NOTA TÉCNICA

Análise simplificada da instabilidade distorcional elástica em perfis de aço formados a frio com seção rack submetidos à compressão

Ingrid Paula Daniel Silva¹ e Maximiliano Malite^{2*}

¹ Graduanda em Engenharia Civil, ingridpauladaniel@gmail.com

² Professor, mamalite@sc.usp.br

Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos
da Universidade de São Paulo

Av. Trabalhador São-Carlense, 400, São Carlos - SP

Simplified analysis of the elastic distortional buckling of compression cold-formed steel rack members

Resumo

Os perfis com seção rack, submetidos à compressão, são propensos a apresentar o modo distorcional como modo de instabilidade predominante. Embora a ABNT NBR 14762:2010 estabeleça que a instabilidade distorcional deva ser considerada no projeto, não apresenta uma solução analítica completa para este caso. Proceder à análise de estabilidade elástica por meio de programas de computador resolve o problema, porém dificulta a tarefa cotidiana do projetista. Com base em análise paramétrica, apresenta-se neste trabalho uma fórmula semiempírica para cálculo da força axial crítica de flambagem distorcional elástica, em função de relações geométricas da seção transversal, eliminando a necessidade do uso de programas computacionais para os casos mais simples e frequentes.

Palavras-chave: estruturas de aço, perfis de aço formados a frio, perfil rack, instabilidade distorcional.

Abstract

The cold-formed steel rack members under compression are likely to present the distortional mode as the predominant buckling mode. Although ABNT NBR 14762: 2010 establishes that distortional buckling should be considered, it does not provide a complete analytical solution for this case. Proceeding the analysis of elastic stability using computer programs solves the problem, but complicates the daily task of the engineer. Based on parametric analysis, this paper presents a semi-empirical formula for elastic distortional buckling force, as a function of geometric cross-section relations, avoiding the demand of computer programs for simpler and more frequent cases.

Keywords: steel structures, cold-formed steel members, steel rack members, distortional buckling.

* autor correspondente

1 Introdução

Os perfis com seção tipo rack submetidos à compressão estão sujeitos aos modos de instabilidade local, distorcional e global (Figura 1). Devido principalmente à forma típica dos enrijecedores de borda, são propensos a apresentar o modo distorcional como modo de instabilidade predominante.

A identificação do modo distorcional e de outros modos de instabilidade, bem como a determinação dos respectivos esforços críticos, pode ser feita com base numa análise geral de estabilidade elástica. Na Figura 2 apresenta-se os resultados da análise de estabilidade elástica de um perfil rack submetido à compressão centrada, via método das faixas finitas (Programa CUFSM – Schafer & Ádány, 2006).

Figura 1 – Modos de instabilidade em perfil rack submetido à compressão

Figura 2 – Análise de estabilidade elástica, via método das faixas finitas, de um perfil rack submetido à compressão (Programa CUFSM - Schafer & Ádány, 2006)

A curva apresentada na Figura 2 corresponde a uma envoltória de valores mínimos da força axial de flambagem elástica em função do comprimento de meia onda. O primeiro ramo da curva está associado ao modo local, o segundo ao modo distorcional e o terceiro ao modo global. Nota-se que o ponto de mínimo do modo distorcional (ponto B) é inferior ao ponto de mínimo do modo local (ponto A), caracterizando assim que o modo distorcional é predominante nesse caso.

Diferentemente dos modos local e global, as fórmulas analíticas disponíveis para o cálculo da força axial de instabilidade distorcional elástica são aproximadas e conduzem a extensas marchas de cálculo. É o caso do modelo australiano, proposto por Lau & Hancock (1987) e incorporado à norma australiana AS/NZS 4600:1996, o qual é baseado na análise de estabilidade do conjunto mesa-enrijecedor vinculado elasticamente à alma. Chodraui et al. (2006) comparam o modelo australiano a resultados obtidos via método das faixas finitas e concluem que o modelo é satisfatório para barras comprimidas mas pode apresentar diferenças significativas para barras submetidas à flexão.

Fórmulas analíticas para cálculo do momento fletor de flambagem distorcional elástica de perfis U e Z enrijecidos são apresentadas em Silvestre & Camotim (2004a; 2004b).

Outra solução analítica é a apresentada pela atual especificação norte-americana, a ANSI/AISI S100-16, a qual apresenta uma formulação que requer o cálculo prévio de cinco valores de rigidez rotacional elástica, resultando também em extensa marcha de cálculo.

As soluções via métodos numéricos, como por exemplo o Método das Faixas Finitas ou Teoria Generalizada de Vigas, resolvem o problema, mas implicam no uso de programas computacionais, demandando muitas vezes considerável tempo do projetista numa fase preliminar de projeto, onde é desejável o emprego de soluções analíticas de fácil execução.

Soluções analíticas baseadas em fórmulas semiempíricas, embora com limitado campo de aplicação, permitem um cálculo rápido e, portanto, muitas vezes são interessantes numa fase inicial de projeto. Nesse sentido, Ellifritt et al. (1998) e Grossi&Malite (2013) apresentam fórmulas semiempíricas para o cálculo do momento fletor resistente associado à instabilidade distorcional de perfis U e Z enrijecidos.

O presente trabalho apresenta uma fórmula semiempírica, determinada com base na análise de estabilidade elástica de 220 seções rack, via método das faixas finitas, permitindo calcular diretamente a força axial de instabilidade distorcional elástica em função de um parâmetro associado apenas às dimensões da seção transversal.

2 Metodologia de análise e resultados

Procedeu-se à análise de estabilidade elástica de 220 seções rack, via programa CUFSM (Schafer & Ádány, 2006), baseado no método das faixas finitas, impondo-se uma ampla gama de valores das relações b_f/t , b_w/D e b_s/b_w (Figura 3), com a consequente determinação, para cada seção, da tensão crítica de instabilidade distorcional elástica (σ_{dist}).

As seções foram determinadas pela combinação dos valores de b_f , b_w , D , b_s e t , apresentados na Tabela 1. Das seções geometricamente possíveis, algumas foram desconsideradas pela ausência do modo distorcional na análise de estabilidade, resultando, portanto, 220 seções efetivamente analisadas, compreendidas nos intervalos indicados na Figura 3.

Tabela 1 – Dimensões iniciais consideradas na análise

b_f (mm)	22,5 ; 62,5 ; 131 ; 175
b_w (mm)	75 ; 125 ; 175
D (mm)	7,5 ; 31 ; 70
b_s (mm)	15 ; 37,5 ; 70
t (mm)	1,5 ; 2,25 ; 3

Os valores de σ_{dist} foram plotados em função de um parâmetro geométrico α , dado pela Equação 1. Finalmente foi ajustada uma função, pelo método dos mínimos quadrados, correlacionando σ_{dist} com o parâmetro α (Figura 4) e dada pela Equação 2, cujo coeficiente de determinação (R^2) da curva resultou igual a 0,926. Consequentemente, a força axial crítica de instabilidade distorcional elástica N_{dist} é dada pela Equação 3.

A maior gama de seções analisadas apresentou valores do parâmetro α inferiores a 200 e a maior dispersão dos valores de σ_{dist} foi observada para valores de α inferiores a 100.

Figura 3 – Seção rack e faixa de variação dos parâmetros geométricos

$$\alpha = \left(\frac{b_f}{t} \right)^{0,96} \left(\frac{b_w}{D} \right)^{0,83} \left(\frac{b_s}{b_w} \right)^{0,5} \quad (1)$$

$$\sigma_{dist} = 6.960 \alpha^{-0,863} \quad (\text{em MPa}) \quad (2)$$

$$N_{dist} = A \sigma_{dist} \quad (3)$$

Onde:

b_w ; b_f ; D ; b_s são as dimensões nominais da seção, conforme Figura 3;

t é a espessura;

A é a área bruta da seção.

Figura 4 – Conjunto de valores da análise paramétrica e curva ajustada σ_{dist} versus α

Na figura 5 apresenta-se a relação entre os valores da força axial de compressão resistente ($N_{c,Rdist}$), conforme ABNT NBR 14762:2010 (Equações 4 a 6), sendo a força axial de instabilidade elástica (N_{dist}) obtida pela formulação proposta e pela análise de estabilidade elástica via método das faixas finitas. A média desta relação é de 0,986 e o coeficiente de variação de 10,5%.

$$N_{c,Rdist} = Af_y \quad \text{para} \quad \lambda_{dist} \leq 0,561 \quad (4)$$

$$N_{c,Rdist} = \left(1 - \frac{0,25}{\lambda_{dist}^{1,2}}\right) \frac{Af_y}{\lambda_{dist}^{1,2}} \quad \text{para} \quad \lambda_{dist} > 0,561 \quad (5)$$

$$\lambda_{dist} = \left(\frac{Af_y}{N_{dist}}\right)^{0,5} \quad (6)$$

Figura 5 – Relação entre os valores de $N_{c,Rdist}$ obtidos com N_{dist} via fórmula proposta (Equação 3) e via método das faixas finitas (programa CUFSM)

Na figura 6, apresenta-se a mesma análise exibida na figura 5, porém considerando apenas perfis comerciais usualmente utilizados pela indústria de racks no Brasil. Notar que o parâmetro geométrico α situa-se entre 30 e 50, e a relação entre os valores da força axial resistente, obtidos via análise simplificada e via método das faixas finitas, situa-se entre 0,84 e 1,02, portanto a favor da segurança.

Figura 6 – Relação entre os valores de $N_{c,Rdist}$ considerando apenas perfis rack usualmente utilizados no Brasil

As dimensões dos perfis comerciais e os dados relativos ao gráfico da figura 6 estão apresentados na tabela 1.

Tabela 2 – Dimensões, resultados da análise de estabilidade elástica e valores de $N_{c,Rdist}$ considerando apenas perfis rack usualmente utilizados no Brasil

Seção	b_f (mm)	b_w (mm)	D (mm)	b_s (mm)	t (mm)	σ_{dist} CUFSM (MPa)	α (Eq. 1)	σ_{dist} (Eq. 2) (MPa)	(a) $N_{c,Rdist}$ (kN)	(b) $N_{c,Rdist}$ (kN)
1	27,5	80,6	15,7	41,5	2,00	436	34,5	327	88,1	74,1
2	27,5	101	15,7	41,5	2,00	396	37,2	307	98,2	86,0
3	27,5	122	15,7	41,5	2,00	344	39,6	291	108,3	100,6
4	27,5	162	15,7	52,5	2,00	232	48,9	242	140,0	141,7
5	27,5	81	13,5	32,5	2,00	397	40,7	284	88,8	75,3
(a) calculado com base em análise de estabilidade elástica via método das faixas finitas.										
(b) calculado com base na análise simplificada proposta.										

3 Conclusões

Com base em análise paramétrica de 220 seções foi determinada uma fórmula semiempírica para cálculo da força axial de instabilidade distorcional elástica para perfis rack, dependente apenas de relações geométricas da seção.

Uma vez que a ABNT NBR 14762:2010 não apresenta uma solução analítica completa para este caso, trata-se de uma solução interessante para um cálculo rápido e preliminar, dispensando o uso de programas computacionais para análise de estabilidade elástica.

Considerando os perfis usualmente empregados na indústria brasileira de racks e a análise de estabilidade elástica via método das faixas finitas como referência, os valores da força axial de compressão resistente situam-se à favor da segurança e divergentes em no máximo 16%.

4 Agradecimentos

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela concessão da bolsa de iniciação científica.

5 Referências bibliográficas

AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE. **ANSI/AISI S100-16**: North American specification for the design of cold-formed steel structural members. Washington, DC, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14762**: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro, 2010.

AUSTRALIAN/NEW ZEALAND STANDARD. **AS/NZS 4600**: Cold-formed steel structures, 1996.

CHODRAUI, G. M. B.; MUNAIAR NETO, J.; GONÇALVES, R. M.; MALITE, M. Distortional buckling of cold-formed steel members. **Journal of Structural Engineering - ASCE**, v.132, n.4, p.636-639, Apr., 2006. 4p. ISSN: 0733-9445.

ELLIFRITT, D.S.; GLOVER, R.L.; HERN, J.D. A simplified model for distortional buckling of channels and zees in flexure. **Proceedings of the 14th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures**. University of Missouri-Rolla, Oct., 1998.

GROSSI, L. G. F.; MALITE, M. Procedimento simplificado para cálculo do momento fletor resistente de instabilidade distorcional em perfis U e Z enrijecidos. **Revista da Estrutura de Aço**, CBCA, v. 2, n. 2, p. 115-125, 2013. ISSN: 2238-9377.

LAU, S.C.W.; HANCOCK G.J. Distortional buckling formulas for channel columns. **Journal of Structural Engineering**, ASCE, 113(5), 1063-1078, 1987.

SCHAFER, B.W.; ÁDÁNY, S. Bucking analysis of cold-formed steel members using CUFSM: conventional and constrained finite strip methods. In: 18th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, Orlando, Florida, **Proceedings...**, p. 39-54, 2006.

SILVESTRE, N.; CAMOTIM, D. Distortional buckling formulae for cold-formed steel C and Z-section members: part I - derivation. **Thin-Walled Structures**, v.42, p.1567-1597, 2004a.

SILVESTRE, N.; CAMOTIM, D. Distortional buckling formulae for cold-formed steel C and Z-section members: part II – validation and application. **Thin-Walled Structures**, v.42, p.1599-1629, 2004b.