


Análise da Influência das Dimensões das Perfurações em Pilares Compostos por Perfis em Aço Formados a Frio do Tipo U Enrijecido

Analysis of Hole Dimensions Influence in Cold-Formed Steel Lipped Channel Columns

Letícia Caroline Policarpo Oliveira ^{1,2}  orcid.org/0000-0002-6303-6233

Arlene Maria Cunha Sarmanho ^{1,2}  orcid.org/0000-0001-6900-8551

Flávio Teixeira de Souza ^{1,3}  orcid.org/0000-0003-3261-9089

¹ Mestrado profissional em Engenharia das Construções – MECON/DECIV/EM/UFOP.

² Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

³ Instituto Federal de Minas Gerais, Campus Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

E-mail do autor principal: Flávio Souza: flavio.souza@ifmg.edu.br

Resumo

Os perfis formados frio são uma importante alternativa para a construção de estruturas de aço seguras e econômicas. Devido à sua esbelteza, estes elementos possuem modos de instabilidade característicos, como a flambagem distorcional, ainda pouco estudada. Além disso, estes perfis podem possuir perfurações para facilitar a montagem ou a passagem de dutos de instalações que modificam o seu comportamento e resistência. A verificação da resistência à flambagem distorcional deve ser feita pelo Método da Resistência Direta que, no entanto, não considera o efeito das perfurações. Por isto, existem adaptações, que consideram o efeito das perfurações por meio da redução da espessura das placas onde elas existem. Este trabalho avalia a viabilidade das adaptações do Método da Resistência Direta para diferentes dimensões de perfurações, por meio de comparação com resultados numéricos obtidos pelo Método dos Elementos Finitos, além de avaliar a influência das dimensões das perfurações na resistência dos pilares. Os resultados mostram a redução da resistência em perfis U enrijecido com perfurações quando se aumentam as dimensões das perfurações, e indicam a viabilidade da adaptação do Método da Resistência Direta para a previsão da resistência destes perfis.

Palavras-Chave: Estruturas Metálicas; Elementos Finitos; Método da Resistência Direta.

Abstract

Cold-formed steel structures are an important option to have constructions safe and economic. These steel profiles have high slenderness that leads to characteristic buckling modes, such as the distortional buckling that was recently described and have relatively few studies. Additionally, Cold-formed profiles can have perforations to make connections easier or to accommodate installation of services. These holes may modify the structures behavior and resistance. Distortional buckling design may be carried out by Direct Strength Method, that don't consider perforations effect. Thus there are some adaptations of Direct Strength Method that consider holes effect by reduced thickness in the plates they are in. This work analyzes these adaptations viability to different holes dimensions, by

comparison between numerical results by Finite Element Method and the influence of holes dimensions in cold formed lipped channel columns. The results showed reductions in columns resistance as the holes dimensions increase and indicate that Direct Strength Method adaptations are suitable to determine these columns resistance.

Key-words: Steel Structures; Finite Element Analysis; Direct Strength Method.

1 Introdução

Os perfis formados a frio são uma opção econômica na utilização de estruturas de aço, por apresentarem menor consumo de material devido à baixa espessura das chapas que os constituem, e devido aos processos de fabricação à temperatura ambiente serem menos onerosos que aqueles dos perfis laminados e soldados. Além disto, são versáteis e fáceis de transportar e movimentar no canteiro de obra [1].

No entanto, por serem elementos esbeltos, as estruturas de aço em perfis formados a frio possuem particularidades, tais como a necessidade de cuidados adicionais na execução das ligações e, principalmente, a susceptibilidade ao modo local e ao modo distorcional de flambagem. A Figura 1 apresenta a seção U enrijecido, bastante comum em perfis formados a frio.

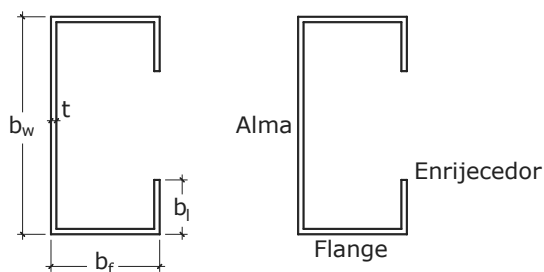


Figura 1: Seção U enrijecido, onde b_w é a largura da alma, b_f a largura da mesa, b_l a largura do enrijecedor e t a espessura.

O modo local apresenta maior probabilidade de ocorrência do que em perfis laminados ou soldados devido à elevada esbelteza das chapas que constituem a seção [1]. Já o modo distorcional caracteriza-se pela rotação da mesa e do enrijecedor em relação à alma, ocasionando o fechamento ou a abertura do pilar. Como o modo distorcional não apresenta resistência pós crítica, a sua ocorrência pode levar a colapsos bruscos e, conseqüentemente, a tragédias [2]. A Figura 2 apresenta os modos local e distorcional na seção U enrijecido.

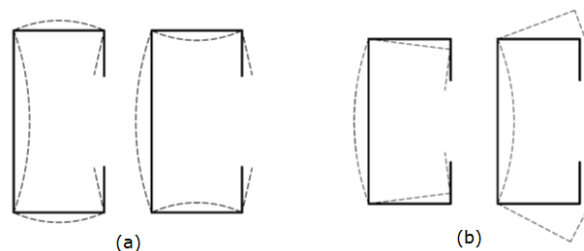


Figura 2: (a) Modo local na seção U enrijecido; (a) Modo distorcional.

A determinação da resistência de uma estrutura de aço em perfis formados a frio sujeita à flambagem local e à flambagem global, considerando inclusive a interação entre os modos, pode ser feita pelo tradicional Método da Largura Efetiva, que visa quantificar a redução da resistência ocasionada pela flambagem local descontando da largura da chapa a região afetada pelo fenômeno. Este método foi desenvolvido por Winter em 1947 e por muito tempo mostrou-se suficiente para a previsão do comportamento e da resistência de perfis formados a frio [2].

No entanto, o advento de seções mais complexas, contando com enrijecedores, além da adoção de tipos de aço com elevadas tensões de escoamento mostraram o surgimento do modo distorcional, que não obedece às premissas do Método da Largura Efetiva [3]. O tratamento analítico deste modo de flambagem inicialmente mostrou-se muito complexo, inviável para fins de utilização em escritórios de projeto. Assim, o dimensionamento de perfis sujeitos ao modo distorcional tem sido feito pelo Método da Resistência Direta [4] [5], que atualmente se encontra prescrito em diversas normas de projeto, tais como a americana AISI-S100-16 [6], a australiana AS/NZS 4600 [7] e a brasileira NBR 14762 [8]. Ressalta-se que o Método da Resistência Direta é muito abrangente, sendo adequado para a previsão da flambagem local, da flambagem distorcional e da flambagem global, podendo considerar inclusive suas interações, com uma quantidade reduzida de cálculos. Possui, no entanto a necessidade de que seja feita a análise de estabilidade da seção, o que pode ser feito,

por exemplo, pela Teoria Generalizada de Vigas (GBT) pelo software GBTul [9].

Buscando aumentar a praticidade da utilização de perfis formados a frio, em diversas aplicações é comum sua fabricação com perfurações, que visam a passagem de instalações e o encaixe de ligações. Diversos estudos indicam a possibilidade de adaptação do Método da Resistência Direta para a avaliação da resistência de perfis formados a frio com perfurações [10-13]. A norma americana [6] traz em seu escopo prescrições para a previsão das perfurações baseadas no trabalho de Moen e Schafer [14], enquanto a norma brasileira [8] ainda não o traz.

Neste contexto, este trabalho tem o objetivo de contribuir com a possibilidade de adaptação do Método da Resistência Direta para a análise da resistência de perfis formados a frio do tipo U enrijecido com perfurações, considerando a flambagem distorcional, avaliando métodos desenvolvidos em trabalhos anteriores [11] [14] para diferentes seções e arranjos de perfurações. Também será avaliada a influência da variação das dimensões das perfurações na resistência destas estruturas. A metodologia adotada será a comparação de resultados obtidos com o Método da Resistência Direta adaptado com resultados de referência obtidos a partir de modelos numéricos via elementos finitos pelo software ANSYS [15], cujo procedimento foi validado experimentalmente em trabalhos anteriores [16, 17].

2 Método da Resistência Direta

2.1 Perfis sem perfurações

O Anexo C da norma ABNT NBR 14762 [8] apresenta as prescrições do Método da Resistência Direta para o cálculo da força axial de compressão resistente para perfis formados a frio sujeitos à flambagem distorcional sem perfurações ($N_{c,Rdist}$), conforme apresentado na Equação 1.

$$\lambda_{dist} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{dist}}}$$

$$\lambda_{dist} \leq 0,561, N_{c,Rdist} = A f_y \quad (1)$$

$$\lambda_{dist} > 0,561, N_{c,Rdist} = \left(1 - \frac{0,25}{\lambda_{dist}^{1,2}}\right) \frac{A f_y}{\lambda_{dist}^{1,2}}$$

Em que A é a área bruta da seção, f_y é a tensão de escoamento do material e N_{dist} é a força axial de

flambagem distorcional elástica, obtida pela análise de estabilidade da seção no software GBTul. Este programa fornece a curva de assinatura da seção. A partir dela, é possível determinar a força axial de flambagem distorcional elástica no segundo mínimo, e o comprimento da coluna a ela associado, no eixo das abscissas, conforme apresentado na Figura 3.

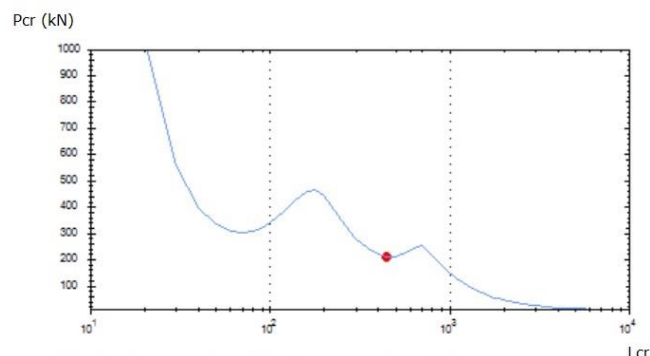


Figura 3: Curva de assinatura obtida no GBTul, destacando-se a força axial de flambagem distorcional elástica ($N_{dist} = 209,68$ kN) e o comprimento a ela associado ($L = 450$ mm).

Ressalta-se que a análise de estabilidade elástica feita no software GBTul é limitada a perfis sem perfurações, advindo daí a necessidade de adaptações que considerem seu efeito nos pilares.

2.2 Perfis com Perfurações – MOEN

Visando considerar a redução da rigidez da alma da seção devido à existência de perfurações, Moen e Schafer [17] apresentaram propostas de adaptação do Método da Resistência Direta para pilares perfurados, conforme apresentado na Equação 2.

$$\lambda_{dist} = \sqrt{\frac{A_{net} f_y}{N_{dist}}}$$

$$\lambda_{dist} \leq 0,561, N_{c,Rdist} = A_{net} f_y \quad (2)$$

$$\lambda_{dist} > 0,561, N_{c,Rdist} = \left(1 - \frac{0,25}{\lambda_{dist}^{1,2}}\right) \frac{A_{net} f_y}{\lambda_{dist}^{1,2}}$$

Onde percebe-se a substituição da área bruta, A, pela área líquida, A_{net} , nas equações. Além desta mudança, inserem-se também modificações na determinação da força axial de flambagem distorcional elástica (N_{dist}) feita pelo software GBTul, substituindo-se a espessura da alma t (Figura 1) pela espessura reduzida $t_{web,hole}$, calculada pela equação 3.

$$t_{web,hole} = \left(1 - \frac{L_h}{L_{crd}}\right)^{\frac{1}{3}} t_w \quad (3)$$

Onde t_w é a espessura real da alma, L_h é o comprimento do furo e L_{crd} é o comprimento crítico distorcional para a seção sem perfurações, obtido via GBTul como mostrado na Figura 3.

2.3 Perfis com Perfurações – Sales

Alternativamente à proposta de Moen e Schafer, Sales [11] avaliou a substituição da espessura real da alma pela espessura fictícia t_{fic} na determinação da força axial de flambagem distorcional elástica (N_{dist}) feita pelo software GBTul, conforme indicado na Equação 4.

$$t_{fic} = \frac{A_{wnet}}{A_{wg}} t_w \quad (4)$$

Onde t_w é a espessura real da alma, A_{wnet} é a área da alma descontadas as perfurações e A_{wg} é a área bruta da alma. Para a determinação da força axial de compressão resistente para perfis formados a frio sujeitos à flambagem distorcional ($N_{c,Rdist}$), é utilizada a Equação 2, modificando-se, portanto, apenas a análise elástica via GBTul.

Estes métodos foram utilizados para a análise de perfis formados a frio com perfurações e tiveram seus resultados comparados a resultados numéricos obtidos por um modelo de elementos finitos previamente calibrado experimentalmente.

3 Análise numérica

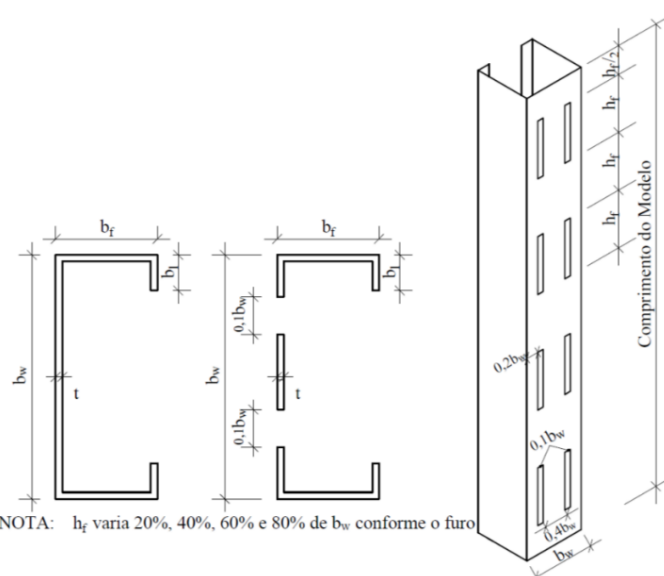
Para avaliar a influência das dimensões das perfurações, foram selecionadas 16 seções do tipo U enrijecido cujas dimensões são apresentadas na Tabela 1.

A escolha destas dimensões foi feita de forma a garantir a ocorrência da flambagem distorcional nestas seções. Cada uma destas seções foi analisada sem perfurações e com perfurações, como apresentado na Figura 4, com o comprimento do furo, h_f , sendo adotado como 20%, 40%, 60% e 80% de b_w . Foram consideradas dois tipos diferentes de propriedades elastoplásticas do aço: a tensão de escoamento (f_y) igual a 220 MPa e a tensão última (f_u) igual a 328 MPa, obtidos experimentalmente [16]; e a tensão de escoamento (f_y) igual a 300 MPa e a tensão última (f_u) igual a 490 MPa, do aço CF-30 previsto em norma [8]. Estas propriedades foram inseridas no modelo por meio de uma aproximação multilinear do diagrama tensão x deformação [17]. Os comprimentos dos modelos foram obtidos a partir dos comprimentos críticos obtidos via GBTul, sem

considerar a existência de perfurações, como indicado na Figura 2.

Tabela 1: Dimensões das seções U enrijecido.

Dimensões em mm ($b_w \times b_f \times b_l \times t$)	
GRUPO 50	Ue 50x45x10x1,2
	Ue 50x45x10x1,4
	Ue 50x45x10x1,6
	Ue 50x45x10x1,8
	Ue 50x45x10x2,0
GRUPO 68	Ue 68x68x20x2,2
	Ue 68x68x20x2,4
	Ue 68x68x20x2,6
	Ue 68x68x20x2,8
GRUPO 75	Ue 75x65x15x1,6
	Ue 75x65x15x1,8
	Ue 75x65x15x2,0
	Ue 75x65x15x2,2
	Ue 75x65x15x2,4
GRUPO 100	Ue 100x100x20x2,2
	Ue 100x100x20x2,4



NOTA: h_f varia 20%, 40%, 60% e 80% de b_w conforme o furo

Figura 4: Geometria das seções e arranjo das perfurações adotadas.

Para a construção do modelo numérico no ANSYS foi utilizado o elemento SHELL181, com elementos quadrangulares com lado igual a 10% da largura da alma (b_w). As condições de contorno adotadas foram a restrição dos deslocamentos nas direções ortogonais aos eixos nas extremidades associada ao acoplamento de todos os deslocamentos nestes nós (Figura 5(a)). Foi ainda restringido o deslocamento na direção axial do modelo em nó à meia altura, a fim de evitar o deslocamento de corpo rígido (Figura 5(b)).

O carregamento foi aplicado de forma distribuída, por meio da aplicação de uma componente em cada nó da aresta da extremidade, tomando-se a precaução de aplicar no nó extremo metade do valor aplicado nos outros nós devido à sua menor área de influência, conforme apresentado na Figura 6.

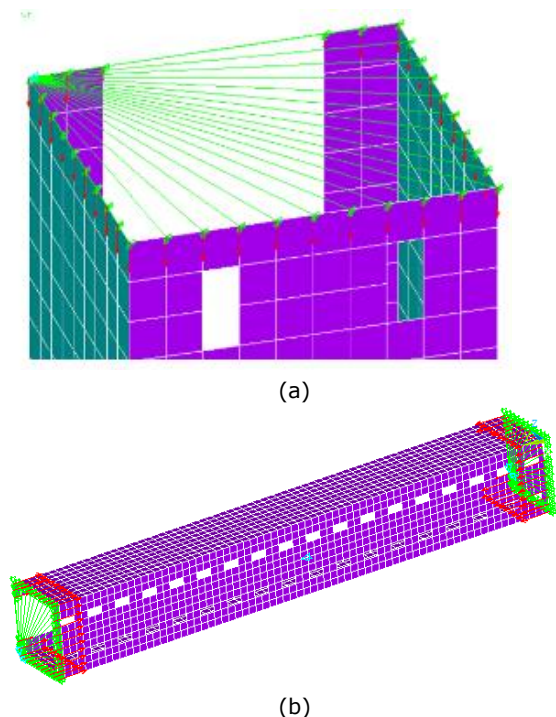


Figura 5: Condições de contorno (a) extremidade; (b) modelo completo.

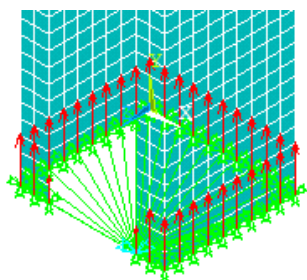


Figura 6: Aplicação do carregamento.

A análise numérica foi feita em duas etapas. Primeiramente, foi feita a análise de autovalor, e obtido o modo distorcional. A partir destes deslocamentos, foi introduzido um fator de imperfeição igual à metade da espessura, e feita a análise não-linear física e geométrica, sendo obtida a força axial de compressão resistente de cada modelo via ANSYS. Esse modelo foi validado em termos de capacidade de carga e de modo de falha a partir de comparações com dados experimentais em estudos

anteriores [16], [17], conforme mostra a Figura 7. Assim, os resultados numéricos foram usados como referência para a validação da aplicação das modificações do Método da Resistência Direta para as várias configurações de perfurações analisadas, bem como para a análise da influência das dimensões das perfurações na resistência das seções estudadas.

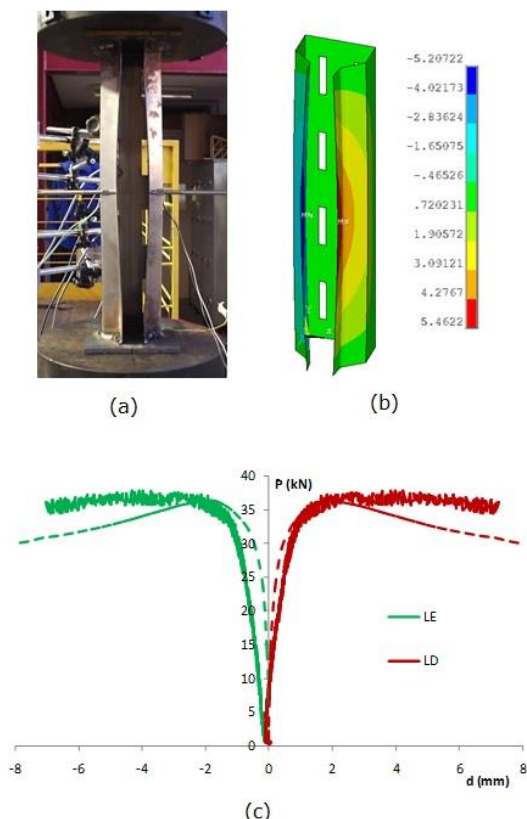


Figura 7: Validação do modelo numérico: (a) Deslocamentos do protótipo experimental; (b) Deslocamentos do modelo numérico; (c) Curvas carga x deslocamento experimental (linha cheia) e numérica (linha tracejada) [16].

4 Resultados

Para avaliar a eficiência das modificações propostas para considerar as perfurações no Método da Resistência Direta, os resultados do modelo numérico foram comparados com resultados analíticos para demonstrar a sua eficiência. As Figura 8 e 9 apresentam os resultados considerando a aproximação proposta por Sales, onde a curva apresenta os resultados teóricos e os pontos apresentam os resultados obtidos pelo método dos

Análise da Influência das Dimensões das Perfurações em Pilares Compostos por Perfis em Aço Formados a Frio do Tipo U Enrijecido

elementos finitos. As figuras 9 e 10 apresentam os resultados considerando-se o método proposto por Moen e Schafer para a consideração das perfurações.

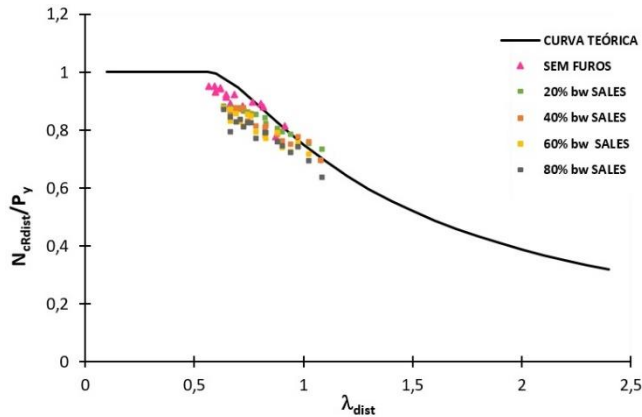


Figura 8: Comparação de resultados analíticos e numéricos, considerando $f_y = 220$ MPa e o método de Sales ($P_y = Af_y$).

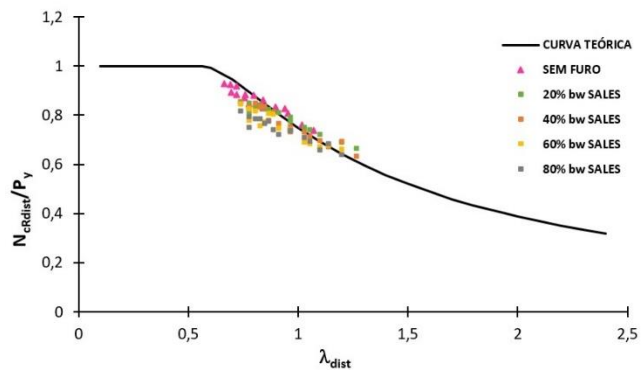


Figura 9: Comparação de resultados analíticos e numéricos, considerando $f_y = 300$ MPa e o método de Sales ($P_y = Af_y$).

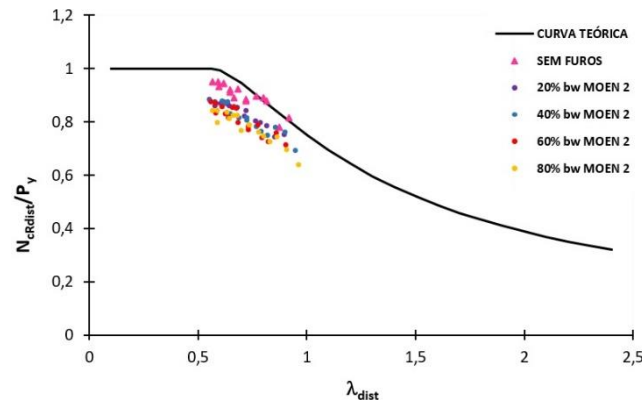


Figura 10: Comparação de resultados analíticos e numéricos, considerando $f_y = 220$ MPa e o método de Moen ($P_y = Af_y$).

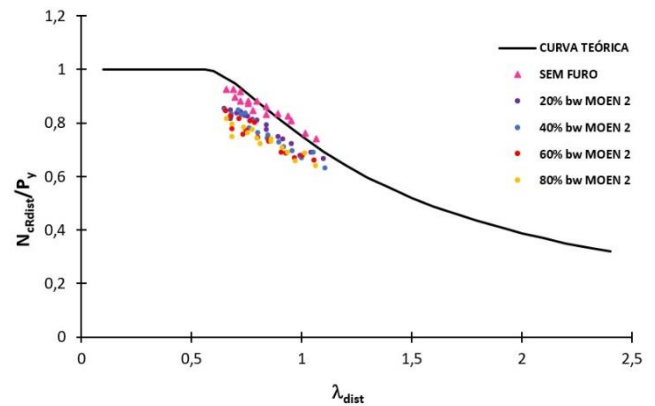


Figura 11: Comparação de resultados analíticos e numéricos, considerando $f_y = 300$ MPa e o método de Moen ($P_y = Af_y$).

Nas figuras 8 a 11 pode-se observar que, para as duas tensões de escoamento consideradas existe uma correlação adequada entre os resultados numéricos e analíticos, indicando a validade das adaptações do Método da Resistência Direta avaliadas. Observa-se ainda que existe uma redução das resistências dos pilares com perfurações em relação àqueles sem elas, como era inicialmente esperado. A Tabela 2 apresenta as relações entre os resultados do Método da Resistência Direta e do ANSYS, podendo-se ver que a máxima diferença é de 11% para a aproximação de Sales e de 18% para a aproximação de Moen.

A partir da análise das Figuras 7-10 e da Tabela 2 pode-se observar que os ajustes teóricos no método da resistência direta levam a bons resultados, indicando a viabilidade da aplicação destes métodos para fins de projeto.

Tabela 2: Relações entre o Método da Resistência Direta Adaptado e o Método dos Elementos Finitos.

TIPO	f_y	MÉDIA		DESVIO PADRÃO	
	(MPa)	$\frac{N_{c,Rdist-MRD}}{N_{c,Rdist-ANSYS}}$			
SEM FUROS	220	1,04		0,032	
	300	1,01		0,037	
20% bw	220	SALES	MOEN	SALES	MOEN
	300	1,05	1,12	0,046	0,021
40% bw	220	1,06	1,14	0,043	0,027
	300	1,02	1,12	0,041	0,030
60% bw	220	1,03	1,17	0,041	0,032
	300	1,06	1,15	0,048	0,041
80% bw	220	1,11	1,18	0,043	0,030
	300	1,08	1,17	0,055	0,044

Foi feita ainda a análise da influência das perfurações na resistência dos pilares. As Figura 12 e

13 apresentam a redução percentual entre as resistências dos pilares perfurados em relação aos pilares sem perfurações, para todas as seções analisadas. Observa-se que a existência das perfurações leva a uma redução da resistência das colunas. Pode-se ainda observar que, para a maioria das seções analisadas, o aumento do comprimento das perfurações leva a uma maior redução da resistência, apesar de não obedecer a um padrão específico para a maioria das seções. A Tabela 3 apresenta as médias e desvios padrões percentuais das resistências dos pilares com perfurações em relação àqueles sem elas.

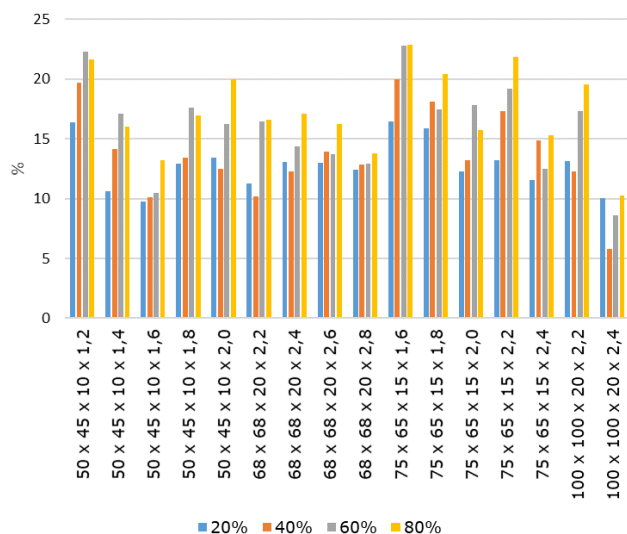


Figura 12: Redução percentual entre as resistências obtidas no ANSYS dos pilares com perfurações em relação aos pilares sem perfurações para $f_y = 220$ MPa.

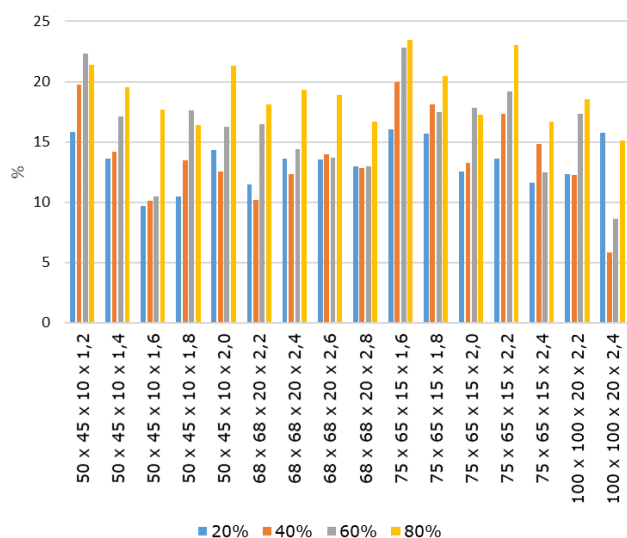


Figura 13: Redução percentual entre as resistências obtidas no ANSYS dos pilares com perfurações em relação aos pilares sem perfurações para $f_y = 300$ MPa.

Tabela 3: Média e desvio padrão das reduções percentuais de resistência dos pilares com perfurações em relação àqueles sem perfurações.

f_y (MPa)	Altura do Furo	MÉDIA (%)	DESVIO PADRÃO (%)
220	20% b_w	12,84	1,97
	40% b_w	13,80	3,57
	60% b_w	16,06	3,73
	80% b_w	17,36	3,37
300	20% b_w	13,31	1,88
	40% b_w	15,06	3,01
	60% b_w	17,54	3,33
	80% b_w	18,99	2,35

A partir da análise destes resultados, observa-se que maiores perfurações levam a maiores reduções na resistência quando se usa como referência o caso sem perfurações, apesar deste comportamento não apresentar um padrão específico.

Observa-se ainda que a adoção de um aço com maior tensão de escoamento leva a uma redução ligeiramente maior. Isto pode ser explicado pois, neste caso, o modo distorcional pode se desenvolver com mais liberdade antes da ruptura por escoamento, o que pode fazer com que os efeitos das perfurações sejam mais relevantes.

5. Conclusões

Este trabalho analisou a eficiência das adaptações do Método da Resistência Direta para a previsão da Resistência de perfis formados a frio do tipo U enrijecido com perfurações e a influência das dimensões destes furos na resistência destas estruturas, tomando como referência resultados numéricos obtidos em um modelo previamente validado a partir de resultados experimentais.

Observou-se que as adaptações do Método da Resistência Direta se mostraram promissoras na previsão do comportamento destas estruturas, considerando-se a prevalência do modo de flambagem distorcional, com diferenças máximas de 11% para a aproximação de Sales e de 18% para a aproximação de Moen.

Foi ainda avaliada a redução da resistência devido à inserção das perfurações nos pilares. Estas análises indicaram que os furos diminuem a resistência dos pilares, com reduções entre 13% e 19%, sendo tanto

maior quanto maiores forem as dimensões das perfurações.

Referências

- [1] YU, W. Cold formed steel design. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 2000.
- [2] SCHAFFER, B.W. Advances in the Direct Strength Method of cold-formed steel design. *Thin-Walled Structures* 140, páginas 533-541, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.03.001>
- [3] HANCOCK, G. J.; KWON, Y. B.; BERNARD, E. S. Strength design curves for thin-walled sections undergoing distortional buckling. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 31, nº. 2-3, p. 169-186, 1994.
- [4] SCHAFFER, B.W. Review: the direct strength method of cold-formed steel member design. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 64, p. 766-778, 2008.
- [5] CAMOTIM, D., DINIS, P.B. MARTINS, A.D. Direct strength method a general approach to the design of cold-formed steel members, in: C. Yu (Ed.), *Recent Trends in Cold-Formed Steel Construction*, 2016.
- [6] 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.
- [7] AS/NZS. Cold-formed steel structures (AS/NZS 4600:2018). Superseding AS/NZS 4600:2005 on 15 May 2019. Sydney-Wellington: AS/NZS, May 15th 2018.
- [8] 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.
- [9] BEBIANO, R., SILVESTRE, N., CAMOTIM, D. GBTUL - A code for the buckling analysis of cold-formed steel members. In: INTERNATIONAL SPECIALTY CONFERENCE ON COLD-FORMED STEEL STRUCTURES, 19., 2008, St. Louis (MO). Proceedings. St. Louis (MO): p. 61-79, Oct. 14 and 15 2008.
- [10] SOUZA, F. T., SANTOS, E. T., 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. 266-01, 266-20, 2020.
- [11] SALES, A. E. C. A. Análise da aplicação do método da resistência direta a perfis formados a frio com perfurações submetidos à compressão. Dissertação (Mestrado Profissional em Construção Metálica) - Escola de Minas, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, 2017.
- [12] JARDIM JÚNIOR, F. Estudo da viabilidade do método da resistência direta em perfis U enrijecidos formados a frio com perfurações. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Minas, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, 2018.
- [13] SANTOS, E. T. Análise numérica da influência das dimensões das perfurações em perfis formados a frio do tipo rack submetidos à compressão. Dissertação (Mestrado profissional em Construção Metálica) – Escola de Minas, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, 2020.
- [14] MOEN, C. D.; SCHAFFER, 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.
- [15] SWANSON ANALYSIS SYSTEMS INC. ANSYS. Vs. 14.5. Houston, USA: 2020.
- [16] 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) – Escola de Minas, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, 2013.
- [17] FARIA, V. O. Análise de estabilidade de perfis formados a frio com perfurações. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Minas, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, 2016.