



ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA E O MÉTODO DA SEÇÃO EFETIVA PARA PERFIS FORMADOS A FRIO SUBMETIDOS À COMPRESSÃO

Thallus Simon Monteiro

André Luis Riqueira Brandão

Washington Batista Vieira

Cláudio Ernani Martins Oliveira

thallus.saimon@gmail.com

andrerieira@unifei.edu.br

vieira@unifei.edu.br

cemo@gmail.com

Universidade Federal de Itajubá – *Campus* de Itabira

Rua Irmã Ivone Drumond, 200 - Distrito Industrial II, 35903-087, Itabira - MG - Brasil

Marcílio Sousa da Rocha Freitas

marcilio@em.ufop.br

Universidade Federal de Ouro Preto

Campus Universitário Morro do Cruzeiro, 35400-000, Ouro Preto - MG, Brasil.

Resumo. O presente trabalho propõe um estudo comparativo entre o Método da Resistência Direta (MRD) e o Método da Seção Efetiva (MSE) no dimensionamento de barras submetidas à compressão de perfis formados a frio (PFF). Este estudo abrange os fenômenos de flambagem rotineiros neste tipo de perfil, além de trazer uma abordagem mais aprofundada dos métodos de dimensionamento. Para a análise dos perfis, foi utilizado um programa numérico que se baseia no Método das Faixas Finitas, para análise da estabilidade elástica, que permite identificar os modos de flambagem e seus respectivos esforços críticos. Perfis de seção U simples e U enrijecido foram adotados para a realização das análises. Foram analisados também alguns perfis não previstos pela ABNT NBR 14762 (2010), com a apresentação do procedimento de calibração das equações de projeto para o MSE.

Keywords: Perfis Formados a frio, Método da Resistência Direta, Método da Seção Efetiva.

CILAMCE 2017

1 INTRODUÇÃO

Os perfis formados a frio (PFF) podem ser obtidos a partir do dobramento a frio de chapas de aço. Esses perfis são caracterizados pelas suas paredes finas e seções abertas, que vem sendo bastante procurados pelo mercado consumidor, devido à necessidade de vencer grandes vãos, ao custo benefício, fácil manuseio, mão de obra barata, fácil dimensionamento, boa durabilidade, dentre outros. Essas estruturas são bem mais leves se comparadas com estruturas de concreto armado ou de aço laminado, além de ter alta resistência, sendo ideal o uso em centros urbanos. Ainda vale ressaltar que os PFF possuem características peculiares, como configurações não usuais da seção (devido ao fácil dobramento das chapas), possuem elevadas relações largura/espessura, interação entre os módulos de flambagem além da diferença na distribuição de tensão devido ser trabalhada a frio (Chodraui, 2006).

Perfis de aço formados por chapa dobrada a frio possuem variadas seções transversais, tendo as paredes finas e a relação largura espessura muito alta, submetendo eles aos fenômenos de instabilidades estrutural como flambagem global, local e distorcional (Schafer, 2002).

A norma ABNT NBR 14762 (2010) estabelece a formulação de três métodos para dimensionamento de PFF, tanto a compressão, quanto a flexão, sendo eles: Método da Largura Efetiva (MLE), Método da Resistência Direta (MRD) e Método da Seção Efetiva (MSE). O presente trabalho tem como objetivo comparar os métodos MRD e MSE, para perfis de seção aberta do tipo U e Ue (U enrijecido). Além disso, será mostrado um procedimento de calibração das equações de projeto para o MSE aplicado ao perfil U enrijecido com borda adicional (bs), aqui denominado Uea. A Figura 1 ilustra os perfis estudados neste trabalho, bem como as nomenclaturas utilizadas para cada tipo de seção transversal. As propriedades geométricas e as propriedades dos materiais dos perfis analisados foram obtidos de diversos trabalho que se basearam em análise experimental. Desta forma, foi possível verificar os resultados pelo MRD e MSE, com relação à força experimental de cada amostra.

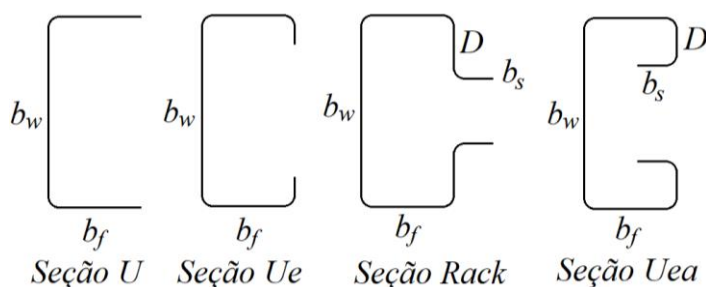


Figura 1. Seções transversais estudadas neste trabalho

As propriedades geométricas e as propriedades dos materiais dos perfis analisados foram obtidos de diversos trabalhos que se basearam em análise experimental. Desta forma, foi possível verificar os resultados pelo MRD e MSE, com relação à força experimental de cada amostra ensaiada à compressão.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E METODOLOGIA

2.1 Método da Resistência Direta

O Método da Resistência Direta (MRD), tem se mostrado bastante eficiente no cálculo da resistência das barras comprimidas. Assume-se neste procedimento que os modos de flambagem local e distorcional podem ser previstos utilizando-se as tensões de flambagem local elástica e as propriedades geométricas da seção transversal bruta da barra. Para a obtenção das resistências das barras utilizando o MRD, é necessário o uso das propriedades dos perfis e as curvas de resistência, porém essa análise deve ser feita para toda a seção, e não separada por elementos, como é feito no tradicional Método da Largura Efetiva (MLE).

Para o cálculo usando o MRD, tem-se o valor característico da força axial de compressão resistente ($N_{c,Rk}$), como sendo o menor valor calculado entre a flambagem global, local e distorcional, $N_{c,Re}$, $N_{c,Rl}$ e $N_{c,Rdist}$, respectivamente.

- Flambagem global da barra:

$$N_{c,Re} = \begin{cases} 0,658 \lambda_0^2 Af_y & \text{para } \lambda_0 \leq 1,5 \\ \left(\frac{0,877}{\lambda_0^2} \right) Af_y & \text{para } \lambda_0 > 1,5 \end{cases} \quad (1)$$

O índice de esbeltez reduzido associado à flambagem global é definido por

$$\lambda_0 = \left(\frac{Af_y}{N_e} \right)^{0,5}$$

onde,

A é a área bruta da seção transversal da barra, f_y é o limite de escoamento do aço e N_e é a força axial de flambagem global elástica.

- Flambagem local:

$$N_{c,Rl} = \begin{cases} N_{c,Re} & \text{para } \lambda_l \leq 0,776 \\ \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_l^{0,8}} \right) \frac{N_{c,Re}}{\lambda_l^{0,8}} & \text{para } \lambda_l > 0,776 \end{cases} \quad (2)$$

O índice de esbeltez reduzido associado à flambagem local é definido por

$$\lambda_l = \left(\frac{N_{c,Re}}{N_l} \right)^{0,5}$$

onde,

N_l é a força axial de flambagem local elástica, obtida através de recurso computacional para análise de estabilidade.

- Flambagem distorcional:

$$N_{c,Rdist} = Af_y \text{ para } \lambda_{dist} \leq 0,561$$
$$N_{c,Rdist} = \left(1 - \frac{0,25}{\lambda_{dist}^{1,2}}\right) \frac{Af_y}{\lambda_{dist}^{1,2}} \text{ para } \lambda_{dist} > 0,561 \quad (3)$$

O índice de esbeltez reduzido associado à flambagem distorcional é definido por

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

onde,

N_{dist} é a força axial de flambagem distorcional elástica, obtida através de recurso computacional para análise de estabilidade.

2.2 Método da Seção Efetiva

O MSE é um método alternativo ao MRD, desenvolvido por Batista (2010) para algumas seções usuais. As equações deste método são apresentadas na ABNT NBR 14762 (2010). De acordo com Batista (2010), o MSE não permite a análise de perfis que estão sujeitos ao fenômeno de flambagem distorcional, sendo o mesmo considerado apenas para casos de interação local-global.

São apresentadas abaixo as formulações para flambagem global e local.

- Flambagem global da barra:

$$\chi = 0,658^{\lambda_0^2} \text{ para } \lambda_0 \leq 1,5$$
$$\chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2} \text{ para } \lambda_0 > 1,5 \quad (4)$$

- Flambagem local:

$$\lambda_p = \left(\frac{\chi Af_y}{N_l}\right)^{0,5}$$
$$A_{ef} = A \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_p^{0,8}}\right) \frac{1}{\lambda_p^{0,8}} \leq A \quad (5)$$
$$N_{cR} = \chi A_{ef} f_y$$

onde,

χ é o fator de redução da força axial de compressão resistente, associado à flambagem local, λ_p é o índice de esbeltez reduzido da seção completa e A_{ef} é a área efetiva da seção transversal da barra.

O MSE tem vantagem em relação ao MRD o fato de permitir o cálculo da força axial de flambagem local diretamente a partir da Eq. (6), proposta com base na equação clássica de distribuição de tensões críticas, que depende das propriedades elásticas do material (E e ν), da relação altura-espessura (b_w/t), da geometria da seção transversal e do coeficiente de flambagem local (k_l).

$$N_l = k_l \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2) \left(\frac{b_w}{t}\right)^2} A \quad (6)$$

Ressalta-se que o MSE, esboçado pela norma ABNT NBR 14762(2010), pode ser utilizado para perfis com η entre 0,1 e 1,0, sendo η a relação b_f/b_w .

2.3 Programa Computacional CUFSM

O programa computacional CUFSM desenvolvido por Schafer (2001) se baseia no Método das Faixas Finitas (MFF) para análise de perfis de aço formados a frio. A principal vantagem é permitir a interação da flambagem local e global em uma única expressão. Através da análise via CUFSM, com base na teoria de estabilidade elástica, obtém-se os valores críticos (valores mínimos) das forças axiais de flambagem elástica local e distorcional, N_l e N_{dist} .

O Método das Faixas Finitas (MFF) foi desenvolvido por Y. K. Cheung em 1976 e foi utilizado para a análise de perfis laminados. Com o passar dos tempos, os estudos foram se aperfeiçoando e começando a sua aplicação em perfis formados a frio. Este método usa uma abordagem simplificada do Método dos Elementos Finitos (MEF), o Método das Faixas Finitas (MFF), onde a discretização da seção de uma barra é feita somente na transversal, resultando em faixas e não em elementos (JAVARONI, 2015). A Figura 2 mostra um perfil U enrijecido com a discretização dos dois métodos.

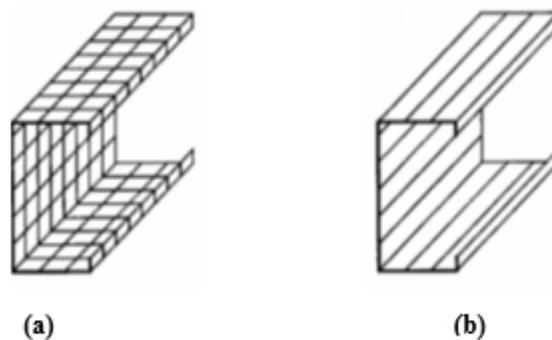


Figura 2. Discretização dos elementos entre (a) MEF e (b) MFF.

O CUFSM é disponibilizado gratuitamente no site da Universidade Cornell, e possui como atribuições o fornecimento de tensão de flambagem elástica para perfis de aço formados a frio. Na Figura 3 é apresentada a tela inicial do programa, onde é possível entrar com as propriedades geométricas e as tensões de cada seção.

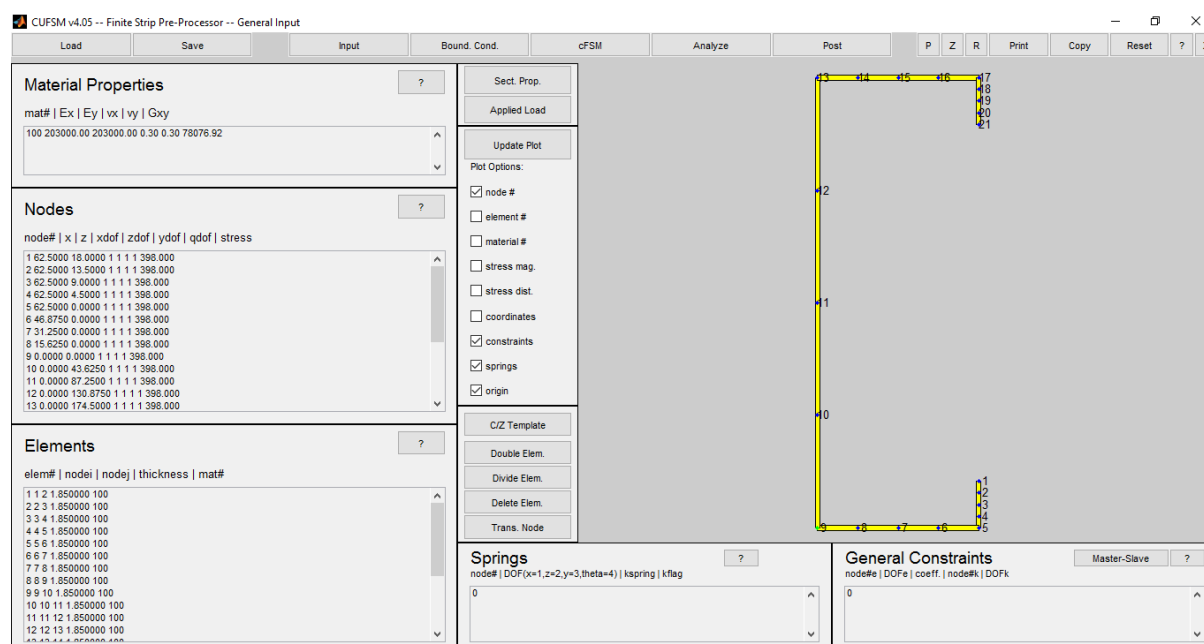


Figura 3. Tela inicial do programa CUFSM.

3 ANÁLISES DOS RESULTADOS

As resistências das barras de seções U e Ue, submetidas a compressão, foram calculadas com base nos métodos MRD e MSE. Os perfis U enrijecidos com bordas adicionais (Uea) foram analisados pelo MRD, e valores de k_l foram obtidos com a finalidade de ajustar uma equação de projeto pelo MSE. O ponto de partida para o cálculo do MRD é a determinação das forças axiais associadas a cada modo de flambagem (Javaroni, 2015).

Com auxílio do programa computacional CUFSM, foram realizadas análises de estabilidade elástica, que permitem identificar os modos de flambagem e seus respectivos esforços críticos.

As propriedades geométricas e as propriedades dos materiais dos perfis analisados foram obtidos de diversos trabalhos de pesquisa de caráter experimental. Esses dados estão organizados conforme o tipo de seção transversal, ou seja, perfis U (simples), perfis Ue (U enrijecido) e perfis Uea (U enrijecido com borda adicional). As Tabelas 1 e 2 apresentam os conjuntos experimentais, com as propriedades geométricas e mecânicas dos espécimes.

Tabela 1. Dados dos perfis U

Referência	Amostra	L (mm)	f_y (MPa)	t (mm)	b_w (mm)	b_f (mm)
Young e Rasmussen (1998)	P36F0280	280	450	1,52	97	37
	P36F1000	1000	450	1,52	97	37
	P36F1500	1501	450	1,52	97	37
	P36F2000	2001	450	1,52	97	37
Moldovan (1994)	PI-1	246	209	1,78	61	51
	PI-2	253	209	1,78	61	51
	PI-3	245	209	1,78	62	51
	P4-1	295	209	1,78	80	62
	P4-2	292	209	1,78	82	60
	P3-1	1486	209	1,78	61	51
	P3-2	1486	209	1,78	62	50
	P5-1	1981	209	1,78	89	58
	P7-1	1209	214	3,05	83	59
Chodraui (2006)	U 100x50 t238	850	371	2,38	100	50
	U 100x50 t238	1320	371	2,38	100	50
	U 100x50 t238	1800	371	2,38	100	50

Tabela 2. Dados dos perfis Ue

Referência	Amostra	L (mm)	f_y (MPa)	t (mm)	b_w (mm)	b_f (mm)	D (mm)
Dat (1980)	PBC 14(I) A3	686	309	1,78	75	42	19
	PBC 14(I) A5	991	309	1,78	75	42	19
	PBC 14(I) A7	1448	309	1,78	75	42	19
	RFC 14(I) B2	686	330	1,78	75	42	19
	RFC 14(I) B4	991	330	1,78	75	42	19
	RFC 14(II) D5	838	305	2,29	76	43	19
Moldovan (1994)	P18-1	1070	213	1,78	85	55	12
	P18-2	1070	213	1,78	85	57	16
	P19-1	1981	213	1,78	85	55	17
	P19-2	1981	213	1,78	86	55	17
Young e Hancock (2003)	ST15A60	1503	450	1,52	99	51	11
	ST15A90	1504	450	1,52	99	50	11
	ST15A120	1504	450	1,52	100	50	11
	ST15A135	1504	450	1,52	100	50	11
	ST15A150	1503	450	1,52	99	50	11
	ST19A135	1504	450	1,78	100	50	12
	ST19A150	1504	450	1,78	100	49	12
	ST24A90	1479	450	2,29	100	50	12
	ST24A120	1478	450	2,29	101	50	12
	ST24A135	1478	450	2,29	100	50	12
Ortiz-Colberg (1981)	L4	686	310	1,27	89	39	13
	L11	991	302	1,27	89	39	13
	L12	686	289	1,27	89	39	13
	L13	1600	296	1,27	89	39	13
	L15	1143	333	2,03	89	39	13
	L25	1588	333	2,03	89	39	13
	L29	686	292	2,03	89	39	13
	L30	686	292	2,03	89	39	13
	S1	305	334	1,27	89	40	13
	S2	305	325	1,27	89	39	13
Chodraui (2006)	Ue 125x50x25	1015	383	2,38	125	50	25
	Ue 125x50x25	1575	383	2,38	125	50	25
	Ue 125x50x25	2130	383	2,38	125	50	25
	Ue 125x50x25	2700	383	2,38	125	50	25
	Ue 125x50x25	985	281	3,88	125	50	25
	Ue 125x50x25	1530	281	3,88	125	50	25
	Ue 125x50x25	2070	281	3,88	125	50	25
	Ue 125x50x25	2615	281	3,88	125	50	25

Os dados das Tabelas 1 e 2 foram utilizados na modelagem dos perfis pelo CUFSM. Na Figura 4 ilustra-se o resultado obtido pelo programa para um perfil Ue, com tensão constante no valor do limite de escoamento em MPa. Observa-se que o programa fornece os pontos de mínimo para cada modo de flambagem elástica, onde o primeiro ramo corresponde à

flambagem local de placa, o segundo ramo corresponde ao modo distorcional e o terceiro ramo corresponde à flambagem global.

Para os pontos de mínimo, o CUFSM fornece o valor do fator de carga que, multiplicado pelo valor de tensão aplicada, fornece a tensão crítica para o respectivo modo. O programa também ilustra o modo de flambagem correspondente. A partir desta análise, obtém-se as forças axiais de compressão de flambagem elástica local, distorcional e global, respectivamente N_l , N_{dist} e N_e . Os valores de N_l , N_{dist} e N_e são empregados no MRD para a obtenção da força axial resistente $N_{c,Rk}$.

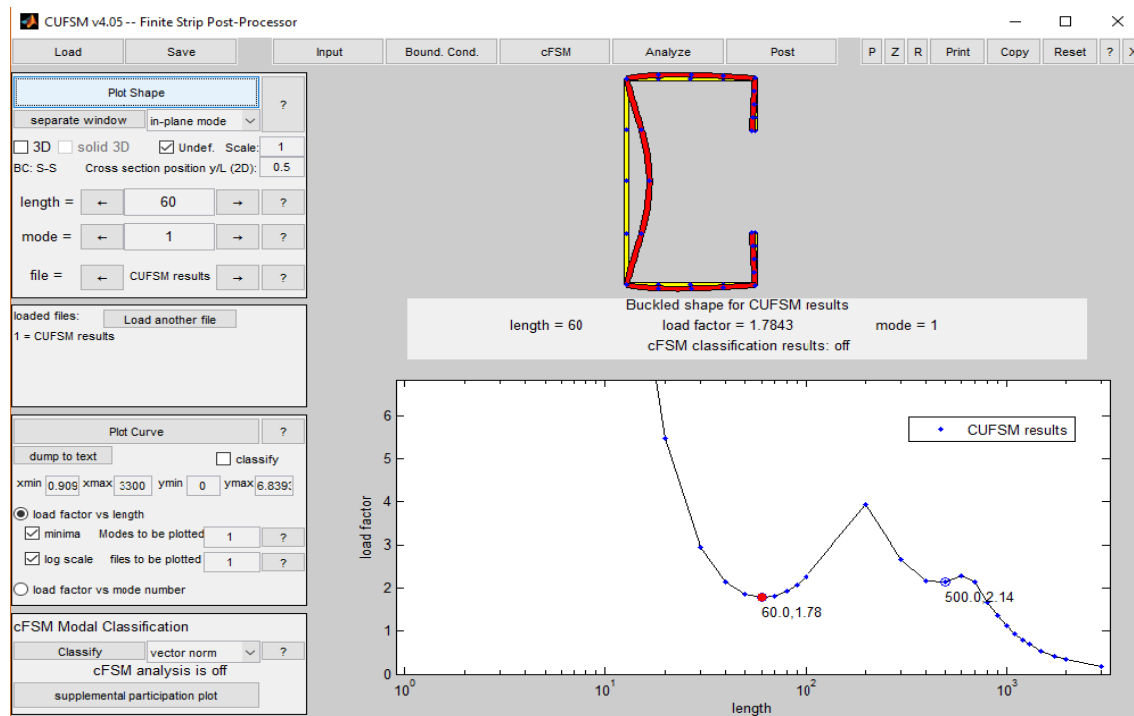


Figura 4. Curva de ponto de mínimo perfil Ue.

No caso do MSE, as equações da norma brasileira ABNT NBR 14762 (2010) permite a obtenção da força axial de flambagem local N_e , sem a necessidade de recurso computacional, simplificando a obtenção da força axial resistente.

3.1 Análises dos perfis U e Ue

A análise dos perfis foi realizada através da comparação entre a força resistente teórica (N_{MRD} ou N_{MRD}) e a força experimental (N_{exp}), sendo a força teórica obtida pelos métodos MRD e MSE.

As Tabelas 3 e 4 apresentam os resultados da comparação entre cada um dos métodos com os resultados experimentais dos perfis U e Ue, respectivamente. São mostrados os resultados da média e do desvio padrão, da razão entre a força experimental e a força teórica computada para cada agrupamento de dados experimentais. Ao valor médio da razão entre a força experimental, atribui-se o termo erro do modelo. O erro do modelo é praticamente o mesmo para os dois métodos de dimensionamento (MSE e MRD). Além disso, tal razão é

próxima da unidade, e os dados apresentam baixa dispersão, tanto para perfis U quanto para perfis Ue.

Tabela 3 - Resultados da Análise de perfis U

Referência	Amostra	N_{exp}	N_{MSE}	N_{MRD}	N_{exp}/N_{MSE}	N_{exp}/N_{MRD}	Modo
Young e Rasmussen (1998)	P36F0280	65,1	68,3	66,0	0,95	0,99	Local
	P36F1000	59,1	60,0	59,5	0,99	0,99	Local
	P36F1500	50,1	51,0	49,5	0,98	1,01	Local
	P36F2000	41,7	41,5	42,0	1,00	0,99	Local
Moldovan (1994)	PI-1	47,1	47,0	48,0	1,00	0,98	Local
	PI-2	42,2	47,0	48,0	0,90	0,88	Local
	PI-3	41,2	47,0	48,0	0,88	0,86	Local
	P4-1	52,9	52,9	52,0	1,00	1,02	Local
	P4-2	52,9	53,2	52,0	0,99	1,02	Local
	P3-1	32,4	36,0	35,0	0,90	0,93	Local
	P3-2	29,4	31,0	30,0	0,95	0,98	Local
	P5-1	21,6	33,5	34,0	0,64	0,64	Local
	P7-1	89,2	99,0	99,0	0,90	0,90	Global
Chodraui (2006)	U 100x50 t238	119,0	117,2	117,9	1,02	1,01	Local
	U 100x50 t238	89,0	91,4	90,6	0,97	0,98	Local
	U 100x50 t238	55,0	59,8	62,4	0,92	0,88	Global
Média					0,937	0,941	
Desvio Padrão					0,091	0,097	

Tabela 4 - Resultados da Análise de perfis Ue

Referência	Amostra	N_{exp}	N_{MSE}	N_{MRD}	N_{exp}/N_{MSE}	N_{exp}/N_{MRD}	Modo
Dat (1980)	PBC 14(I) A3	89,9	92,1	92,1	0,98	0,98	Global
	PBC 14(I) A5	85,9	78,2	78,2	1,10	1,10	Global
	PBC 14(I) A7	62,1	61,0	61,0	1,02	1,02	Global
	RFC 14(I) B2	86,7	97,3	97,3	0,89	0,89	Global
	RFC 14(I) B4	80,1	82,1	82,1	0,98	0,98	Global
	RFC 14(II) D5	153,5	120,0	120,0	1,28	1,28	Global
Moldovan (1994a)	P18-1	66,7	71,5	71,5	0,93	0,93	Global
	P18-2	67,7	75,5	75,5	0,90	0,90	Global
	P19-1	52,0	55,3	55,3	0,94	0,94	Global
	P19-2	49,0	55,6	55,6	0,88	0,88	Global
Young e Hancock (2003)	ST15A60	83,5	83,7	83,5	1,00	1,00	Local
	ST15A90	97,4	85,0	85,2	1,15	1,14	Local
	ST15A120	102,3	86,4	86,6	1,18	1,18	Local
	ST15A135	90,5	84,5	84,6	1,07	1,07	Local
	ST15A150	97,4	87,5	87,7	1,11	1,11	Local
	ST19A135	152,9	120,3	121,8	1,27	1,26	Local
	ST19A150	154,4	120,2	121,5	1,28	1,27	Local
	ST24A90	194,2	170,5	170,2	1,14	1,14	Local
	ST24A120	198,8	170,5	170,2	1,17	1,17	Local
	ST24A135	197,4	173,5	173,8	1,14	1,14	Local
Ortiz-Colberg (1981)	L4	55,2	50,2	50,4	1,10	1,10	Local
	L11	38,5	40,4	40,6	0,95	0,95	Local
	L12	52,9	48,5	48,5	1,09	1,09	Local
	L13	35,6	32,5	32,6	1,10	1,09	Local
	L15	99,6	83,0	83,0	1,20	1,20	Global
	L25	59,8	54,5	54,5	1,10	1,10	Global
	L29	97,9	93,4	93,4	1,05	1,05	Global
	L30	99,6	93,5	93,5	1,07	1,07	Global
	S1	67,2	57,2	57,4	1,17	1,17	Local
	S2	65,8	57,5	57,9	1,14	1,14	Local
Chodraui (2006)	Ue 125x50x25	168	170,5	172,0	0,99	0,98	Local
	Ue 125x50x25	132	136,2	136,7	0,97	0,97	Global
	Ue 125x50x25	75	86,5	86,5	0,87	0,87	Global
	Ue 125x50x25	63	59,4	59,4	1,06	1,06	Global
	Ue 125x50x25	282	225,6	225,6	1,25	1,25	Global
	Ue 125x50x25	173	179,5	179,5	0,96	0,96	Global
	Ue 125x50x25	106	124,6	124,6	0,85	0,85	Global
	Ue 125x50x25	108	91,6	91,6	1,18	1,18	Global
Média					1,066	1,065	
Desvio Padrão					0,120	0,119	

3.2 Perfis Uea

A Tabela 5 apresenta os dados do material e geométricos dos perfis Uea (perfil U enrijecido com borda adicional), cujos resultados experimentais foram obtidos de Young e Yan (2004). A borda adicional (b_s) tem por objetivo o acréscimo de resistência à compressão

do perfil. Por exemplo, se a amostra T1.5F80L500 não tivesse a borda adicional, a resistência nominal seria 8% menor. Através da nomenclatura de cada amostra é possível conhecer o comprimento aproximado da coluna ensaiada ($L = 500$ mm ou $L = 1000$ mm).

A norma brasileira ABNT NBR 14762 (2010) não apresenta equação para o cálculo do coeficiente de flambagem local (k_l) para este tipo de seção, na descrição do Método da Seção Efetiva (MSE).

Tabela 5. Dados dos perfis Uea

Referência	Amostra	f_y (MPa)	t (mm)	b_w (mm)	b_f (mm)	D (mm)	b_s (mm)
Young e Yan (2004)	T1.5F80L500	450	1,540	153,6	83,5	28,0	17,6
	T1.5F80L1000	450	1,540	153,6	83,5	28,0	17,6
	T1.5F120L500	450	1,526	153,4	123,8	28,1	17,4
	T1.5F120L1000	450	1,526	153,4	123,8	28,1	17,4
	T1.9F80L500	450	1,928	154,7	83,4	28,4	18,8
	T1.9F80L1000	450	1,928	154,7	83,4	28,4	18,8
	T1.9F120L500	450	1,921	155,1	123,3	28,2	18,9
	T1.9F120L1000	450	1,921	155,1	123,3	28,2	18,9

Os resultados experimentais obtidos de Young e Yan (2004) e os resultados das capacidades resistentes via MRD são apresentados na Tabela 6. Além disso, são mostrados os resultados da média e do desvio padrão, da razão entre a força experimental e a força teórica. Verificou-se que esta razão é próxima à unidade, e que os dados apresentaram baixa dispersão.

Tabela 6. Resultados da Análise de perfis Uea

Referência	Amostra	N_{exp}	N_{MRD}	N_{exp}/N_{MRD}	Modo
Young e Yan (2004)	T1.5F80L500	172,0	140,0	1,23	Local
	T1.5F80L1000	166,9	133,0	1,25	Local
	T1.5F120L500	164,9	163,2	1,01	Local
	T1.5F120L1000	159,3	160,0	1,00	Local
	T1.9F80L500	238,5	207,7	1,15	Local
	T1.9F80L1000	236,3	203,0	1,16	Local
	T1.9F120L500	233,7	237,8	0,98	Local
	T1.9F120L1000	231,2	235,4	0,98	Local
				Média	1,10
				Desvio Padrão	0,115

A Tabela 7 apresenta resultados para os coeficientes de flambagem local (k_l), sendo que os resultados fornecidos na coluna 1 foram obtidos através da aplicação da Eq. (7). Esta equação é a própria Eq. (6), quando se exprime k_l em função da força de flambagem local (N_l). Obtém-se N_l por meio da análise de estabilidade elástica, realizada pelo software

CUFSM. Para fins de comparação, a Tabela 7 apresenta resultados do coeficiente k_l pela Eq. (7) e através de equações para o MSE disponíveis na norma ABNT NBR 14762 (2010).

$$k_l = \frac{N_l}{\frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2) \left(\frac{b_w}{t}\right)^2} A} \quad (7)$$

Tabela 7. Resultados das Análise dos perfis Uea

Referência	Amostra	η (b_f/b_w)	b_s/b_w	k_l^1	k_l^2	k_l^3
Young e Yan (2004)	T1.5F80L500	0,544	0,115	5,43	5,44	5,40
	T1.5F80L1000	0,544	0,115	5,43	5,44	5,40
	T1.5F120L500	0,807	0,113	5,09	5,06	4,96
	T1.5F120L1000	0,807	0,113	5,09	5,06	4,96
	T1.9F80L500	0,539	0,122	5,45	5,45	5,41
	T1.9F80L1000	0,539	0,122	5,45	5,45	5,41
	T1.9F120L500	0,997	0,122	5,11	4,71	4,21
	T1.9F120L1000	0,997	0,122	5,11	4,71	4,21

Nota-se pela Tabela 7, que o valor de k_l obtido pela Eq. (7) e pela norma brasileira para perfil Rack apresentaram boa aproximação, sendo à relação k_l^1/k_l^2 , variando de 0,988 a 1,085. Os dois últimos valores da relação k_l^1/k_l^2 ficaram mais distantes da unidade, pois a relação η está próxima do limite estabelecido pela norma ($0,1 \leq \eta \leq 1,0$). Observou-se um aspecto semelhantes entre o perfil Uea e o perfil Rack: ambos possuem o mesmo número de elementos ou dobras (sete). Considerando-se as mesmas relações geométricas dos perfis analisados, a equação de k_l constante da tabela da ABNT NBR 14762 (2010) para perfis Rack pode ser aplicável aos perfis Uea.

4 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um estudo comparativo entre dois métodos de dimensionamento de perfis formados a frio, o Método da Resistência Direta (MRD) e o Método da Seção Efetiva (MSE). O MSE, que é um método desenvolvido à partir do MRD, mostrou-se eficiente na obtenção das resistências teóricas de perfis U e Ue submetidos à compressão. Através da comparação dos valores teóricos com os resultados experimentais, verificou-se que ambos podem ser utilizados em dimensionamentos de barra. Entretanto a aplicação do MSE está limitada a perfis com η entre 0,1 e 1,0, não sujeitos ao modo de instabilidade distorcional. Em todas as análises, verificou-se que os resultados da média da razão entre a

¹ Equação de k_l conforme a Equação 1

² Equação de k_l para seção Rack conforme ABNT NBR 14762 (2010)

³ Equação de k_l para seção Ue conforme ABNT NBR 14762 (2010)

força experimental e a força teórica se aproximaram do valor unitário e que a dispersão destes resultados foram relativamente baixas.

Um estudo do coeficiente de flambagem local (k_l) mostrou que a equação da norma para perfis Rack apresenta valores próximos aos obtidos pela Eq. (7). Sugere-se um estudo com inclusão de novos dados experimentais, para perfis Uea sujeitos à compressão, com o objetivo de verificar a aplicabilidade da referida equação de k_l para relação η inferior à 0,544

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES, à FAPEMIG, ao CNPq e ao PROPEC (UFOP).

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2003). *NBR 6355: Perfis estruturais de aço formados a frio – Padronização*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2010). *NBR 14762. Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio – Procedimento*. 2010
- Batista, E. M., 2010. Effective section method: A general direct method for the design of steel cold-formed members under local–global buckling interaction. *Thin-Walled Structures*. Vol. 48, pp. 345-356.
- Chodraui, G. M. B., 2006. *Análise teórica e experimental de perfis de aço formados a frio submetidos à compressão*. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos.
- Dat, D. T., 1980. The strength of cold-formed steel columns. Cornell University, Department of Structural Engineering Report No. 80-4, Ithaca, NY.
- Javaroni, C.E., 2015. *Estruturas de aço: dimensionamento de perfis formados a frio*. 1ª ed. Elsevier Editora Ltda.
- Moldovan, A., 1994. Compression tests on cold-formed steel columns with monosymmetrical section. *Thin-Walled Structures*, v.20, p.241-252.
- Ortiz-Colberg, R. A. (1981). *The load carrying capacity of perforated cold-formed steel columns*. M.S. Thesis, Cornell University, Ithaca, NY.
- Schafer, B.W., 2001. CUFSM 2.5 SOFTWARE, User Manual and Tutorials, disponível no site <www.ce.jhu.edu/bschafer/cufsm>.
- Schafer, B.W., 2002. Local, Distortional and Euler Buckling in Thin-Walled Columns. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, v. 28, n.3, pp. 289-299.
- Young, B., e Hancock, G. J., 2003. Compression tests of channels with inclined simple edge stiffeners. *ASCE Journal of Structural Engineering*, v.129, n.10, p.1403-1411.
- Young, B., e Rasmussen, K. J. R., 1998. Tests of fixed-ended plain channel columns. *ASCE Journal of Structural Engineering*, v.124, n.2, p.131-139.

Young, B., e Yan, J., 2004. Design of Cold-Formed Steel Channel Columns with Complex Edge Stiffeners by Direct Strength Method. *Journal of Structural Engineering*.