

EFFECTIVE SECTION METHOD APPLICATION TO COLD-FORMED STEEL LIPPED ANGLE COLUMNS

William Douglas de Paula Lopes

André Luis Riqueira Brandão

Washington Batista Vieira

wpdlopes6@gmail.com

andreriqueira@unifei.edu.br

vieira@unifei.edu.br

*Instituto de Engenharias Integradas, Universidade Federal de Itajubá - Campus de Itabira
Rua Irmã Ivone Drumond, 200, Distrito Industrial, 35903-087, Itabira, Minas Gerais, Brasil.*

Marcílio Sousa da Rocha Freitas

marcilio@ufop.edu.br

*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto,
Campus Universitário Morro do Cruzeiro, 35400-000, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.*

Abstract. In the structural design of the cold formed sections, the procedures described in NBR 14762:2010 are adopted. The Brazilian standard establishes three bar design methods: Direct Strength Method (DSM), Effective Section Method (ESM), and Effective Width Method (EWM). The DSM is developed by calculating the geometric properties of the gross section. In the ESM, the local buckling is considered through the effective section obtained directly, and not by the calculation of the effective widths of its elements, as in the case of the traditional Effective Width Method (EWM). The dispensation of numerical methods for elastic stability analysis constitutes a certain advantage of the ESM in relation to the DSM. For cold formed steel section on compression, an important step is to obtain the elastic buckling axial force, which in the case of ESM is obtained by means of an equation that is a function of the local buckling coefficient for the complete section. The NBR 14762:2010 presents expressions of this coefficient for open sections of the type U, Z and rack, besides hollow section. The objective of this work is to present a procedure to obtain the axial force of elastic buckling, for lipped angles on compression, in order to complement the Effective Section Method. In this context, an equation is present for the local buckling coefficient for lipped angle, as a function of the geometric properties of the cross section.

Keywords: Compression, Lipped Angles, Effective Section.

1 Introdução

A utilização de estruturas metálicas na construção civil apresenta tendência de crescimento devido às suas principais vantagens, como a rapidez na execução, a redução do volume de resíduos, a capacidade para vencer grandes vãos e a possibilidade de reaproveitamento da estrutura. Nas construções em aço, destacam-se os perfis laminados e os perfis formados a frio (PFF). Os PFF são elementos estruturais obtidos por meio de algum processo de conformação à temperatura ambiente, seja por dobramento ou por perfilagem. Em geral, as chapas finas de aço utilizadas em sua fabricação variam entre 0,40 e 4,75 mm. Segundo Chodraui [1] a aplicação dos perfis de aço formados a frio no âmbito da construção civil brasileira foi desenvolvida inicialmente por empresas de pequeno e médio portes do Estado de São Paulo. Atualmente são vários fabricantes no Brasil, sobretudo nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste.

A metodologia de fabricação dos perfis formados a frio, permite a obtenção de uma grande variedade de seções transversais, como mostra a Fig 1. Dentre as várias seções que podem ser criadas, está inclusa a seção cantoneira (Fig. 1d), que podem ser utilizadas como elemento de encaixe, elementos principais de sistemas treliçados ou contraventamentos. As cantoneiras são elementos de aço, cuja seção transversal é constituída por duas paredes convergentes num ponto, sendo geralmente designadas de perfis L. No caso de cantoneira em PFF, existe a possibilidade de inclusão de uma borda adicional com a finalidade de se aumentar a capacidade resistente destes elementos estruturais. Neste caso, a designação usual da seção cantoneira enrijecida é dada por perfil Le.

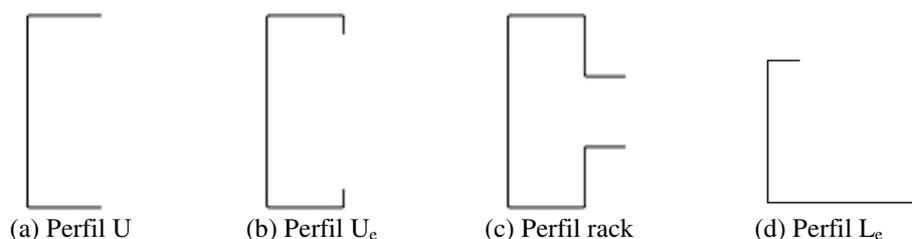


Figura 1. Variedade de perfis formados a frio

A norma ABNT [2] estabelece a formulação de três métodos para dimensionamento de PFF, tanto a compressão, quanto a flexão: o Método da Largura Efetiva (MLE), o Método da Resistência Direta (MRD) e o Método da Seção Efetiva (MSE). Este trabalho tem como objetivo apresentar um procedimento para a obtenção da força axial de flambagem elástica, para perfis cantoneira enrijecida de abas iguais, sob compressão, complementando o Método da Seção Efetiva.

2 Métodos de Dimensionamento

2.1 Barras submetidas à força axial de compressão

Como consequência da alta relação largura-espessura das paredes (elementos de placa), os perfis formados a frio estão sujeitos a fenômenos de instabilidade. Além dos modos de flambagem global por flexão e por flexo-torção, os PFF estão sujeitos aos modos de instabilidade local e distorcional. A flambagem local de placas caracteriza-se pela flexão dos elementos constituintes da seção transversal, sem que haja deslocamento das arestas comuns a tais elementos. A flambagem distorcional, por sua vez, caracteriza-se pela flexão de um ou mais elementos acompanhada pelo deslocamento das arestas comuns a esses elementos.

São mostrados na Fig. 2 os modos de flambagem local e distorcional em seção cantoneira submetida à compressão. Além disso, é possível verificar a influência da inclusão e da variação da dimensão da borda enrijecida no comportamento de seções cantoneira, Shifferaw e Schafer [3]. A

legenda da figura, indica a dimensão da borda em relação à dimensão da aba da seção, por exemplo, *lip*10 refere-se à uma seção cantoneira cuja borda mede 10% da aba.

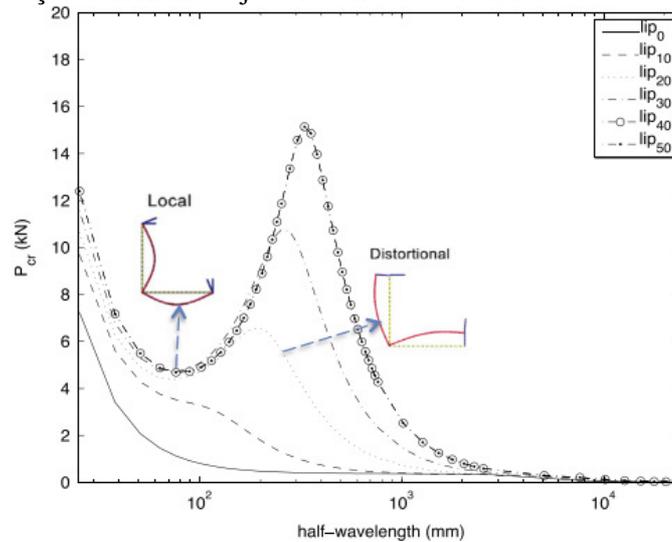


Figura 2. Curvas de flambagem de cantoneiras com enrijecedor de borda variando de 0 a 50% da aba

A força axial de compressão resistente característica $N_{c,Rk}$ deve ser calculada por:

$$N_{c,Rk} = \chi A_{ef} f_y \quad (1)$$

χ é o fator de redução da força axial de compressão resistente, obtido em função do índice de esbeltez reduzido associado à flambagem global λ_0 . O índice de esbeltez pode ser calculado conforme a Eq. 2.

$$\begin{aligned} \text{- para } \lambda_0 \leq 1,5 \quad \chi &= 0,658 \lambda_0^2 \\ \text{- para } \lambda_0 > 1,5 \quad \chi &= \frac{0,877}{\lambda_0^2} \end{aligned} \quad (2)$$

Sendo o índice de esbeltez reduzido λ_0 associado à flambagem global, dado por:

$$\lambda_0 = \left(\frac{A f_y}{N_e} \right)^{0,5} \quad (3)$$

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.

A_{ef} é a área efetiva da seção transversal da barra, calculada com base em uma das duas opções apresentadas a seguir: Método da Largura Efetiva (MLE) ou Método da Seção Efetiva (MSE).

2.2 Método de Largura Efetiva

Há décadas o Método da Largura Efetiva (MLE) tem sido empregado na obtenção de resistência de barras em perfis formados à frio. Trata-se de um método cuja formulação considera os efeitos de flambagem local em seções de chapas finas. Derivado da solução original para o comportamento pós-crítico de placas perfeitas proposto por von Karman, a equação de Winter, Eq. (4), é encontrada nas normas direcionadas ao cálculo estrutural de perfis formados à frio. O índice de esbeltez reduzido (λ_p) é dado pela Eq. (5).

$$b_{ef} = \frac{b \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p} \right)}{\lambda_p} \leq b \quad (4)$$

$$\lambda_p = \left(\frac{f_y}{\sigma_{cr}} \right)^{0,5} \quad (5)$$

onde b_{ef} é a largura efetiva de elementos de placa, b é a largura real do elemento (largura plana), f_y é a tensão de escoamento do aço, σ_{cr} é a tensão crítica de flambagem elástica do elemento. A tensão crítica de flambagem elástica de cada elemento da seção transversal, que considera individualmente uma placa com suas condições de contorno aproximadas e substituindo o elemento de placa real, é representada pela fórmula clássica teórica, a Eq. (6).

$$\sigma_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)(b/t)^2} \quad (6)$$

onde E e ν são o módulo de elasticidade longitudinal e o coeficiente de Poisson do material, respectivamente, t é a espessura do elemento de placa e k é o coeficiente de flambagem local do elemento de placa, que quantifica as condições de contorno e de carregamento da placa. A área efetiva (A_{ef}) pode ser diretamente calculada através da largura efetiva (b_{ef}), com a força de compressão aplicada no centroide da seção transversal bruta.

As bases do método da largura efetiva (MLE) para colunas tomados no presente trabalho estão prescritas nas normas AISI [4] e ABNT [2].

2.3 Método da Resistência Direta

O Método da Resistência Direta (MRD) é atualmente identificado com a formulação introduzida no AISI [4] onde se encontra uma solução desenvolvida e calibrada por Schafer [5], para colunas em perfis formados a frio. Na ABNT [2] esse método pode ser verificado no Anexo C. O MRD está baseado nas propriedades geométricas da seção bruta e em análise geral de estabilidade elástica que permita identificar todos os modos de flambagem e seus respectivos esforços críticos, dispensando o cálculo da área efetiva. Esse método pode ser empregado como alternativa para o cálculo da força axial de compressão resistente. No caso da flambagem global da barra, fórmulas incluídas no corpo principal da norma permitem a obtenção dos valores precisos da força axial de flambagem global elástica (N_e). As forças críticas de flambagem local e distorcional podem ser obtidas através de recurso computacional como por exemplo o CUFSM, que se baseia no Método das Faixas Finitas (Schafer [6]).

No 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, $N_{c,Re}$, $N_{c,Rl}$, $N_{c,Rdist}$, respectivamente, os quais devem ser calculados conforme a seguir.

- Flambagem global da barra:

$$N_{c,Re} = (0,658^{\lambda_0^2}) A f_y \quad \text{para } \lambda_0 \leq 1,5 \quad (7)$$

$$N_{c,Re} = \left(\frac{0,877}{\lambda_0^2} \right) A f_y \quad \text{para } \lambda_0 \geq 1,5$$

- Flambagem local:

$$N_{c,RI} = N_{c,Re} \text{ para } \lambda_l \leq 0,776$$

$$N_{c,RI} = \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_l^{0,8}}\right) \frac{N_{c,Re}}{\lambda_l^{0,8}} \text{ para } \lambda_l > 0,776 \quad (8)$$

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:

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

$$N_{c,Rdist} = \left(1 - \frac{0,25}{\lambda_{dist}^{1,2}}\right) \frac{Af_y}{\lambda_{dist}^{1,2}} \text{ para } \lambda_{dist} > 0,561 \quad (9)$$

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

$$\lambda_{dist} = \left(\frac{Af_y}{N_{dist}}\right)^{0,5} \quad (10)$$

onde,

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

2.4 Método da Seção Efetiva

Sendo Método da Seção Efetiva (MSE) um método direto de avaliação da força axial de compressão resistente ($N_{c,Rk}$), a flambagem local de placa é considerada a partir do comportamento real da seção transversal e considera, portanto, a interação entre as placas (Batista [7]). O MSE é um método aplicável a seções específicas e com algumas restrições geométricas (ABNT [2]). De acordo com Batista [7], 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. A área efetiva pode ser obtida com a Eq. (11). O índice de esbeltez reduzido (λ_p) da seção completa é definido pela Equação (12).

$$A_{ef} = A \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_p^{0,8}}\right) \frac{1}{\lambda_p^{0,8}} \leq A \quad (11)$$

$$\lambda_p = \left(\frac{\chi Af_y}{N_l}\right)^{0,5} \quad (12)$$

Sendo N_l , a força axial de flambagem local elástica, calculada por meio de análise de estabilidade elástica, ou, de forma direta, segundo a expressão:

$$N_l = k_l \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)(b_w/t)^2} A \quad (13)$$

Esta equação foi proposta em analogia à equação clássica de distribuição de tensões em placas, Eq. (6), e representa uma vantagem para o MSE em relação ao MRD, pela facilidade na obtenção da força axial de flambagem local elástica.

Batista [7] apresentou estudos paramétricos que possibilitaram a determinação dos coeficientes de flambagem local (k_l) para alguns tipos de seção. Tais coeficientes estão dispostos na norma ABNT ABNT [2] da seguinte forma:

- (a) Seção U simples e Z simples,
- (b) Seção U enrijecido, Z enrijecido e Seção cartola,
- (c) Seção *rack*,
- (d) Seção tubular retangular.

As equações de k_l dos quatro casos apresentadas na norma são funções do parâmetro η , definido pela relação entre a largura da seção (b_f) e sua altura (b_w).

3 Resultados

3.1 Coeficiente de flambagem local

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

Uma vez que o Método da Seção Efetiva (MSE) não contempla o modo de flambagem distorcional, as propriedades geométricas dos perfis analisados foram obtidas atendendo das relações $50 \leq b/t \leq 250$ e $0,1 \leq \eta \leq 0,5$. Todos os perfis analisados apresentaram um ponto de mínimo, correspondentes ao modo de flambagem local. Na Figura 3 são mostradas as curvas de flambagem de alguns perfis representativos, mostrando um ponto de mínimo como característica comum em termos de comportamento. Se for utilizado um valor unitário na análise via CUFSM, o ponto de mínimo correspondente é a força axial de flambagem local elástica (N_l) no eixo vertical do gráfico.

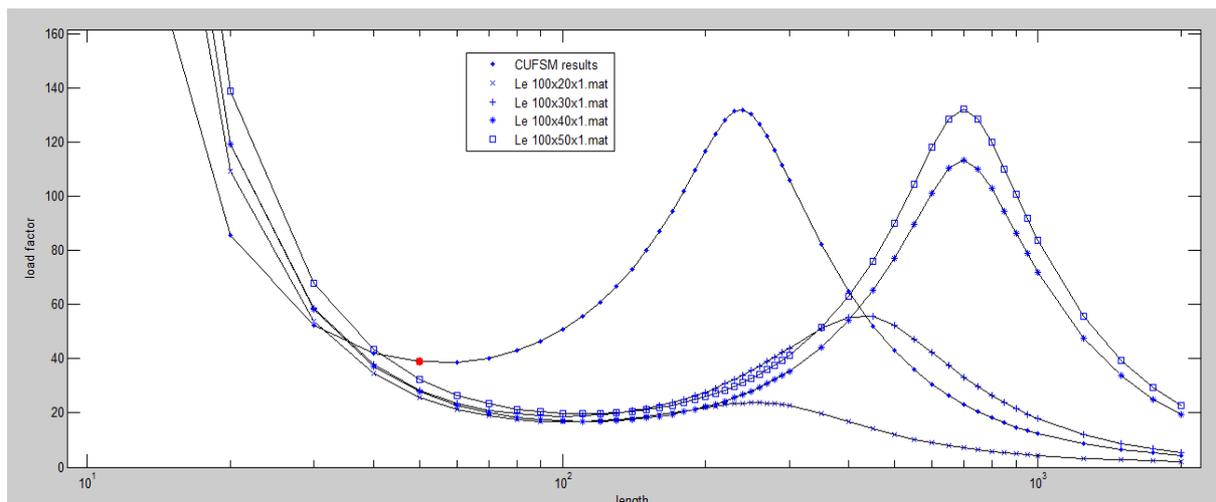


Figura 3. Curva de flambagem elástica obtida via CUFSM

Após a obtenção da força de flambagem local N_l , calcula-se o coeficiente de flambagem local k_l através da Eq. (14), oriunda da Eq. (13).

$$k_l = \frac{N_l}{\frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2) \left(\frac{b_w}{t}\right)^2} A} \quad (14)$$

A Tabela 1 apresenta as características geométricas da seção transversal dos perfis cantoneira enrijecida de abas iguais (L_e) modelados para análise de estabilidade elástica. Neste trabalho, o parâmetro η é definido pela relação entre a borda enrijecida D e a dimensão b da cantoneira. A tabela também apresenta os resultados de k_l e N_l .

Na Figura 4 é apresentado um gráfico com os resultados de k_l de cada seção cantoneira analisada em função do parâmetro η . Verificou-se que os valores de k_l apresentam maior dispersão próximo aos extremos da curva, o que justifica os limites adotados para a relação D/b ($0,1 \leq \eta \leq 0,5$). A Eq. (15) corresponde a um polinômio de terceiro grau que descreve a curva apresentada na figura, ou seja, a equação para o coeficiente de flambagem local para seção cantoneira enrijecida de abas iguais.

$$k_l = -10,32\eta^3 - 6,18\eta^2 + 4,21\eta + 3,69 \quad (15)$$

O coeficiente de determinação R^2 para a Eq. (15), que permite inferir qualidade da aproximação do modelo matemático à curva, foi de 0,952. Resultados de R^2 próximos de 1 significa bons resultados de ajuste.

Tabela 1. Perfis analisados e resultados de k_l e N_l

	Designação	$\eta (D/b)$	b/t	N_l (kN)	k_l
	Le 100x10x1,0	0,1	100	16,70	4,148
	Le 100x20x1,0	0,2	100	18,79	4,273
	Le 100x30x1,0	0,3	100	20,00	4,195
	Le 100x40x1,0	0,4	100	19,70	3,835
	Le 100x50x1,0	0,5	100	16,05	2,915
	Le 100x10x1,5	0,1	67	54,76	4,029
	Le 100x20x1,5	0,2	67	63,03	4,247
	Le 100x30x1,5	0,3	67	67,26	4,180
	Le 100x40x1,5	0,4	67	66,60	3,840
	Le 100x50x1,5	0,5	67	58,18	3,129
	Le 100x10x2,0	0,1	50	125,97	3,910
	Le 100x20x2,0	0,2	50	148,53	4,222
	Le 100x30x2,0	0,3	50	159,24	4,174
	Le 100x40x2,0	0,4	50	157,59	3,833
	Le 100x50x2,0	0,5	50	137,55	3,121
	Le 050x20x1,0	0,4	50	38,80	3,811
	Le 100x20x1,0	0,2	100	18,79	4,273
	Le 150x20x1,0	0,13	150	11,79	4,243
	Le 200x20x1,0	0,1	200	8,48	4,188
	Le 250x20x1,0	0,08	250	6,57	4,122
Le 044x20x1,0	0,45	44	42,91	3,507	
Le 044x20x2,0	0,45	22	30,85	3,152	

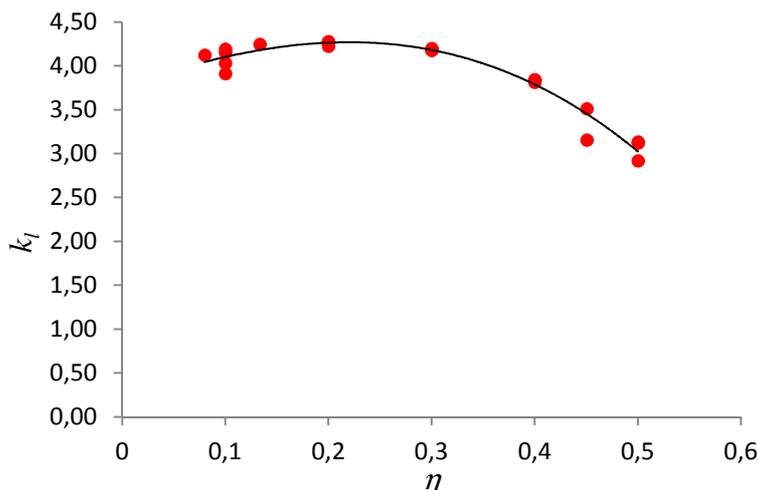


Figura 4. Coeficiente de flambagem local k_l em função do parâmetro geométrico η (D/b)

3.2 Exemplo de Aplicação

Com objetivo de verificar a eficácia da nova equação de k_l para o emprego do MSE em seção cantoneira enrijecida, adotou-se o perfil L_c 100x35x1,0, por este apresentar elevada esbelteza de placa e apresentar flambagem local até um determinado comprimento efetivo de flambagem ($KL=K_xL_x=K_yL_y$). Os métodos MSE e MRD foram utilizados na obtenção da força axial de compressão resistente característica ($N_{c,Rk}$), variando-se o comprimento efetivo de flambagem para as devidas comparações.

A Tabela 2 mostra resultados da comparação entre o MRD e o MSE, para o comprimento efetivo de flambagem até 2500 mm. O erro relativo ε apresentado na tabela, mostra que os resultados da capacidade resistente pelo MSE apresentaram boa aproximação em relação ao MRD. Tal aproximação entre os métodos de dimensionamento pode ser observada na Figura 5, onde é mostrada a variação da força axial de compressão resistente ($N_{c,Rk}$) em relação ao comprimento efetivo de flambagem KL .

Tabela 2. Parâmetros de cálculo e comparação entre os métodos de dimensionamento

KL (mm)	λ_o	χ	$N_{c,Re}$ (kN)	λ_l	$N_{c,Rl}$ (kN)	λ_{dist}	$N_{c,dist}$ (kN)	$N_{c,Rk}$ MRD (kN)	A_{ef}/A (%)	$N_{c,Rk}$ MSE (kN)	ε (%)
250	0,28	0,967	77,607	1,96	41,30	0,55	80,21	41,39	53,0	41,14	0,6
500	0,56	0,877	70,323	1,87	38,78	0,55	80,21	38,77	54,9	38,63	0,4
750	0,84	0,745	59,749	1,72	34,93	0,55	80,21	34,93	58,2	34,80	0,4
1000	1,11	0,594	47,691	1,54	30,20	0,55	80,21	30,20	63,1	30,09	0,4
1250	1,39	0,447	35,856	1,33	25,08	0,55	80,21	25,08	69,7	24,99	0,4
1500	1,66	0,320	25,670	1,13	20,13	0,55	80,21	20,13	78,1	20,06	0,3
1750	1,92	0,238	19,099	0,97	16,52	0,55	80,21	16,52	86,2	16,47	0,3
2000	2,18	0,185	14,833	0,86	13,92	0,55	80,21	13,92	93,5	13,88	0,3
2250	2,43	0,148	11,908	0,77	11,91	0,55	80,21	11,91	100,0	11,91	0,0
2500	2,68	0,122	9,816	0,70	9,82	0,55	80,21	9,82	100,0	9,82	0,0

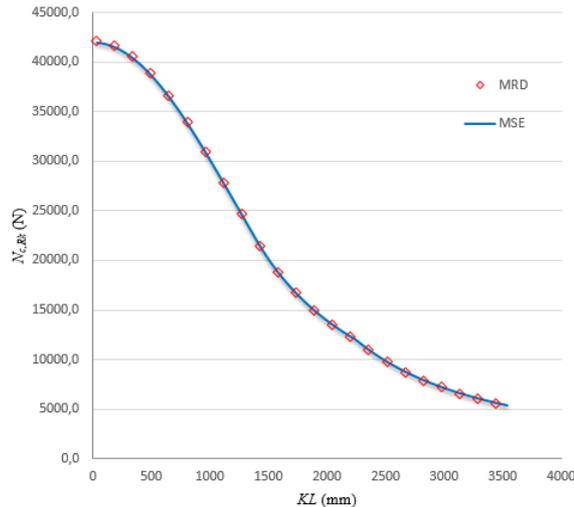


Figura 5. Curvas da capacidade resistente obtida pelos métodos de dimensionamento

4 Conclusão

Com o objetivo de validar uma alternativa para o dimensionamento de cantoneiras enrijecidas (L_e) de abas iguais pelo MSE, um estudo para obtenção do coeficiente de flambagem local elástica (k_l) foi desenvolvido. Inicialmente, foram realizadas análises de estabilidade elástica com auxílio do *software* CUFSM, de 22 seções teóricas propostas, com o parâmetro geométrico η , entre 0,1 e 0,5. Com as forças axiais de flambagem local elástica, foram obtidos os coeficientes de k_l de cada perfil proposto. A obtenção de k_l compreende uma importante etapa no dimensionamento de perfis formados a frio, pois permite a obtenção direta da área efetiva (A_{ef}). Após a obtenção da curva k_l versus η , um polinômio do terceiro grau resultante foi apresentado. O dimensionamento de perfil cantoneira pelo MSE, utilizando a equação proposta para k_l , apresentou bons resultados quando comparados aos resultados do dimensionamento pelo MRD.

A norma ABNT [2] apresenta o MSE, onde as equações para o coeficiente de flambagem local elástica estão disponíveis para 4 casos, definidos conforme o tipo de seção. O polinômio obtido neste trabalho poderá ampliar o espectro de aplicação do MSE para seções cantoneira enrijecidas de abas iguais, constituindo um quinto caso para o cálculo k_l .

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e à FAPEMIG pelo financiamento deste trabalho e à UNIFEI e à UFOP pela possibilidade de execução.

Referências

- [1] Chodraui, G. M. D. B. Análise Teórica e Experimental Submetidos à Compressão. Tese de Doutorado, USP, 2006.
- [2] ABNT, NBR 14762 "Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio – Procedimento", Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT, Rio de Janeiro, 2010.
- [3] Shifferaw, Y.; Schafer, B. W. Cold-formed steel lipped and plain angle columns with fixed ends. *Thin-Walled Structures*, v. 80, pp. 142–152, 2014.
- [4] AISI-S100-16. North American Specification for the Design of Cold-formed Steel Structural Members. Estados Unidos da América, 2016.

- [5] Schafer, B. W. Distortional buckling of cold-formed steel columns. *American Iron and Steel Institute*, Washington, D.C, 2000.
- [6] Schafer, B.W., 2019. CUFSM 5.01 Software. User Manual and Tutorials, www.ce.jhu.edu/bschafer/cufsm.
- [7] Batista, E. M., Effective section method: A general direct method for the design of steel cold-formed members under local-global buckling interaction. *Thin-Walled Structures*, v. 48, n. 4–5, pp. 345–356, 2010.