

Dimensionamento estrutural de perfis de aço formados a frio na compressão axial: atualização dos estudos sobre os efeitos da interação entre modos de flambagem

Gustavo Yoshio Matsubara¹, Eduardo de Miranda Batista²

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro / COPPE / Programa de Engenharia Civil / gustavoyoshio@coppe.ufrj.br

² Universidade Federal do Rio de Janeiro / COPPE / Programa de Engenharia Civil / batista@coc.ufrj.br

Resumo

O emprego de perfis de aço formados a frio (PFF) na construção metálica resulta em um processo muito competitivo devido à relação favorável entre resistência e peso próprio. Merecem destaque o emprego dos PFF nas construções residenciais e edifícios de andares múltiplos com o emprego do sistema construtivo *steel frame*, estruturas de armazenamento e logística com sistemas porta paletes, coberturas leves para grandes vãos, entre outras aplicações. A Figura 1 apresenta exemplos de sistema construtivos (a) *steel frame* e (b) cobertura leve.



(a)



(b)

Figura 1 – Aplicações de perfis de aço formados a frio: (a) construções residenciais em sistema *steel frame* (GYPSTEEL, c2019) e (b) cobertura de grande vão no sistema Roll-on® (MARKO, 2014?).

A norma brasileira NBR 14762 (ABNT, 2010) considera, no dimensionamento estrutural dos PFF sujeitos à compressão axial, os modos de flambagem Distorcional (D), Global (G) e a interação Local-Global (LG). Entretanto, outros modos de flambagem originados da interação entre modos básicos (L, D e G) não são considerados: interação Local-Distorcional (LD), Distorcional-Global (DG) e Local-Distorcional-Global (LDG). A despeito da ausência de prescrições para esses casos na norma brasileira, está comprovado nos estudos experimentais de SANTOS *et al.* (2014), YOUNG *et al.* (2018) e SALLES *et al.* (2019) a ocorrência dessas configurações no colapso estrutural de colunas de PFF.

A interação entre modos de flambagem conduz a uma redução da resistência das colunas de PFF, quando comparado aos resultados obtidos sob a consideração simplificada dos modos isolados (L, D e G). A comprovação experimental desses fenômenos conduziu a inúmeras pesquisas, resultando em diferentes propostas de dimensionamento estrutural para os casos de interação LD, DG e LDG, sendo apresentadas por SCHAFFER (2002), MARTINS *et al.* (2017), DINIS *et al.* (2018), MATSUBARA *et al.* (2019), BATISTA *et al.* (2019), MARTINS *et al.* (2018) e LAZZARI e BATISTA (2020).

O presente trabalho tem por objetivo propor uma formulação para o dimensionamento estrutural de colunas de PFF sujeitas a interação LD, para as seções mais usuais: U enrijecido, Z enrijecido, Cartola e Rack. Além disso, para os casos das interações DG e LDG, são destacadas as propostas consideradas mais promissoras na literatura recente. Sendo assim, são apresentados os seguintes tópicos: (i) revisão bibliográfica de resultados numéricos e experimentais de colunas de PFF, (ii) revisão bibliográfica de propostas de dimensionamento estrutural de colunas de PFF sujeitas às interações DG e LDG, (iii) desenvolvimento de modelo em elementos finitos de casca para o estudo paramétrico e (iv) apresentação de possíveis soluções para consideração das interações não cobertas pela norma brasileira.

Palavras-chave

Perfis de aço formados a frio; Dimensionamento estrutural; Interação entre modos de flambagem.

Introdução

O emprego dos perfis de aço formados a frio ganhou espaço nos últimos anos em várias aplicações da construção civil. As estruturas utilizando esses materiais apresentam relação favorável entre resistência e peso próprio, além de boa versatilidade na fabricação de diferentes seções transversais para diferentes aplicações. Algumas das seções transversais mais usuais podem ser observadas na Figura 2.

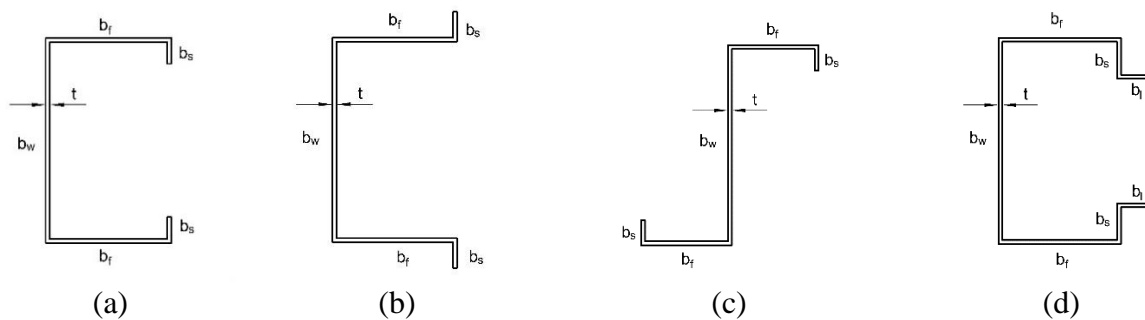


Figura 2 – Seções transversais usuais de PFF: (a) U enrijecido, (b) Cartola (Hat), (c) Z e (d) Rack.

As paredes desses perfis costumam apresentar esbelteza elevada, sendo assim, podem desenvolver modos de flambagem quando sujeitas à compressão axial. Na Figura 3 estão apresentados os modos de flambagem puros (sem interação) de um perfil do tipo U enrijecido.

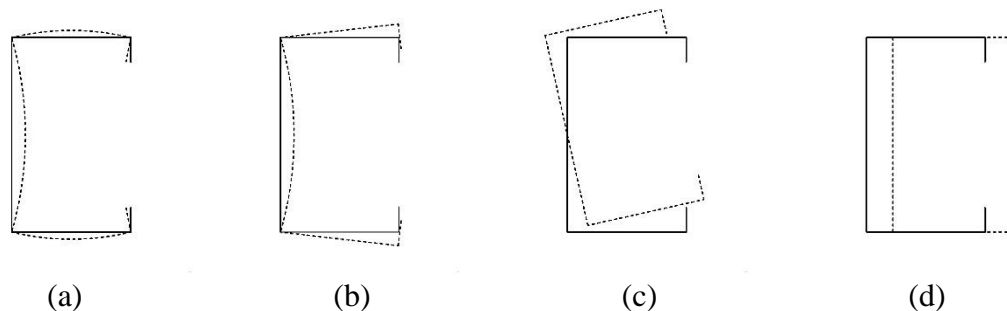


Figura 3 – Modo de flambagem: (a) local (L), (b) distorcional (D), (c) global de flexo-torção (FT) e (d) global de flexão na menor inércia (F_m).

Além dos modos puros apresentados na Figura 3, existe a possibilidade de ocorrer interação entre esses modos, originando os modos de interação local-distorcional (LD), local-global (LG), distorcional-global (DG) e local-distorcional-global (LDG). Essas interações conduzem a uma redução adicional da resistência à compressão dessas colunas, quando comparadas aos modos puros.

No presente trabalho, será verificada a interação entre modos sob a perspectiva da NBR 14762 (ABNT, 2010). Além disso, visa propor possíveis soluções para consideração das mesmas nos procedimentos normativos para o dimensionamento estrutural, segundo o conceito de estados limites últimos.

Dimensionamento de PFF sujeitos à compressão axial segundo a NBR 14762 (ABNT, 2010)

Atualmente, a NBR 14762 (ABNT, 2010) apresenta formulações para dimensionamento de barras sob compressão axial sujeitas aos modos de flambagem distorcional (D), global (G) e a interação local-global (LG). A consideração do modo global é feita através da Eq. (1), em termos de tensão resistente - f_{nG} . Os parâmetros λ_G , f_y e f_{crG} são, respectivamente, a esbelteza global, a tensão de escoamento do aço e a tensão crítica referida ao modo de flambagem global.



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

$$f_{nG} = \chi f_y \quad \text{sendo } \chi = \begin{cases} (0.658\lambda_G^2) & \text{se } \lambda_G \leq 1.50 \\ \left(\frac{0.877}{\lambda_G^2}\right) & \text{se } \lambda_G > 1.50 \end{cases} \quad \text{e } \lambda_G = \sqrt{\frac{f_y}{f_{crG}}} \quad (1)$$

Para o caso do modo de flambagem distorcional, o dimensionamento é descrito pela Eq. (2) - f_{nD} . Sendo λ_D , f_y e f_{crD} , respectivamente, a esbeltez distorcional, a tensão de escoamento do aço e a tensão crítica segundo o modo de flambagem distorcional.

$$f_{nD} = \begin{cases} f_y & \text{se } \lambda_D \leq 0,561 \\ \left(1 - \frac{0,25}{\lambda_D^{1,20}}\right) \frac{f_y}{\lambda_D^{1,20}} & \text{se } \lambda_D > 0,561 \end{cases} \quad \text{sendo } \lambda_D = \sqrt{\frac{f_y}{f_{crD}}} \quad (2)$$

Por fim, a norma considera a possibilidade da interação local-global através da Eq. (3). Para esse caso, o cálculo da esbeltez λ_{LG} considera o valor de f_{nG} - Eq. (1) e a tensão crítica no modo de flambagem local f_{crL} . Ressalta-se que a consideração do modo local puro está implícita nessa mesma equação.

$$f_{nLG} = \begin{cases} f_{nG} & \text{se } \lambda_{LG} \leq 0,776 \\ \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_{LG}^{0,8}}\right) \frac{f_{nG}}{\lambda_{LG}^{0,8}} & \text{se } \lambda_{LG} > 0,776 \end{cases} \quad \text{sendo } \lambda_{LG} = \sqrt{\frac{f_{nG}}{f_{crL}}} \quad (3)$$

Observa-se o fato de que no presente artigo, as tensões dos perfis serão representadas por f , sendo obtidas através da relação entre a carga aplicada P e a área da seção transversal do perfil A (P/A).

Interação local-distorcional (LD)

Para a interação LD, a NBR 14762 (ABNT, 2010) não apresenta formulação de dimensionamento específica para esse caso. Sendo assim, no gráfico da Figura 4, é possível observar o impacto dessa ausência em barras comprimidas axialmente através dos resultados de 332 colunas numéricas biengastadas (utilizando o método dos elementos finitos) de seções do tipo U enrijecido. Destaca-se que dentre as colunas analisadas, 275 foram geradas por MATSUBARA *et al.* (2019) e 57 colunas numéricas foram geradas adicionalmente pelos autores do presente artigo para complementação das análises.

O eixo das ordenadas do gráfico da Figura 4 representa a relação entre tensões últimas numéricas f_{num} e tensões últimas estimadas segundo os procedimentos da norma NBR 14762 (Eqs 1 a 3), $f_n = \text{menor } \{f_{nG}; f_{nD}; f_{nLG}\}$. No eixo das abscissas é apresentada a variação do parâmetro $R_{LDL} = \lambda_D/\lambda_L$, representada pela relação entre esbeltez distorcional $\lambda_D = (f_y/f_{crD})^{1/2}$ e esbeltez local $\lambda_L = (f_y/f_{crL})^{1/2}$. Adicionalmente, o parâmetro $\lambda_{maxLD} = \text{máximo } \{\lambda_L, \lambda_D\}$ representa a esbeltez predominante no comportamento. As colunas numéricas foram geradas considerando o aço apresentando módulo de elasticidade $E = 210$ GPa e coeficiente de Poisson $\nu = 0,30$. Além disso, os perfis foram simulados com elementos de casca (SHELL181), com a aplicação da compressão feita através de duas forças concentradas no centro de gravidade de ambas as extremidades dos perfis. Para reproduzir numericamente a condição biengastada dos ensaios experimentais utilizados no presente trabalho, acoplou-se duas placas rígidas de 25 mm nas duas extremidades. Detalhes adicionais sobre os modelos numéricos podem ser obtidos em MATSUBARA *et al.* (2019).



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

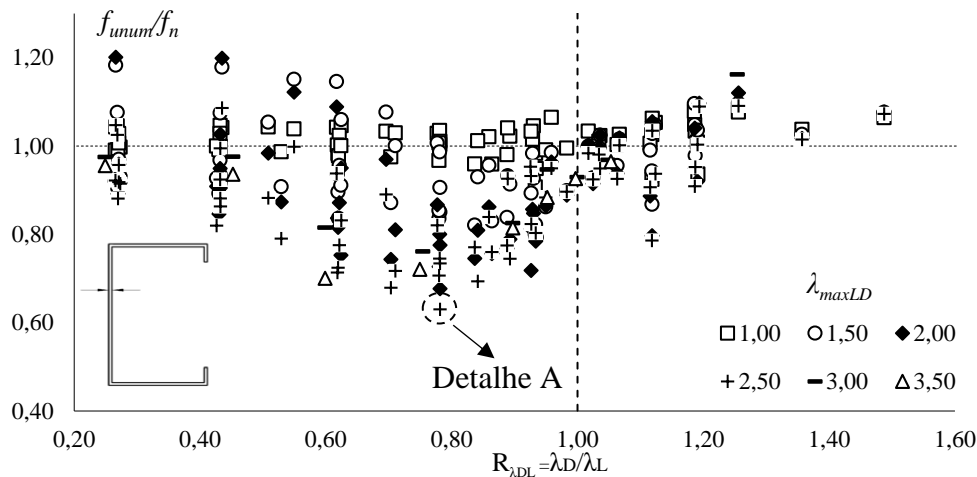


Figura 4 – Comparação entre resultados obtidos pelo método dos elementos finitos f_{unum} e pelas prescrições da NBR 14762 f_n , em função do parâmetro de esbeltezas $R_{\lambda_{DL}}$, para perfis U enrijecidos na compressão axial.

Analisando o gráfico da Figura 4, é possível notar que as formulações apresentadas pela NBR 14762 (ABNT, 2010) não conseguem lidar com esse tipo de interação conforme $R_{\lambda_{DL}}$ se aproxima de 0,80. A diferença entre resistência numérica f_u e a resistência estimada segundo a NBR 14762 (ABNT, 2010) f_n pode chegar a valores próximos de 37% para colunas com valores de λ_{maxLD} elevados ($\lambda_{maxLD} \approx 2,50$), como apontado pelo detalhe A (círculo pontilhado). Observa-se, ainda, que a inclusão do parâmetro $R_{\lambda_{DL}}$ nos cálculos de dimensionamento se mostra bastante muito útil para mapear os casos não abrangidos pelas equações normativas.

A coluna indicada no detalhe A pode ser melhor analisada no gráfico da Figura 5, que apresenta o resultado da análise pelo MEF, utilização do programa comercial ANSYS (SAS, 2009), para uma coluna com seção U enrijecido 204x193x41x5,20 (mm) e comprimento $L = 2300$ mm. O aço foi considerado com $f_y = 3540$ MPa, $E = 210$ GPa e $\nu = 0,3$. No eixo das ordenadas é apresentada a relação entre o carregamento de compressão axial aplicado P , expresso de forma paramétrica $f_{apl} = P_{num}/A$ (relação entre aplicação de carga numérica P_{num} e área do perfil A), e a tensão de escoamento f_y . No eixo das abscissas está apresentada a relação entre deslocamento axial d_{axial} e a espessura t da chapa de aço.

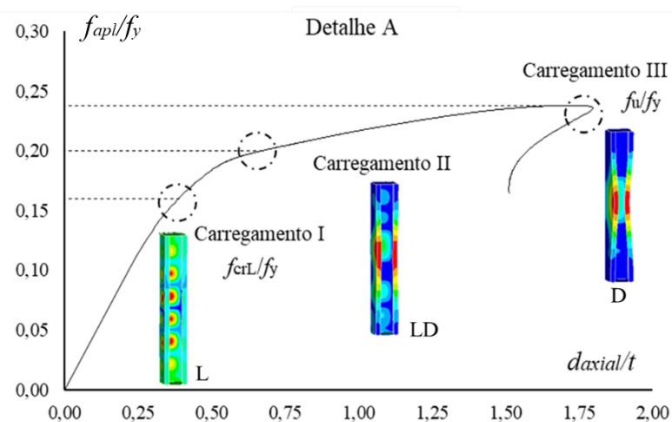


Figura 5 - Relação f_{apl}/f_y vs d_{axial}/t .

De forma complementar, quando analisa-se colunas testadas experimentalmente, notamos um comportamento muito similar ao observado no estudo numérico, como pode ser verificado na Figura 6. É possível observar que, de forma análoga às colunas numéricas, para valores de $R_{\lambda DL} \approx 0,80$, existe uma diferença da ordem de 39% entre a tensão última obtida experimentalmente $f_{uexp} = P_{uexp}/A$ (relação entre aplicação de carga experimental P_{exp} e área do perfil A) e a tensão última estimada segundo a NBR 14762 (ABNT, 2010) dada por $f_n = \text{menor} \{f_{nG}; f_{nD}; f_{nLG}\}$.

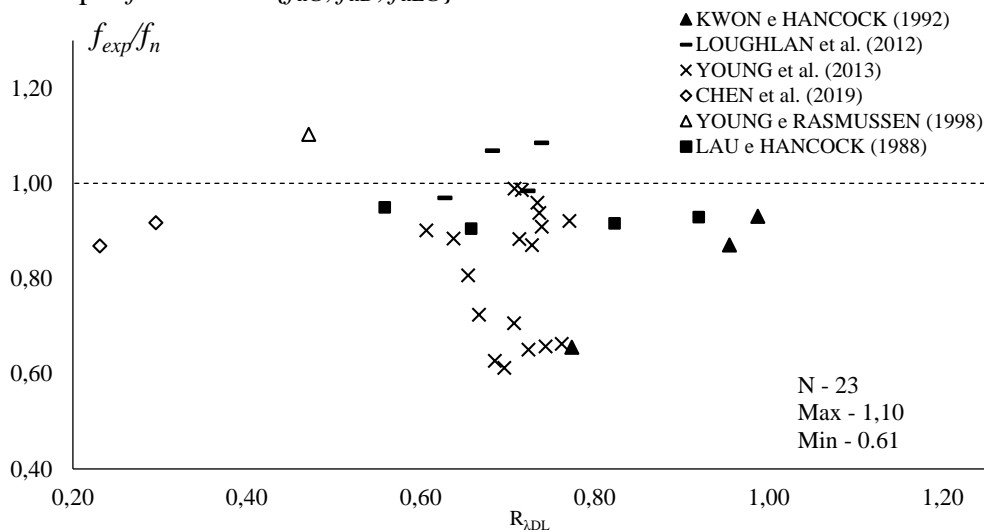


Figura 6 - Comparação entre resultados obtidos de ensaios experimentais $f_{uexp} = P_{uexp}/A$ e pelas prescrições da NBR 14762 f_n , em função do parâmetro de esbeltezas $R_{\lambda DL}$, para perfis U enrijecidos na compressão axial.

Sendo assim, com intuito de propor uma solução para lidar com a interação LD em perfis de aço formados a frio sob compressão axial, é apresentada a Eq. (4). Essa equação foi obtida pela interpolação dos resultados obtidos para as colunas numéricas apresentadas na Figura 4. O coeficiente de correção S_n adapta a Eq. (4) para dimensionar diferentes seções transversais, sendo igual a 1 para perfis do tipo U enrijecido.

$$f_{nLD} = \left(1 - \frac{A}{\lambda_{maxLD}^B}\right) \frac{S_n f_y}{\lambda_{maxLD}} \quad \text{com } \lambda_{maxLD} = \text{maior} \{\lambda_L, \lambda_D\} \text{ e } \frac{f_{nLD}}{f_y} \leq 1 \quad (4)$$

sendo

$$A = \begin{cases} 0,15 & R_{\lambda DL} < 0,80 \\ 0,40 R_{\lambda DL} - 0,17 & 0,80 \leq R_{\lambda DL} \leq 1,05 \\ 0,25 & R_{\lambda DL} > 1,05 \end{cases} \quad (4.1)$$

$$B = \begin{cases} 0,80 & R_{\lambda DL} < 0,45 \\ -2,26 R_{\lambda DL}^2 + 4,06 R_{\lambda DL} - 0,57 & 0,45 \leq R_{\lambda DL} \leq 1,05 \\ 1,20 & R_{\lambda DL} > 1,05 \end{cases} \quad (4.2)$$

De forma a embasar a validação da Eq. (4), foram testados os resultados pelo MEF, utilizando software comercial Abaqus (SIMULIA, 2011), para casos de colunas formadas por PFF de seção U enrijecido para o estudo da interação LD, desenvolvidos por SILVESTRE *et al.* (2012), DINIS e CAMOTIM (2015) e MARTINS *et al.* (2015). O resultado dessa análise está apresentado na Figura 7, sendo possível observar que para 593 colunas modeladas pelo MEF, a média e desvio padrão da relação entre tensão última numérica f_{num} (relação entre carga última numérica aplicada P_{num} e área do perfil A) e a Eq. (4) - f_{nLD} resultaram em 1,02 e 0,08, respectivamente.



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

A análise destes resultados com base nos procedimentos da NBR 14762 para a definição do coeficiente de ponderação da resistência (item 11, Dimensionamento com base em ensaios), conduz a $\gamma = 1,12$. O valor proposto na norma brasileira, $\gamma = 1,20$ para barras sob compressão axial, atende, portanto, os critérios de segurança estrutural para a interação entre modos de flambagem LD.

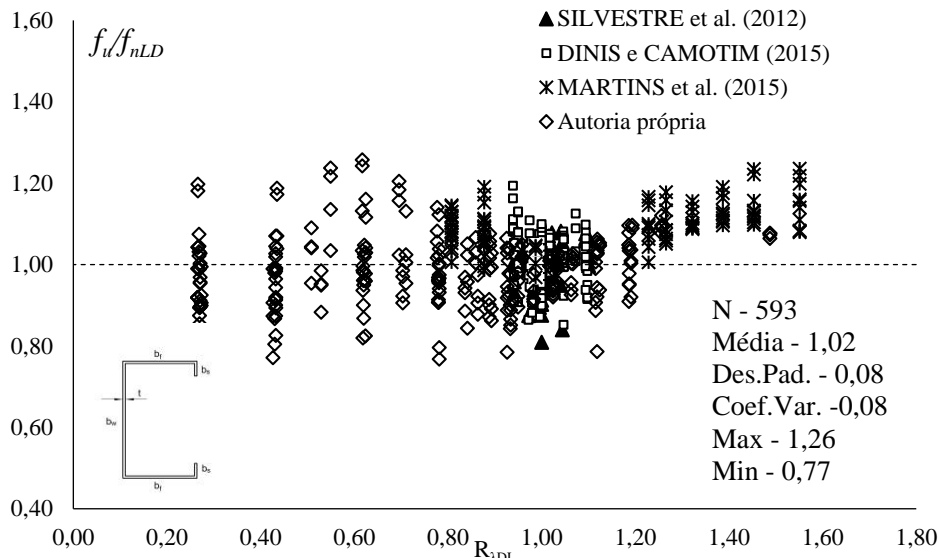


Figura 7 – Comparação entre resultados obtidos pelo método dos elementos finitos f_u e pela proposta Eq. (4) - f_{nLD} , em função do parâmetro de esbeltezas $R_{\lambda DL}$, para perfis U enrijecidos na compressão axial.

A validação da Eq. (4) para colunas experimentais do tipo U enrijecido está apresentada na Figura 8. A média e o desvio padrão da relação entre as tensões últimas experimentais f_{exp} e tensões estimadas por f_{nLD} - Eq. (4), resultaram em 0,94 e 0,09, respectivamente. O coeficiente de ponderação da resistência para o conjunto de resultados experimentais é $\gamma = 1,14$, atendendo os critérios de segurança estrutural adotados pela NBR 14762 ($\gamma = 1,20$).

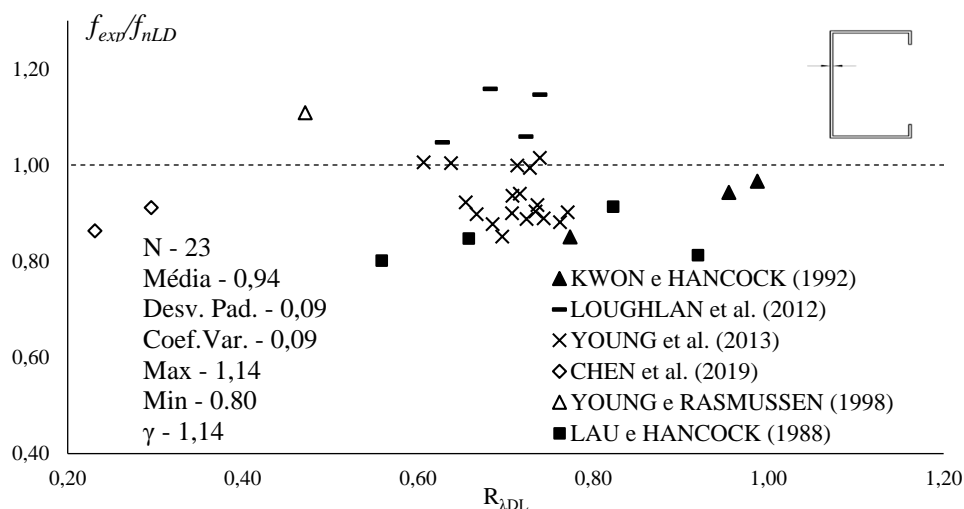


Figura 8 - Comparação entre resultados obtidos de ensaios experimentais $f_{uexp} = P_{uexp}/A$ e pela proposta Eq. (4) f_{nLD} , em função do parâmetro de esbeltezas $R_{\lambda DL}$, para perfis U enrijecidos na compressão axial (MATSUBARA e BATISTA, 2020).







XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

Para colunas de seções do tipo Cartola, Rack, e Z enrijecido, foram calibrados distintos valores de S_n com base em resultados numéricos (MEF) obtidos por MARTINS et al. (2015), DINIS e CAMOTIM (2015) e CAMPOS (2020). Os intervalos dos parâmetros geométricos das seções, julgados válidos para a presente proposta, estão resumidos na Tabela 1, enquanto os valores de S_n interpolados para cada tipo de seção estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 1 – Intervalo dos parâmetros geométricos válidos, para aplicação da proposta de dimensionamento estrutural de PFF na compressão axial (Eq. 4), sujeitos à interação LD de modos de flambagem.

Seção	Parâmetros geométricos			
	b_f/b_w	b_s/b_w	b_l/b_w	$R_{\lambda DL}$
Cartola (Hat)	0,50 - 1,00	0,05 - 0,10	-	0,65-1,55
Z (Zed)	0,50 - 1,00	0,05 - 0,15	-	0,65-1,55
Rack	0,50 - 1,00	0,05 - 0,20	0,05 - 0,25	0,29-1,44

Tabela 2 – Coeficiente de correção S_n ajustado para cada tipo de seção.

Seção	S_n
U enrijecido 	$S_n = 1$
Cartola (Hat) 	$R_{\lambda DL} < 0,45 \quad S_n = 1$ $0,45 \leq R_{\lambda DL} \leq 1,05$ $S_n = -0,98 R_{\lambda DL}^2 + 1,47 R_{\lambda DL} + 0,54$ $R_{\lambda DL} > 1,05 \quad S_n = 1$
Z enrijecido 	$R_{\lambda DL} < 0,45 \quad S_n = 1$ $0,45 \leq R_{\lambda DL} \leq 1,00$ $S_n = -1,34 R_{\lambda DL}^2 + 1,95 R_{\lambda DL} + 0,39$ $R_{\lambda DL} > 1,00 \quad S_n = 1$
Rack 	$R_{\lambda DL} < 0,45 \quad S_n = 1$ $0,45 \leq R_{\lambda DL} \leq 0,95$ $S_n = -1,12 R_{\lambda DL}^2 + 1,57 R_{\lambda DL} + 0,52$ $R_{\lambda DL} > 0,95 \quad S_n = 1$

A validação da Eq. (4) - f_{nLD} , para seções do tipo Cartola, Z enrijecido e Rack utilizando os valores calibrados de S_n (Tabela 2) está apresentada na Tabela 3. Estes resultados indicam que a Eq. (4) conduz a estimativas acuradas da resistência estrutural de barras de PFF sob compressão axial, para diferentes tipos de seções transversais, sujeitas a interação LD.



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

Tabela 3– Resultados da relação entre a resistência numérica e segundo a Eq. (4), f_{unum} / f_{nLD} , para diferentes tipos de seção de PFF.

Seção	f_{unum}/f_{nLD}		
	Cartola	Rack	Z
nº colunas	531	615	554
Média	1,01	1,02	1,02
Desv.Pad.	0,06	0,09	0,07
Coef.Var.	0,06	0,09	0,07
Mín-Máx	0,86-1,23	0,83-1,28	0,85-1,27
γ	1,11	1,13	1,11

Interação distorcional-global (DG)

Inicialmente, apresentamos a proposta de SCHAFFER (2002) para lidar com a interação DG, conforme descrito pela Eq. (5) - f_{nDG} . O valor de f_{nG} é calculado segundo a Eq. (1) e $f_{crD} = P_{crD}/A$ corresponde à carga crítica distorcional.

$$f_{nDG} = \begin{cases} f_{nG} & \text{se } \lambda_{DG} \leq 0,561 \\ \left(1 - \frac{0,25}{\lambda_{DG}^{1,2}}\right) \frac{f_{nG}}{\lambda_{DG}^{1,2}} & \text{se } \lambda_{DG} > 0,561 \end{cases} \quad \text{sendo } \lambda_{DG} = \sqrt{\frac{f_{nG}}{f_{crD}}} \quad (5)$$

Segundo estudos de MARTINS *et al.* (2018) e LAZZARI e BATISTA (2020), a Eq. (5) - f_{nDG} dimensiona colunas de aço do tipo U enrijecido de forma bastante conservadora. Desse modo, propõem a utilização da Eq. (1) - f_{nG} para colunas para o caso de $\lambda_G \leq 2,00$. Em contrapartida, essa alternativa apresenta resultados bastante conservadores para valores de $\lambda_G > 2,00$, como pode ser observado na Figura 9 (a).

Adicionalmente, MARTINS *et al.* (2018) analisaram a interação DG em perfis do tipo Z, sendo constatando que, para esse caso, a Eq. (1) - f_{nG} apresenta resultados contra segurança estrutural. Em razão disso, sugerem de forma conservadora a utilização da Eq. (5) - f_{nDG} , como mostrado na Figura 9 (b).

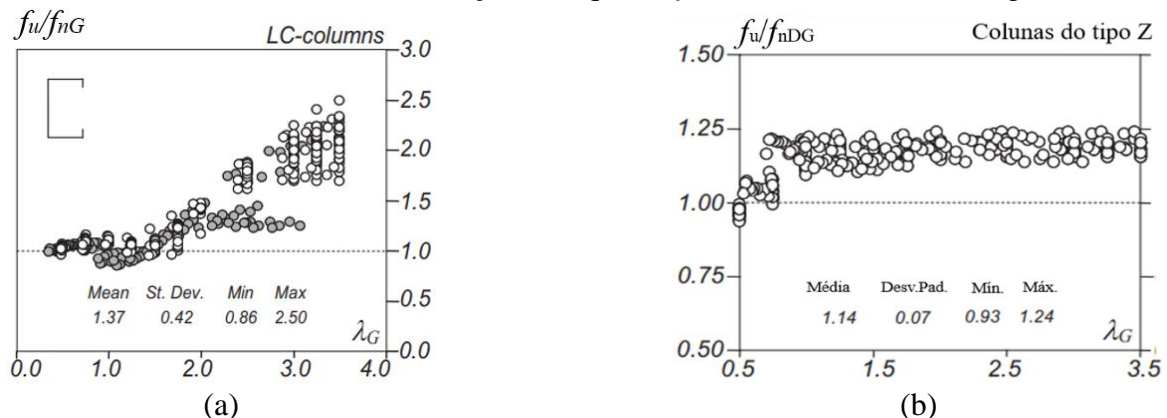


Figura 9– Relação entre: (a) carga última numérica f_{unum} e f_{nG} - Eq.(1) vs λ_G para perfis do tipo U enrijecido e (b) carga última numérica f_{unum} e f_{nDG} - Eq. (5) vs λ_G para perfis do tipo Z enrijecido (Adaptado de MARTINS *et al.*, 2018).

Interação local-distorcional-global (LDG)

DINIS *et al.* (2018) estudaram a interação LDG e propuseram a utilização da Eq. (3) - f_{nLG} para dimensionamento de colunas de aço formadas a frio do tipo U enrijecido. Sendo assim, concluíram que a Eq. (3) - f_{nLG} estima de maneira satisfatória colunas limitadas a $\lambda_G \leq 1,50$. No entanto, para colunas com $\lambda_G > 1,50$, resultados bastante conservadores são obtidos. Essas conclusões foram baseadas em colunas numéricas e experimentais exibidas na Figura 10.



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS

7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

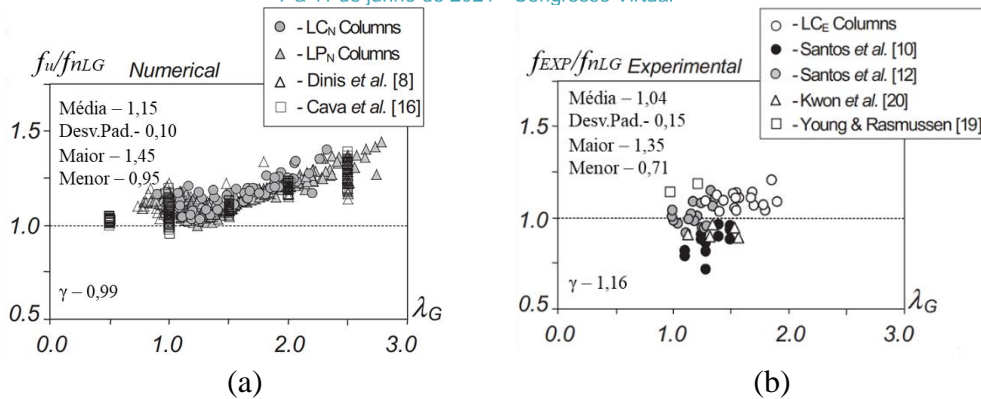


Figura 10 - Verificação da Eq. (3) – f_{nLG} para: (a) colunas numéricas e (b) colunas experimentais (Adaptado de DINIS *et al.*, 2018).

Ainda que os coeficientes de ponderação da resistência γ calculados para colunas experimentais e numéricas resultem em valores abaixo de 1,20, atendendo aos critérios de segurança estrutural adotados pela NBR 14762 (ABNT, 2010), essa solução resulta em uma solução pouco econômica, sendo recomendado estudos adicionais visando encontrar uma melhor solução.

Conclusões

Com base nos resultados apresentados sobre a interação LD, é possível concluir que a Eq. (4) - f_{nLD} proposta pelos autores se mostrou eficaz para dimensionar barras compridas de PFF do tipo U enrijecido, cartola, Z enrijecido e Rack. Dessa maneira, recomenda-se a implementação dessa equação na NBR 14762, em substituição à Eq. (2) - f_{nD} . Essa implementação aprimora significativamente a segurança estrutural, resultando em uma solução de aplicação simples e prática para o projeto estrutural.

Para os casos de interação que envolvem o modo global, DG e LDG, em PFF do tipo U enrijecido sob compressão axial, os estudos revelaram que as equações disponíveis na norma brasileira NBR 14762 conduzem a resultados conservadores para casos de esbeltez relativa $\lambda_G > 1,50$. Estudos adicionais são recomendados, para aprimorar esses procedimentos de dimensionamento.

Quando se analisa colunas de aço do tipo Z enrijecido sujeitas a interação DG, as equações normativas existentes resultam em soluções contra a segurança estrutural. Portanto, para esses casos, MARTINS *et al.* (2018) sugerem, de forma conservadora, a utilização a Eq. (5) - f_{nDG} . Estima-se, no entanto, que soluções mais refinadas possam conduzir a resultados mais acurados, garantida a simplicidade das soluções propostas.

Por fim, os autores do presente artigo seguem desenvolvendo pesquisas com a finalidade de obter soluções econômicas e seguras para os casos de interação entre modos de flambagem, que envolvam o modo global – LG, DG e LDG.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14762: Dimensionamento de Estruturas de Aço constituídas por Perfis Formado a Frio. Rio de Janeiro, Brasil, 2010.
- BATISTA, E. M.; MATSUBARA, G. Y.; FRANCO, J. M. S. Local-distortional buckling interaction of cold-formed steel columns design approach. In: Stability and Ductility of Steel Structures, Praga, v. Único, p. 164-171, 2019.
- CAMPOS, R. G. A. Análise da interação entre os modos de flambagem local e distorcional em perfis de aço formados a frio com seção rack sob compressão axial. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2020.
- CHEN, J.; CHEN, M; YOUNG, B. Compression Tests of Cold-Formed Steel C- and Z-Sections with Different Stiffeners. Journal of Structural Engineering, v. 145 (5), p. 1-10, 2019.
- DINIS, P.B.; CAMOTIM, D. Cold-formed steel columns undergoing local-distortional coupling: Behaviour and direct strength prediction against interactive failure. Thin-Walled Structures, v. 101, p. 181-204, 2015.



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

- DINIS, P. B.; CAMOTIM, D.; YOUNG, B.; BATISTA, E. M. CFS lipped channel columns affected by L-D-G interaction. Part II: Numerical simulation and design considerations. *Computers and Structures*, v. 207, Setembro, p. 200-218, 2018.
- GYPSTEEL: Steel Frame, construção a seco, eficiente, c2019. Disponível em: < <http://www.gypsteel.com.br/>>. Acesso em: 10 de fev. de 2021.
- KWON, Y. B.; HANCOCK, G. J. Tests of cold-formed channels with local and distortional buckling. *Journal of Structural Engineering*, v. 118, p. 1786–1803, 1992.
- LAU, S. C. W.; HANCOCK, G. J. Distortional buckling tests of cold-formed channel sections. In: Ninth International Specialty Conference on Cold-formed Steel Structures, St. Louis, Missouri, U.S.A, November 8-9, pp. 45-73, 1988.
- LAZZARI, J. A.; BATISTA, E. M. Distortional-Global Buckling Interaction Relevance in Cold-Formed Steel Lipped Channel Columns. *Latin American Journal of Solids and Structures*, v. 19, n.9, p. 1-29, 2020.
- LOUGHLAN, J.; YIDRIS, N.; JONES, K. The failure of thin-walled lipped channel compression members due to coupled local-distortional interactions and material yielding. *Thin-Walled Structures*, v. 61, p. 14–21, 2012.
- MARKO: sistemas metálicos, 2014?. Disponível em: < <http://www.marko.com.br/segmentos/hipermercados/>>. Acesso em: 10 de fev. de 2021.
- MARTINS, A. D.; CAMOTIM, D.; DINIS, P.B. On the direct strength design of cold-formed steel columns failing in local-distortional interactive modes. *Thin-Walled Structures*, v. 120, n. March, p. 432–445, 2017.
- MARTINS, A.D.; CAMOTIM, D.; DINIS, P. B. On the distortional-global interaction in cold-formed steel columns: Relevance, post-buckling behaviour, strength and DSM design. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 145, p. 449-470, 2018.
- MARTINS, A. D.; DINIS, P.B; CAMOTIM, D.; PROVIDÊNCIA, P. On the relevance of local-distortional interaction effects in the behaviour and design of cold-formed steel columns. *Computers and Structures*, v. 160, p. 57–89, 2015.
- MATSUBARA, G. Y.; BATISTA, E.M. Lipped Channel, Hat, Zed and Rack Cold-Formed Steel Columns Under Local-Distortional Buckling Interaction. In: XLI Ibero-Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, pp. 1-7, 2020.
- MATSUBARA, G.Y.; BATISTA, E.M.; SALLES, G.C. Lipped Channel cold-formed steel columns under local-distortional buckling mode interaction. *Thin-Walled Structures*, v. 137, p. 251-270, 2019.
- SALLES, G. C.; BATISTA, E.M.; MATSUBARA, G. Y. Evidências experimentais da interação entre modos de flambagem local e distorcional em perfis de aço formado a frio sob compressão axial. In: Oitavo Congresso Latino Americano de Construção Metálica, pp. 359-373, 2019.
- SANTOS, E. S., BATISTA, E. M.; CAMOTIM, D. Cold-formed steel columns under L-D-G interaction. *Steel Construction*, v. 7, n. 3, p. 193-198, 2014.
- SAS. Theory Reference for the Mechanical APDL and Mechanical Applications, 2009.
- SCHAFFER, B. W. Local, Distortional, and Euler Buckling of Thin-Walled Columns *Journal of Structural Engineering*, 2002.
- SILVESTRE, N.; CAMOTIM, D.; DINIS, P. B. Post-buckling behaviour and direct strength design of lipped channel columns experiencing local/distortional interaction. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 73, p. 12–30, 2012.
- SIMULIA. Theory Reference Abaqus 6.11, 2011.
- YOUNG, B.; DINIS, P. B.; CAMOTIM, D. CFS lipped channel columns affected by L-D-G interaction. Part I: Experimental investigation. *Computers and Structures*, v. 207, Setembro, p. 219-232, 2018.
- YOUNG, B.; RASMUSSEN, J. R. Design of Lipped Channel Columns. *Journal of Structural Engineering*, v. 124, p. 140-148, 1998.
- YOUNG, B.; SILVESTRE, N.; CAMOTIM, D. Cold-Formed Steel Lipped Channel Columns Influenced by Local-Distortional Interaction: Strength and DSM Design. *Journal of Structural Engineering*, v. 139, p. 1059–1074, 2013.