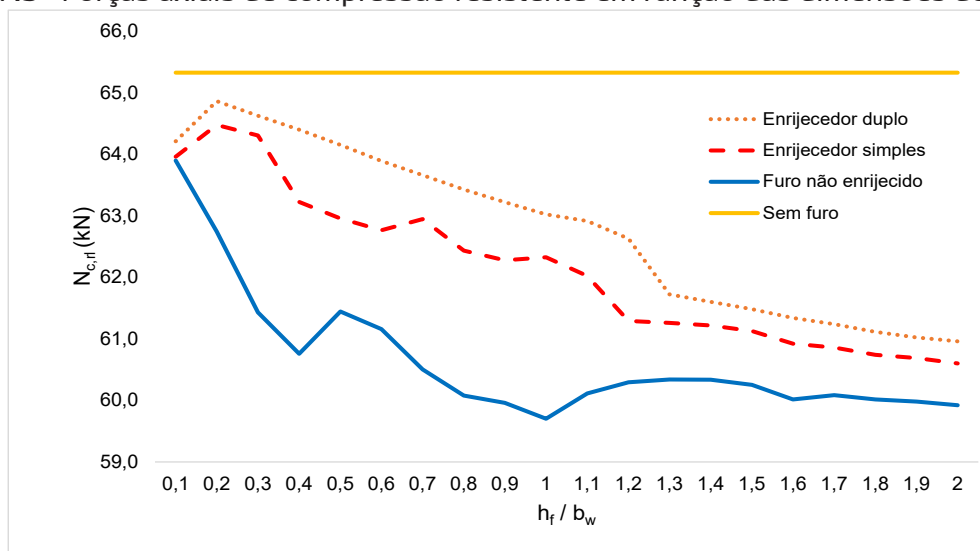
Fonte: Elaboração própria.



Análise não linear

A análise não linear foi efetuada com o objetivo de avaliar a influência da inserção dos enrijecedores na força axial de compressão resistente dos pilares, considerando-se os efeitos da não-linearidade geométrica, a partir da introdução das imperfeições, e da não-linearidade elástica, a partir da introdução das propriedades elastoplásticas do aço. A Figura 13 apresenta os resultados.

Figura 13 - Forças axiais de compressão resistente em função das dimensões dos furos.

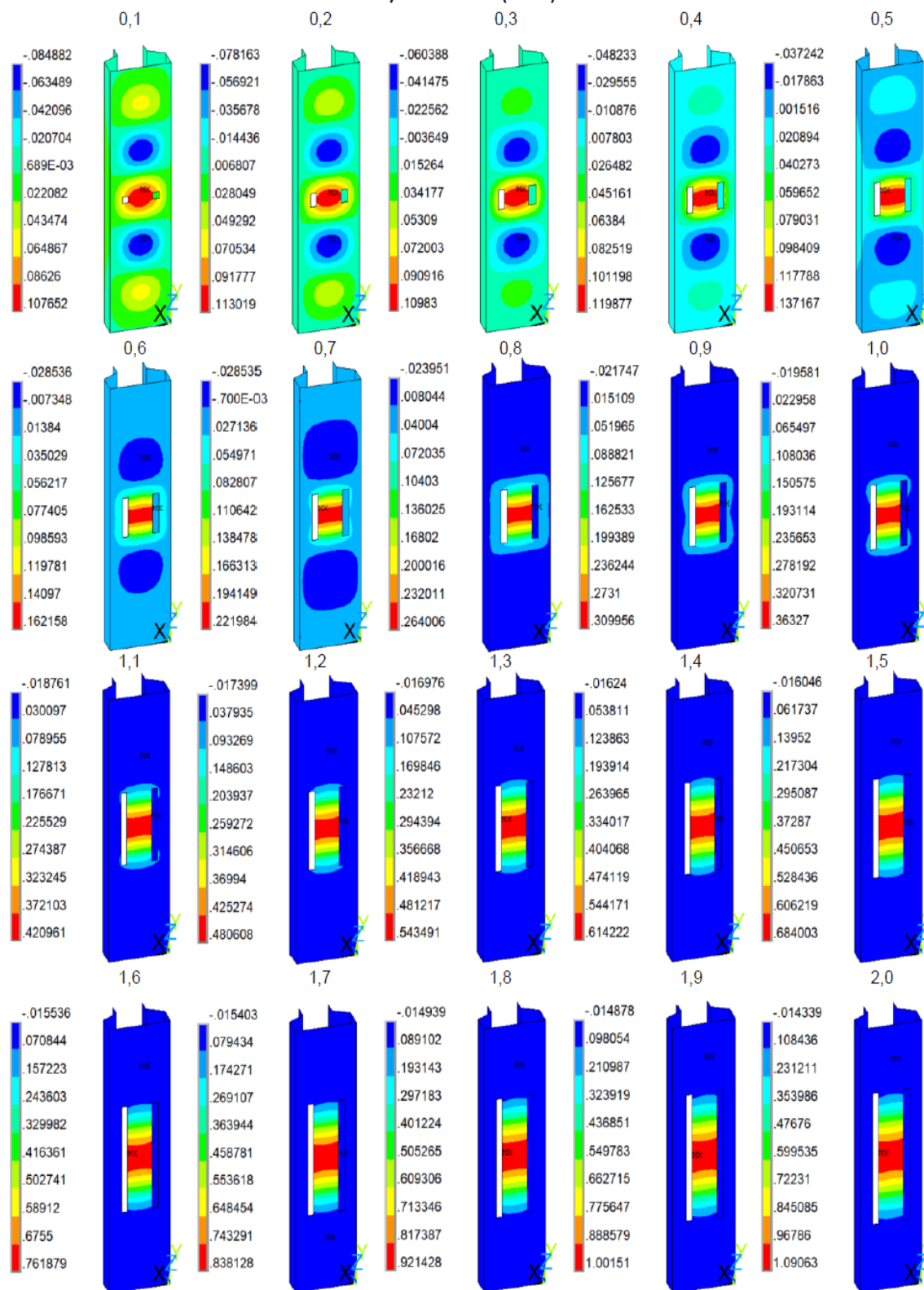


Fonte: Elaboração própria.

Pode-se observar que, em todos os casos de pilares com perfurações houve redução da resistência à compressão se a resistência do pilar sem perfurações for considerada como referência. No entanto, observa-se que os pilares com furos com perfurações enrijecidas apresentam ganhos de resistência se comparados aos pilares com perfurações não-enrijecidas.

A Figura 14 apresenta os deslocamentos nos pilares com furos não enrijecidos. Observa-se que há uma manutenção no padrão dos deslocamentos em todo o espectro de comprimentos dos furos. O mesmo não ocorre para os pilares com enrijecedores. A Figura 15 apresenta os deslocamentos para os pilares com furos com enrijecedores simples. A partir da relação $h_f/b_w = 1,2$, o enrijecedor perde eficiência, o que se reflete em uma redução significativa na resistência, observada na Figura 13. Para os pilares com furos com enrijecedores duplos, ocorre fenômeno semelhante a partir da relação $h_f/b_w = 1,3$, conforme é apresentado na Figura 16.

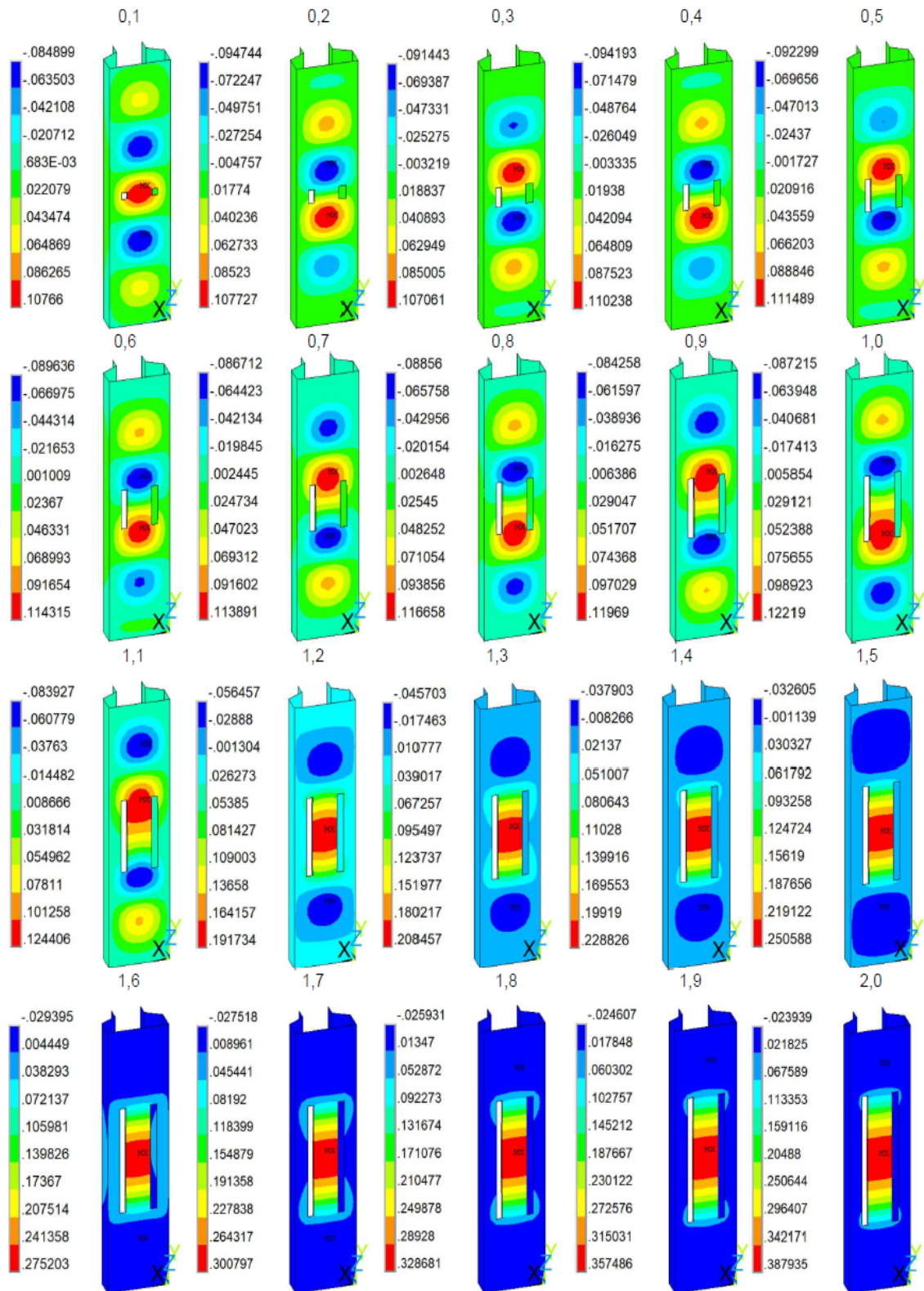
Figura 14 - Deslocamentos obtidos na análise não-linear na alma dos pilares com furos sem enrijecedores (mm).



Fonte: Elaboração própria.



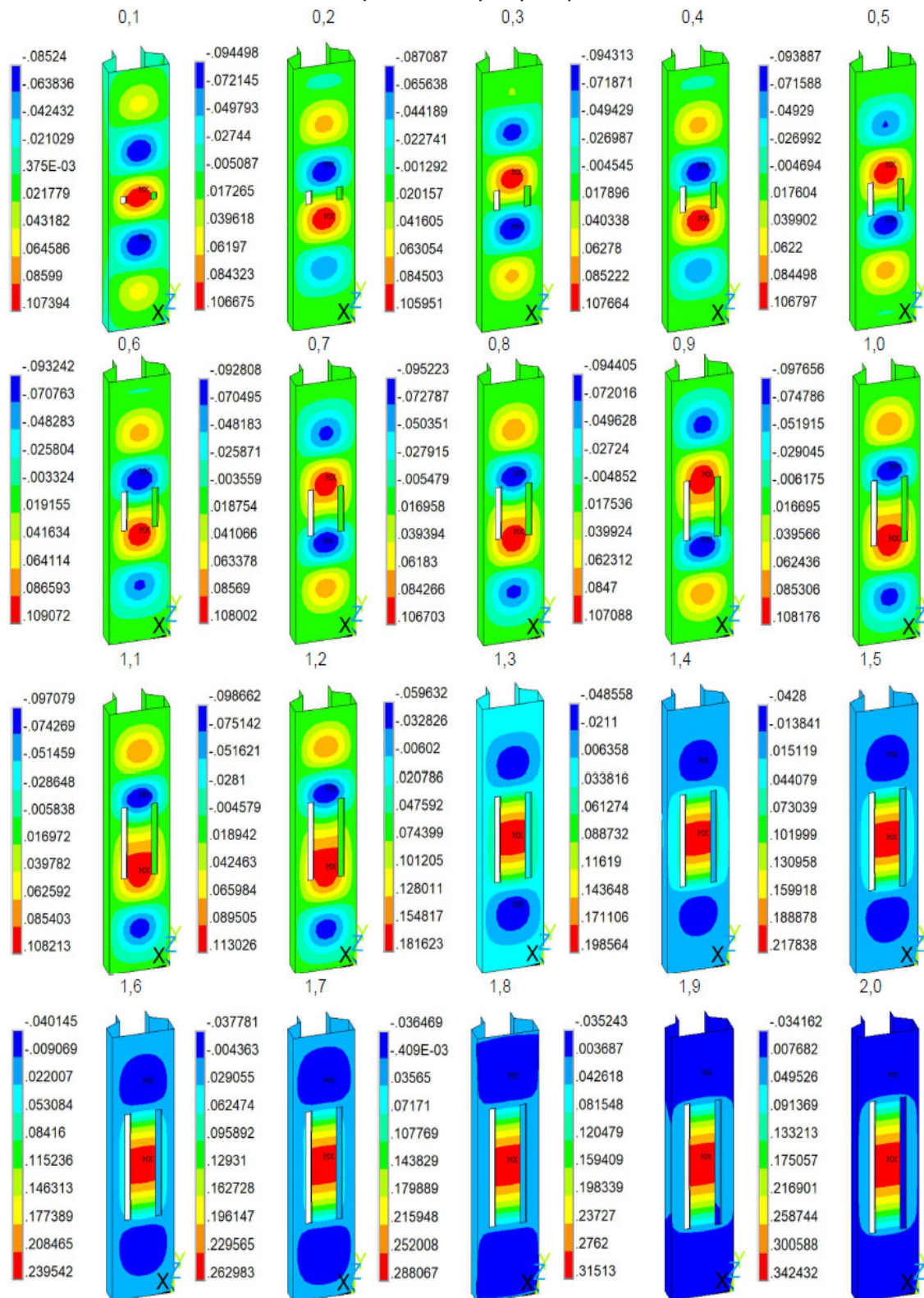
Figura 15 - Deslocamentos obtidos na análise não-linear na alma dos pilares com furos com enrijecedor simples (mm).



Fonte: Elaboração própria.



Figura 16 - Deslocamentos obtidos na análise não-linear na alma dos pilares com furos com enrijecedor duplo (mm).



Fonte: Elaboração própria.



Conclusões

Os perfis de aço formados a frio constituem uma alternativa técnica e economicamente viável para a construção de estruturas. No entanto, por serem esbeltos e, portanto, suscetíveis à flambagem local e distorcional, possuem particularidades em seu dimensionamento. Além disso, a existência de perfurações, comuns em aplicações como *steel frame* e sistemas de armazenagem industrial, torna ainda mais necessária a correta avaliação do desenvolvimento dos modos de flambagem.

Este trabalho avaliou a existência de perfurações retangulares paralelas na alma de perfis formados a frio do tipo rack, usuais em sistemas de armazenagem industrial. Esse arranjo de perfurações, dependendo de suas dimensões, pode levar à ocorrência da flambagem entre furos, que é um comportamento não previsto nas normas de dimensionamento correntes. O principal objetivo da pesquisa foi a avaliação da eficiência da adoção de enrijecedores de borda nas perfurações para combater a flambagem entre furos.

A primeira abordagem, chamada enrijecedores simples, posicionou estes elementos nas bordas laterais internas das perfurações. Foi observada a eficiência dos enrijecedores em evitar a flambagem entre furos para perfurações de comprimento até 20% maior que a largura da alma da seção. Foi ainda avaliada a adoção de enrijecedores duplos, nas duas bordas laterais das perfurações. Nesse caso, foi observada a sua eficiência em evitar a flambagem entre furos para perfurações de comprimento até 30% da largura da alma.

Conclui-se que as duas propostas de enrijecimento das perfurações retangulares demonstraram eficiência similar na contenção do desenvolvimento da flambagem entre furos. Como, em geral, o comprimento das perfurações é inferior à largura da alma, tanto o enrijecimento simples, quanto o enrijecimento duplo, podem contribuir para aumentar a resistência e melhorar o comportamento dos pilares em perfis de aço formados a frio do tipo rack.

Nas aplicações destes pilares em sistemas de armazenagem industrial, em geral, as ligações são encaixadas nas bordas laterais externas das perfurações. Assim, devido à pequena diferença na eficiência dos dois modelos de enrijecimento, sendo ambos eficientes, pode-se sugerir o enrijecimento simples, apenas nas bordas laterais internas das perfurações, como uma alternativa cuja viabilidade possa ser avaliada em situações reais de projeto.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES, à Universidade Federal de Ouro Preto e ao Instituto Federal de Minas Gerais Campus Ouro Preto pelo suporte à pesquisa.

Referências

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14762**: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por Perfis Formados a Frio. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

Águia sistemas. Disponível em: <https://aguiasistemas.com.br/> Acesso em 09 abr. 2024.

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®. Structural Analysis, Release 15.0, Help System. *Mechanical APDL Structural Analysis Guide*. ANSYS, Inc., Canonsburg, PA. 2013.

BEBIANO, R.; PINA, P.; SILVESTRE, N.; CAMOTIM, D. **GBTUL – Buckling and Vibration Analysis of Thin-Walled Members**, DECivil/IST, Technical University of Lisbon, 2008. (<http://www.civil.ist.utl.pt/gbt>).

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, V. O. **Análise de estabilidade de Perfis Formados a Frio com perfurações**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, 2016.
- FREITAS, A. M. S.; FREITAS, M. S. R.; SOUZA, F. T. Analysis of steel storage rack columns. **Journal of Constructional Steel Research**, Vol. 61, p. 1135 –1146, 2005.
- 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.; KWON, B.; BERNARD, E. S. Strength design curves for thin-walled sections undergoing distortional buckling. **Journal of Constructional Steel Research**, v.31, p.169-186, 1994.
- JARDIM JR, F.; HELENO, R. P.; SOUZA, F. T.; SARMANHO, A. M. C. 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.
- MOEN, C. D.; SCHAFER, B. W. Direct strength method for design of cold-formed steel columns with holes. **Journal of Structural Engineering**, v. 137, n. 5, p. 559-570, 2011.
- NEIVA, L. H. A.; SALES, A. E. C. A.; ELIAS, G. C.; SARMANHO, A. M. C.; SOUZA, F. T. Análise do modo distorcional de elementos perfurados segundo Método da Resistência Direta. **Revista da Estrutura de Aço**. v. 7. p. 17-36, 2018.
- NICOLAU, I. A. N.; SARMANHO, A. M. C.; SOUZA, F. T. Análise Numérica de Perfis Formados a Frio do tipo U Enrijecido com Perfurações Enrijecidas Submetidos à Compressão. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, v. 8, p. 1-10, 2023.
- 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.
- PEREIRA, A. F. N.; SARMANHO, A. M. C., SOUZA, F. T. Análise via Elementos Finitos de Pilares em Perfis Formados a Frio do tipo U enrijecido com perfurações submetidos à flambagem distorcional. **REUCP**, Petrópolis, v. 17, n. 1, 85-98, 2023.
- PINTO, R. A. R.; SARMANHO, A. M. C.; 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.
- SANTOS, E. T.; SARMANHO, A. M. C.; SOUZA, F. T. 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.
- SCHAFER, B. Local, distortional and Euler buckling of thin-walled columns. **Journal of Structural Engineering**, v.128, p. 289-299, 2002.
- Solara engenharia**. Disponível em: <http://www.solaradrywallbh.com.br/steel-frame/#!> Acesso em: 09 abr. 2024
- SOUZA, F. T. **Análise teórico-experimental da estabilidade de colunas perfuradas em perfis de aço formados a frio de seções tipo rack**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, 2013.
- 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>.