

CAPACIDADE RESISTENTE DE COLUNAS CONTRAVENTADAS EM PERFIS FORMADOS A FRIO COM PERFURAÇÕES

Luiz Henrique de Almeida Neiva
Guilherme Cássio Elias
Juliane Aparecida Braz Starlino
Vinicius Nicchio Alves
Arlene Maria Cunha Sarmanho

lhalmeidaneiva@gmail.com

eliasguilhermec@gmail.com

justarlino@yahoo.com.br

vnichio@hotmail.com

arlene.sarmanho@gmail.com

Civil Engineering Department, Federal University of Ouro Preto

R. Diogo de Vasconcelos, 122, Pilar, 35.400-000, Ouro Preto, MG, Brasil

Abstract. The use of cold-formed profiles, due to its versatility, economy and lightness, has been increasingly incorporated into the civil construction. The workability found in the thin-walled sections allows a great variety of cross sections, allowing its use in several segments. One of these uses is in the Industrial Storage Systems, usually called racks, in which the cold-formed steel profiles are used in most elements, including the uprights. These uprights have perforations along the length, in order to facilitate the assembly of the system as a whole. The objective of this work is to evaluate the influence of the perforations and the arrangement of bracings in the ultimate load of pinned uprights under axial compression, with lengths in which the distortional buckling mode is dominant. The analyzed cross sections are of the rack type, commonly used in these systems. Numerical studies were carried out using ANSYS commercial program, calibrated with results of experimental program. An elastic stability analysis was performed in the ANSYS and in conjunction with a modification of the Direct Strength Method proposed by the authors, were obtained the ultimate loads that were compared to the experimental results.

Keywords: Cold-formed steel, Axial compression tests, Direct strength method (DSM)

1 Introdução

A concepção de estruturas cada vez mais leves e esbeltas na indústria da construção civil leva em consideração os atuais avanços tecnológicos e fatores econômicos. Os sistemas de armazenagem industriais são estruturas utilizadas para armazenar produtos manufaturados. Começaram a ser utilizados por volta do ano 1930 [1] e variam de pequenas estantes carregadas manualmente até estruturas com mais de 30 metros de altura com carregamento automatizado.

Os sistemas de armazenagem (Fig. 1) são, em geral, construídos em perfis formados a frio, obtidos a partir do dobramento ou perfilagem de chapas de aço em temperatura ambiente. Estas chapas de aço possuem características que proporcionam a trabalhabilidade necessária ao processo de conformação, como a reduzida espessura. Em consequência, tais perfis apresentam grande variedade de seções transversais, desenvolvidas para facilitar a montagem das estruturas.



Figura 1. Sistema de armazenagem industrial.[2]

A seção transversal do tipo rack (Fig. 2) é usualmente adotada para as colunas que compõem os sistemas de armazenagem. Os flanges de ligação possibilitam a fixação dos contraventamentos que conectam duas colunas formando os painéis contraventados, responsáveis pela estabilização da estrutura. A alma apresenta perfurações contínuas e igualmente espaçadas que permitem o posicionamento das vigas (longarinas), como mostrado na Fig. 3.

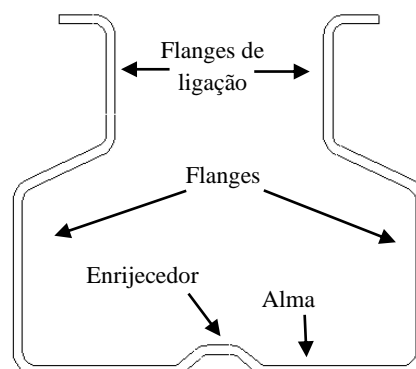


Figura 2. Elementos que compõem a seção tipo rack.



Figura 3. Conexão dos contraventamentos e da longarina com a coluna.[3]

Devido a sua elevada esbelteza, os perfis formados a frio estão sujeitos aos modos de instabilidades. Os principais modos são a flambagem local, flambagem global e flambagem distorcional.

O modo de flambagem distorcional, característico dos perfis formados a frio de seção aberta e monossimétrica, se caracteriza quando a perda de estabilidade provoca alterações na seção transversal com deslocamentos de pelo menos um dos vértices, causando abertura ou fechamento da seção [4]. O estudo do comportamento das placas que compõem a seção transversal do perfil formado a frio depende da solução de equações de equilíbrio complexas. São adotados, portanto, métodos simplificados de solução, como o método da resistência direta [5] e o método da seção efetiva [6]. Estudos a respeito da estabilidade e resistência de elementos comprimidos e a influência das perfurações no comportamento estrutural destes elementos tem sido realizados por diversos autores, a exemplo dos trabalhos de Schafer [7], Pastor *et al.* [8], Bonada *et al.* [9], Zhao *et al.* [10], Neiva *et al.* [11], Elias *et al.* [3] e Neiva *et al.* [4].

Neiva *et al.* [4] realizaram um estudo comparativo da capacidade resistente de colunas perfuradas formadas por perfil formado a frio, entre resultados obtidos pelo método da resistência direta e pelo modelo numérico desenvolvido. A partir das análises propôs-se uma modificação nas formulações do método da resistência direta para considerar a perfuração contínua presente na seção da coluna do tipo rack e em perfil formado a frio.

O objetivo do presente trabalho é realizar uma análise comparativa da capacidade resistente entre painel contraventado e coluna isolada (ou seja, sem posicionamento do contraventamento) obtida experimentalmente. Além disso, comparar a capacidade resistente obtida pelo método da resistência direta adaptado por Neiva *et al.* [4] e a obtida experimentalmente.

2 Programa Experimental

As colunas estudadas possuem seção transversal do tipo rack e é mostrada na Fig. 4, com os furos e suas dimensões representados. O comprimento de coluna analisado é de 800 mm, escolhido por evidenciar o modo de flambagem distorcional, como concluído por Elias *et al.* [3]. A tensão de escoamento do aço foi obtida por ensaio de caracterização, e seu valor é $f_y=370,54$ MPa.

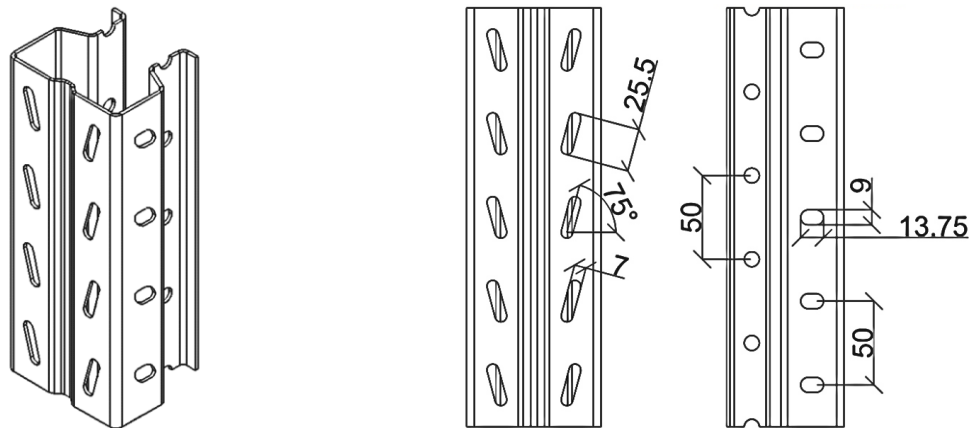


Figura 4. Seção transversal estudada (dimensões em mm).[3]

A montagem experimental do ensaio de compressão foi desenvolvida baseada na norma europeia BS EN 15512:2009 [12], mostrada na Fig. 5. Os protótipos foram posicionados entre os pratos de aplicação de carga da prensa de ensaio, com extremidades rotuladas. Foram realizados dois ensaios dos painéis contraventados compostos por duas colunas conectadas por barras de contraventamento e um ensaio de coluna isolada. Os ensaios foram realizados em prensa servo-hidráulica INSTRON SATEC 5569 com controle de deslocamentos e foram determinadas as capacidades de carga experimentais dos protótipos. Foram utilizados transdutores de deslocamentos (LVDTs) para monitorar o andamento do ensaio. O posicionamento dos LVDTs foi a $\frac{1}{2}$ e $\frac{1}{4}$ do comprimento dos protótipos.

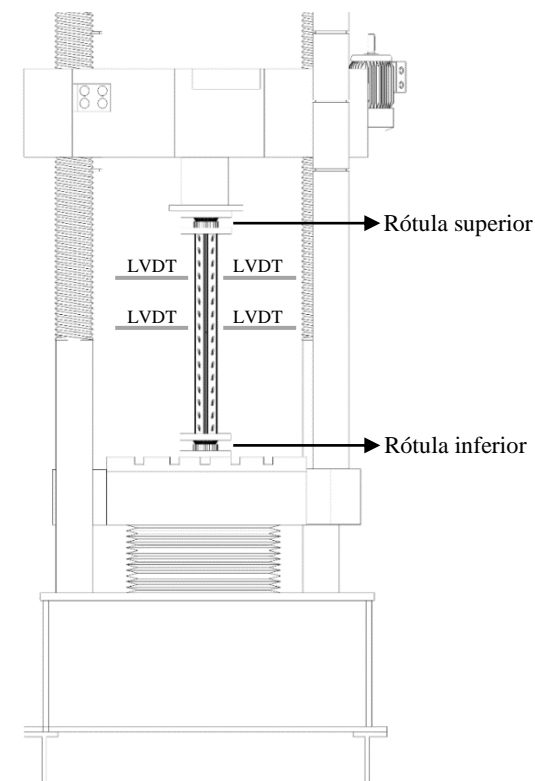
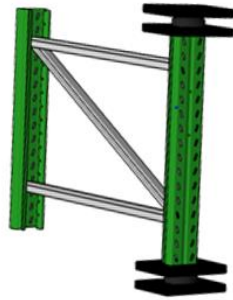


Figura 5. Esquema de ensaio - vista frontal. [3]

O esquema do painel contraventado com a disposição dos contraventamentos é mostrado na Fig. 6a e uma imagem do ensaio realizado é mostrada na Fig. 6b. Na Fig.7a e na Fig. 7b,

respectivamente, são mostrados o esquema e a imagem do ensaio da coluna isolada (sem os contraventamentos).

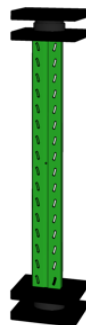


(a)



(b)

Figura 6. Painel contraventado – (a) Esquema do ensaio – vista lateral; (b) Imagem do ensaio.



(a)



(b)

Figura 7. Coluna isolada – (a) Esquema do ensaio; (b) Imagem do ensaio.

As propriedades da seção transversal dos protótipos estudados são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades da seção.

b_w (mm)	t (mm)	A_g (cm ²)	A_{net} (cm ²)	I_x (cm ⁴)	I_y (cm ⁴)	C_w (cm ⁶)	J (cm ⁴)
100	2,0	5,57	4,73	35,76	80,93	1102,22	0,07422

Onde:

b_w é a largura da alma;

t é a espessura da seção;

A_g é a área bruta da seção transversal maciça;

A_{net} é a área da seção transversal considerando redução devido aos furos da alma e flanges;

I_x e I_y são os momentos de inércia relativos aos eixos x e y, respectivamente;

C_w é a constante de empenamento da seção transversal;

J a constante de torção da seção.

A área da seção A_{net} foi calculada como a área mínima da seção transversal segundo um plano que intercepte o maior número de perfurações existentes ao longo do comprimento da coluna, que passa pelos furos da alma e dos flanges da seção rack estudada.

3 Análise Numérica

Para utilizar as prescrições do método da resistência direta a fim de obter a capacidade resistente da coluna isolada, é necessário realizar uma análise de estabilidade elástica para obter a carga crítica de flambagem da coluna. Foi utilizado o método dos elementos finitos através do software Ansys [13], sendo possível inserir as perfurações ao longo do comprimento da coluna, o que não é possível em outros métodos como GBtul [14] e CuFSM [7].

3.1 Elementos, refinamento de malha e condições de contorno

O elemento finito utilizado nas colunas foi o elemento SHELL 181 (Fig. 7), baseado em estudos realizados considerando seções perfuradas [15]. Este elemento possui quatro nós com seis graus de liberdade (três translações e três rotações) em cada nó.

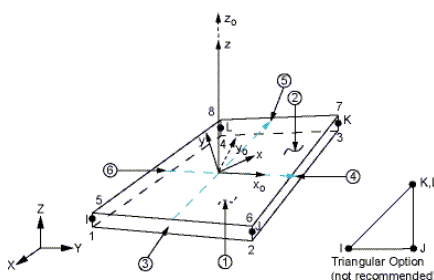


Figura 7. Elemento SHELL 181.

A malha utilizada no modelo numérico é mostrada na Fig. 8, com o tamanho dos elementos utilizados da ordem de 4 mm. As condições de contorno implementadas simulam as colunas com extremidades simplesmente apoiadas sob carga de compressão axial. Para evitar o deslocamento de corpo rígido na direção axial da coluna, a translação de um nó a meia altura do modelo foi impedida nesta direção. Os deslocamentos em torno dos eixos perpendiculares à coluna foram restringidos em quatro nós. Finalmente, o carregamento foi aplicado uniformemente em todos os nós das extremidades dos montantes para garantir a centralização das cargas (Fig. 9).

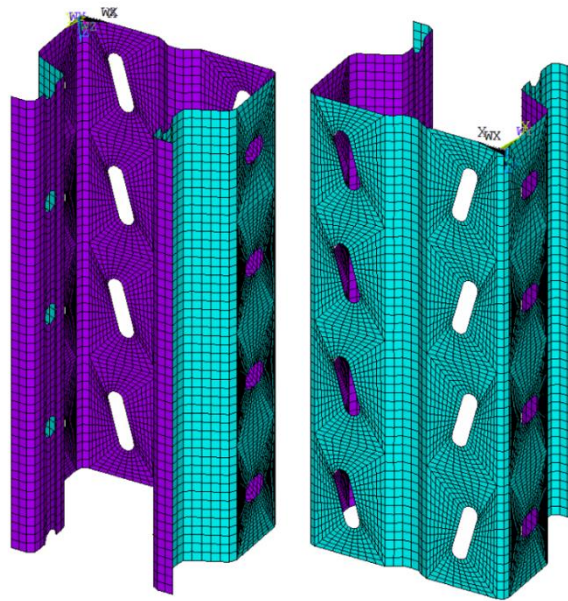


Figura 8. Malha utilizada no modelo numérico.

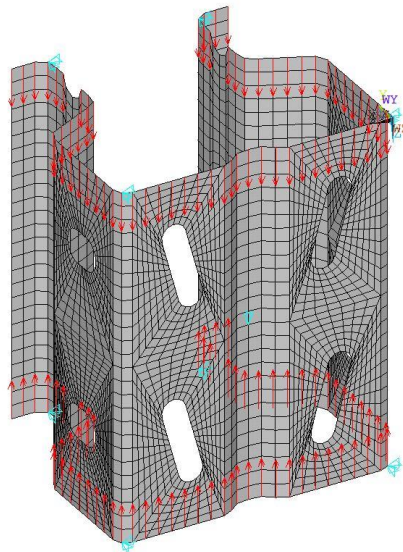


Figura 9. Condições de contorno.

A carga crítica de flambagem foi determinada por análise de estabilidade elástica para obter a carga crítica mínima da seção considerada para o modo distorcional de flambagem. O comprimento analisado foi considerado para ocorrência do modo de flambagem distorcional.

4 Análise dos resultados

4.1 Cargas últimas experimentais

As cargas últimas experimentais obtidas para os painéis contraventados e para a coluna isolada, são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2. Cargas últimas experimentais.

L (mm)	b_w (mm)	t (mm)	Protótipo	P_u (kN)
800	100	2,0	painel contraventado 1	166,00
			painel contraventado 2	168,46
			coluna isolada	164,60

Onde:

L é o comprimento da coluna;

b_w é a largura da alma;

t é a espessura da seção;

P_u a carga última experimental encontrada.

A partir dos resultados encontrados, observa-se que não houve diferenças significativas entre a capacidade resistente da coluna isolada e dos painéis contraventados, sendo da ordem de 2%.

4.2 Método da resistência direta

A norma brasileira NBR 14762:2010 [16] prevê a determinação da capacidade resistente dos elementos formados em perfil formado a frio pelo método da resistência direta, que considera a determinação da carga crítica de flambagem elástica por análise de estabilidade. As equações associadas ao modo de flambagem distorcional são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3. Capacidade resistente associada ao modo distorcional.

Flambagem distorcional – NBR 14762:2010 [16]
$\lambda_{dist} \leq 0,561 \rightarrow N_{c,Rdist} = P_y = Af_y$
$\lambda_{dist} > 0,561 \rightarrow N_{c,Rdist} = \left(1 - \frac{0,25}{\lambda_{dist}^{1,2}}\right) \frac{Af_y}{\lambda_{dist}^{1,2}}$
$\lambda_{dist} = \left(\frac{Af_y}{N_{dist}}\right)^{0,5}$

Onde:

N_{dist} é a força axial de flambagem distorcional elástica;

λ_{dist} é o índice de esbeltez reduzido associado à flambagem distorcional;

$N_{c,Rdist}$ é a força axial de compressão associada ao modo distorcional.

A força axial de flambagem distorcional elástica, N_{dist} , da seção analisada foi determinada por meio da análise numérica via software Ansys, com o modelo numérico desenvolvido. A força de flambagem encontrada foi $N_{dist} = 136,88$ kN.

A capacidade resistente da coluna isolada associada ao modo distorcional, $N_{c,Rdist}$, foi calculada pelas equações propostas por Neiva *et al.* [4] como adaptação às equações do método da resistência direta. A Tabela 4 mostra as equações propostas. A motivação em usar tais equações se deu pelo fato de as mesmas considerarem a existência dos furos na seção transversal da coluna com seção do tipo rack, o que não é contemplado na NBR 14762:2010 [16].

Tabela 4. Capacidade resistente associada ao modo distorcional.

Flambagem distorcional proposto por Neiva <i>et al.</i> [4]
$\lambda_{dist} \leq 0,350 \rightarrow N_{c,Rdist} = A_{net} f_y$
$\lambda_{dist} > 0,350 \rightarrow N_{c,Rdist} = \left(1 - \frac{0,45}{\lambda_{dist}^{0,4}}\right) \frac{A_{net} f_y}{\lambda_{dist}^{1,1}}$
$\lambda_{dist} = \left(\frac{A_{net} f_y}{N_{dist}}\right)^{0,5}$

Para a seção analisada no trabalho, o índice de esbeltez reduzido, λ_{dist} , foi de 1,131 associado à flambagem distorcional da seção.

O valor da força axial de flambagem elástica, $N_{c,Rdist}$, da seção calculada por meio da formulação proposta foi de 87,42 kN.

Elias *et al.* [3] realizou um estudo de colunas com seção transversal do tipo rack. Em seu trabalho, relacionou alguns comprimentos de colunas ao modo de flambagem dominante. Concluiu que a força axial de compressão resistente da seção, $N_{c,Rk}$, para o comprimento de 800 mm, está associado ao modo de flambagem distorcional.

Portanto, conclui-se que para a seção analisada no presente trabalho:

$$N_{c,Rk} = 87,42 \text{ kN.}$$

Observa-se que a capacidade resistente da coluna isolada encontrada pelo método da resistência direta com as adaptações propostas por Neiva *et al.* [4], foi menor que o resultado obtido experimentalmente, igual a 53% do valor experimental. Essa diferença pode ser atribuída ao fato de que o método da resistência direta, no qual baseiam-se as equações de Neiva *et al.* [4], não levar em conta a forma da seção transversal utilizada. As equações propostas não consideram a existência do enrijecedor na alma da seção rack. Assim, a formulação pode estar considerando um acoplamento entre o modo distorcional e o modo local de flambagem, sendo que este último não é observado de forma significativa na seção transversal analisada no presente trabalho.

5 Conclusões

Foram realizadas análises da capacidade resistente do painel contraventado e da coluna isolada obtidos experimentalmente, com seção transversal e comprimento definidos. Além disso, um modelo numérico foi desenvolvido com o intuito de realizar uma análise de estabilidade elástica a fim de obter-se a carga crítica de flambagem da coluna, para então ser possível determinar a capacidade resistente por meio de uma adaptação ao método da resistência direta.

As capacidades resistentes encontradas no programa experimental mostraram pequena diferença entre a coluna isolada e o painel contraventado (da ordem de 2%), mostrando que o posicionamento dos contraventamentos não levou a um aumento considerável na capacidade resistente da coluna. Conclui-se que o posicionamento dos contraventamentos no painel contraventado não alterou o comprimento de flambagem da coluna.

A capacidade resistente encontrada pelo método da resistência direta com formulações adaptadas foi menor que a obtida experimentalmente, representando 53% do valor. Esta diferença significativa se deve ao fato de que o método da resistência direta não leva em consideração a forma da seção analisada. Além disso, as equações propostas por Neiva *et al.* [4] utilizadas se referem a uma seção transversal com algumas diferenças, como a ausência do enrijecedor da seção. Assim, a formulação pode estar considerando um acoplamento entre o modo distorcional e o modo local de flambagem, sendo que este último não é observado de forma significativa na seção transversal analisada no presente trabalho.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e da Águia Sistemas.

Referências

- [1] Godley MH. Storage Racking In Design of cold Formed Steel Members. Ed. Rhodes. Elsevier Applied Science, Amsterdam; 1991.
- [2] Águia Sistemas 2019. <https://aguiasistemas.com/produtos/>.
- [3] Elias GC, Neiva LH de A, Sarmanho AMC, Alves VN, Castro AFB. Ultimate load of steel storage systems uprights. *Eng Struct* 2018;170:53–62. doi:10.1016/j.engstruct.2018.05.078.
- [4] Neiva LHA, Sales AECA, Elias GC, Sarmanho AMC, Souza FT. Análise do modo distorcional de elementos perfurados segundo Método da Resistência Direta. *Rev Da Estrut Aço - REA* 2018;7:17–36.
- [5] Schafer BW. Designing cold-formed steel using the direct strength method. *Eighteenth Int Spec Conf Cold-Formed Steel Struct Recent Res Dev Cold-Formed Steel Des Constr* 2006;2006:475–88.
- [6] de Miranda Batista E. Effective section method: A general direct method for the design of steel cold-formed members under local-global buckling interaction. *Thin-Walled Struct* 2010;48:345–56. doi:10.1016/j.tws.2009.11.003.
- [7] Schafer BW. Review: The Direct Strength Method of cold-formed steel member design. *J Constr Steel Res* 2008;64:766–78. doi:10.1016/j.jcsr.2008.01.022.
- [8] Pastor MM, Casafont M, Bonada J, Roure F. Imperfection amplitudes for nonlinear analysis of open thin-walled steel cross-sections used in rack column uprights. *Thin-Walled Struct* 2014;76:28–41. doi:10.1016/j.tws.2013.10.025.
- [9] Bonada J, Pastor MM, Roure F, Casafont M. Distortional Influence of Pallet Rack Uprights Subject to Combined Compression and Bending. *Structures* 2016;8:275–85. doi:10.1016/j.istruc.2016.05.007.
- [10] Zhao X, Ren C, Qin R. An experimental investigation into perforated and non-perforated steel storage rack uprights. *Thin-Walled Struct* 2017;112:159–72. doi:10.1016/j.tws.2016.11.016.
- [11] Neiva LH de A, Sarmanho AMC, Faria VO, Souza FT de, Starlino JAB. Numerical and experimental analysis of perforated rack members under compression. *Thin-Walled Struct* 2018;130:176–93. doi:10.1016/j.tws.2018.05.024.
- [12] EN 15512. Steel static storage system —Adjustable pallet racking systems – Principles for structural design 2009.
- [13] ANSYS Inc. ANSYS. ANSYS, Inc 2014.
- [14] Bebiano R, Camotim D, Gonçalves R. GBTUL 2.0 – A second-generation code for the GBT-based buckling and vibration analysis of thin-walled members. *Thin-Walled Struct* 2018;124:235–57. doi:10.1016/j.tws.2017.12.002.
- [15] Freitas AMS, Souza FT, Freitas MSR. Analysis and behavior of steel storage drive-in racks. *Thin-Walled Struct* 2010;48:110–7. doi:10.1016/j.tws.2009.09.003.
- [16] ABNT NBR 14762:2010. Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio 2010.