

Dimensionamento via Método da Resistência Direta de Colunas de Aço Formadas a Frio com Seção em U

Elisa L. Cerqueira¹, Alexandre Landesmann¹

¹ Programa de Eng^a Civil, PEC/COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil

Rua Moniz Aragão N° 360, Bloco I, Ilha do Fundão – Cidade Universitária. 21941-972. Rio de Janeiro/RJ, Brasil

elisa.cerqueira@coc.ufRJ.br, alandes@coc.ufRJ.br

Resumo. Recentemente, Dinis *et al.* [1] demonstraram que as curvas propostas por eles baseadas no Método da Resistência Direta (MRD) subestimam a resistência de colunas de aço em perfil formado a frio sob interação global-global (flexão e flexo-torção). O objetivo deste trabalho é estender o escopo do estudo anterior, considerando-se geometrias adicionais, cuidadosamente selecionadas em seção-transversal U (simples), para o desenvolvimento de análises numérica-computacionais de colunas (engastadas) com diferentes níveis de proximidade entre as tensões de flambagem da coluna f_{cr} e $f_{b,Fm}$ (R_G). Os resultados apresentados e discutidos consistem em forças críticas e respectivos modos de flambagem, trajetórias de equilíbrio e resistências últimas (modos de colapso), obtidos via MEF, com auxílio do código comercial ANSYS [2], segundo análises não-lineares com elementos de casca. As colunas analisadas exibem (i) seções transversais e comprimentos que garantem esbeltezes altas e moderadas, (ii) diferentes tensões de escoamento (para cobrir uma ampla faixa de esbeltez) e (iii) sob falha flexo-torcional. O trabalho explora o comportamento pós-crítico das colunas selecionadas e as forças últimas compiladas que, juntamente com anteriormente reportadas, são usadas para avaliar as atuais curvas propostas por Dinis *et al.* [1].

Palavras-chave: Perfis metálicos formados a frio, Análise via MEF, interação global-global.

1 Introdução

Os perfis formados a frio (PFF) estruturais em aço carbono oferecem variadas soluções de projeto, alta eficiência estrutural (relação resistência/peso) e custos de produção e montagem geralmente mais baixos. Entretanto, os mesmos tornam-se, frequentemente, propensos a vários fenômenos de instabilidade, como flambagem global – Fig. 1 (a) – (c) – e local – Fig.1 (d) – devendo ser adequadamente incorporados nas especificações normativas de estimativa de resistência de PFF.

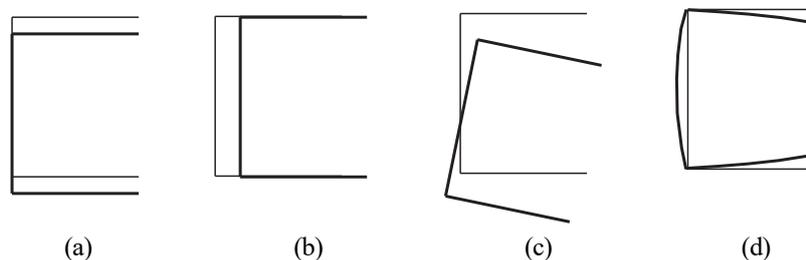


Figura 1- Modos de flambagem de seção U: (a) flexão na maior inércia, (b) flexão na menor inércia, (c) flexo-torção e (d) local

Com o objetivo de melhorar a eficiência do dimensionamento de PFF, foi desenvolvido por Schafer & Peköz [3] o Método da Resistência Direta (MRD), baseado na ideia original proposta por Hancock *et al.* [4], sendo amplamente utilizado por diversos pesquisadores e especificações de dimensionamento, como é o caso das normas americana (AISI – S100 [5]), australiana (AS/NZS 4600 [6]) e brasileira (ABNT NBR 14762:2010 [7]) sendo capaz de lidar com falhas locais, distorcionais, globais e interativas locais-globais. No contexto desta investigação, a força nominal relevante é a global (P_{nG}), que é dada por:

$$P_{nG} = \begin{cases} P_y \cdot (0.658^{\lambda_g^2}) & \text{para } \lambda_g \leq 1.5 \\ P_y \cdot \left(\frac{0.877}{\lambda_g^2}\right) & \text{para } \lambda_g > 1.5 \end{cases} \quad \text{onde,} \quad \lambda_g = \sqrt{\frac{P_y}{P_{crG}}} \quad (1)$$

onde $P_y = A \cdot f_y$ é a força escoamento do aço (A é a área da seção transversal e f_y é a tensão de escoamento do aço, respectivamente), P_{crG} é a carga crítica de flambagem global e λ_g corresponde a esbelteza global da coluna. Essa curva de projeto combina a curva exponencial de Johnson (Ziemian [8]) com a parte inferior da curva de Euler. Em sua pesquisa, Peköz & Sümer [9] mostraram que a mesma, codificada originalmente para colunas constituídas por perfis de aço laminados a quente e/ou soldados (com dupla simetria), comumente usados em edifícios (AISC 1986 [10]), fornecia estimativas melhores do que a curva empregada pela comunidade de PFF até então.

Recentemente, Dinis *et al.* [11][12] reportaram investigações numéricas destinadas a avaliar a precisão da atual curva de projeto da resistência global do MRD ao prever as resistências últimas de colunas em PFF, com um eixo de simetria, com extremidades engastadas que colapsam nos modos de flexo-torção (F_{MT}), ou flexão (F_m). Constatou-se que a atual curva subestima, de forma substancial, a resistência máxima de várias colunas em PFF com falha por F_{MT} na faixa de esbelteza alta e moderada e, portanto, leva a projetos imprecisos e não econômicos. Além disso, notou-se que a curva de projeto atual prediz com precisão as resistências últimas das colunas com colapso nos modos de F_m – havia apenas espaço para pequenas melhorias nas faixas de esbelteza baixa e intermediária – o que era esperado, considerando que essa curva foi desenvolvida para colunas de aço laminadas a quente, que normalmente exibem seções transversais duplamente simétricas, nas quais as falhas ocorrem por F_m . Na Figura 2 é possível observar uma curva de assinatura, que fornece a variação de P_{cr} em relação ao comprimento (L) de uma coluna U engastada e seus modos críticos de flambagem, com destaque para o modo F_{MT} , referente ao comprimento $L=200\text{cm}$.

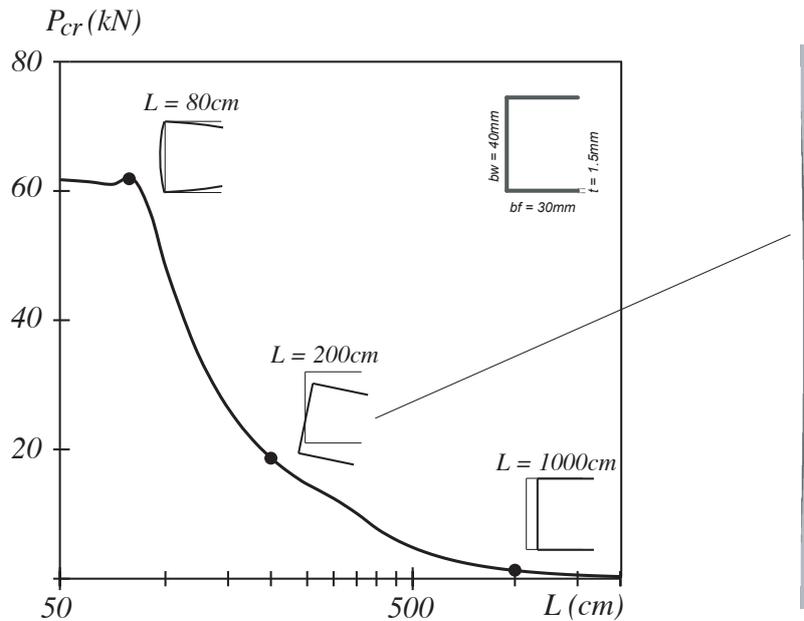


Figura 2 – Curva de assinatura P_{cr} vs. L com modos críticos de flambagem da coluna U

Além disso, Dinis *et al.* [1] relataram que, dependendo do comprimento da coluna e das condições de apoio, sua resistência última pode ser reduzida pela interação entre os dois primeiros modos de flambagem globais (F_{MT} e F_m – interação Global-Global). Naquela pesquisa, os referidos autores constataram que a atual curva do MRD para flambagem global não consegue prever adequadamente as resistências últimas das colunas U afetadas pela interação no modo G-G, refletindo uma qualidade de previsão muito baixa.

Diante das observações relatadas, Dinis *et al.* [1] buscaram melhorar as previsões de falha propondo um novo conjunto de curvas, baseado no MRD, dependentes de um parâmetro geométrico denominado β_{FT} e de R_G . O conjunto de curvas de resistência proposto, denominado aqui P_{nFT-G} , é definido pelas expressões:

$$P_{nFT-G} = \begin{cases} P_y \cdot (0.658^{\lambda_{FT}^2}) & \text{para } \lambda_{FT} \leq 1.5 \\ P_y \cdot \left(\frac{a}{\lambda_{FT}^b}\right) & \text{para } \lambda_{FT} > 1.5 \end{cases} \quad \text{sendo,} \quad \lambda_{FT} = \sqrt{\frac{P_y}{P_{crFT}}} \quad (2)$$

onde os parâmetros a , b e c são dados por:

$$a = 0.39 \times 1.5^b \quad b = 0.06 \beta_{FT} + c \leq 2.0 \quad c = -19.5 R_G^3 + 73.6 R_G^2 - 94.1 R_G + 42 \geq 0.71 \quad (3)$$

sendo, β_{FT} e R_G dados por:

$$\beta_{FT} = \frac{I_I + I_w/A}{I_{II}} \quad R_G = \frac{P_{b.Fm}}{P_{cr.FT}} \quad (4)$$

Tendo em vista a qualidade das descobertas mencionadas, estende-se o escopo do estudo de Dinis *et al.* [1] com o objetivo de avaliar as atuais curvas propostas por estes autores. Para tal, serão consideradas geometrias adicionais, cuidadosamente selecionadas em seção-transversal U (simples) para o desenvolvimento, como parte preliminar de uma campanha experimental em andamento no LABEST da COPPE/UFRJ, de análises numérica-computacionais de colunas (engastadas) sob modo de colapso F_{MT} e com diferentes níveis de proximidade entre as tensões de flambagem da coluna f_{cr} e $f_{b.Fm}$ (R_G). Para este trabalho, serão analisadas apenas colunas com valores de R_G acima de 1.5, ou seja, com carga crítica de flambagem claramente flexo-torcional e consideravelmente distante dos valores críticos de bifurcação flexional, não apresentando interação Global-Global.

2 Seleção de Colunas

A primeira etapa do trabalho consiste em escolher cuidadosamente as dimensões e comprimentos das seções transversais a serem analisadas. As colunas metálicas em PFF estão sujeitas a compressão centrada, e a condição de apoio utilizada é de engaste (impedindo totalmente as rotações e o empenamento), tendo como propriedades do aço $E = 210 \text{ GPa}$ e $\nu = 0.3$. Busca-se identificar geometrias de colunas U associadas a vários níveis de proximidade entre as tensões de flambagem da coluna f_{cr} e $f_{b.Fm}$. O processo de seleção das geometrias das colunas envolveu análises numéricas de flambagem com auxílio do programa GBTul [13] – que permite a decomposição modal possibilitando a obtenção das cargas críticas relacionadas ao modo F_{MT} .

Como resultado da análise descrita anteriormente, tem-se 23 colunas U – cujas dimensões da seção transversal e comprimentos são dados na Tabela 1 – cujas relações entre as cargas de flambagem $f_{b.Fm}/f_{cr}$ (R_G) variam entre 1.55 e 3.97. Esta tabela também fornece a área das colunas (A), os momentos no eixo de maior inércia (I_I) e menor inércia (I_{II}), constantes de empenamento (C_w) e valores do parâmetro β_{FT} – calculados com base das dimensões da linha média da seção transversal.

Tabela 1. Seleção das geometrias das colunas U: b_w , b_f , t , A , I_I , I_{II} , C_w , β_{FT} , L , $P_{cr.FT}$, $P_{b.Fm}$ e R_G .

Coluna	b_w (cm)	b_f (cm)	t (cm)	A (cm ²)	I_I (cm ⁴)	I_{II} (cm ⁴)	C_w (cm ⁶)	β_{FT}	L (cm)	$P_{cr.FT}$ (kN)	$P_{b.Fm}$ (kN)	R_G	
U1	4.0	3.0	0.065	0.64	1.82	0.62	1.69	7.17	L1	215	4.22	11.15	2.64
									L2	245	3.42	8.59	2.51
									L3	275	2.87	6.82	2.37
U2	4.0	2.5	0.065	0.58	1.57	0.38	1.03	8.84	L1	180	5.02	9.71	1.93
									L2	215	3.80	6.81	1.79
									L3	245	3.14	5.24	1.67
									L4	275	2.68	4.16	1.55
U3	3.5	3.5	0.065	0.67	1.55	0.90	1.90	4.85	L1	215	3.56	6.81	1.91
									L2	245	2.89	5.24	1.82
									L3	275	2.41	4.16	1.72
U4	3.5	3.0	0.065	0.61	1.36	0.59	1.24	5.71	L1	180	4.45	15.22	3.42
									L2	215	3.34	10.67	3.19
									L3	245	2.74	8.21	3.00
									L4	275	2.32	6.52	2.81
U5	3.0	3.0	0.065	0.58	0.97	0.56	0.87	4.39	L1	180	3.34	14.44	4.32
									L2	215	2.55	10.12	3.97
									L3	245	2.12	7.79	3.68
									L4	275	1.82	6.19	3.40
U6	3.0	2.5	0.065	0.51	0.83	0.34	0.53	5.38	L1	180	3.15	8.83	2.80
									L2	215	2.46	6.19	2.51
									L3	245	2.09	4.76	2.28
U7	2.5	2.5	0.065	0.48	0.55	0.32	0.34	3.93	L1	180	2.34	8.30	3.54
									L2	215	1.87	5.81	3.11

3 Modelo Numérico

A trajetória de equilíbrio de pós-flambagem global e os valores referentes à resistência última das colunas selecionadas foram obtidas através de um modelo de análise não linear de elementos finitos, com emprego de elementos de casca, realizado no software ANSYS [2]. As colunas foram discretizadas utilizando o elemento SHELL181, adequado para analisar estruturas de parede fina, que possui quatro nós e seis graus de liberdade por nó, utilizando integração completa. Foi utilizada uma malha com refinamento de 5mmx20mm, característica que fornece resultados precisos com um esforço computacional razoável. As análises foram realizadas pelo Método de Newton-Raphson, com uma estratégia de controle de comprimento de arco.

No modelo, as condições de contorno – coluna engastada – se deram através da fixação de chapas rígidas, mais espessas que as faces dos perfis, nas extremidades das colunas. Restringiram-se os deslocamentos nos eixos de maior e menor inércia (x e y), assim como o empenamento. A aplicação da força foi feita em pequenos incrementos, aproveitando as vantagens do procedimento automático de “load stepping” do ANSYS [2]. Todas as resistências últimas obtidas neste trabalho consideram colunas com imperfeições geométricas iniciais de amplitude máxima de $L/1000$ para o modo crítico global (F_{MT}). Este, por sua vez, é determinado por meio de análise preliminares de flambagem com o programa ANSYS, realizadas com a mesma malha adotada nas análises de pós-flambagem subsequentes. Não foram consideradas tensões residuais de fabricação e encruamento do aço pela formação a frio, os quais se cancelam (e.g., Ellobody & Young [14]).

4 Resistência Última de Colunas

Para abordar o MRD para o dimensionamento de colunas U neste trabalho, serão utilizadas as 23 geometrias apresentadas na Tabela 1, todas com modo de falha por F_{MT} , e com as seguintes tensões de escoamento: $f_y = 230$; 450; 600; 750 MPa, possibilitando uma ampla faixa de esbeltez, totalizando 90 colunas (e resistências últimas) diferentes – ver Tabela 2. A Fig. 3 apresenta as trajetórias de equilíbrio referentes à coluna U3_L1 – ver Tabela 1.

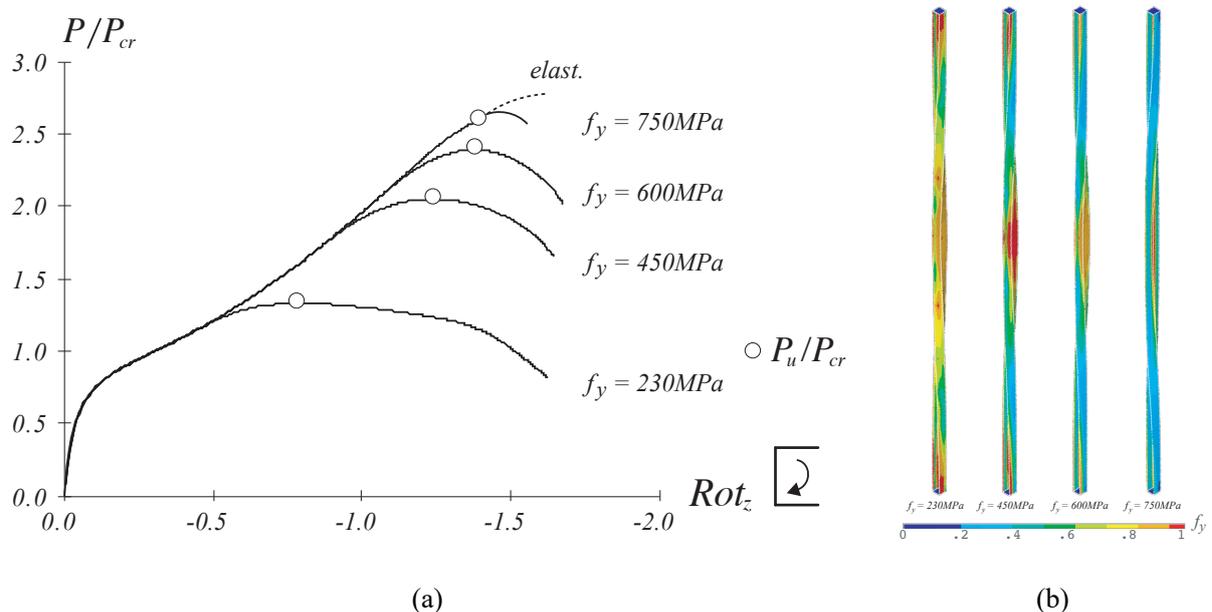


Figura 3 – (a) Trajetória de equilíbrio P/P_{cr} vs. Rot_z da coluna U3_L1 e (b) modos de colapso e contornos de tensão de von Mises

5 Considerações sobre o MRD

As Figuras 4(a)-(b) apresentam, respectivamente, os valores de P_u/P_{nG} e P_u/P_{nFT-G} , contra λ_{FT} , obtidos neste trabalho. Ambas as figuras incluem os valores da média associada de P_u/P_{nG} e P_u/P_{nFT-G} , desvio-padrão e valores máximo/mínimo obtidos. A observação dos dados levantados na Fig. 4 (a) permite concluir que, conforme previsto, a Eq. 1 é incapaz de prever adequadamente as resistências últimas das colunas U analisadas neste trabalho. Observa-se que a mesma subestima a resistência última das colunas com esbeltez superior a 1.5, levando à realização de projetos não econômicos. Isso pode ser percebido ao avaliarmos os indicadores de P_u/P_{nG} , nomeadamente a média (2.10) está muito acima daquela esperada (1.00).

Tabela 2 – Resistência última das colunas U analisadas neste trabalho e suas estimativas pelo MRD codificado $[P_{nG}]$ e proposto $[P_{nFT-G}]$.

Coluna	P_y (kN)	P_u (kN)	P_u/P_y	λ_{FT}	a	b	c	β_{FT}	R_G	P_{nG} (kN)	P_{nFT-G} (kN)	P_u/P_{nG}	P_u/P_{nFT-G}
U1_L1	14.76	4.94	0.33	1.87	0.62	1.14	0.71	7.17	2.64	3.70	4.47	1.34	1.10
	28.87	6.99	0.24	2.62	0.62	1.14	0.71	7.17	2.64	3.70	5.97	1.89	1.17
	38.49	7.44	0.19	3.02	0.62	1.14	0.71	7.17	2.64	3.70	6.76	2.01	1.10
	48.12	7.45	0.15	3.38	0.62	1.14	0.71	7.17	2.64	3.70	7.44	2.01	1.00
U1_L2	14.76	4.47	0.30	2.08	0.62	1.14	0.71	7.17	2.51	3.00	3.97	1.49	1.12
	28.87	5.98	0.21	2.90	0.62	1.14	0.71	7.17	2.51	3.00	5.30	1.99	1.13
	38.49	5.98	0.16	3.35	0.62	1.14	0.71	7.17	2.51	3.00	6.00	1.99	1.00
	48.12	5.98	0.12	3.75	0.62	1.14	0.71	7.17	2.51	3.00	6.60	1.99	0.91
U1_L3	14.76	4.09	0.28	2.27	0.62	1.14	0.71	7.17	2.37	2.52	3.59	1.62	1.14
	28.87	5.32	0.18	3.17	0.62	1.14	0.71	7.17	2.37	2.52	4.80	2.11	1.11
	38.49	5.34	0.14	3.66	0.62	1.14	0.71	7.17	2.37	2.52	5.43	2.12	0.98
	48.12	5.34	0.11	4.09	0.62	1.14	0.71	7.17	2.37	2.52	5.97	2.12	0.89
U2_L1	13.26	5.23	0.39	1.63	0.64	1.24	0.71	8.84	1.93	4.40	4.68	1.19	1.12
	25.94	6.43	0.25	2.27	0.64	1.24	0.71	8.84	1.93	4.40	6.04	1.46	1.06
	34.59	6.43	0.19	2.63	0.64	1.24	0.71	8.84	1.93	4.40	6.74	1.46	0.95
	43.24	6.43	0.15	2.93	0.64	1.24	0.71	8.84	1.93	4.40	7.33	1.46	0.88
U2_L2	13.26	4.39	0.33	1.87	0.64	1.24	0.71	8.84	1.79	3.33	3.94	1.32	1.12
	25.94	5.71	0.22	2.61	0.64	1.24	0.71	8.84	1.79	3.33	5.08	1.71	1.12
	34.59	5.92	0.17	3.02	0.64	1.24	0.71	8.84	1.79	3.33	5.67	1.78	1.04
	43.24	5.92	0.14	3.37	0.64	1.24	0.71	8.84	1.79	3.33	6.17	1.78	0.96
U2_L3	13.26	3.90	0.29	2.06	0.64	1.24	0.71	8.84	1.67	2.75	3.50	1.42	1.11
	25.94	4.70	0.18	2.87	0.64	1.24	0.71	8.84	1.67	2.75	4.52	1.71	1.04
	34.59	4.70	0.14	3.32	0.64	1.24	0.71	8.84	1.67	2.75	5.04	1.71	0.93
	43.24	4.70	0.11	3.71	0.64	1.24	0.71	8.84	1.67	2.75	5.48	1.71	0.86
U2_L4	13.26	3.48	0.26	2.22	0.64	1.24	0.71	8.84	1.55	2.35	3.17	1.48	1.10
	25.94	4.08	0.16	3.11	0.64	1.24	0.71	8.84	1.55	2.35	4.09	1.74	1.00
	34.59	4.09	0.12	3.59	0.64	1.24	0.71	8.84	1.55	2.35	4.57	1.74	0.90
	43.24	4.09	0.09	4.02	0.64	1.24	0.71	8.84	1.55	2.35	4.97	1.74	0.82
U3_L1	15.50	4.80	0.31	2.09	0.59	1.00	0.71	4.85	1.91	3.13	4.35	1.54	1.10
	30.33	7.38	0.24	2.92	0.59	1.00	0.71	4.85	1.91	3.13	6.08	2.36	1.21
	40.44	8.60	0.21	3.37	0.59	1.00	0.71	4.85	1.91	3.13	7.02	2.75	1.23
	50.55	9.33	0.18	3.77	0.59	1.00	0.71	4.85	1.91	3.13	7.85	2.98	1.19
U3_L2	15.50	4.46	0.29	2.32	0.59	1.00	0.71	4.85	1.82	2.53	3.91	1.76	1.14
	30.33	6.70	0.22	3.24	0.59	1.00	0.71	4.85	1.82	2.53	5.47	2.65	1.23
	40.44	7.58	0.19	3.74	0.59	1.00	0.71	4.85	1.82	2.53	6.31	2.99	1.20
	50.55	8.05	0.16	4.19	0.59	1.00	0.71	4.85	1.82	2.53	7.06	3.18	1.14
U3_L3	15.50	4.18	0.27	2.53	0.59	1.00	0.71	4.85	1.72	2.12	3.58	1.97	1.17
	30.33	6.05	0.20	3.55	0.59	1.00	0.71	4.85	1.72	2.12	5.00	2.86	1.21
	40.44	6.61	0.16	4.09	0.59	1.00	0.71	4.85	1.72	2.12	5.77	3.12	1.15
	50.55	6.83	0.14	4.58	0.59	1.00	0.71	4.85	1.72	2.12	6.45	3.23	1.06
U4_L1	14.01	4.98	0.36	1.77	0.60	1.05	0.71	5.71	3.42	3.90	4.58	1.28	1.09
	27.41	6.27	0.23	2.48	0.60	1.05	0.71	5.71	3.42	3.90	6.29	1.61	1.00
	36.54	6.27	0.17	2.87	0.60	1.05	0.71	5.71	3.42	3.90	7.21	1.61	0.87
	U4_L2	14.01	4.35	0.31	2.05	0.60	1.05	0.71	5.71	3.19	2.93	3.94	1.49
27.41		6.38	0.23	2.86	0.60	1.05	0.71	5.71	3.19	2.93	5.41	2.18	1.18
36.54		7.08	0.19	3.31	0.60	1.05	0.71	5.71	3.19	2.93	6.20	2.42	1.14
45.68		7.15	0.16	3.70	0.60	1.05	0.71	5.71	3.19	2.93	6.89	2.44	1.04
U4_L3	14.01	3.99	0.28	2.26	0.60	1.05	0.71	5.71	3.00	2.40	3.55	1.66	1.13
	27.41	5.66	0.21	3.16	0.60	1.05	0.71	5.71	3.00	2.40	4.87	2.36	1.16
	36.54	6.21	0.17	3.65	0.60	1.05	0.71	5.71	3.00	2.40	5.58	2.58	1.11
	45.68	6.26	0.14	4.08	0.60	1.05	0.71	5.71	3.00	2.40	6.21	2.61	1.01
U4_L4	14.01	3.68	0.26	2.46	0.60	1.05	0.71	5.71	2.81	2.03	3.25	1.81	1.13
	27.41	4.92	0.18	3.44	0.60	1.05	0.71	5.71	2.81	2.03	4.46	2.42	1.10
	36.54	5.11	0.14	3.97	0.60	1.05	0.71	5.71	2.81	2.03	5.12	2.51	1.00
	45.68	5.11	0.11	4.44	0.60	1.05	0.71	5.71	2.81	2.03	5.69	2.51	0.90
U5_L1	13.26	4.26	0.32	1.99	0.58	0.97	0.71	4.39	4.32	2.93	3.93	1.45	1.09
	25.94	6.51	0.25	2.79	0.58	0.97	0.71	4.39	4.32	2.93	5.54	2.22	1.18
	34.59	7.21	0.21	3.22	0.58	0.97	0.71	4.39	4.32	2.93	6.42	2.46	1.12
	43.24	7.29	0.17	3.60	0.58	0.97	0.71	4.39	4.32	2.93	7.20	2.49	1.01
U5_L2	13.26	3.84	0.29	2.28	0.58	0.97	0.71	4.39	3.97	2.24	3.44	1.72	1.12
	25.94	5.70	0.22	3.19	0.58	0.97	0.71	4.39	3.97	2.24	4.86	2.55	1.17
	34.59	6.43	0.19	3.68	0.58	0.97	0.71	4.39	3.97	2.24	5.63	2.87	1.14
	43.24	6.82	0.16	4.12	0.58	0.97	0.71	4.39	3.97	2.24	6.31	3.05	1.08
U5_L3	13.26	3.55	0.27	2.50	0.58	0.97	0.71	4.39	3.68	1.86	3.14	1.91	1.13
	25.94	5.05	0.19	3.50	0.58	0.97	0.71	4.39	3.68	1.86	4.44	2.72	1.14
	34.59	5.49	0.16	4.04	0.58	0.97	0.71	4.39	3.68	1.86	5.14	2.95	1.07
	43.24	5.63	0.13	4.52	0.58	0.97	0.71	4.39	3.68	1.86	5.77	3.03	0.98
U5_L4	13.26	3.27	0.25	2.70	0.58	0.97	0.71	4.39	3.40	1.59	2.92	2.05	1.12
	25.94	4.24	0.16	3.78	0.58	0.97	0.71	4.39	3.40	1.59	4.12	2.66	1.03
	34.59	4.47	0.13	4.36	0.58	0.97	0.71	4.39	3.40	1.59	4.77	2.80	0.94
	43.24	4.47	0.10	4.88	0.58	0.97	0.71	4.39	3.40	1.59	5.35	2.80	0.84
U6_L1	11.77	3.59	0.31	1.93	0.59	1.03	0.71	5.38	2.80	2.76	3.53	1.30	1.02
	23.02	5.43	0.24	2.70	0.59	1.03	0.71	5.38	2.80	2.76	4.89	1.97	1.11
	30.69	5.78	0.19	3.12	0.59	1.03	0.71	5.38	2.80	2.76	5.62	2.09	1.03
	38.37	5.79	0.15	3.49	0.59	1.03	0.71	5.38	2.80	2.76	6.26	2.10	0.93
U6_L2	11.77	3.38	0.29	2.19	0.59	1.03	0.71	5.38	2.51	2.16	3.11	1.57	1.09
	23.02	4.53	0.20	3.06	0.59	1.03	0.71	5.38	2.51	2.16	4.30	2.10	1.05
	30.69	4.61	0.15	3.53	0.59	1.03	0.71	5.38	2.51	2.16	4.95	2.14	0.93
	38.37	4.61	0.12	3.95	0.59	1.03	0.71	5.38	2.51	2.16	5.51	2.14	0.84
U6_L3	11.77	3.05	0.26	2.38	0.59	1.03	0.71	5.38	2.28	1.83	2.85	1.67	1.07
	23.02	3.80	0.16	3.32	0.59	1.03	0.71	5.38	2.28	1.83	3.95	2.08	0.96
	30.69	3.85	0.13	3.84	0.59	1.03	0.71	5.38	2.28	1.83	4.54	2.10	0.85
	U7_L1	11.02	3.26	0.30	2.17	0.57	0.95	0.71	3.93	3.54	2.05	3.03	1.59
21.56		4.58	0.21	3.03	0.57	0.95	0.71	3.93	3.54	2.05	4.32	2.23	1.06
28.74		4.71	0.16	3.50	0.57	0.95	0.71	3.93	3.54	2.05	5.03	2.30	0.94
35.93		4.71	0.13	3.92	0.57	0.95	0.71	3.93	3.54	2.05	5.65	2.30	0.83
U7_L2	11.02	2.92	0.26	2.43	0.57	0.95	0.71	3.93	3.11	1.64	2.73	1.78	1.07
	21.56	3.92	0.18	3.39	0.57	0.95	0.71	3.93	3.11	1.64	3.88	2.39	1.01
	28.74	4.06	0.14	3.92	0.57	0.95	0.71	3.93	3.11	1.64	4.52	2.47	0.90
	35.93	4.06	0.11	4.38	0.57	0.95	0.71	3.93	3.11	1.64	5.09	2.47	0.80

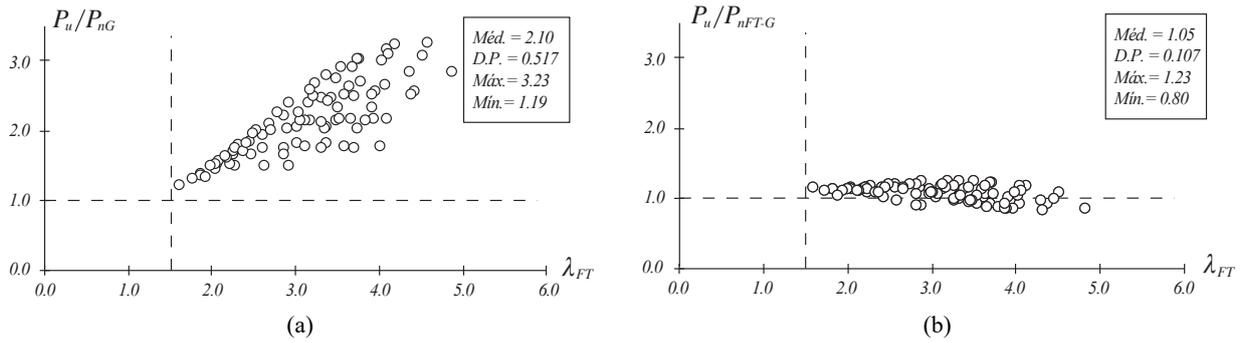


Figura 4- Gráfico (a) P_u/P_{nG} vs. λ_{FT} e (b) P_u/P_{nFT-G} vs. λ_{FT} para todas as colunas dadas na Tabela 2

Por sua vez, na Fig. 4 (b) é possível estimar o desempenho e os méritos do conjunto de curvas de resistência global, dependente de β_{FT} e R_G , proposto pelas Eqs. (2)-(3). Nota-se que estas são capazes de prever com qualidade as resistências últimas das colunas selecionadas considerando que se tratam de colunas do tipo U com extremidades engastadas e que colapsam no modo $F_M T$ independentemente de seus valores de R_G . Logo, fornece boas previsões para colunas afetadas ou não pela interação G-G.

A fim de ilustrar a qualidade da previsão de resistência última alcançada pelo conjunto de curvas de resistência modificadas para as colunas consideradas neste trabalho, a Figura 5 apresenta os valores de P_u/P_y referentes às colunas analisadas (U1 a U7) contra λ_{FT} , e compara-os com as curvas de resistência baseadas no MRD definidas pelas Equações (1) e (2) - (3) (P_{nG} e P_{nFT-G} - linhas tracejadas e contínuas, respectivamente). Fica claro que os valores de P_u/P_y são consideravelmente bem previstos pelas curvas de resistência do P_{nFT-G}/P_y ; de fato, eles invariavelmente fornecem previsões de fálha bastante precisas, independentemente do nível de interação do G-G.

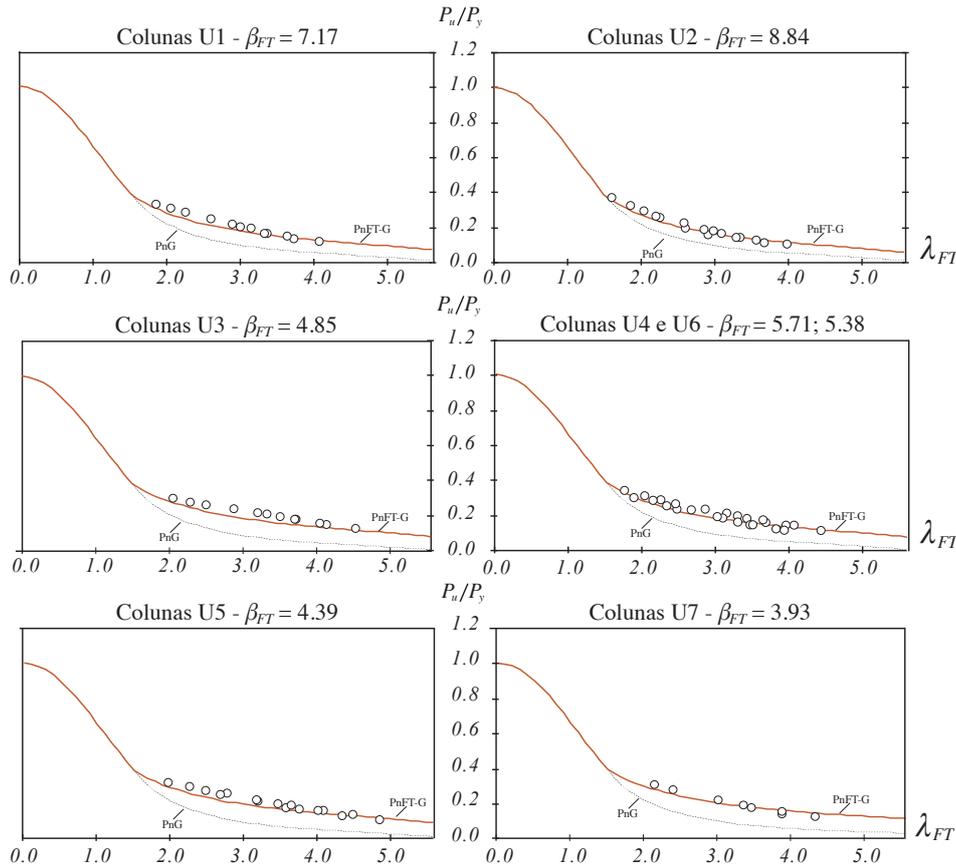


Figura 5 - Comparação entre a curva dada pelas Eq. (2)-(3) proposta por Dinis *et al.* [1], a curva normativa (Eq. (1)) e os valores P_u/P_y das colunas U1 a U7

A qualidade do conjunto de curvas proposto por Dinis *et al.* [1] garante uma alta precisão de previsão da resistência última de todas as colunas U com extremidades engastadas, colapsando por $F_M T$ analisados até agora, independentemente de suas combinações de valores de esbelte e R_G .

6 Conclusão

Este trabalho relatou os resultados numéricos obtidos de uma investigação em andamento que lida com o comportamento pós-crítico de colunas em PFF que colapsam no modo $F_M T$ com diversos valores de esbeltez e R_G . Os resultados apresentados e discutidos referem-se exclusivamente a seções do tipo U, com extremidades engastadas e constitui a primeira etapa de pesquisa em andamento com desdobramento para uma posterior campanha experimental. Após uma breve visão geral dos principais recursos e méritos da abordagem de projeto baseada no MRD, proposta por Dinis *et al.* [1], para prever a resistência última das colunas que colapsam por $F_M T$, o artigo analisou o comportamento da flambagem das mesmas, a fim de selecionar geometrias suscetíveis à ocorrência de vários níveis de R_G . Em seguida, após uma investigação sobre o comportamento e a resistência pós-flambagem elástica-plástica das colunas em consideração, foram reunidos dados de resistência última obtidos por meio de um estudo paramétrico envolvendo diferentes tensões de escoamento, escolhidas para cobrir uma ampla faixa de esbeltez. Finalmente, as resistências últimas, ora obtidas, foram apresentadas às curvas de resistência normativa modificada por Dinis *et al.* [1], visando avaliar a qualidade da previsão de cada uma delas. A abordagem de projeto modificada baseada no MRD mostrou prever de maneira bastante adequada (com segurança e precisão) as resistências últimas das colunas U de extremidade fixa, que colapsam por $F_M T$ consideradas neste trabalho. Embora esta pesquisa tenha sido restrita a colunas U que não apresentam interação G-G com extremidades engastadas, os autores estão investigando esta possibilidade, além de outros perfis que apresentam interação, uma vez que a qualidade das descobertas relatadas fornece forte incentivo para prosseguir nesse caminho.

Declaração de autoria. Os autores confirmam que são os únicos responsáveis pela autoria deste trabalho, e que todo o material aqui incluído como parte do presente trabalho é propriedade (e autoria) dos autores, ou tem a permissão dos proprietários a serem incluídos aqui.

Referências

- [1] P.B. Dinis, D. Camotim, A.D. Martins, A. Landesmann, “Global-global interaction in cold-formed steel channel columns: Relevance, post-buckling behavior, strength and DSM design”. *Thin-Walled Structures*, in press, 2020.
- [2] ANSYS (2009). Reference Manual, *Swanson Analysis Systems (SAS)*, 12.0.1.
- [3] B.W. Schafer, T. Peköz, “Direct strength prediction of cold-formed steel members using numerical elastic buckling solutions”. *Proceedings of 14th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures* (St. Louis, 15-16/10), W.W. Yu, R. LaBoube (eds.), 69-76, 1998.
- [4] G.J. Hancock, Y.B. Kwon, E.S. Bernard, “Strength design curves for thin-walled sections undergoing distortional buckling”. *Journal of Construction Steel Research*, **31**(2-3), 169-186, 1994.
- [5] AISI (American Iron and Steel Institute). *North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members (NAS)*, Washington DC, 2016.
- [6] AS/NZS4600 (Standards of Australia (SA) and Standards of New Zealand (SNZ)). *Cold-Formed Steel Structures*, Sydney-Wellington, 2005.
- [7] ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). *Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio - Procedimento (ABNT NBR 14762:2010)*, Associação Brasileira de Normas Técnicas – Rio de Janeiro, RJ, 2010.
- [8] R. Ziemian. *Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures* (6th edition), John Wiley & Sons, Hoboken, 2010.
- [9] T. Peköz, O. Sümer. *Design Provisions for Cold-Formed Steel Columns and Beam-Column*, Research Report RP92-1, American Iron and Steel Institute, Washington DC, 1992.
- [10] AISI (American Iron and Steel Institute). *Cold-Formed Steel Design Manual*, Washington DC, 1986.
- [11] P.B. Dinis, D. Camotim, A. Landesmann, A.D. Martins, “On the Direct Strength Method design of columns against global failure”. *Thin-Walled Structures*, **139**(June), 242-270, 2019.
- [12] P.B. Dinis, D. Camotim, A. Landesmann, A.D. Martins, “Improving the Direct Strength Method prediction of column flexural-torsional failure loads”. *Thin-Walled Structures*, in press, 2020.
- [13] R. Bebbiano, D. Camotim, R. Gonçalves, “GBTUL 2.0 – a second- generation code for the GBT-based buckling and vibration analysis of thin-walled members”, *Thin-Walled Structures*, **124**, 235-253, 2018.
- [14] E. Ellobody, B. Young, “Behavior of cold-formed steel plain angle columns”, *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, **131**(3), 469-478, 2005.