

ANÁLISE VIA ELEMENTOS FINITOS DE PILARES EM PERFIS FORMADOS A FRIO DO TIPO U ENRIJECIDO COM PERFURAÇÕES SUBMETIDOS À FLAMBAGEM DISTORCIONAL

Aline F. N. Pereira¹, Arlene M. C. Sarmanho¹ e Flávio. T. de Souza^{2*}

¹*Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 35400-000, MG, Brasil.*

²*Instituto Federal de Minas Gerais-Campus Ouro, Ouro Preto, 35400-000, MG, Brasil.*

Palavras-chave: Perfis Formados a Frio com Perfurações, Método dos Elementos Finitos, Flambagem Distorcional.

Resumo. As estruturas de aço em perfis formados a frio são amplamente utilizadas devido à sua versatilidade e economia. A variedade de seções transversais desenvolvidas para atender às mais diversas aplicações e o uso de aços mais resistentes leva à necessidade de cuidadosa análise de estabilidade, uma vez que diferentes modos de instabilidade podem comprometer o comportamento e a resistência da estrutura. Entre esses modos, destaca-se o modo distorcional, para o qual não existem formulações específicas e pela inexistência de reserva de resistência pós-crítica, que pode levar a colapso repentino. O uso de perfurações para a passagem de dutos ou o encaixe das ligações pode ainda alterar o comportamento e a resistência dessas estruturas. O objetivo desta pesquisa é avaliar a influência das dimensões e da posição de perfurações na alma no comportamento de pilares formados a frio do tipo U enrijecido. Esta análise é feita via Método dos Elementos Finitos no software ANSYS, com diferentes seções e arranjos de perfurações. Observou-se que as perfurações sempre levam à redução da resistência do pilar, e que o uso de duas linhas de perfurações simétricas em relação ao eixo leva a maiores reduções que uma linha posicionada no eixo da alma. Observou-se, no caso de duas linhas de perfurações, que a distância entre o furo e a borda não altera significativamente a resistência do pilar, e que o aumento da dimensão horizontal do pilar leva a menores resistências.

*Endereço de e-mail: flavio.souza@ifmg.edu.br.

FINITE ELEMENT ANALYSIS OF COLD-FORMED PERFORATED LIPPED CHANNEL COLUMNS UNDER DISTORTIONAL BUCKLING

Keywords: Cold-formed perforated steel profiles, Finite Element Method, Distortional Buckling.

Abstract. Cold-formed Steel Profiles are widely used due to their versatility and economy. The large range of transversal sections developed to solve various design applications and the use of high strength steel demands a stability analysis due to different buckling modes that may modify their behavior and reduce their resistance. Special attention must be taken to distortional buckling mode due to lack of analytical formulae and the inexistence of post-critical resistance, which may lead to sudden collapse. These structures may have their resistance and behavior modified by perforations to fit connections or accommodate electrical end hydraulic installations. This work analyzes the influence of perforations dimensions and position in cold-formed lipped channels columns, by Finite Element Method in software ANSYS. Different sections and perforations were analyzed, and it was observed that holes always reduce the column resistance. Two perforations lines symmetrical axially reduce the resistance more than one perforation line axially disposed in the lipped channel web. In columns with two perforation lines, that distance between hole and the web lateral edge do not induce significant resistance reduction, and the increase in holes horizontal dimension leads to less resistant columns.

1 INTRODUÇÃO

Os perfis formados a frio são elementos que permitem a obtenção de estruturas de aço seguras e econômicas, devido ao seu baixo peso próprio se comparados aos perfis laminados e soldados. Além disso, facilitam o transporte e montagem, por dispensarem equipamentos para a movimentação de cargas elevadas.

No entanto, a reduzida espessura das chapas leva a um considerável aumento da esbeltez. Isso torna os perfis formados a frio susceptíveis a diferentes modos de instabilidade [25], como apresentado na Figura 1. Destes modos de instabilidade, a flambagem distorcional é aquela sobre a qual demandam-se mais pesquisas, devido à sua observação relativamente recente [10, 11], à inexistência de formulações analíticas para a sua verificação e à ausência de reserva de resistência pós-crítica, o que leva a colapsos bruscos quando de sua ocorrência.

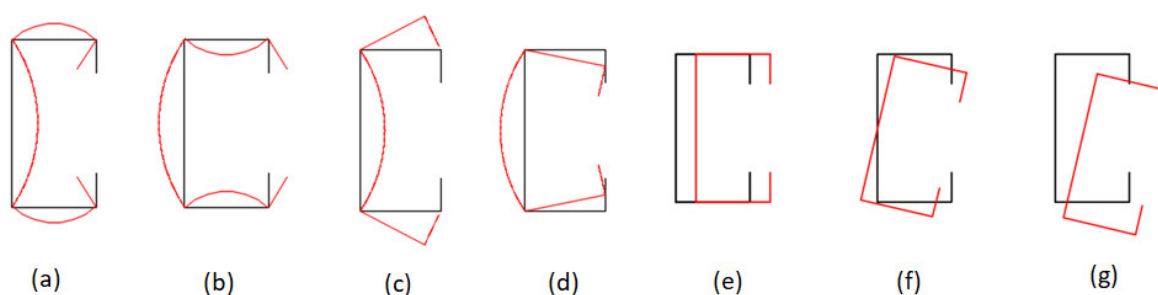


Figura 1: Modos de instabilidade em um perfil formado a frio do tipo U enrijecido: local (a) e (b); distorcional (c) e (d); e global (e) e (g)

A fabricação por meio de dobradeiras ou perfiladeiras, executada à temperatura ambiente, confere grande versatilidade ao processo. Deste modo, os perfis formados a frio têm seções desenvolvidas para atenderem especificamente os mais variados propósitos estruturais, gerando geometrias complexas e que demandam um aprofundamento na análise. Além disso, a fabricação de aços com melhores propriedades mecânicas permitiu a redução da espessura das chapas e, conseqüentemente, o aumento da esbeltez das estruturas. Essas inovações descortinaram a necessidade de um processo de dimensionamento válido para qualquer tipologia de seção, que abrangesse os diversos modos de instabilidade, e que fosse viável aos escritórios de dimensionamento, que sempre lidam com prazos exíguos. Nesse contexto foi desenvolvido o Método da Resistência Direta [10, 20], que utiliza a análise de estabilidade elástica como base para a previsão da capacidade resistente de perfis formados a frio submetidos à compressão e à flexão.

No entanto, a diversidade de aplicações dos perfis formados a frio demanda, muitas vezes, a inserção de perfurações para o encaixe de ligações, como nos sistemas de armazenagem industrial, ou a passagem de dutos, como no sistema *light steel frame* (Figura 2). Essas perfurações alteram o comportamento do sistema, e sua posição e dimensões são determinantes para a magnitude de sua influência [12, 14, 17, 18, 19, 22, 23].

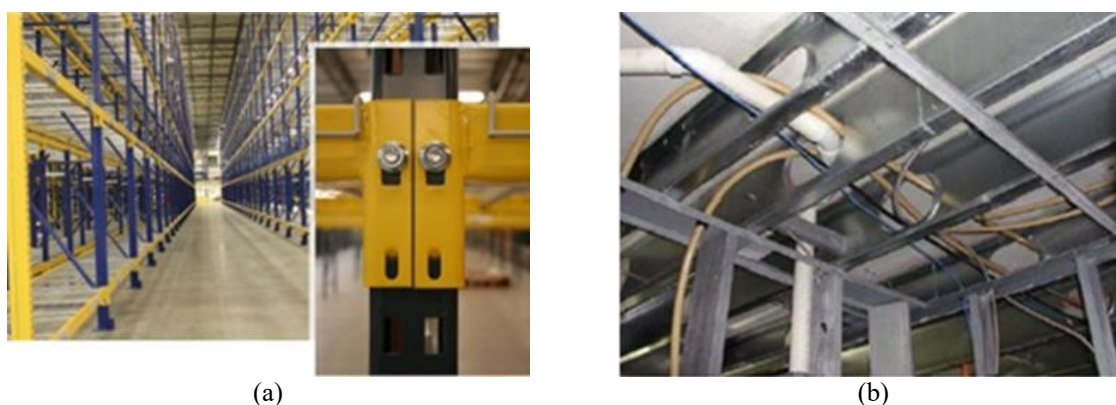


Figura 2: Perfurações em perfis formados a frio do tipo U enrijecido: (a) encaixe de ligações [5] e (b) passagem de dutos [24]

O estudo para a compreensão dos efeitos das perfurações é amplamente disseminado [7, 9, 13], bem como sobre medidas para reduzir sua influência negativa no comportamento e na resistência de perfis formados a frio [6, 15, 16]. A norma americana AISI S100 [2] traz em seu escopo prescrições para a consideração das perfurações em pilares e vigas formados a frio. No entanto, a norma brasileira ABNT NBR 14762 [1] ainda não aborda esse aspecto do dimensionamento.

Nesse contexto, esse trabalho tem o objetivo de avaliar a influência das dimensões e da posição de perfurações retangulares na resistência de perfis formados a frio do tipo U enrijecido submetidos à compressão e sujeitos à flambagem distorcional. Para isso, é feita a análise numérica via elementos finitos, por meio do software ANSYS [3], de pilares formados a frio sem e com perfurações e posterior comparação dos resultados.

2 METODOLOGIA

Foram simulados, via Método dos Elementos Finitos, 72 pilares de aço formados a frio com perfurações. Na análise paramétrica, as dimensões e a posição das perfurações, apresentadas na Figura 3, foram variadas de acordo com proporções da largura da alma (b_w). O comprimento do furo (h_f) foi mantido constante, em todos os modelos, em 40% da largura da alma ($h_f = 0,4 \cdot b_w$). Esta proporção foi escolhida para evitar a ocorrência da Flambagem entre Furos [21].

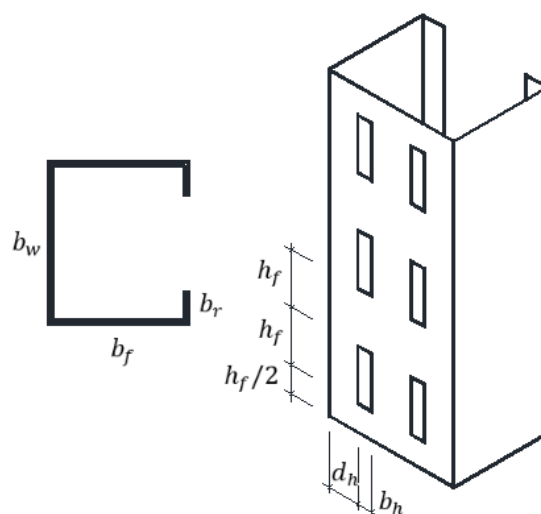


Figura 3: Geometria e dimensões da seção e das perfurações

Dois situações foram consideradas. Na primeira delas, os pilares possuem uma única linha de perfurações, centralizada em relação à largura da alma (b_w). Nesse caso, foram consideradas três larguras das perfurações (b_f): 20, 40 e 60% da largura da alma, conforme mostra a Figura 4. O comprimento de todos os pilares analisados é de 500 mm, suficiente para o pleno desenvolvimento do modo distorcional, segundo apurado em análises baseadas na Teoria Generalizada de Vigas (GBT) via software GBTul [4].

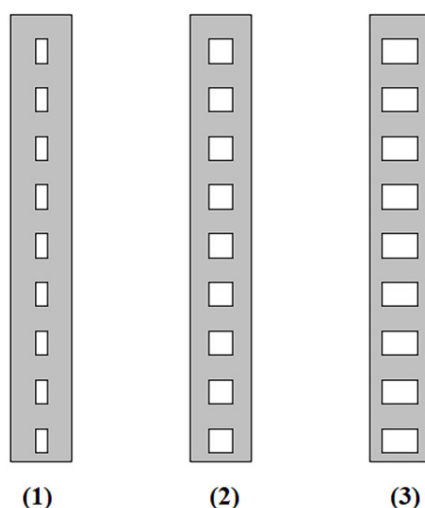


Figura 4: Linha centralizada de perfurações com furos equivalentes à (1) 20%, (2) 40% e (3) 60% de b_w

Em outra situação, foram consideradas duas linhas de perfurações, simétricas em relação ao eixo da alma, como apresenta a Figura 5. Nesse caso, foram consideradas perfurações com b_f igual a 10, 20 e 30% de b_w . Além disso, para as larguras iguais a 10% e 20% foram alteradas as distâncias horizontais entre a borda da perfuração e a borda da alma (d_h), que foram consideradas iguais a 10 e 20% de b_w . Ressalta-se que a situação com d_h igual a 20% de b_w e largura do furo (b_h) igual a 30% de b_w não foi considerada, pois, nesse caso, as perfurações unir-se-iam, retornando à situação 3 apresentada na Figura 4.

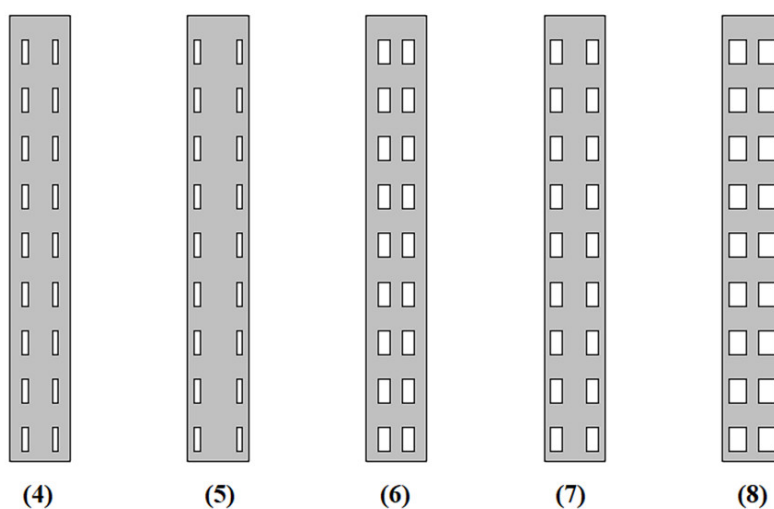


Figura 5: Duas linhas de perfurações: (4) $b_h = 10\%$ de b_w e $d_h = 20\%$ de b_w ; (5) $b_h = 10\%$ de b_w e $d_h = 10\%$ de b_w ; (6) $b_h = 20\%$ de b_w e $d_h = 20\%$ de b_w ; (7) $b_h = 20\%$ de b_w e $d_h = 10\%$ de b_w ; (8) $b_h = 30\%$ de b_w e $d_h = 10\%$ de b_w

Foram ainda consideradas duas diferentes seções e quatro diferentes espessuras em todas as análises, conforme apresentado na Tabela 1, organizadas em dois grupos, G1 e G2, de acordo com as dimensões das seções. O Grupo 1, caracterizado pelas dimensões 68x68x15 mm, é composto por 4 perfis sem perfurações, 12 perfis com uma linha de furos e 20 perfis com duas linhas de furos. O Grupo 2, caracterizado pelas dimensões 75x65x15 mm, é composto por 4 perfis sem perfurações, 12 perfis com uma linha de furos e 20 perfis com duas linhas de furos.

Para viabilizar a apresentação dos resultados, foi adotada a nomenclatura indicada na Figura 6.

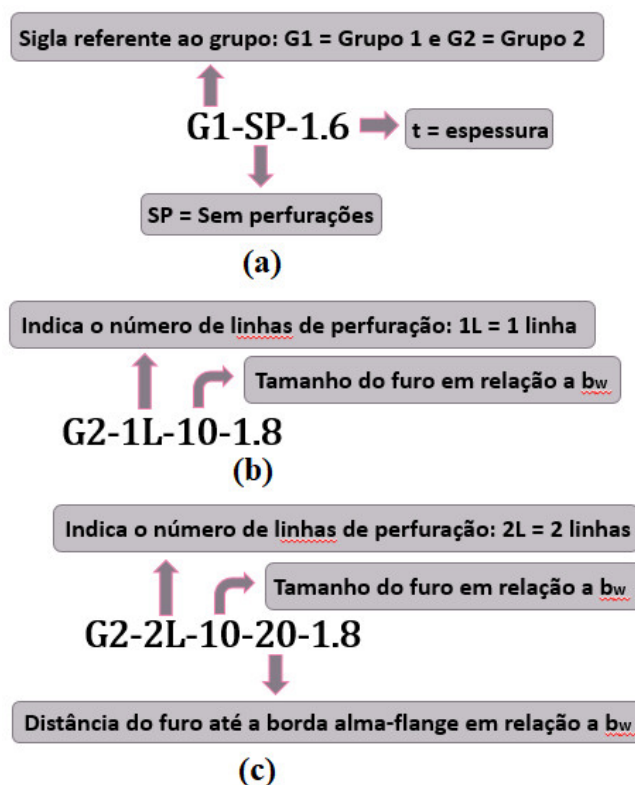


Figura 6: Nomenclatura de identificação dos grupos de perfis: (a) Perfis sem perfuração; (b) Perfis com uma linha de perfuração; (c) Perfis com duas linhas de perfurações

Tabela 1: Dimensões das seções transversais do Grupo 1 (68x68x15) e Grupo 2 (75x65x15) sem furos, com uma linha de furos e com duas linhas de furos

Grupos de perfis	Dimensões da seção transversal dos perfis tipo U enrijecido						
	b_w	b_f	b_f	t	Furos	Distância até a borda	A
	mm	mm	mm	mm	% de b_w	% de b_w	mm ²
GRUPO 1 G1-SP	68	68	15	1,6	Sem furos	-	374,4
				1,8			421,2
				2,0			468
				2,2			514,8
GRUPO 2 G2-SP	75	65	15	1,6	Sem furos	-	376
				1,8			423
				2,0			470
				2,2			517
GRUPO 1	68	68	15	1,6	1 linha de furos	Furos	352,64
				1,8			396,719

G1-1L-20				2,0	20%	centralizados	440,8
				2,2			484,88
GRUPO 2 G2-1L-20	75	65	15	1,6	1 linha de furos 20%	Furos centralizados	352
				1,8			396
				2,0			440
				2,2			484
GRUPO 1 G1-1L-40	68	68	15	1,6	1 linha de furos 40%	Furos centralizados	330,88
				1,8			372,24
				2,0			413,6
				2,2			454,96
GRUPO 2 G2-1L-40	75	65	15	1,6	1 linha de furos 40%	Furos centralizados	328
				1,8			369
				2,0			410
				2,2			451
GRUPO 1 G1-1L-60	68	68	15	1,6	1 linha de furos 60%	Furos centralizados	309,12
				1,8			347,76
				2,0			386,4
				2,2			425,04
GRUPO 2 G2-1L-60	75	65	15	1,6	1 linha de furos 60%	Furos centralizados	304
				1,8			342
				2,0			380
				2,2			418
GRUPO 1 G1-2L-10-20	68	68	15	1,6	2 linhas de furos 10%	20%	352,64
				1,8			396,72
				2,0			440,8
				2,2			484,88
GRUPO 2 G2-2L-10-20	75	65	15	1,6	2 linhas de furos 10%	20%	352
				1,8			396
				2,0			440
				2,2			484
GRUPO 1 G1-2L-10-10	68	68	15	1,6	2 linhas de furos 10%	10%	352,64
				1,8			396,72
				2,0			440,8
				2,2			484,88
GRUPO 2 G2-2L-10-10	75	65	15	1,6	2 linhas de furos 10%	10%	352
				1,8			396
				2,0			440
				2,2			484
GRUPO 1 G1-2L-20-20	68	68	15	1,6	2 linhas de furos 20%	20%	330,88
				1,8			372,24
				2,0			413,6
				2,2			454,96
GRUPO 2 G2-2L-20-20	75	65	15	1,6	2 linhas de furos 20%	20%	328
				1,8			369
				2,0			410
				2,2			451
GRUPO 1 G1-2L-20-10	68	68	15	1,6	2 linhas de furos 20%	10%	330,88
				1,8			372,239
				2,0			413,6
				2,2			454,96
GRUPO 2 G2-2L-20-10	75	65	15	1,6	2 linhas de furos 20%	10%	328
				1,8			369
				2,0			410
				2,2			451
GRUPO 1	68	68	15	1,6	2 linhas de furos	10%	309,12
				1,8			347,759

G1-2L-30-10				2,0	30%		386,4
				2,2			425,04
GRUPO 2 G2-2L-30-10	68	68	15	1,6	2 linhas de furos 30%	10%	304
				1,8			342
				2,0			380
				2,2			418

Para a simulação numérica foi utilizado o elemento de casca SHELL181, disponível na biblioteca interna do ANSYS, que apresenta boa eficiência computacional e precisão a partir da comparação com resultados experimentais [21]. Foram adotados elementos finitos quadriláteros com dimensão igual a 10% de b_w [21]. A Figura 7 apresenta o aspecto da malha de elementos finitos.

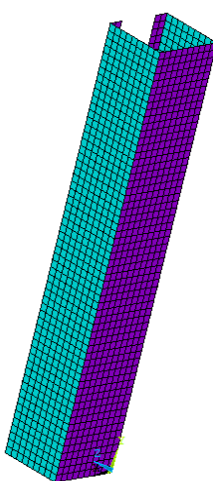


Figura 7: Malha de elementos finitos

As condições de contorno foram adotadas visando simular o efeito do ensaio de compressão com extremidades rotuladas. Nas extremidades, foram aplicados acoplamentos de todos os graus de liberdade a partir do nó mestre e, neste nó, foram restringidos os deslocamentos nas direções ortogonais ao eixo do pilar. Para evitar o deslocamento de corpo rígido, o deslocamento na direção do eixo do pilar foi restringido à meia altura do pilar. E para simular a aplicação do carregamento, as forças foram aplicadas nos nós mestres das extremidades, pois, como todos os outros nós têm seu comportamento vinculado a ele, o carregamento atua distribuído por toda a extremidade. As condições de contorno e o carregamento são apresentados na Figura 8.

Para as análises realizadas em Perfis Formados a Frio do tipo U enrijecido neste trabalho, foi utilizado o aço CF-30 com as características apresentadas na Tabela 2. Faria [8] inseriu as propriedades elastoplásticas do aço através de um diagrama multilinear (Figura 9) de tensão versus deformação que fornece os valores de deformações $\varepsilon_y = 0,7 \cdot f_y/E$, $3 \cdot \varepsilon_y$ e $100 \cdot \varepsilon_y$ correspondentes às tensões de escoamento $0,7 \cdot f_y$, f_y e f_u , respectivamente.

A solução foi realizada em duas etapas. Na primeira, foi feita a análise de estabilidade linear do pilar, sendo obtidos a força axial de flambagem elástica distorcional (N_{dist}) e o modo de flambagem a ela associado. Este modo foi utilizado para a introdução das imperfeições geométricas, a partir de um fator de imperfeição igual à metade da espessura da chapa. Em uma segunda etapa, foi feita a análise não linear física e geométrica, considerando o efeito da imperfeição e as propriedades elastoplásticas do aço. Para a obtenção da trajetória de equilíbrio do pilar foi adotado, como estratégia de incremento de carga, o método do comprimento de arco

e, como critério de parada foi adotado um deslocamento limite de 4 mm, em que o modo distorcional já se encontra plenamente desenvolvido e o pilar já atingiu sua força axial de compressão resistente.

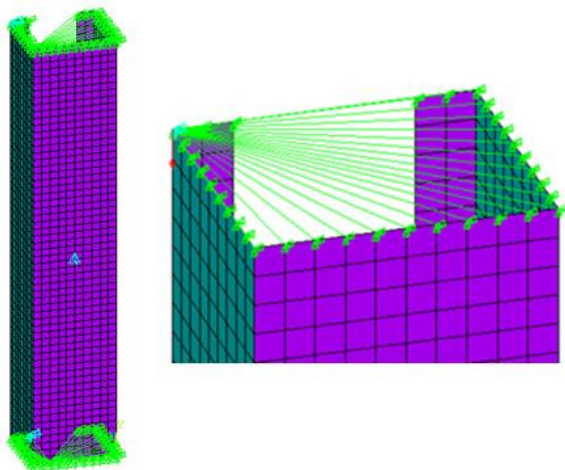


Figura 8: Condições de contorno e carregamento

Tabela 2: Propriedades do Material

Tensão de escoamento (f_y)	Tensão última (f_u)	Módulo de elasticidade (E)	Módulo de elasticidade transversal (G)	Coefficiente de Poisson (ν)
300 MPa	328 MPa	200.000 MPa	77.000 MPa	0,3

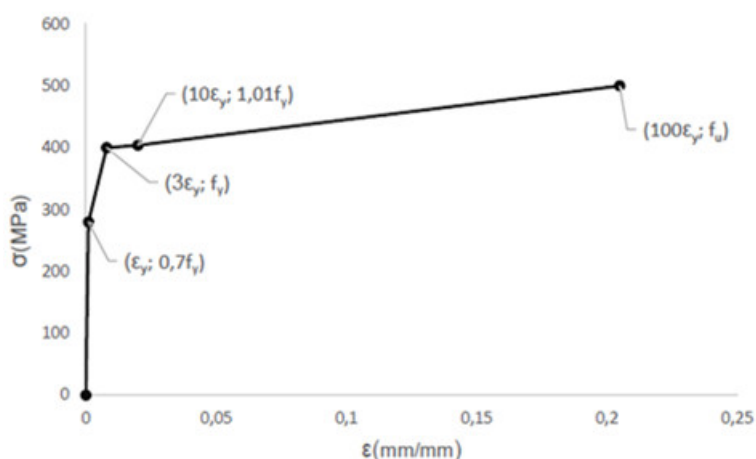


Figura 9: Aproximação multilinear do diagrama tensão x deformação

3 RESULTADOS

Os diferentes arranjos de perfurações mostrados nas Figuras 4 e 5 foram simulados para os dois grupos de pilares, para todas as espessuras adotadas. As análises foram orientadas segundo o objetivo principal que buscou definir a influência da largura das perfurações e suas posições

em relação à borda alma-flange nas forças axiais de compressão resistente dos perfis selecionados do tipo U enrijecido submetidos à flambagem distorcional sob compressão. Além disso, foram simulados os pilares sem perfurações para servirem de referência.

3.1 Análise da influência da posição das perfurações

Para a avaliação da influência da posição das perfurações os resultados foram agrupados segundo a porcentagem de redução da área bruta da alma. Os resultados, para os grupos 1 e 2, são apresentados na Figura 10.

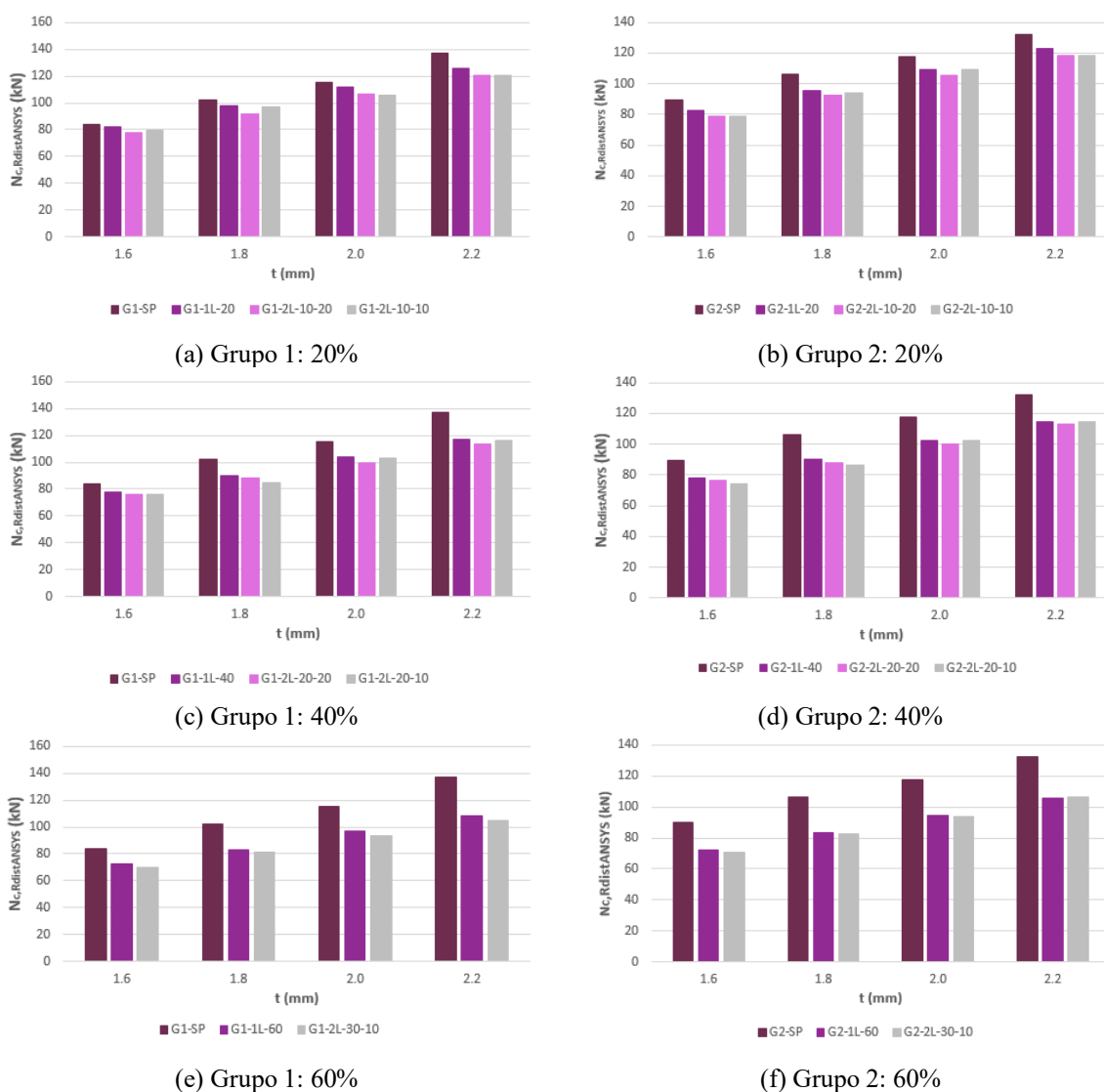


Figura 10: Influência da variação da posição das perfurações na resistência dos pilares do tipo U enrijecido

Para os pilares com redução da área bruta da alma de 60% ocorre uma aproximação entre as resistências dos pilares com uma ou duas linhas de perfurações. No entanto, os pilares com uma única linha ainda apresentam resistências ligeiramente superiores, principalmente para os pilares do grupo 1, em que a alma é menos esbelta.

3.2 Avaliação da influência das dimensões horizontais (larguras) das perfurações

Para a avaliação da influência da largura das perfurações, os resultados foram agrupados

segundo a quantidade e posicionamento das perfurações. Os resultados, para os grupos 1 e 2, são apresentados na Figura 11.

Em todos os resultados analisados pode-se observar que o aumento da largura das perfurações leva à redução da resistência do pilar, indicando que o comprometimento da área da seção pelo aumento da perfuração é refletido de forma direta na resistência do pilar, independentemente das dimensões e da espessura da seção.

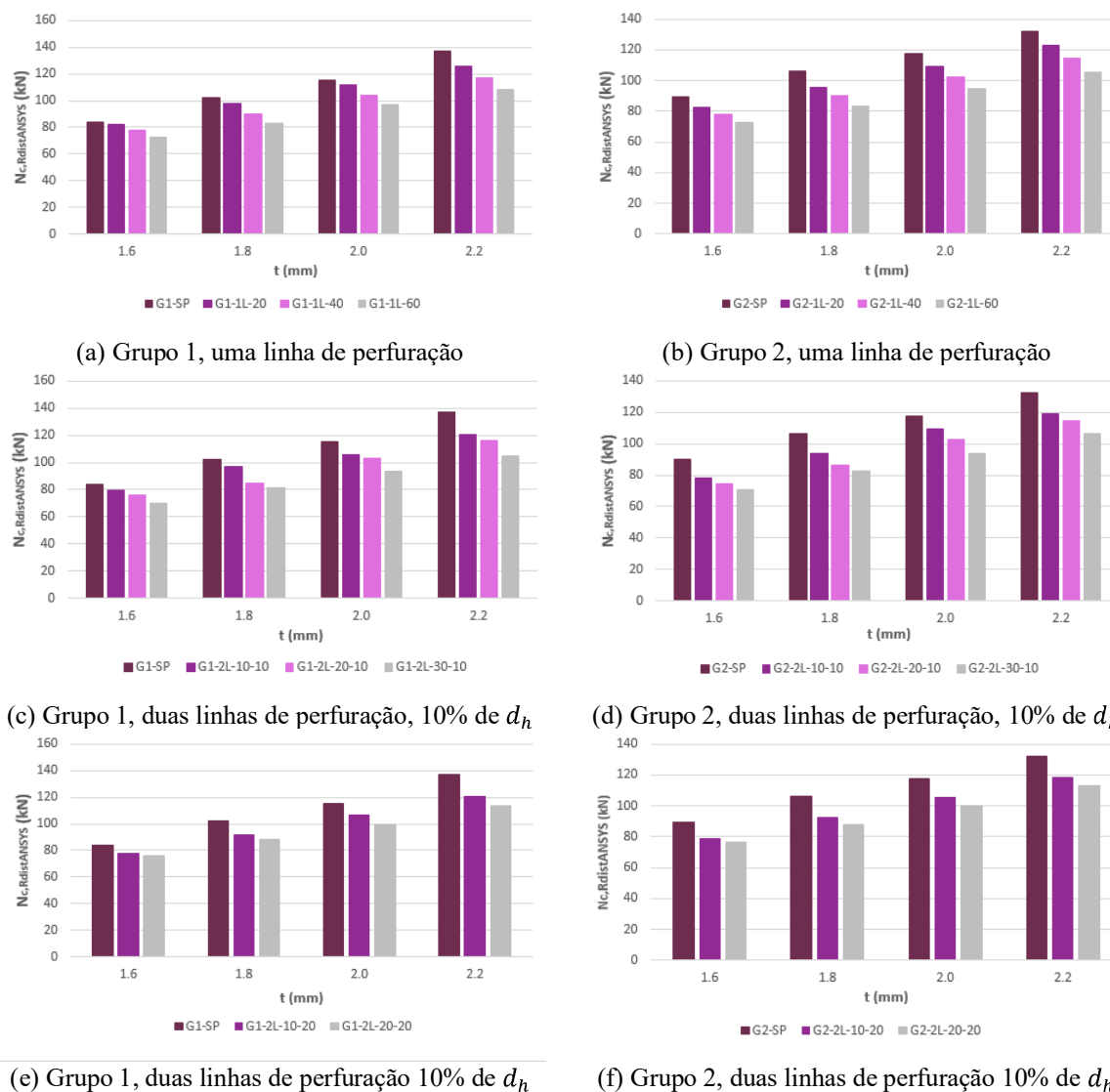


Figura 11: Influência da variação das dimensões horizontais das perfurações na resistência dos pilares do tipo U enrijecido

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os perfis de aço formados a frio proporcionam estruturas de aço versáteis e econômicas. Podem possuir perfurações que, em geral, reduzem sua resistência. A vasta possibilidade de geometrias das seções e das perfurações demanda estudos que avaliem sua influência, visando projetá-las de modo a buscar maiores resistências.

Esse trabalho avaliou a influência da posição e das dimensões horizontais das perfurações retangulares na resistência de pilares em aço formados a frio do tipo U enrijecido. O foco foi a

resistência de pilares sujeitos à flambagem distorcional. Observou-se que as perfurações sempre levarão à redução da resistência dos pilares, se comparados a pilares sem perfurações. Quanto à posição das perfurações, observou-se que uma linha de furos posicionada no eixo da alma leva a maiores resistências do que duas linhas de furos simétricas em relação ao eixo. Para duas linhas de furos, a influência da distância horizontal entre a perfuração e a borda da alma na resistência do pilar não se mostrou significativa.

Quanto às dimensões horizontais das perfurações, o seu aumento leva à redução da resistência do pilar, indicando que o comprometimento da área da seção pelo aumento da largura da perfuração é refletido de forma direta na resistência do pilar, independentemente das dimensões e da espessura da seção.

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

- [1] Associação Brasileira de Normas Técnicas. *ABNT NBR 14762:2010 – Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio*. ABNT/CB-002 Construção Civil, Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2010.
- [2] American Iron and Steel Institute – AISI. *North American Specification (NAS) for the design of cold-formed steel structural members (AISI-S100-16)*. Washington – DC, EUA, 2016.
- [3] ANSYS®. Structural Analysis, Release 15.0, Help System. *Mechanical APDL structural analysis guide*. ANSYS, Inc., Canonsburg – PA, EUA. 2013.
- [4] R. Bebiano, P. Pina, N. Silvestre e D. Camotim. *GBTUL – buckling and vibration analysis of thin-walled members*, DECivil/IST, Technical University of Lisbon, 2008.
- [5] J. Cai e C. D. Moen. Elastic buckling analysis of thin-walled structural members with rectangular holes using generalized beam theory. *Thin-Walled Structures*, 107:274–286, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2016.06.014>.
- [6] B. Chen, K. Roy., A. Uzzaman, G. Raftery e J. B. P. Lim. Parametric study and simplified design equations for cold-formed steel channels with edge-stiffened holes under axial compression, *Journal of Constructional Steel Research*, 172:1–27, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106161>.
- [7] A. Crisan, V. M. Ungureanu e D. Dubina. Behaviour of cold-formed steel perforated sections in compression: Part 2 – numerical investigations and design considerations, *Thin-Walled Structures*, 61:97–105, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2012.07.013>.
- [8] V. O. Faria. *Análise de estabilidade de perfis formados a frio com perfurações*. Dissertação de Mestrado em Engenharia das Construções, Escola de Minas, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto – MG, Brasil, 2016.
- [9] A. M. S. Freitas, M. S. R. Freitas e F. T. Souza. Analysis of steel storage rack columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 61:1135 –1146, 2005.
- [10] G. J. Hancock. Design for distortional buckling of flexural members. *Thin-Walled Structures*, 27(1):3–12, 1997.
- [11] G. J. Hancock, Y. B. Kwon e E. S. Bernard. Strength design curves for thin-walled sections

- undergoing distortional buckling. *Journal of Constructional Steel Research*, 31:169-186, 1994.
- [12] F. Jardim Jr, R. P. Heleno, F. T. Souza e A. M. C. Sarmanho. Estudo da viabilidade do método da resistência direta em perfis U enrijecidos formados a frio com perfurações. *Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, 17(1):1–15, 2021.
- [13] C. D. Moen e B. W. Schafer. *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.
- [14] L. H. A. Neiva, A. E. C. A. Sales, G. C. Elias, A. M. C. Sarmanho e F. T. Souza. Análise do modo distorcional de elementos perfurados segundo método da resistência direta. *Revista da Estrutura de Aço*, 7:17–36, 2018.
- [15] I. A. N. Nicolau. *Análise numérica do comportamento de perfis formados a frio com perfurações enrijecidas*. Dissertação de Mestrado em Engenharia das Construções, Escola de Minas, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto – MG, Brasil, 2022.
- [16] I. A. N. Nicolau, A. M. C. Sarmanho e F. T. Souza. Análise numérica de perfis formados a frio do tipo U enrijecido com perfurações enrijecidas submetidos à compressão. *Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada*, 8(2):1–10, 2023. <http://10.25286/repa.v8i2.2193>.
- [17] L. C. P. Oliveira, A. M. C. Sarmanho e F. T. Souza. 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*, 7(1):30–37, 2022. <https://10.25286/repa.v7i1.1717>.
- [18] R. A. R. Pinto, A. M. C. Sarmanho e F. T. Souza. 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*, 10:333–350, 2021.
- [19] A. E. C. A. Sales. *Análise da aplicação do método da resistência direta a perfis formados a frio com perfurações submetidos à compressão*. Dissertação de Mestrado em Engenharia das Construções, Escola de Minas, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto – MG, Brasil, 2017.
- [20] B. Schafer. Local, distortional and Euler buckling of thin-walled columns. *Journal of Structural Engineering*, 128:289–299, 2002.
- [21] F. T. Souza. *Análise teórico-experimental da estabilidade de colunas perfuradas em perfis de aço formados a frio de seções tipo rack*. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Escola de Minas, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto – MG, Brasil, 2013.
- [22] F. T. Souza, E. T. Santos e A. M. C. Sarmanho. 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, 5(5):1–266, 2020. <https://10.21575/25254782rmetg2020vol5n51128>.
- [23] F. T. Souza, A. M. C. Sarmanho e A. P. M. Machado. Análise via elementos finitos de ligações tipo encaixe em sistemas de armazenamento industrial. *Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, 17(1):16–30, 2021.
- [24] C. Yu. Cold-formed steel flexural member with edge stiffened holes: behavior, optimization, and design. *Journal of Constructional Steel Research*, 71:210–218, 2012.

<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.09.008>.

[25] W. Yu. *Cold-formed steel design*. John Wiley & Sons, 3ª edição, 2000.