

ANÁLISE DA ESTABILIDADE EM COLUNAS DE AÇO FORMADAS A FRIO COM SEÇÕES ENRIJECIDAS

Hélio Françaço Jr.^{1,2*}, Cilmar Basaglia¹, Dinar Camotim³ e João A.V. Requena¹

1: Departamento de Engenharia de Estruturas
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo
Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP
Av. Albert Einstein 951, 13083-852 Campinas, Brasil
e-mail: heliofrancozo@gmail.com, cbasaglia@fec.unicamp.br, jvrequena@fec.unicamp.br

2: Faculdade de Tecnologia
Centro Universitário Padre Anchieta, UniAnchieta
Av. Doutor Adoniro Ladeira, 94, 13210-800 Jundiaí, Brasil
e-mail: helio.junior@anchieta.br

3: Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura
ICIST, CERis, Instituto Superior Técnico
Universidade de Lisboa
Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal
e-mail: dcamotim@civil.ist.utl.pt

Palavras-chave: Estruturas metálicas, Aço formado a frio, Coluna com seção enrijecida, Flambagem, Teoria Generalizada de Vigas.

Resumo. *Este trabalho apresenta os resultados de uma investigação numérica em andamento que consiste em avaliar, através da Teoria Generalizada de Vigas, a estabilidade de perfis de aço formados a frio, submetidos à compressão axial, com seções do tipo C e exibindo enrijecedores longitudinais intermediários, dos tipos Trapezoidal, em V e em Z, na alma e/ou nas mesas. Em particular, por meio de um estudo paramétrico preliminar, procura-se identificar o “enrijecimento ótimo”, analisando-se a influência da quantidade, da dimensão e do tipo dos enrijecedores nos valores de carga crítica e nas configurações dos correspondentes modos de instabilidade.*

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas duas décadas, a comunidade científica ligada às estruturas de perfis metálicos (de aço) com seção de parede fina aberta (e.g., perfis formados a frio) tem dedicado um considerável esforço de pesquisa ao desenvolvimento de metodologias ligadas especificamente ao dimensionamento e verificação de segurança de perfis fabricados a partir de chapas de aço de alta resistência, cujo comportamento é caracterizado por uma elevada tensão de plastificação [1]. Devido aos elevados níveis de esbeltez frequentemente exibidos por esses perfis de aço formados a frio, a sua eficiência estrutural é fortemente condicionada pela ocorrência de fenômenos de instabilidade (flambagem) locais, distorcionais e/ou globais. Uma forma de aumentar a resistência dos perfis às instabilidades locais e distorcionais (i.e., de aumentar a

correspondente tensão crítica de bifurcação) consiste na inclusão de enrijecedores longitudinais intermediários nas placas/paredes que compõem a seção transversal do perfil (quase sempre na alma, mas muitas vezes também nas mesas) – a maioria destes enrijecedores (longitudinais) intermediários são dos tipos em V, Trapezoidal, e em Z (ver Fig. 1). Estes enrijecedores intermediários reduzem a “esbeltez local” das paredes que compõem o perfil, na medida em que elas ficam subdivididas em segmentos de menor largura, podendo conseguir-se assim ganhos consideráveis em termos da resistência última dos perfis [2-4]. Para além disso, a presença desses enrijecedores na seção transversal de um perfil pode alterar significativamente a natureza do modo de instabilidade em relação a um perfil correspondente com seção transversal lisa [5].

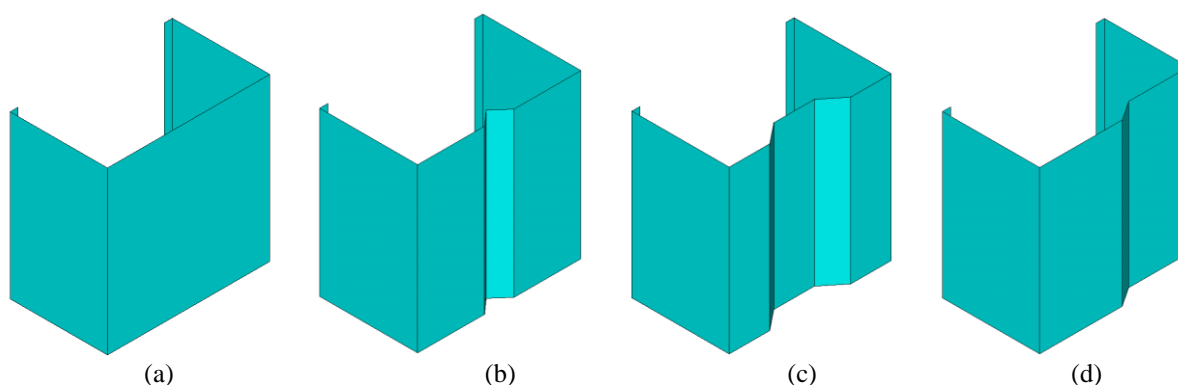


Figura 1. Perfil de seção C (a) sem enrijecedor (longitudinal) intermediário e com enrijecedores dos tipos (b) em V, (c) Trapezoidal e (d) em Z.

No entanto, a elaboração, validação e calibração de metodologias e fórmulas para dimensionar eficazmente esses perfis requer um conhecimento aprofundado sobre o seu comportamento de estabilidade (carga crítica e modo de instabilidade), o qual só pode ser obtido através de (i) pesquisas laboratoriais dispendiosas e/ou (ii) métodos de análises muito complexos. No contexto das análises numéricas “tradicionais”, tais como as baseadas no método dos elementos finitos, essa tarefa é realizada através de discretizações (malhas) em elementos de casca bastante refinadas, abordagem que envolve um intenso trabalho de modelagem, esforços computacionais muito elevados e uma laboriosa interpretação dos resultados obtidos (para identificar o modo de instabilidade pretendido) – assim, pode imaginar-se a dimensão do trabalho envolvido num estudo paramétrico que vise determinar a forma, a dimensão e o posicionamento mais eficaz dos enrijecedores intermediários ao longo das paredes/placas. Uma alternativa para superar essas limitações é o uso de um elemento finito de barra baseado na Teoria Generalizada de Vigas (GBT – “Generalised Beam Theory” em inglês) [6-8]. A GBT é uma teoria de barras que inclui a deformação local e global das seções. Ao discretizar a configuração deformada da barra (*e.g.*, a forma de um modo de instabilidade), numa combinação de modos de deformação (locais, distorcionais e globais), a GBT fornece soluções elegantes e precisas para vários problemas estruturais que envolvem barras prismáticas de parede fina.

O objetivo deste trabalho é apresentar os resultados de uma investigação numérica em andamento que consiste em avaliar, através da GBT, a estabilidade de perfis de aço formados a

frio, submetidos à compressão axial, com seções do tipo C e exibindo enrijecedores longitudinais intermediários na alma e/ou nas mesas. Em particular, por meio de um estudo paramétrico preliminar, procura-se identificar o “enrijecimento ótimo”, analisando-se a influência da quantidade (espaçamento), da dimensão e do tipo (formas Trapezoidais, V e Z) dos enrijecedores nos valores de carga crítica (de flambagem) e nas configurações dos correspondentes modos de instabilidade.

2. ÂMBITO DA PESQUISA, METODOLOGIA E SELEÇÃO DAS COLUNAS

Os perfis com seção de parede fina aberta podem ser encarados como um conjunto de paredes (placas) longas unidas entre si através dos respectivos bordos longitudinais (*i.e.*, arestas que unem duas paredes adjacentes). A perda de estabilidade destas paredes comprimidas caracteriza a *instabilidade local* da barra, a qual envolve somente deformação das seções transversais (nos seus próprios planos), permanecendo o eixo longitudinal da barra indeformado – este fenômeno de instabilidade pode ocorrer nas paredes de perfis submetidas a compressão axial, a flexão e a ambas (a flexão pode ser devida a momentos aplicados e/ou forças transversais). Dependendo das características da deformação das seções transversais, esses modos de instabilidade são classificados em “modos locais (de placa)” e “modos distorcionais”.

Nos modos locais não existem deslocamentos dos bordos longitudinais internos do perfil. Desta forma, a deformação das seções deve-se, quase exclusivamente, à flexão transversal das paredes internas (as paredes de extremidade têm um bordo longitudinal livre e, por esse motivo, sofrem sobretudo rotações de corpo rígido) – esta característica limita o comprimento das semi-ondas do modo de instabilidade (“comprimento de instabilidade”) às dimensões transversais das paredes que constituem o perfil (*e.g.*, largura da mesa ou a altura da alma). A instabilidade do perfil é acionada pela flexão da parede (placa) comprimida mais esbelta (flexível), sendo as restantes paredes “obrigadas” a deformar-se por compatibilidade de rotação ao longo dos bordos longitudinais.

Sempre que a seção de uma barra possua mais que três paredes não complanares, pode ocorrer instabilidade distorcional [9]. Este fenômeno de instabilidade é caracterizado pelo fato de a deformação das seções transversais da barra incluir movimentos de rotação de corpo rígido de um conjunto de paredes (*e.g.*, o mesa e o reforço de extremidade de uma seção em C), em torno de um bordo interno, os quais induzem, por compatibilidade, deformações de flexão moderadas em todas ou algumas das restantes paredes – esta característica faz com que os comprimentos das semi-ondas do modo de instabilidade sejam maiores que os valores relativos aos modos locais.

A inclusão de enrijecedores longitudinais intermediários nas paredes da seção transversal aumenta consideravelmente a carga crítica de flambagem local e distorcional da coluna.

2.1. Teoria Generalizada de Vigas: Breve Introdução

As análises de estabilidade tratadas nesse trabalho foram realizadas através da GBT, por meio do código computacional GBTUL [10]. A principal característica inovadora da GBT consiste no fato de a deformação da seção transversal da barra ser expressa como uma combinação linear de funções de forma “especiais”, as quais são designadas por “modos de deformação” e satisfazem um certo conjunto de condições de ortogonalidade. Esta “natureza modal” da GBT conduz a grandes vantagens, em termos (i) de “clareza estrutural” e, principalmente, (ii) de eficiência computacional.

Apesar da sua designação, a GBT é muito mais que uma teoria de barras e deve ser encarada como

uma *abordagem* ou *metodologia* extremamente eficaz e elegante para resolver vários problemas estruturais que envolvem barras prismáticas com seção de parede fina. De fato, muito embora a GBT (i) seja apresentada num formato que exibe grandes semelhanças com as teorias de barras “clássicas” (uma formulação unidimensional, *i.e.*, em que as equações de equilíbrio e as condições de contorno que regem o comportamento do elemento estrutural são expressas em termos de grandezas que dependem apenas de uma coordenada axial), ela (ii) incorpora também conceitos da teoria de “placas dobradas”, o que faz com que seja possível tomar em consideração os *efeitos locais* (deformações das seções transversais dos elementos nos seus próprios planos). Obviamente, para que seja possível combinar estas duas características, é necessário ser capaz de determinar, *a priori*, as propriedades mecânicas que descrevem não só o comportamento de corpo rígido da seção transversal do elemento estrutural (tal como sucede nas teorias “clássicas”), mas também as deformações sofridas pelas suas paredes (*deformações locais*). Pelo fato de adotar uma discretização da seção transversal genuinamente original, a GBT consegue alcançar esse objetivo através de um processo designado por *análise da seção*, a qual inclui (i) a identificação dos *modos de deformação* (da seção transversal) e (ii) a determinação das correspondentes *propriedades mecânicas modais*. A Figura 2 apresenta os modos de deformação **5 a 12** (distorcionais + locais) para um perfil C sem enrijecedor intermediário e com enrijecedores dos tipos em V, Trapezoidal e em Z.



Figura 2. Modos de deformação do perfil de seção C (a) sem enrijecedor longitudinal intermediário e com enrijecedores dos tipos (b) em V, (c) Trapezoidal e (d) em Z.

2.2. Seleção da geometria das colunas

A seleção da geometria das colunas (sem enrijecedores intermediários) de aço ($E=200GPa$ e $\nu=0.3$) tratadas nesse trabalho foi por “tentativa e erro” através de análises de estabilidade, sendo que o critério de escolha é condicionado ao fato de se obter um modo de flambagem de natureza dominante *local* ou *distorcional*. A Tabela 1 apresenta as dimensões e as áreas das três seções do tipo C selecionadas. O produto final do processo de seleção das seções é mostrado na Tabela 2, na qual são comparados, para 8 comprimentos (L) de colunas simplesmente apoiadas

Seção	bw (mm)	bf (mm)	d (mm)	t (mm)
C100x5	100	60	5	1
C100x8	100	60	8	1
C200x10	200	120	10	1

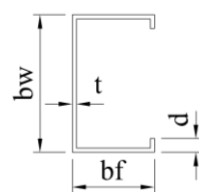


Tabela 1. Dimensões das seções sem enrijecedores intermediários.

Seção	Comprimento	Carga Crítica	Número de	Participação Modal		Natureza Modal
	L (cm)	P_{cr} (kN)	Semi-ondas (n_s)	Distorcional (%)	Local (%)	
C100x5	20	21.26	1	85.00	14.97	Distorcional
	30	17.44	1	96.08	3.89	
	40	19.05	1	97.44	2.49	
	50	18.40	2	93.58	6.38	
	60	17.44	2	96.08	3.89	
	90	17.44	3	96.07	3.89	
	120	17.46	4	96.07	3.90	
	150	17.48	5	96.04	3.92	
C100x8	20	23.51	2	0.92	99.06	Local
	30	22.79	4	0.22	99.77	
	40	22.63	5	0.30	99.70	
	50	22.66	6	0.36	99.62	
	60	22.75		0.41	99.57	
	90	23.17	>7	0.53	99.47	
	120	24.13		0.45	99.54	
	150	24.95		0.55	99.43	
C200x10	20	11.45	1	0.75	99.22	Local
	30	11.08	2	0.18	99.81	
	40	11.45	2	0.75	99.22	
	50	10.99	4	0.30	99.69	
	60	11.09	4	0.18	99.81	
	90	11.11	5	0.44	99.56	
	120	11.07	7	0.34	99.64	
	150	11.09	>7	0.27	99.73	

Tabela 2. Comprimento, carga crítica de flambagem, número de semi-ondas e participações modais.

(articuladas local e globalmente e com o empenamento livre) e submetida a compressão axial uniforme, os valores de carga crítica de flambagem (P_{cr}) e os correspondentes número de semi-ondas longitudinais (n_s) e participações modais. Observa-se que enquanto as colunas de seções transversais C100x8 e C200x10 exibem modos de flambagem de natureza *local*, as colunas de seção C100x5 apresentam modos de flambagem de natureza *distorcional*. Para além disso, todos os modos de flambagem exibem 2 ou mais semi-ondas para colunas com $L \geq 50\text{cm}$.

2.2. Geometrias e dimensões dos enrijecedores intermediários

Além das colunas sem enrijecedores intermediários (CF-00), foram realizadas análises de estabilidade em colunas simplesmente apoiadas com 11 configurações diferentes (CF-01 a CF-11) de enrijecimento intermediário, tomando em consideração a quantidade (espaçamento) e o tipo – essas configurações podem ser divididas em *quatro* famílias, nomeadamente: (i) com um ou dois enrijecedores do tipo V na alma (CF-01 a CF-05), (ii) com um enrijecedor do tipo V na alma e nas mesas (CF-06), (iii) com um enrijecedor do tipo trapezoidal (seções “sigma”) na alma (CF-07 a CF-10) e (iv) com um enrijecedor do tipo Z na alma (CF-11). Para além disso, foram consideradas duas profundidades diferentes de enrijecedor, $c=2.5t$ e $c=5.0t$. A Figura 3 mostra a geometria dessas 11 configurações de enrijecimento intermediário da seção transversal.

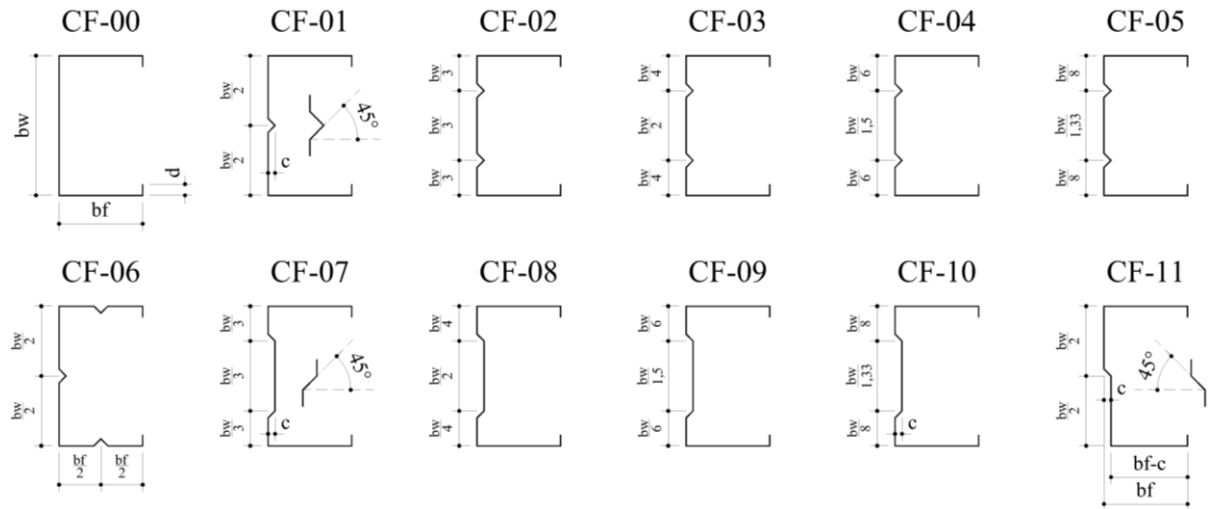


Figura 3. Configurações de seções analisadas.

3. RESULTADOS NUMÉRICOS

As Figuras 4 a 9 mostram os resultados obtidos para as colunas de seção C100x5, C100x8 e C200x10 sem e com enrijecedores intermediários de profundidade $c=2.5t$ (Figs. 4, 6 e 8) e $c=5.0t$ (Figs. 5, 7 e 9). As curvas apresentadas nas figuras traduzem a variação da carga crítica (P_{cr}) com o comprimento da coluna (L). Enquanto que os gráficos apresentados das Figuras 4(a)-9(a) são associados às colunas com enrijecedores em V, os gráficos das Figuras 4(b)-9(b) referem-se às colunas com enrijecedores Trapezoidal e em Z. As Figuras 4(c)-9(c) comparam as curvas P_{cr} vs. L das colunas com configurações CF-00, CF-06, CF-11 e daquelas que apresentam os maiores

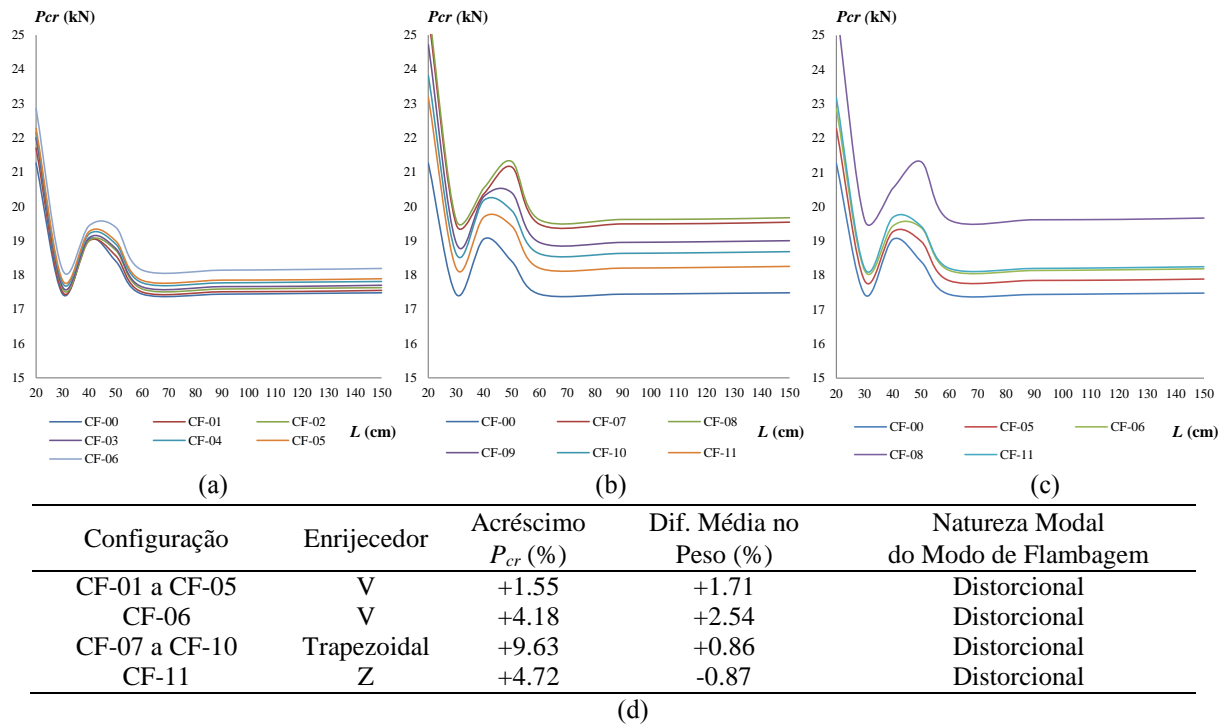


Figura 4. C100x5 e $c=2.5t$: P_{cr} vs. L das colunas (a) CF-00 – CF-06, (b) CF-00, CF-07 – CF-11, e (c) CF-00, CF-05, CF-06, CF-08, CF-11 e (d) síntese dos acréscimos de P_{cr} , diferença média de peso e natureza do modo de instabilidade.

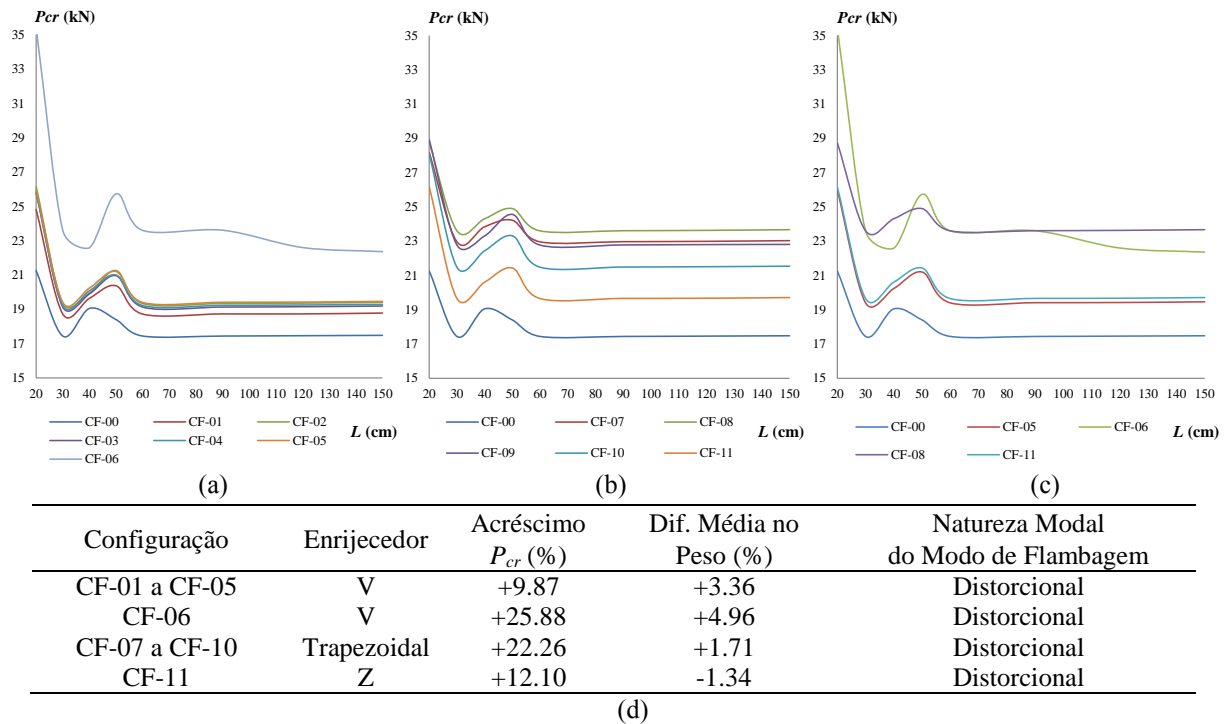


Figura 5. C100x5 e $c=5.0t$: P_{cr} vs. L das colunas (a) CF-00 – CF-06, (b) CF-00, CF-07 – CF-11, e (c) CF-00, CF-05, CF-06, CF-08, CF-11 e (d) síntese dos acréscimos de P_{cr} , diferença média de peso e natureza do modo de instabilidade.

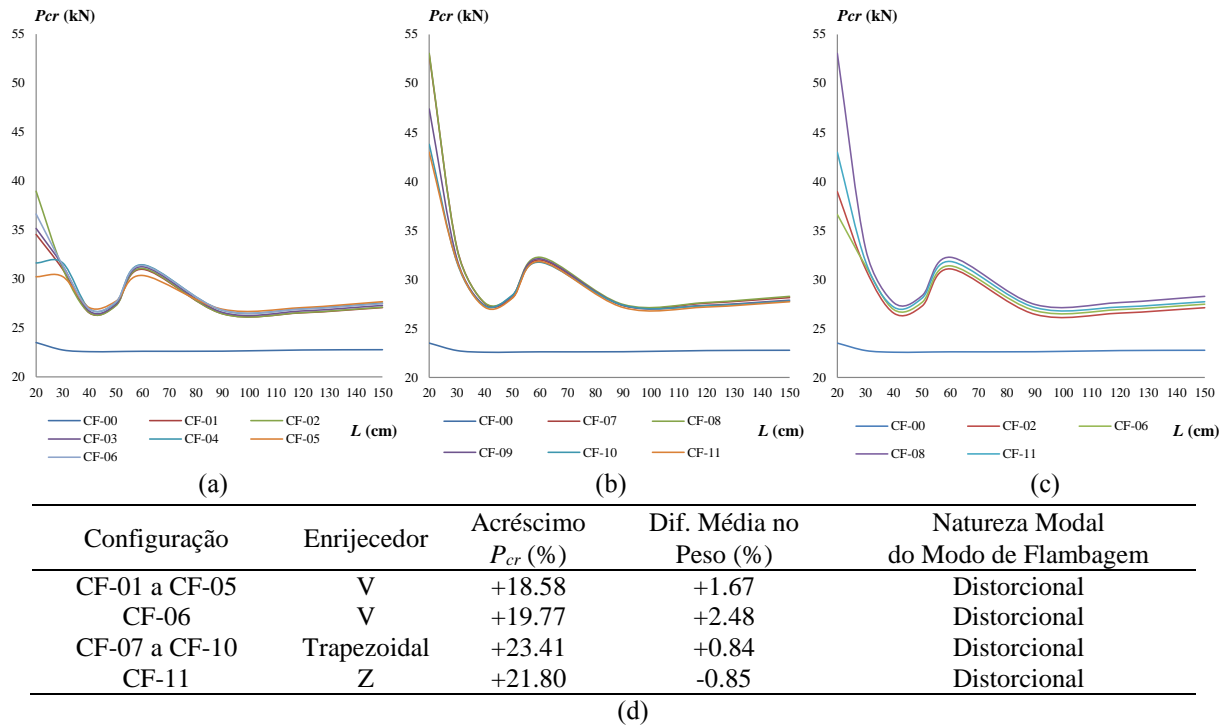


Figura 6. C100x8 e $c=2.5t$: P_{cr} vs. L das colunas (a) CF-00 – CF-06, (b) CF-00, CF-07 – CF-11, e (c) CF-00, CF-02, CF-06, CF-08, CF-11 e (d) síntese dos acréscimos de P_{cr} , diferença média de peso e natureza do modo de instabilidade.

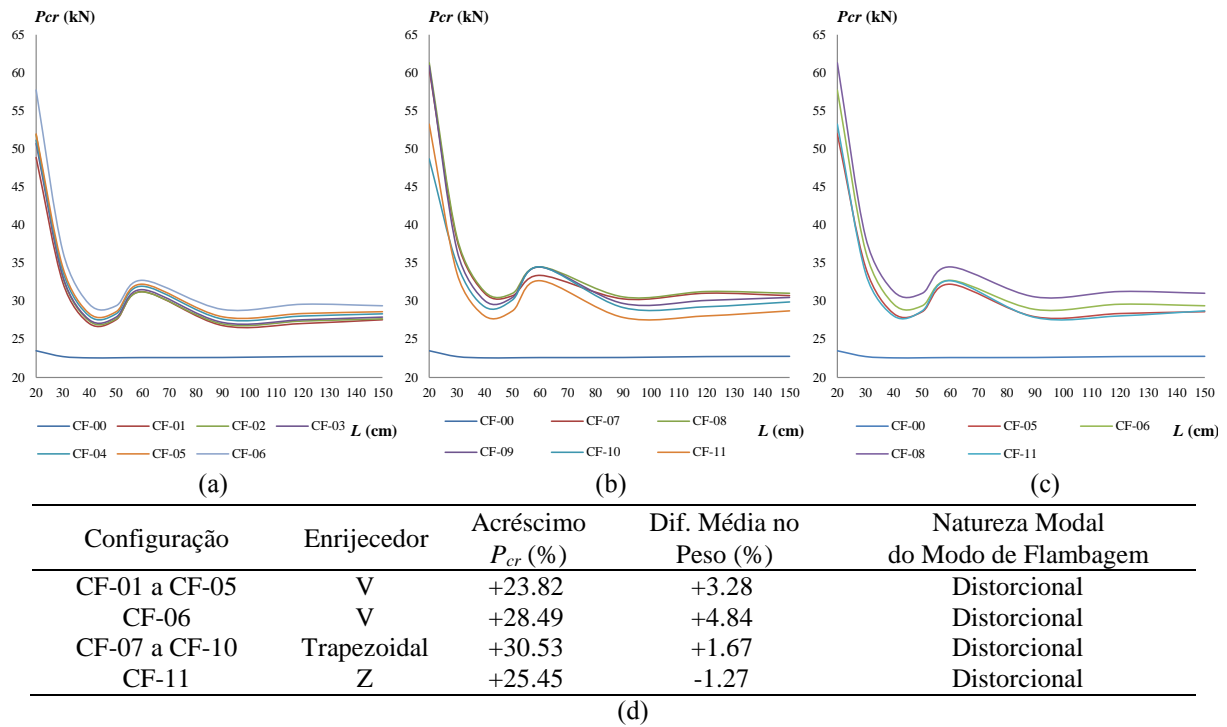


Figura 7. C100x8 e $c=5.0t$: P_{cr} vs. L das colunas (a) CF-00 – CF-06, (b) CF-00, CF-07 – CF-11, e (c) CF-00, CF-02, CF-06, CF-08, CF-11 e (d) síntese dos acréscimos de P_{cr} , diferença média de peso e natureza do modo de instabilidade.

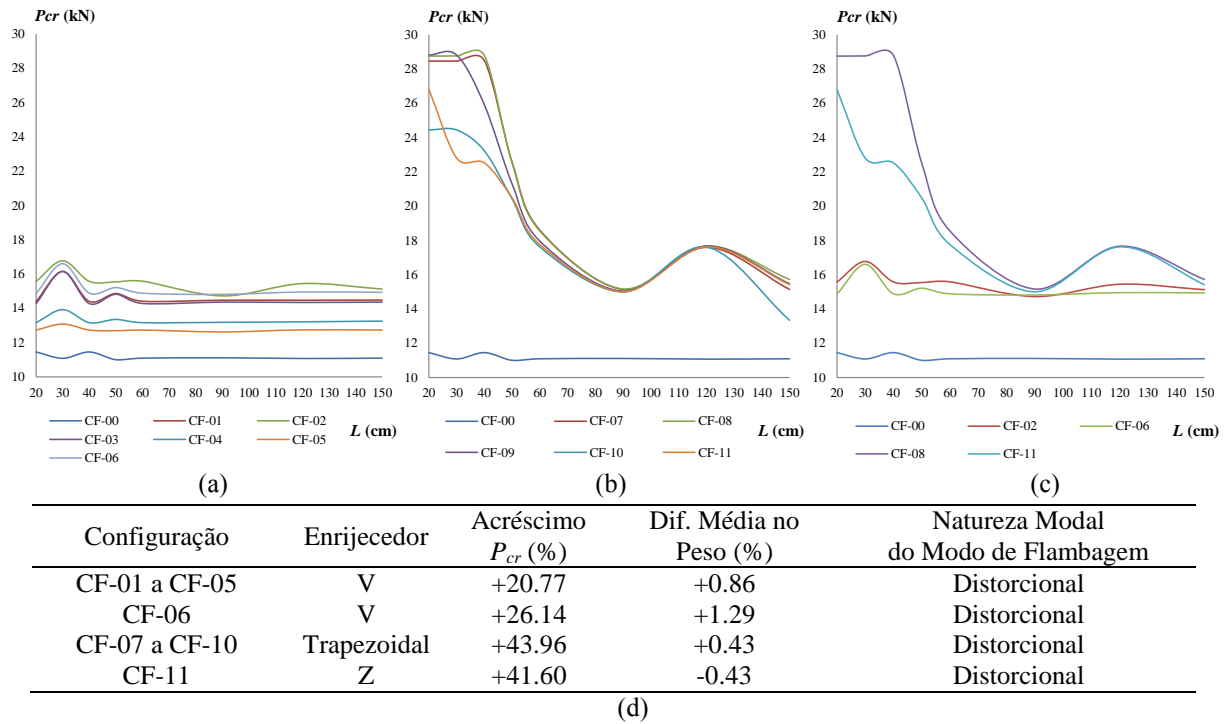


Figura 8. C200x10 e $c=2.5t$: P_{cr} vs. L das colunas (a) CF-00 – CF-06, (b) CF-00, CF-07 – CF-11, e (c) CF-00, CF-02, CF-06, CF-08, CF-11 e (d) síntese dos acréscimos de P_{cr} , diferencia média de peso e natureza do modo de instabilidade.

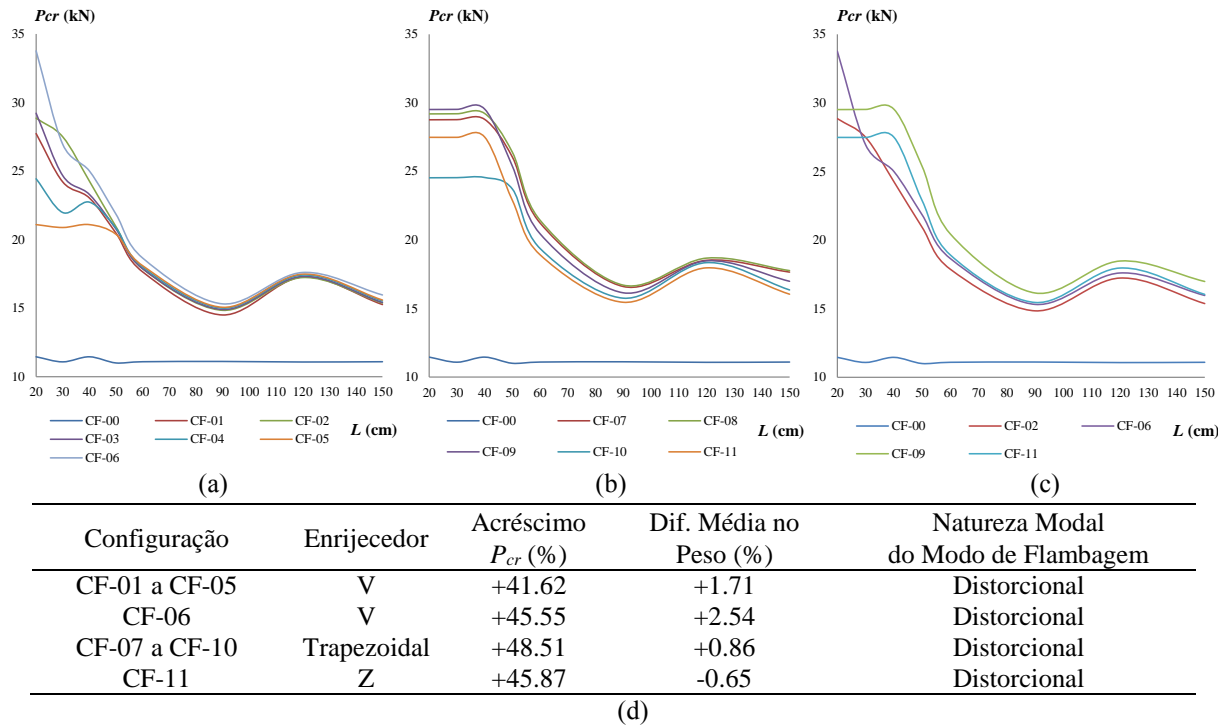


Figura 9. C200x10 e $c=5.0t$: P_{cr} vs. L das colunas (a) CF-00 – CF-06, (b) CF-00, CF-07 – CF-11, e (c) CF-00, CF-02, CF-06, CF-08, CF-11 e (d) síntese dos acréscimos de P_{cr} , diferencia média de peso e natureza do modo de instabilidade.

valores médios de P_{cr} (para $20\text{cm} \leq L \leq 150\text{cm}$) entre as configurações CF-01 a CF-05 (com enrijecedor em V na alma) e CF-07 a CF-10 (com enrijecedor trapezoidal na alma). Por outro lado, para as quatro famílias de configurações de enrijecedores (CF-01 a CF-05, CF-06, CF-07 a CF-10, CF-11) mencionadas atrás, as tabelas mostradas nas Figuras 4(d)-9(d) apresentam uma síntese dos acréscimos médios nos valores de carga crítica e as diferenças médias de peso em relação à coluna sem enrijecedor, bem como a natureza modal do modo de flambagem. A Figura 10 mostra as configurações dos modos de flambagem das colunas de seção C200x10, com $L=20\text{cm}$, sem enrijecedor longitudinal intermediário e exibindo enrijecedores com $c=5.0t$, dos tipos em V (CF-01 e CF-06), Trapezoidal (CF-09) e em Z (CF-11).

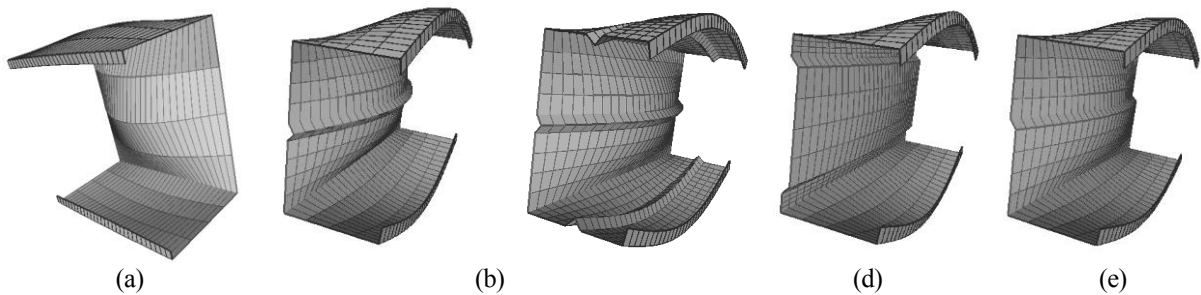


Figura 10. Modos de flambagem da coluna de seção C200x10, com $L=20\text{cm}$, (a) sem enrijecedor intermediário e com enrijecedores, $c=5.0t$, dos tipos (b) em V (CF-01 e CF-06), (c) trapezoidal (CF-09) e (d) em Z (CF-11).

A observação dos resultados apresentados nas Figuras 4-10 permite tecer os seguintes comentários:

- (i) No âmbito das configurações de enrijecedor do tipo V apenas na alma (CF-01 a CF-05), enquanto nas seções C100x5 e C100x8 o maior acréscimo de P_{cr} foi constatado para a configuração CF-05, na seção C200x10 o maior aumento de P_{cr} pertence à configuração CF-02. Essa constatação mostra de uma forma preliminar que para almas mais esbeltas é conveniente aproximar os enrijecedores do tipo V na meia altura da alma.
- (ii) O uso de enrijecedores do tipo V nas mesas proporcionou um acréscimo maior no valor de P_{cr} nas colunas com seções C100x5, as quais exibiram um modo de flambagem distorcional (ver Tabela 2) na situação original (*i.e.*, seção lisa).
- (iii) Entre as configurações de enrijecedores do tipo Trapezoidal, o maior acréscimo no valor de P_{cr} pertence à CF-08 em todos os casos analisados.
- (iv) Todas as colunas com enrijecedor do tipo Z (CF-11) apresentaram acréscimos nos valores de P_{cr} entre 7% (C100x8, $c=5.0t$) e 200% (C100x5, $c=2.5t$) superiores aos acréscimos obtidos nas colunas com configurações de enrijecedor do tipo V apenas na alma (CF-01 a CF-05). Para além disso, o uso do enrijecedor do tipo Z promove uma diminuição de 13% (para $c=2.5t$) a 34% (para $c=5.0t$) no peso da coluna em relação ao caso original (sem enrijecedor).
- (v) As colunas com seções enrijecidas C100x5 e $c=5.0t$ exibiram um acréscimo médio de P_{cr} de cerca de 250% superior ao acréscimo obtido nas colunas C100x5 e $c=2.5t$. Por outro lado, as colunas com seções enrijecidas C100x8 e C200x10 com $c=5.0t$ apresentaram um acréscimo médio em torno de 30% superior ao acréscimo obtido nas correspondentes seções com $c=2.5t$.

- (vi) Como seria de esperar, o modo distorcional tornou-se dominante no comportamento de estabilidade em todas as colunas com enrijecedores intermediários analisadas. Tal como mostra a Figura 10, a coluna C200x10, com $L=20cm$ e sem enrijecedor intermediário instabiliza em um modo local e passa a exibir instabilidade distorcional com a inclusão de enrijecedores.
- (vii) Os maiores acréscimos de P_{cr} ocorreram nas colunas curtas ($L \leq 50cm$), cujos valores médios de carga crítica aumentaram em cerca de 32%. Para colunas com $L > 50cm$, os ganhos na carga crítica são mais constantes ao longo de L , com aumento de valores na ordem de 19%.
- (viii) Entre todos os tipos de enrijecedores analisados, o enrijecedor do tipo Trapezoidal mostrou ser o mais eficiente no comportamento de estabilidade das colunas, *i.e.*, aquele que proporcionou um maior acréscimo de carga crítica, mediante um menor aumento de peso da coluna devido a inclusão do enrijecedor.

4. CONCLUSÕES

Apresentaram-se e discutiram-se resultados de uma investigação numérica em andamento que consiste em avaliar, através da GBT, a estabilidade de perfis de aço formados a frio, submetidos à compressão axial, com seções do tipo C e exibindo enrijecedores longitudinais intermediários, dos tipos em V, Trapezoidal e em Z, na alma e/ou nas mesas. Com base no estudo paramétrico apresentado neste trabalho (embora ainda limitado), é possível concluir preliminarmente que:

- (i) A inclusão de enrijecedores intermediários na alma da seção transversal de uma coluna formada a frio pode aumentar expressivamente os valores da carga de flambagem local e alterar a natureza do modo de instabilidade de local para distorcional.
- (ii) A inclusão de enrijecedores intermediários na mesa da seção transversal de uma coluna formada a frio tende a aumentar principalmente os valores da carga de flambagem distorcional.
- (iii) O enrijecedor do tipo Trapezoidal mostrou ser o mais eficiente no comportamento de estabilidade das colunas.

Por fim, é importante relatar que os autores estão trabalhando atualmente na análise de estabilidade de colunas com seções transversais enrijecidas exibindo outras dimensões e esbeltez.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro concedido pelo *Fundo de Apoio ao Ensino, à Pesquisa e à Extensão* (FAPEX-UNICAMP – Brasil), por meio do projeto 0841/14.

REFERÊNCIAS

- [1] D. Yang, *Compression Stability of High Strength Steel Sections with Low Strain-Hardening*, Ph.D. Thesis, University of Sydney, Sydney, (2004).
- [2] D.C.Y. Yap e G.J. Hancock, “Experimental Study of High-strength Cold-formed Stiffened C-sections in Compression”, *Journal of Structural Engineering*, Vol. **137**, pp. 162-172, (2011).
- [3] A.I. El-Sheikh, E.M.A. El-Kassas e R.I. Mackie, “Performance of stiffened and unstiffened cold-formed channel members in axial compression”, *Engineering*

- Structures, Vol. **23**, pp. 1221-1231, (2001).
- [4] B.W. Schafer, “Stiffened elements with multiple intermediate stiffeners and edge stiffened elements with intermediate stiffeners”, *Proceedings of the 16th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Design and Construction* (Orlando, 14-18/10), pp. 14-40, (2002).
- [5] R. Bebbiano, N. Silvestre e D. Camotim, “Buckling and Post-Buckling Behaviour of Cold-Formed Steel Columns with Distinct Intermediate and End Stiffeners: a Comparative Study”, *Proceedings of 4th European Conference on Steel and Composite Structures* (Maastricht, 8-10/6), B. Hoffmeister e O. Hechler, eds., *EuroSteel*, pp.145-153, (2005).
- [6] R. Schardt, *Verallgemeinerte Technische Biegetheorie*, Springer-Verlag, Berlin, (1989).
- [7] C. Basaglia e D. Camotim, “Buckling analysis of thin-walled steel structural systems using generalised beam theory (GBT)”, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, Vol. **15**, pp. 1540004-1 - 1540004-28, (2015).
- [8] D. Camotim, C. Basaglia, “Buckling analysis of thin-walled steel structures using generalized beam theory (GBT): state-of-the-art report”, *Steel Construction*, Vol. **6**, pp.117-131, (2013).
- [9] S. Ádány, *Buckling Mode Classification of Members with Open Thin-Walled Cross-Sections by Using the Finite Strip Method*, Research Report, Department of Civil Engineering, Johns Hopkins University, Baltimore, (2004).
- [10] R. Bebbiano, R. Gonçalves, N. Silvestre e D. Camotim, *GBTUL – Buckling and Vibration Analysis of Thin-Walled Members*, DECivil/IST, Technical University of Lisbon (<http://www.civil.ist.utl.pt/gbt>), (2015).