



## DIMENSIONAMENTO DE COLUNAS DE AÇO EM PERFIS FORMADOS A FRIO, DE SEÇÃO U ENRIJECIDO COM BORDA ADICIONAL, PELO MÉTODO DA SEÇÃO EFETIVA

### Design of cold-formed steel Columns, of lipped channel section with additional edge stiffeners by Effective Section Method

André Luis Riqueira Brandão (1)(P); Washington Batista Vieira (1);  
Tiago Antunes Faria Amaral (2); Marcilio Sousa da Rocha Freitas (3).

(1) Dr. Prof., Universidade Federal de Itajubá, Itabira – MG, Brasil.

(2) Graduando em Engenharia, Universidade Federal de Itajubá, Itabira – MG, Brasil.

(3) Dr. Prof., Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto - MG, Brasil

Email para Correspondência: andreriqueira@unifei.edu.br; (P) Apresentador

**Resumo:** As principais normas de dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio contemplam, para o dimensionamento de barra, o Método da Resistência Direta (MRD). O MRD baseia-se nas propriedades geométricas da seção bruta e em análise geral de estabilidade elástica, que permita identificar os modos de flambagem e seus respectivos esforços críticos. A norma brasileira prevê, além do MRD, o Método da Seção Efetiva (MSE), em que a flambagem local é considerada por meio das propriedades geométricas efetivas calculadas de forma direta. Esse método é vantajoso em relação ao MRD devido à facilidade de obtenção dos esforços de flambagem elástica local sem a necessidade de um programa computacional para análise numérica. No caso de perfis submetidos à compressão, uma importante etapa é a obtenção da força axial de flambagem elástica ( $N_l$ ), em função do coeficiente de flambagem local para a seção completa ( $k_l$ ). A norma brasileira apresenta expressões de  $k_l$  para seções U simples, Z simples, U enrijecido, Z enrijecido, Rack e Tubular Retangular. Este trabalho apresenta uma proposta para dimensionamento pelo MSE, para barras comprimidas de seção U enrijecido com borda adicional, a partir do desenvolvimento de uma equação para o coeficiente de flambagem local  $k_l$  em função de parâmetros geométricos da seção transversal.

**Palavras chaves:** colunas; aço; formado a frio; flambagem; seção efetiva.

**Abstract:** The main codes for the design of cold-formed steel structural members include the Direct Strength Method (DSM). The DSM is based on the geometric properties of the complete folded cross-section and on a general analysis of elastic stability, which allows the identification of the modes of buckling and their respective critical loads. The brazilian code predicts, in addition to the DSM, the Effective Section Method (ESM), in which local buckling is considered through the direct calculated effective geometric properties. This method is advantageous compared to the DSM because of the ease of obtaining the local elastic critical buckling loads without the need of a numerical analysis computer program. For cold-formed steel members in

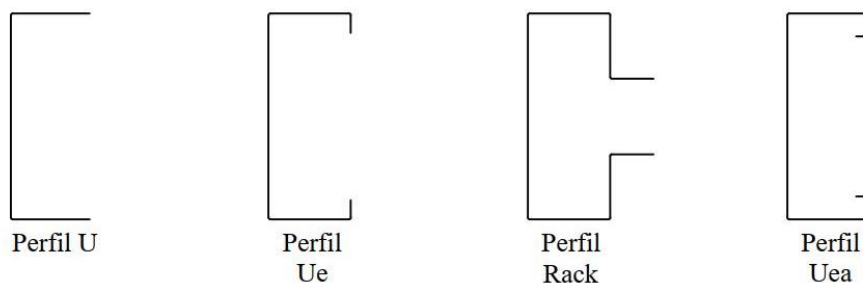
compression, an important step is the calculation of the elastic buckling axial force ( $N_l$ ), as a function of the local buckling coefficient ( $k_l$ ) for the full section area. The brazilian code presents  $k_l$  expressions for cold-formed steel C, lipped C, Z, lipped Z, rack and rectangular hollow sections. This work presents a proposal for the design of lipped C sections with additional edge stiffeners in compression, from the ESM. An equation for the local buckling coefficient  $k_l$  is presented as a function of cross-section geometric parameters.

**Keywords** columns; steel; cold-formed; buckling; effective section.

## 1 INTRODUÇÃO

Perfis de aço formado a frio (PFF), são obtidos a partir da dobra de chapas finas de aço a temperatura ambiente. Com este processo é possível obter perfis de seção aberta, com uma grande variedade de seções transversais trazendo enorme aplicabilidade para a construção civil, sendo uma alternativa aos perfis laminados a quente. Os PFF possuem notáveis vantagens, por se tratar de um material leve, de facilidade na fabricação, transporte e montagem. São perfis com alta de relação largura/espessura de suas paredes, em consequência disto surgem fenômenos de instabilidade como: flambagem local, distorcional e global (Schafer, 2002).

A norma brasileira ABNT NBR 14762 (2010), institui três métodos de dimensionamento para PFF. Método da largura efetiva (MLE), Método da seção efetiva (MSE) e o Método da resistência direta (MRD). Na presente norma brasileira existe uma limitação de dimensionamento aos tipos de seções transversais pelo MSE de perfis submetidos a compressão centrada, pois só existem equações para perfis já determinados na mesma (BATISTA, 2010). O objetivo deste trabalho é propor uma equação para o coeficiente de flambagem local  $k_l$  no MSE para perfil U enrijecido com borda adicional (Uea) submetido à compressão. O MSE apresenta praticidade de seu emprego no dimensionamento estrutural em relação ao MRD, por dispensar o uso de *software* de análise numérica. A Figura 1 ilustra alguns perfis usuais bem como o perfil Uea estudado no presente trabalho.



**Figura 1.** Tipos de seções em PFF

**Fonte:** Próprio autor

Neste trabalho foi utilizado o *software* CUFSM 5.01 (Schafer, 2018) para a obtenção da força axial de flambagem elástica  $N_l$ , uma vez que a equação para  $N_l$  é função de  $k_l$ .

## 2 MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO

### 2.1 Método da Resistência Direta

O emprego do Método da Resistência Direta (MRD) requer a determinação das cargas críticas de flambagem elástica e a aplicação dessa informação junto a uma série de curvas de resistência, determinando assim a capacidade resistente do perfil. Presume-se em tal procedimento que os modos de flambagem local e distorcional podem ser obtidos por meio das tensões de flambagem local elástica e as propriedades geométricas da seção transversal bruta do perfil. Este método exige um emprego de uma aplicação computacional para análise da estabilidade. Para a obtenção das resistências das barras utilizando-se 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, de mesmo modo que o tradicional Método da Largura Efetiva (MLE).

Para o cálculo utilizando 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,  $N_{c,Re}$ ,  $N_{c,Rl}$ ,  $N_{c,Rdist}$ , respectivamente.

- Flambagem global da barra:

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

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

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:

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

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

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 esbelteza 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

Sendo 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, 2010). O MSE é um método aplicável à seções específicas e com algumas restrições geométricas (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. Nesta metodologia não há demanda de recurso computacional para análise da estabilidade elástica, como no caso do MRD.

As Equações 4 e 5 permitem as análises 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,

$\chi$  é o fator de redução da força axial de compressão resistente, associado à flambagem local,  $\lambda_p$  é o índice de esbelteza 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 (módulo de elasticidade  $E$  e coeficiente de Poisson  $\nu$ ), da relação altura-espessura ( $b_w/t$ ), da geometria da seção transversal e do coeficiente de flambagem local ( $k_l$ ).

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

De acordo com a norma ABNT NBR 14762 (2010), o coeficiente de flambagem local ( $k_l$ ) para diferentes seções podem ser obtidas para 4 casos (Equação 7).

Caso a: Seção U e Z simples.

$$k_l = 4 + 3,4\eta + 21,8\eta^2 - 174,3\eta^3 + 319,9\eta^4 - 237,6\eta^5 + 63,6\eta^6$$

Caso b: Seção U e Z enrijecido e Seção cartola.

$$k_l = 6,8 - 5,8\eta + 9,2\eta^2 - 6\eta^3 \quad (7)$$

Caso c: Seção rack.

$$k_l = 6,5 - 3,0\eta + 2,8\eta^2 - 1,6\eta^3$$

Caso d: Seção tubular retangular.

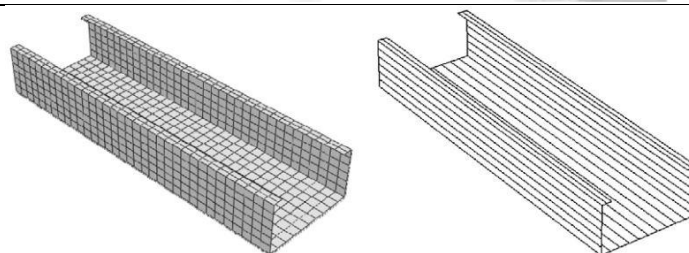
$$k_l = 6,6 - 5,8\eta + 8,6\eta^2 - 5,4\eta^3$$

Sendo  $\eta$  a relação  $b_f/b_w$ , aplicável para o intervalo entre 0,1 e 1,0.

## 2.3 Programa de análise numérica CUFSM

O programa computacional CUFSM desenvolvido por Schafer (2018) 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  $N_{dist}$ .

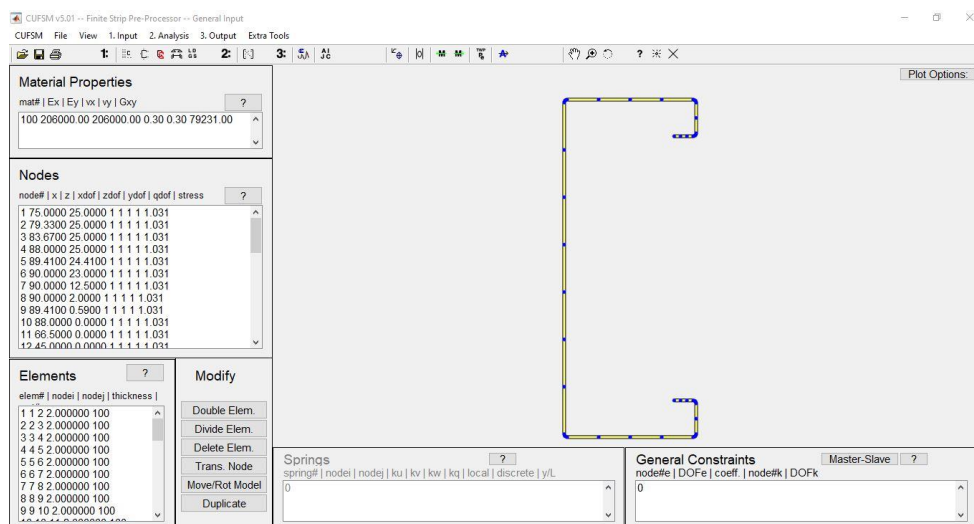
O Método das Faixas Finitas (MFF) foi desenvolvido por Y. K. Cheung em 1976 e foi utilizado para a análise de perfis laminados. Com o passar dos tempos, os estudos foram se aperfeiçoando e começando a sua aplicação em perfis formados a frio. Este método utiliza uma abordagem simplificada do Método dos 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 MEF e MFF**

Fonte: (Li; Schafer, 2010)

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 software CUFSM**

Fonte: Próprio autor

### 3 PROCEDIMENTO DE ANÁLISE E RESULTADOS

A norma brasileira ABNT NBR 14762 (2010) não apresenta equação para o cálculo do coeficiente de flambagem local ( $k_l$ ) para perfil U enrijecido com borda adicional (Uea), na descrição do Método da Seção Efetiva (MSE). Para a obtenção de uma equação de projeto pelo MSE para os perfis Uea foram analisados alguns destes perfis pelo MRD variando-se o fator  $\eta$ .

Com o auxílio do *software* CUFSM foram obtidos os valores de força de flambagem local  $N_l$  e em seguida, o valor de  $k_l$  foi obtido para cada perfil.

### 3.1 Propriedades geométrica dos perfis

As Tabelas 1 e 2 correspondem aos perfis utilizados na análise de estabilidade elástica e posterior obtenção dos coeficientes de flambagem local ( $k_l$ ). Todos os perfis se enquadram na restrição geométrica  $0,1 \leq \eta \leq 0,5$ .

A Tabela 1 apresenta os dados geométricos dos perfis Uea disponíveis na literatura. Os perfis obtidos de Young e Yan (2004) foram ensaiados experimentalmente e a tensão de escoamento do aço  $f_y$  foi igual a 450 MPa. Os perfis obtidos de Wang et al. (2016) foram submetidos a análise numérica e experimental, sendo a tensão de escoamento do aço  $f_y$  sendo igual a 345 MPa e 385,5 MPa, respectivamente.

**Tabela 1. Dados geométricas dos perfis encontrados na literatura**

Referência	Amostra	$t$ (mm)	$b_w$ (mm)	$b_f$ (mm)	$D$ (mm)	$b_s$ (mm)
Young e Yan (2004)	T1.5F80L500	1,5	153,6	83,5	28,0	17,6
	T1.5F80L1000	1,5	153,6	83,5	28,0	17,6
	T1.5F120L500	1,5	153,4	123,8	28,1	17,4
	T1.5F120L1000	1,5	153,4	123,8	28,1	17,4
	T1.9F80L500	1,9	154,7	83,4	28,4	18,8
	T1.9F80L1000	1,9	154,7	83,4	28,4	18,8
	T1.9F120L500	1,9	155,1	123,3	28,2	18,9
	T1.9F120L1000	1,9	155,1	123,3	28,2	18,9
Wang et al. (2016)*	C1L700a	2,0	229,6	90,9	24,1	14,4
	C1L1250a	2,0	227,5	91,1	25,3	15,0
	C1L1800a	2,0	227,5	91,2	25,5	14,7
	C1L1250+a	2,0	229,2	91,0	25,2	15,0
	C1L1000s1	1,0	230,0	90,0	25,0	15,0
	C1L1000s2	2,0	230,0	90,0	25,0	15,0
	C1L2000s1	1,0	230,0	90,0	25,0	15,0
	C1L2000s2	2,0	230,0	90,0	25,0	15,0
	C1L3000s1	1,0	230,0	90,0	25,0	15,0
	C1L3000s2	2,0	230,0	90,0	25,0	15,0
	C1L1000h1	1,0	330,0	90,0	25,0	15,0
	C1L1000h2	2,0	330,0	90,0	25,0	15,0
	C1L2000h1	1,0	330,0	90,0	25,0	15,0
	C1L2000h2	2,0	330,0	90,0	25,0	15,0
	C1L3000h1	1,0	330,0	90,0	25,0	15,0
	C1L3000h2	2,0	330,0	90,0	25,0	15,0

\* As amostras cuja as nomenclaturas terminam em 1 ou 2 foram submetidas à análise numérica.

A Tabela 2 apresenta os dados de alguns perfis teóricos incluídos na análise de estabilidade elástica e cálculo de  $k_l$ , onde a tensão de escoamento do aço  $f_y$  é 345 MPa. Desta forma, foi possível ampliar a variação do parâmetro geométrico  $\eta$ .

**Tabela 2. Dados geométricos dos perfis teóricos**

Referência	Amostra	$t$ (mm)	$b_w$ (mm)	$b_f$ (mm)	$D$ (mm)	$b_s$ (mm)
Perfis teóricos	Uea.25W50F1000s1	1,0	250,0	50,0	25,0	15,0
	Uea.25W62F1000s1	1,0	250,0	62,5	25,0	15,0
	Uea.25W85G1000s1	1,0	250,0	85,0	25,0	25,0
	Uea.25W112G1000s1	1,0	250,0	112,5	25,0	25,0
	Uea.25W125G1000s1	1,0	250,0	125,0	25,0	25,0
	Uea.25W150G1000s1	1,0	250,0	150,0	25,0	25,0
	Uea.25W162G1000s1	1,0	250,0	162,5	25,0	25,0
	Uea.25W175G1000s1	1,0	250,0	175,0	25,0	25,0
	Uea.85W40G1000s1	1,0	85,0	40,0	20,0	25,0
	Uea.85W50G1000s1	1,0	85,0	50,0	20,0	25,0
	Uea.65W40G1000s1	1,0	65,0	40,0	20,0	25,0
	Uea.65W50G1000s1	1,0	65,0	50,0	20,0	25,0

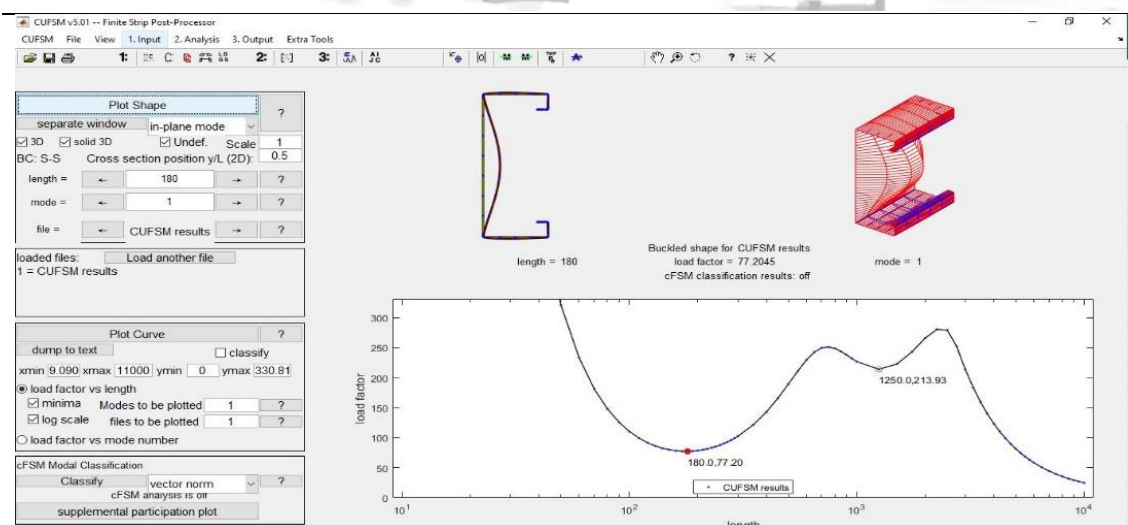
### 3.2 Análise dos perfis

O programa computacional CUFSM foi utilizado para a análise da estabilidade elástica. Uma vez que carga aplicada foi um valor unitário, a força axial de flambagem elástica é obtida em função do comprimento. A Figura 4 ilustra a resposta gráfica do CUFSM para o perfil C1L700a. O primeiro ponto de mínimo corresponde à força axial de flambagem local ( $N_l$ ) força axial de flambagem distorcional ( $N_{dist}$ ). Nas seções utilizadas na análise não houve registro de ocorrência do modo de flambagem distorcional, tendo em vista que foi adotada a mesma restrição geométrica da norma ABNT NBR 14762 (2010) para o parâmetro  $\eta$ .

Após a obtenção de  $N_l$ , foi obtido os valores de  $k_l$  para os perfis Uea representados na Tabela 3 a partir da Eq. (8). Esta equação é a própria Eq. (6), quando se exprime  $k_l$  em função da força de flambagem local ( $N_l$ ). A Tabela 3 apresenta os parâmetros geométricos da seção e resultados de  $k_l$ .

$$k_l = \frac{N_l}{\frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2) \left(\frac{b_w}{t}\right)^2 A}} \quad (8)$$





**Figura 4. Curva de flambagem elástica de um perfil Uea, obtida via CUFSM**

**Fonte: Próprio autor**

A Eq. (9), corresponde a um polinômio de terceiro grau que descreve a curva apresentada na Figura 5 para perfis Uea, ou seja, a equação para o coeficiente de flambagem local para perfil cantoneira enrijecida.

$$k_l = -4,2\eta^3 + 6,7\eta^2 - 4,7\eta + 6,7 \quad (9)$$

O coeficiente de determinação  $R^2$  para a Eq. (9), que permite inferir qualidade da aproximação do modelo matemático à curva, foi de 0,992. Resultados de  $R^2$  próximos de 1 significa bons resultados de ajuste.

A Figura 5 apresenta a curva de  $k_l$  ajustada a partir dos dados da Tabela 3. A Figura 6 mostra as curvas de  $k_l$  de todos os casos apresentados na ABNT NBR 14762 (2010), bem como curva obtida no presente trabalho para perfis Uea, conforme a Equação (9). O “Caso a” refere-se à seção U simples e Z simples; o “Caso b” à seção U enrijecido Z enrijecido e seção cartola; o “Caso c” à seção *rack*; o “Caso d” à seção tubular e o “Caso e”, como uma proposta para seção U enrijecido com borda adicional (Uea).

**Tabela 3. Valores de  $k_I$  e parâmetros geométricos para os perfis estudados**

Referência	Amostra	$\eta (b_f/b_w)$	$D/b_w$	$b_s/b_w$	$k_I$
Young e Yan (2004)	T1.5F80L500	0,544	0,182	0,115	5,430
	T1.5F80L1000	0,544	0,182	0,115	5,430
	T1.5F120L500	0,807	0,183	0,113	5,090
	T1.5F120L1000	0,807	0,183	0,113	5,090
	T1.9F80L500	0,539	0,184	0,122	5,450
	T1.9F80L1000	0,539	0,184	0,122	5,450
	T1.9F120L500	0,795	0,182	0,122	5,110
	T1.9F120L1000	0,795	0,182	0,122	5,110
Wang et al. (2016)	C1L700a	0,396	0,105	0,063	5,626
	C1L1250a	0,400	0,111	0,066	5,610
	C1L1800a	0,401	0,112	0,065	5,622
	C1L1250+a	0,397	0,110	0,065	5,596
	C1L1000s1	0,391	0,109	0,065	5,666
	C1L1000s2	0,391	0,109	0,065	5,635
	C1L2000s1	0,391	0,109	0,065	5,666
	C1L2000s2	0,391	0,109	0,065	5,635
	C1L3000s1	0,391	0,109	0,065	5,666
	C1L3000s2	0,391	0,109	0,065	5,635
	C1L1000h1	0,273	0,076	0,045	5,845
	C1L1000h2	0,273	0,076	0,045	5,788
	C1L2000h1	0,273	0,076	0,045	5,845
	C1L2000h2	0,273	0,076	0,045	5,788
	C1L3000h1	0,273	0,076	0,045	5,845
	C1L3000h2	0,273	0,076	0,045	5,788
Perfis teóricos	Uea.25W50F1000s1	0,200	0,100	0,060	6,010
	Uea.25W62F1000s1	0,250	0,100	0,060	5,899
	Uea.25W85G1000s1	0,340	0,100	0,100	5,748
	Uea.25W112G1000s1	0,450	0,100	0,100	5,589
	Uea.25W125G1000s1	0,500	0,100	0,100	5,520
	Uea.25W150G1000s1	0,600	0,100	0,100	5,408
	Uea.25W162G1000s1	0,650	0,100	0,100	5,347
	Uea.25W175G1000s1	0,700	0,100	0,100	5,280
	Uea.85W40G1000s1	0,471	0,235	0,294	5,585
	Uea.85W50G1000s1	0,588	0,235	0,294	5,427
	Uea.65W40G1000s1	0,615	0,308	0,385	5,382
	Uea.65W50G1000s1	0,769	0,308	0,385	5,175

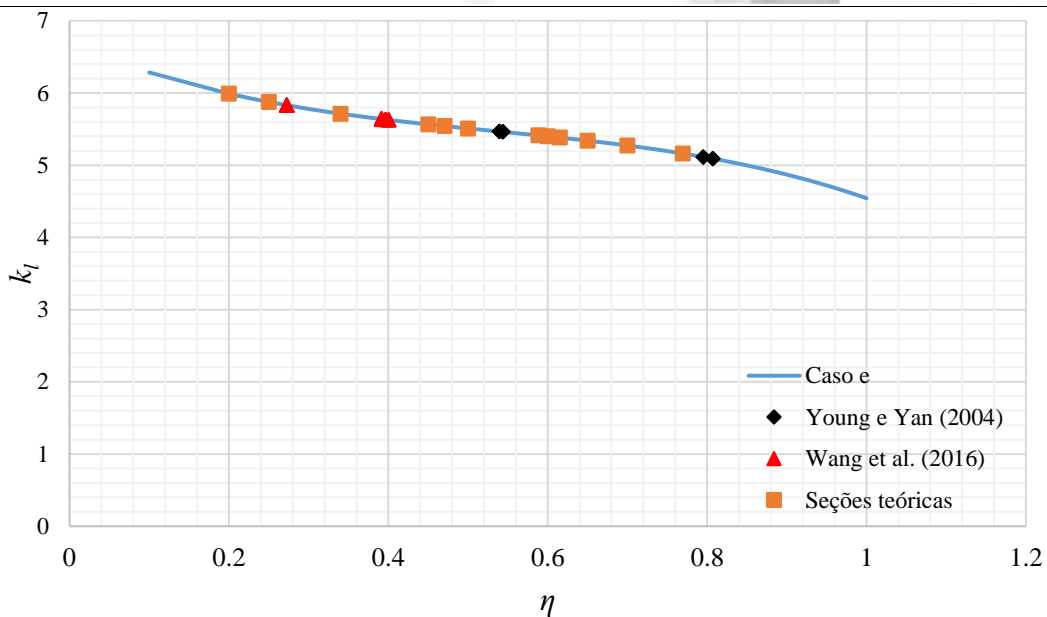


Figura 5. Curva de  $k_t$  para perfil Uea

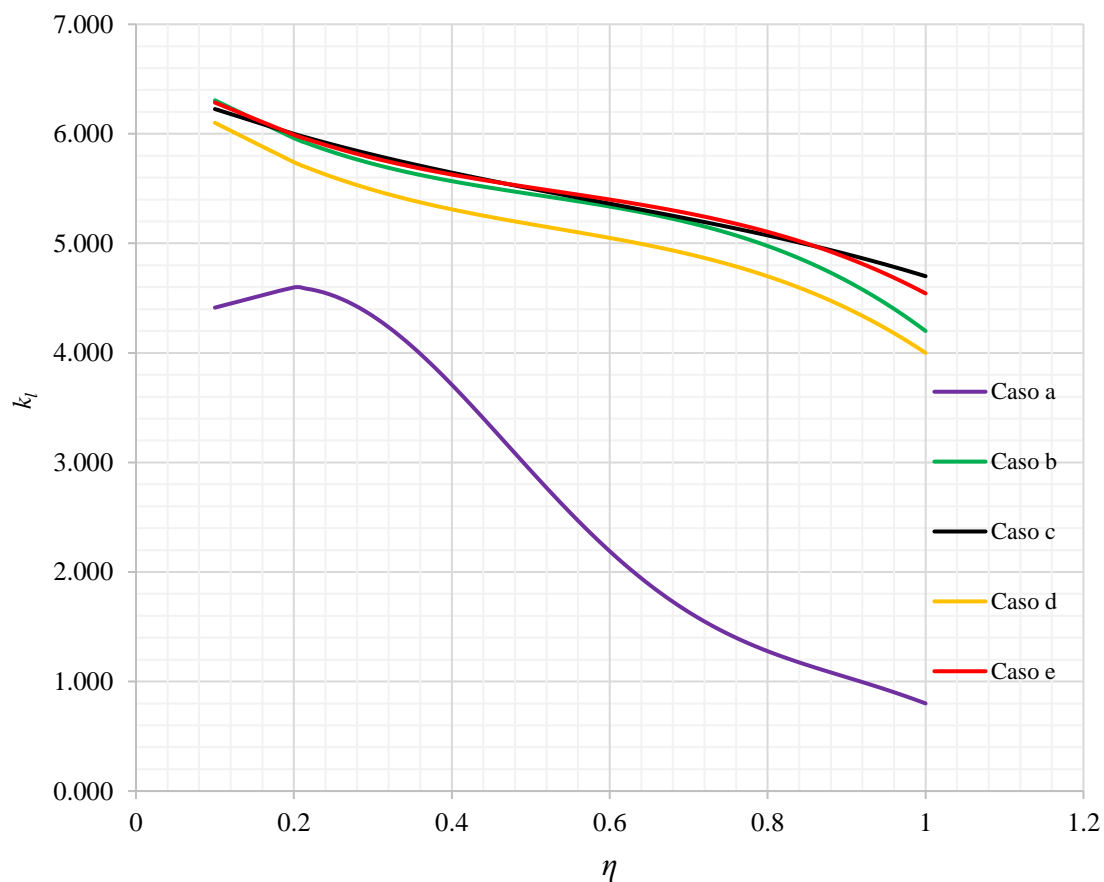


Figura 6. Curvas de  $k_t$  para os perfis da NBR 14762 (2010) e para o perfil Uea

### 3.3 Exemplo de aplicação

Com objetivo de verificar a eficácia da nova equação de  $k_l$  no MSE para seção Uea, foi dimensionado o perfil C1L1000h2 (Tabela 1) pelo MSE e pelo MRD, variando-se o comprimento de flambagem. Os dados geométricos desse perfil foram apresentados na seção 3.1. Os dados do material e as condições de apoio utilizadas no dimensionamento, são as mesmas descritas por Wang et al. (2016). Com relação ao eixo  $y$  que passa pelo centroide da seção transversal, os apoios foram considerados rotulados. Com relação ao eixo  $x$  que passa pelo centroide, os apoios foram considerados engastados. Os coeficientes de flambagem global adotados foram,  $K_y$  igual a 1,0 e  $K_x$  igual 0,5. Além disso, foi adotado o coeficiente de flambagem global por torção,  $K_z$ , igual a 0,5.

A Figura 7 apresenta um gráfico de força axial de compressão resistente característica ( $N_{c,Rk}$ ) em função do comprimento de flambagem em relação ao eixo de menor inércia ( $K_y L_y$ ). As curvas obtidas pelos métodos MSE e MRE apresentaram boa aproximação, inclusive para os comprimentos  $K_y L_y$  em que flambagem local se tornava predominante. A flambagem local de placa fica evidente à medida que a relação entre a área efetiva e a área bruta ( $A_{ef}/A$ ) mostrada na Tabela 4, torna-se inferior à 100%.

De acordo com Wang et al. (2016), através da análise numérica utilizando o ANSYS, do perfil C1L1000h2 com comprimento  $K_y L_y$  igual a 1000 mm, foi obtida uma capacidade resistente de 145,65 kN. De acordo com a curva do MSE (Figura 7), a capacidade resistente do perfil com  $K_y L_y$  igual a 1000 mm é cerca de 5% maior que o da referência. Este resultado, demonstra que a nova equação de  $k_l$  para seções Uea, no contexto da norma ABNT NBR 14762 (2010), produz bons resultados de dimensionamento de barras sob compressão.

**Tabela 4. Resultados do dimensionamento da seção C1L1000h2**

L (mm)	$N_e$ (kN)	$N_\ell$ (kN)	$N_{dist}$ (kN)	$N_{c,Re}$ (kN)	$N_{c,R\ell}$ (kN)	$N_{c,dist}$ (kN)	$N_{c,Rk}$ (MRD) (kN)	$N_{c,Rk}$ (MSE) (kN)	$A_{ef}/A$ (%)
100	281931,2	46,3	133,3	403,0	158,9	180,8	158,9	158,8	39,4
1000	2819,3	46,3	133,3	379,8	153,1	180,8	153,1	153,5	40,4
2100	639,3	46,3	133,3	309,7	134,6	180,8	134,6	135,0	43,6
4100	84,1	46,3	133,3	147,1	83,9	180,8	83,9	84,1	57,2
6100	50,2	46,3	133,3	66,4	50,0	180,8	50,0	50,2	75,5
8100	43,0	46,3	133,3	37,7	34,3	180,8	34,3	34,3	91,1
10100	27,6	46,3	133,3	24,2	24,2	180,8	24,2	24,2	100,0
12100	19,3	46,3	133,3	16,9	16,9	180,8	16,9	16,9	100,0
14100	14,2	46,3	133,3	12,4	12,4	180,8	12,4	12,4	100,0
15100	12,4	46,3	133,3	10,8	10,8	180,8	10,8	10,8	100,0
19100	7,7	46,3	133,3	6,8	6,8	180,8	6,8	6,8	100,0
22100	5,8	46,3	133,3	5,1	5,1	180,8	5,1	5,1	100,0

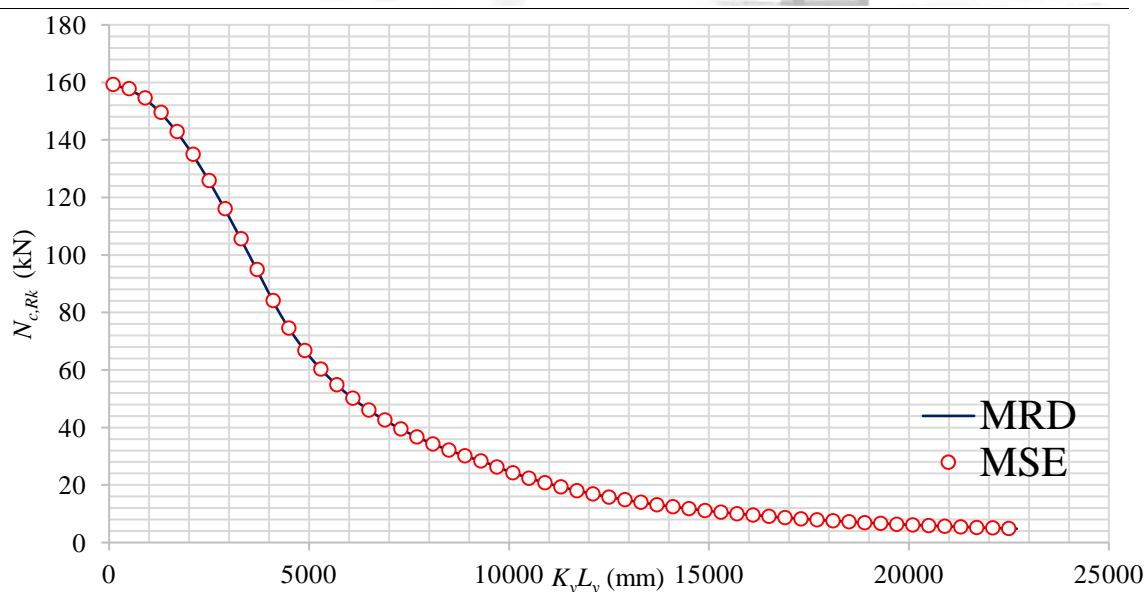


Figura 7. Dimensionamento do perfil C1L1000h2 pelos métodos MRD e MSE

## 4 CONCLUSÕES

O projeto perfis de aço formados a frio com seções não usuais com vários elementos de placa (ou dobras) pode ser bastante exaustivo, pelo tradicional Método da Largura Efetiva, especificado na norma ABNT NBR 14762 (2010). O Método de Resistência Direta, incorporado como uma dos anexos da norma brasileira, tem se mostrado eficaz, embora exija do calculista o emprego de recurso computacional para análise de flambagem elástica de seções diversas. O Método da Seção Efetiva, método genuinamente brasileiro em que a flambagem local é considerada por meio das propriedades geométricas reduzidas da seção transversal das barras, permite a obtenção da área efetiva de forma direta para um número limitado de seções, definidas em quatro casos na norma ABNT NBR 14762 (2010).

Uma proposta foi apresentada para o emprego do MSE no dimensionamento de perfis U enrijecidos com dobra adicional (Uea). Através do estudo de flambagem elástica de seções Uea, um ajuste de curva foi realizado à partir dos coeficientes de flambagem local, resultantes da análise de 36 perfis com parâmetros geométricos variados. Com base na curva obtida, uma equação de  $k_l$  em função do parâmetro  $\eta$  ( $b_s/b_w$ ) foi apresentada. Verificou-se que o dimensionamento pelo MSE, com auxílio da expressão proposta para  $k_l$ , apresentou boa aproximação com os resultados do dimensionamento pelo MRD, para as seções sujeitas ao modo de instabilidade local-global.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à UNIFEI e ao Grupo de Pesquisa de Materiais para Indústria da Construção Civil e Mecânica (MATCIME).



---

## REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT, 2010. NBR 14762, 2010. Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio – Procedimento.

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.

Javaroni, C.E., 2015. *Estruturas de aço: dimensionamento de perfis formados a frio*. 1ª ed. Elsevier Editora Ltda.

Li, Z., Schafer, B.W., 2010. Application of the finite strip method in cold-formed steel member design. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 66, n. 8-9, pp.971-980.

Schafer, B.W., 2018. *CUFSM 5.01 Software. User Manual and Tutorials*, [www.ce.jhu.edu/bschafer/cufsm](http://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.

Wang, C., Zhang, Z., Zhao, D., Liu, Q., 2016. Compression tests and numerical analysis of web-stiffened channels with complex edge stiffeners. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 116, p.29-39.

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