

Estudo da flambagem local de perfis U enrijecidos em situação de incêndio

Alexandre A. R. Costa¹, Rodrigo B. Caldas²Professor³,
Francisco C. Rodrigues⁴

Resumo

Este trabalho apresenta um estudo sobre a flambagem local de perfis formados a frio, com seção transversal do tipo U enrijecido, em situação de incêndio. Foi analisada analítica e numericamente a variação do fator de redução da resistência ao escoamento de seções sujeitas à flambagem local, $k_{\sigma, \theta}$, em função do índice de esbeltez da seção transversal do perfil. Os modelos analíticos considerados têm por base normas européia e brasileira. O modelo numérico tem por base o método dos elementos finitos. Com os resultados obtidos por meio do modelo numérico, verificou-se que estes divergiam dos resultados analíticos normalizados, que consideram $k_{\sigma, \theta}$ variando apenas com a temperatura. Valores teóricos do fator de redução foram obtidos e demonstraram uma correlação com o índice de esbeltez da seção transversal.

Palavras-chave: Perfil formado a frio. Flambagem local. Incêndio.

¹ Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. e-mail: alexandre.acipreste@yahoo.com.br

² Autor correspondente – Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Avenida Antônio Carlos, 6627, Bloco 1, Sala 4108, Pampulha. 31270-901 Belo Horizonte. BRASIL. Tel.: +55 31 3409 3589 Fax: +55 31 3409 1973. e-mail: caldas@dees.ufmg.br

³ Autor correspondente – Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Avenida Antônio Carlos, 6627, Bloco 1, Sala 4108, Pampulha. 31270-901 Belo Horizonte. BRASIL. Tel.: +55 31 3409 3589 Fax: +55 31 3409 1973. e-mail: caldas@dees.ufmg.br

⁴ Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. e-mail: francisco@dees.ufmg.br

1 Introdução

Os perfis formados a frio, por serem constituídos por chapas muito finas, estão sujeitos a fenômenos de instabilidades locais, como flambagem local e distorção. Em situação de incêndio, o conhecimento do comportamento desses perfis, principalmente em relação às instabilidades, ainda é inicial e, portanto, mais estudos são necessários.

Devido a esses fenômenos de instabilidade os perfis esbeltos atingem a carga crítica antes de ocorrer a plastificação, inviabilizando o uso do fator de redução para a resistência ao escoamento do aço em temperatura elevada relativo ao valor à temperatura ambiente, $k_{y,\theta}$, que é definido para uma deformação total de 2% na relação tensão *versus* deformação do aço em temperatura elevada.

Atualmente, a norma europeia EN 1993-1-2:2005 e o texto base de revisão ABNT NBR 14323:2011 propõem o uso do fator de redução $k_{\sigma,\theta}$ para o dimensionamento de perfis sujeitos a flambagem local, definido para uma deformação residual de 0,2%, na relação tensão *versus* deformação do aço em temperatura elevada. A Figura 1 apresenta a variação desse fator, do fator de redução $k_{y,\theta}$ e do fator de redução do módulo de elasticidade, $k_{E,\theta}$, em função da temperatura do aço.

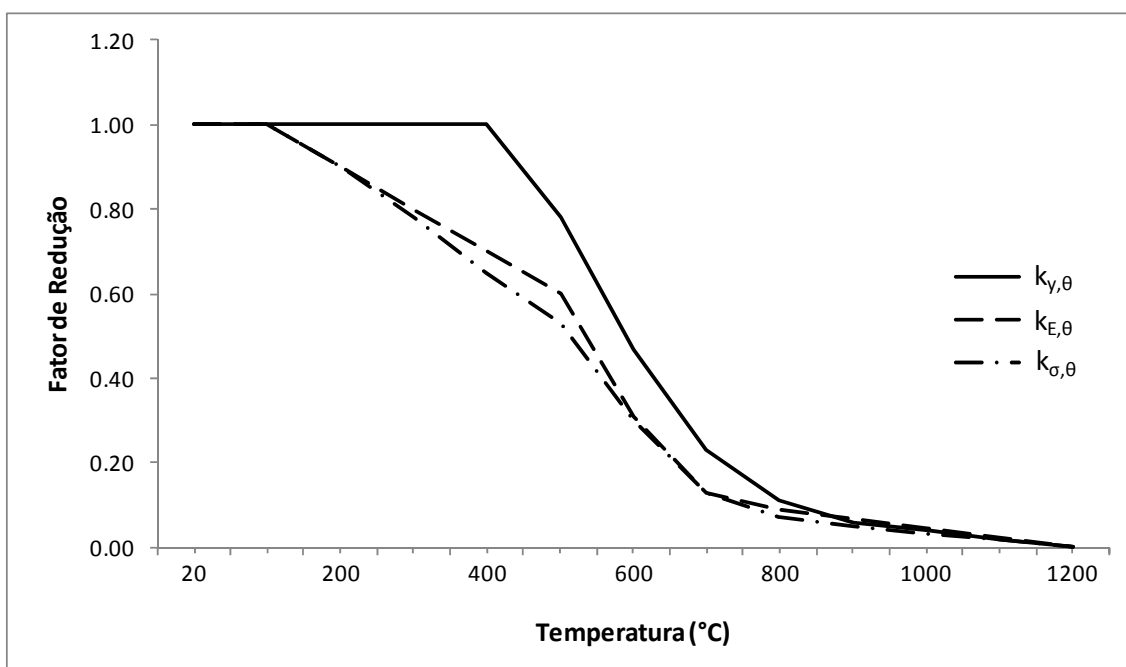


Figura 1: Variação dos fatores $k_{y,\theta}$, $k_{\sigma,\theta}$ e $k_{E,\theta}$ em função da temperatura do aço (EN 1993-1-2:2005).

Dessa forma, para seções sujeitas à flambagem local, ou seja, com tensão convencional de flambagem local elástica inferior à resistência ao escoamento do aço, utiliza-se o fator de redução $k_{\sigma,\theta}$; caso contrário, utiliza-se $k_{y,\theta}$. A relação entre os valores de $k_{\sigma,\theta}$ e $k_{y,\theta}$ pode chegar a 0,65 e, conforme a norma EN 1993-1-2:2005 e o projeto de revisão ABNT NBR 14323:2011, os fatores de redução $k_{\sigma,\theta}$ devem ser utilizados mesmo quando a tensão de flambagem local elástica é ligeiramente inferior à resistência ao escoamento do aço.

Observa-se que segundo as especificações normativas, ocorre uma descontinuidade no tratamento do fenômeno da flambagem local em situação de incêndio, uma vez que se utiliza o fator de redução $k_{y,\theta}$ em perfis onde não ocorre a flambagem local e o fator $k_{\sigma,\theta}$ em perfis nos quais a flambagem local ocorre antes do material atingir sua resistência ao escoamento. Deve-se enfatizar que o fator $k_{\sigma,\theta}$ é utilizado mesmo que a flambagem local ocorra na iminência do escoamento.

O objetivo do estudo apresentado neste trabalho é analisar a variação teórica do fator de redução $k_{\sigma,\theta}$ com o índice de esbeltez reduzido da seção transversal de perfis com seção transversal do tipo U enrijecido. Para realizar este estudo, foram analisados numericamente, para as temperaturas de 20°, 400°, 550° e 700° C, diversos perfis U enrijecidos previstos pela ABNT NBR 6355:2003.

2 Modelo analítico

Nas prescrições da ABNT NBR 14762:2010, para o cálculo da resistência última em temperatura ambiente, constam três métodos: o Método da Largura Efetiva (MLE), o Método da Seção Efetiva (MSE) e o Método da Resistência Direta (MRD).

O Método da Largura Efetiva considera os elementos constituintes da seção transversal do perfil como placas isoladas, realizando o cálculo da largura efetiva para cada elemento separadamente. Já o Método da Seção Efetiva e o Método da Resistência Direta consideram o comportamento da seção completa, apresentando um índice de esbeltez reduzido associado à seção do perfil,

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{\chi A f_y}{N_l}} \quad (1)$$

onde: χ é o fator de redução associado à flambagem global; A é a área bruta da seção transversal do perfil; f_y é a resistência ao escoamento do aço; N_l é a força axial de flambagem local elástica.

No Método da Resistência Direta, a carga crítica de flambagem local, N_l , em geral, é obtida via análise com base na teoria de estabilidade elástica, o que pode ser realizado via programas computacionais. Pelo Método da Seção Efetiva, para perfis U enrijecidos, a carga crítica pode ser determinada pela equação

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

na qual

$$k_l = 6,8 - 5,8(b_f / b_w) + 9,2(b_f / b_w)^2 - 6,0(b_f / b_w)^3 \quad (3)$$

é o coeficiente de flambagem local associado à seção transversal. Nas equações anteriores: b_w é a altura nominal da alma; b_f é a largura nominal da mesa; t é a espessura da chapa que constitui o perfil.

Em situação de incêndio, a norma EN 1993-1-2:2005 e o projeto de revisão ABNT NBR 14323:2011 permitem realizar os cálculos da área efetiva da mesma forma como é feito à temperatura ambiente, com as propriedades do material a 20°C. Como se observa na Figura 1, a razão entre os valores do fator de redução para a resistência ao escoamento do aço de perfis sujeitos à flambagem local, $k_{\sigma, \theta}$, e do fator de redução para o módulo de elasticidade, $k_{E, \theta}$, é próxima da unidade, o que justifica a aproximação adotada pelas normas. A resistência última em temperatura elevada é dada por:

$$N_u = \chi_{fi} k_{\sigma, \theta} A_{ef} f_y \quad (4)$$

onde: χ_{fi} é o fator de redução associado à resistência à compressão em situação de incêndio; A_{ef} é a área efetiva; f_y é a resistência ao escoamento do aço.

Como o objetivo deste trabalho é apenas o estudo do fenômeno da flambagem local, os efeitos relacionados à flambagem global foram eliminados tomando-se χ_{fi} igual à unidade.

3 Modelo numérico

Os perfis foram modelados via Método dos Elementos Finitos (MEF) no programa computacional Abaqus (Simulia, 2010), utilizando-se elementos de casca quadrangulares de 4 nós com integração reduzida. A malha foi refinada até que apresentasse uma adequada convergência para os resultados. Verificou-se também que a utilização da integração reduzida não levava a problemas de convergência além de manter os resultados adequados e minimizar os tempos de processamento.

Como condição de contorno utilizou-se um sistema bi-rotulado, com as extremidades comportando-se como corpo rígido.

Primeiramente, determinou-se a carga crítica de flambagem local do perfil submetido a uma carga concentrada aplicada no centro geométrico da seção transversal. Posteriormente, tomou-se a configuração deformada associada ao modo da flambagem local, Figura 2, e aplicou-se uma pequena imperfeição inicial ao perfil com um valor máximo igual à $b_w/1000$, sendo b_w a altura da alma.

Para determinação da carga última, executou-se uma análise não linear com incrementos de carga e de deslocamento. Com a intenção de minimizar os efeitos da flambagem global adotou-se um comprimento do perfil igual a duas vezes a altura da alma da seção transversal.

A não-linearidade do material foi implementada por meio da curva tensão *versus* deformação do aço, variando com a temperatura, segundo o EN 1993-1-2:2005.

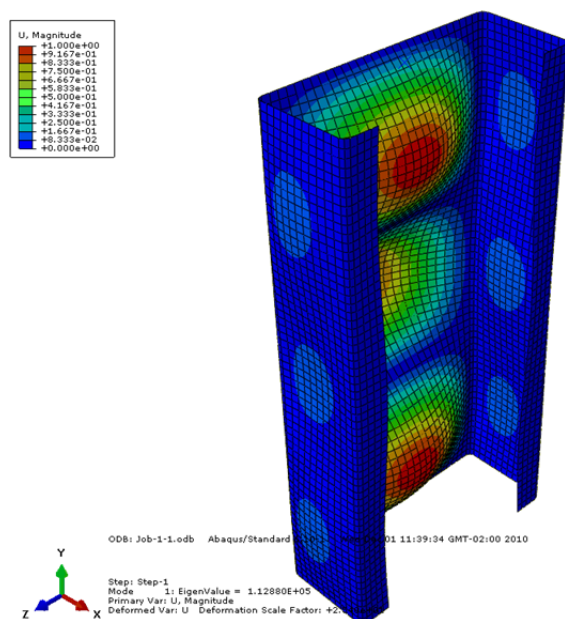


Figura 2: Modo de flambagem local.

Para validação do modelo numérico os resultados foram comparados com os experimentos realizados por Hanya e Kanno (2005), que analisaram perfis formados a frio com diferentes tipos de aços. As características dos perfis ensaiados assim como as cargas últimas obtidas experimentalmente por Hanya e Kanno (2005), $N_{u,e}$, para diversas temperaturas e os resultados numéricos obtidos no presente trabalho, $N_{u,n}$, são apresentados na Tabela 1. Na primeira coluna da Tabela 1, os perfis são nomeados da seguinte forma: b_w (altura nominal da alma) x b_f (largura nominal da mesa) x c (largura da parte plana do enrijecedor de borda) x t (espessura nominal da chapa).

Tabela 1: Validação do modelo numérico: resultados experimentais e numéricos.

Perfis	20°C			350°C			550°C		
	$N_{u,e}$	$N_{u,n}$	$N_{u,e}/N_{u,n}$	$N_{u,e}$	$N_{u,n}$	$N_{u,e}/N_{u,n}$	$N_{u,e}$	$N_{u,n}$	$N_{u,e}/N_{u,n}$
89x44.5x12x1.0	43,2	46,8	0,92	29,7	25,6	1,16	19,2	19,8	0,97
50x44.5x12x1.0	42,2	47,3	0,89	30	25,8	1,16	21,1	19,3	1,09
150x75x12x1.0	40,9	46,6	0,88	31,3	28,7	1,09	22,1	23,9	0,92
89x44x12x1.58	73,3	80,4	0,91	56,2	48,2	1,17	36,7	33,2	1,10
89x44x12x1.57	74,1	85,2	0,87	64,7	61,8	1,05	45,5	44,9	1,01

Observa-se que a razão entre os resultados experimentais e numéricos, $N_{u,e}/N_{u,n}$, varia de 0,87 a 1,16, comprovando a eficiência do modelo numérico adotado neste trabalho.

Adicionalmente, os resultados em temperatura ambiente, obtidos pelo Método da Largura Efetiva (MLE), conforme a ABNT NBR 14762:2010, foram comparados aos

resultados numéricos obtidos via Métodos dos Elementos Finitos (MEF). Os resultados, mostrados na Figura 3, foram obtidos para perfis com altura variando de 75 mm a 140 mm, apresentados pela ABNT NBR 6355:2003. Observa-se uma boa aproximação entre os resultados, notando-se que os valores analíticos obtidos via MLE são ligeiramente inferiores aos valores numéricos. Os mesmos perfis foram utilizados no estudo em temperatura elevada, conforme descrito a seguir.

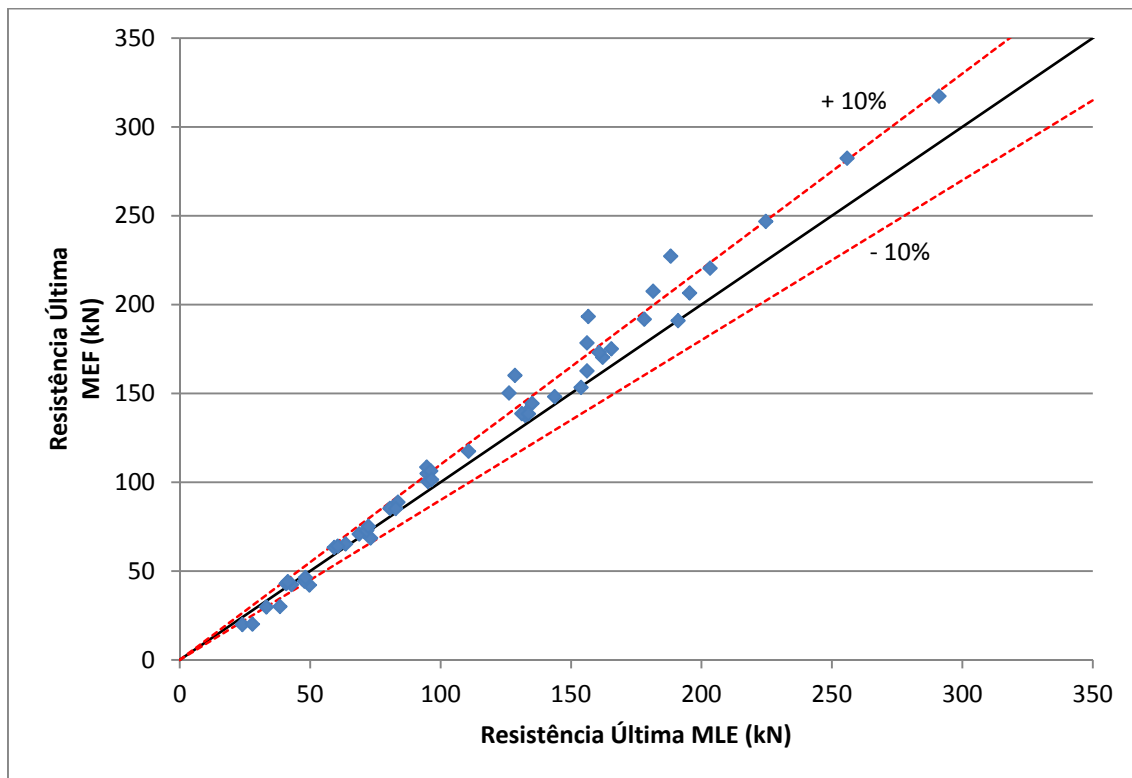


Figura 3: Comparação dos resultados da resistência última via MLE e via MEF, a 20 °C.

4 Resultados

Com o modelo numérico validado foram analisados os perfis com altura variando de 75 mm a 140 mm, previstos pela ABNT NBR 6355:2003. Os perfis foram escolhidos de acordo com as especificações da ABNT NBR 14762:2010 com o objetivo de não apresentar flambagem distorcional e com as demais considerações, por exemplo, para evitar a flambagem global, conforme apresentado no item anterior. Verificou-se que os resultados numéricos divergiam dos resultados obtidos com os modelos analíticos prescritos pela norma EN 1993-1-2:2005 e pelo projeto de revisão

ABNT NBR 14323:2011, que consideram $k_{\sigma,\theta}$ variando apenas com a temperatura. Partindo dessa observação, foram determinados valores teóricos para o fator de redução da resistência ao escoamento de seções sujeitas à flambagem local, $k'_{\sigma,\theta}$, que tornassem os resultados analíticos próximos dos resultados numéricos, utilizando-se a expressão

$$k'_{\sigma,\theta} = \frac{N_{u,n}}{A_{ef} f_y}, \quad (5)$$

onde $N_{u,n}$ são as capacidades resistentes obtidas numericamente via MEF, e A_{ef} é a área efetiva calculada em temperatura ambiente, conforme propõe as normas de dimensionamento em situação de incêndio.

As Figuras 4 (a), (b) e (c) apresentam a variação teórica do coeficiente $k'_{\sigma,\theta}$ com o índice de esbeltez da seção transversal para os perfis analisados conforme a metodologia apresentada, nas temperaturas de 400°C, 550°C e 700°C respectivamente.

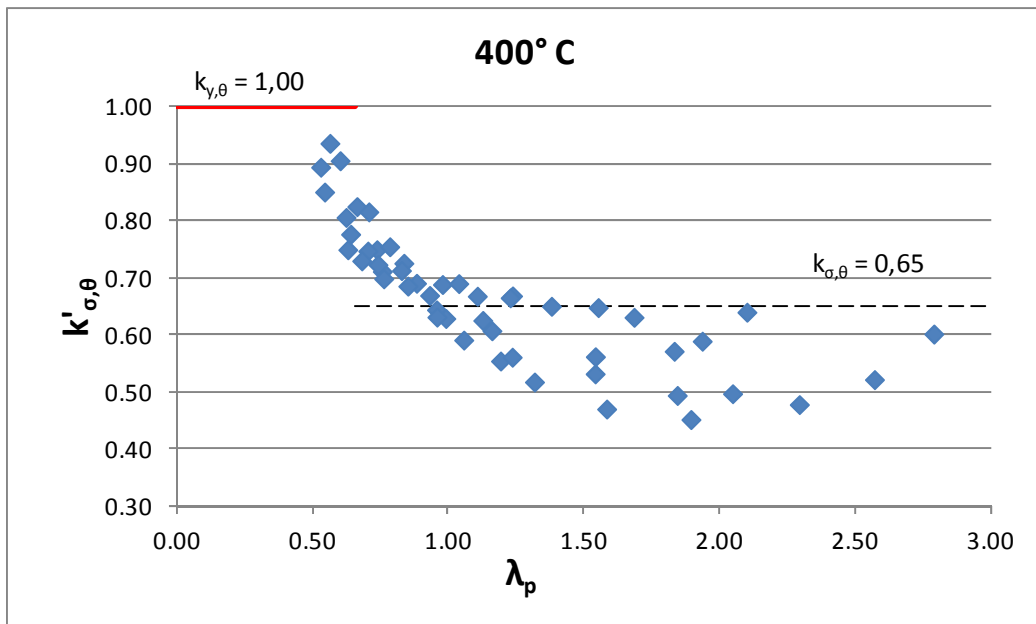
O índice de esbeltez foi calculado com as Equações 1, 2 e 3. Também verificou-se que, apesar de não serem apresentados neste trabalho, os resultados numéricos para a carga crítica de flambagem local são bem próximos dos resultados analíticos.

Os valores dos coeficientes $k_{\sigma,\theta}$ e $k_{y,\theta}$ segundo a norma EN 1993-1-2:2005, que são iguais aos valores especificados pelo projeto de revisão ABNT NBR 14323:2011, são indicados nos gráficos pelas retas horizontais tracejada e contínua respectivamente.

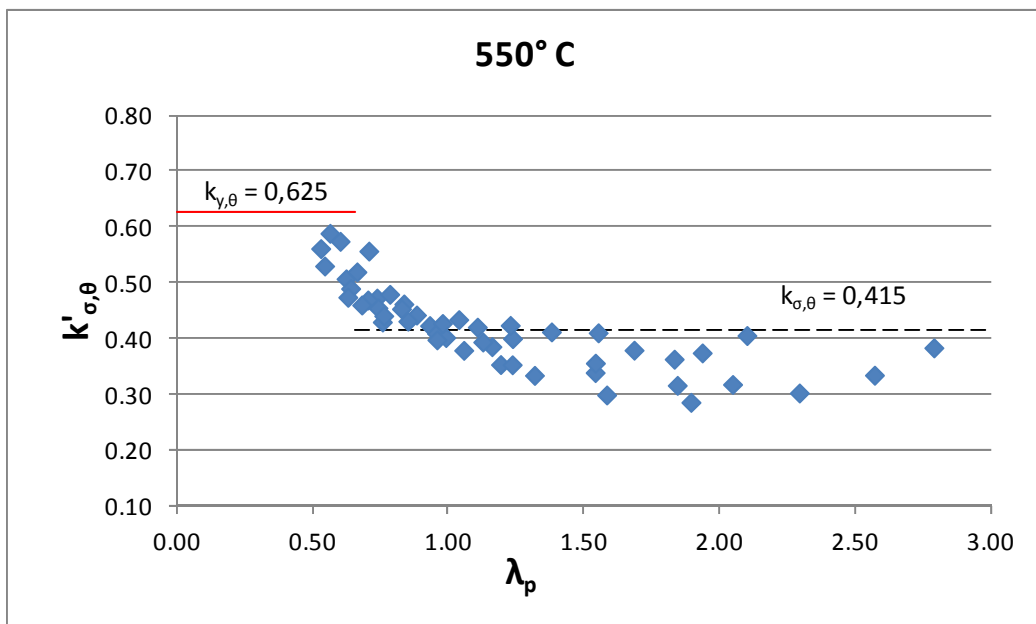
Conforme mostram as Figuras 4 (a), (b) e (c), pode-se notar a variação do fator de redução diferentemente do que propõe o EN 1993-1-2:2005 e o projeto de revisão ABNT NBR 14323:2011 que consideram o fator de redução constante para cada temperatura.

O fator de redução teórico $k'_{\sigma,\theta}$ tende ao valor do fator $k_{y,\theta}$ quanto menor é o índice de esbeltez da seção, e decai para valores maiores de esbeltez, tendendo aparentemente a um valor constante na média, inferior a $k_{\sigma,\theta}$.

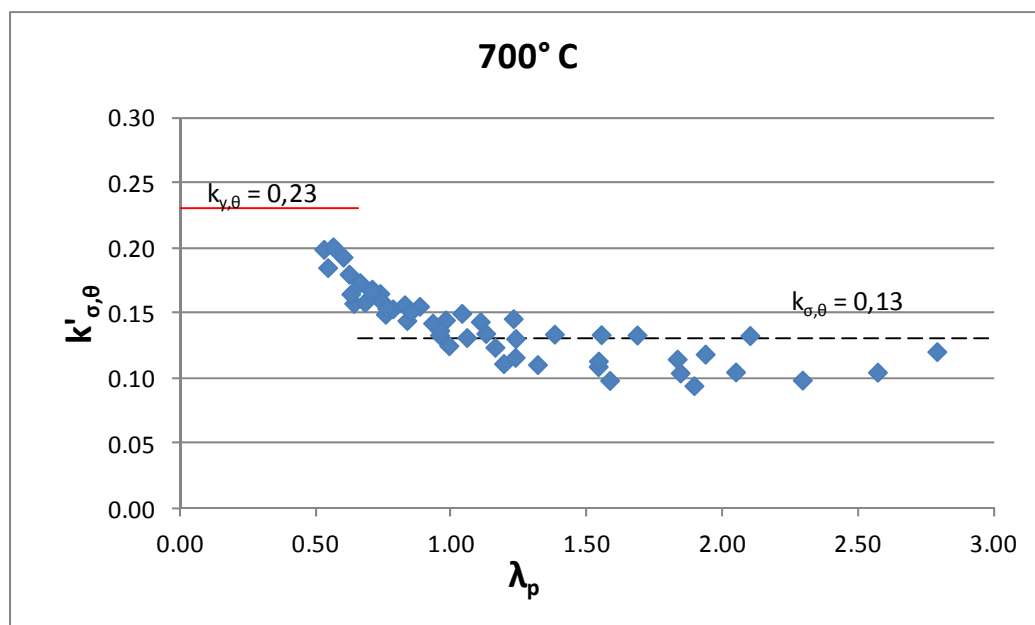
Considerando a variação do coeficiente $k'_{\sigma,\theta}$ somente com a esbeltez do perfil, nota-se que ocorre uma dispersão maior dos resultados com o aumento da esbeltez.



(a)



(b)



(c)

Figura 4: Variação do fator de redução teórico $k'_{\sigma,\theta}$ com esbelteza da seção transversal para as temperaturas elevadas: (a) 400°C; (b) 550°C; (c) 700°C.

5 Conclusões

Devido ao crescente uso de perfis formados a frio tanto em obras comerciais como em residenciais, incluindo as de interesse social no Brasil, é importante compreender o comportamento deste tipo de perfil em situação de incêndio. Neste trabalho, apresenta-se um estudo do comportamento da flambagem local em perfis de seção transversal U enrijecida submetido a altas temperaturas.

Analizou-se analítica e numericamente a variação do fator de redução da resistência ao escoamento de seções sujeitas à flambagem local, $k_{\sigma,\theta}$, em função do índice de esbelteza da seção transversal, λ_p . Os modelos analíticos considerados têm por base a norma europeia EN 1993-1-2:2005 e o projeto de revisão da norma brasileira ABNT NBR 14323:1999. O modelo numérico tem por base o método dos elementos finitos. Com os resultados obtidos numericamente, verificou-se que estes divergiam dos resultados analíticos normalizados, que consideram $k_{\sigma,\theta}$ variando apenas com a temperatura. Valores teóricos do fator de redução, denominados $k'_{\sigma,\theta}$, foram obtidos e demonstraram uma correlação com o índice de esbelteza da seção transversal.

Para valores de λ_p próximos de 0,5, observa-se que $k'_{\sigma,\theta}$ torna-se bem próximo de $k_{y,\theta}$ com relação $k'_{\sigma,\theta}/k_{y,\theta}$ em torno de 0,9. Observa-se que este valor de esbelteza é inferior ao limite que define os perfis que sofrerão flambagem local em temperatura

ambiente, em torno de 0,776. O valor 0,5 ainda fica bem abaixo, mesmo quando o limite 0,776 é multiplicado por 0,85, conforme previsto pelas normas de dimensionamento em situação de incêndio, o que levaria ao valor de 0,66 para o limite em temperatura elevada.

Para valores do índice de esbeltez entre 0,5 e 1,0 o fator de redução teórico apresenta-se superior ao fator de redução previsto pelas normas.

Já para valores de λ_p superiores a 1,0, em geral, os valores teóricos $k'_{\sigma,\theta}$ são menores do que os propostos pelo EN 1993-1-2:2005 e o texto base de revisão ABNT NBR 14323:2011, com a variação ocorrendo de forma mais tênue e aparentemente tendendo a um valor constante na média.

Nota-se também que, para valores mais elevados do índice de esbeltez reduzido, ocorre uma dispersão maior dos resultados, podendo indicar que somente a esbeltez da seção transversal, conforme adotado neste trabalho, não seja o melhor parâmetro para se correlacionar com a variação do fator de redução. Um estudo para determinar uma expressão matemática para a variação do fator de redução com a esbeltez da seção está sendo desenvolvido.

Agradecimentos

À FAPEMIG, à CAPES, ao CNPq e ao Programa Institucional de Auxílio à Pesquisa de Doutores Recém-Contratados da PRÓ-REITORIA DE PESQUISA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, que tornaram possível a elaboração e a apresentação deste trabalho.

Referências

ABNT NBR 14323:1999. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio.

ABNT NBR 14323:2011. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Texto-Base de Revisão de Norma - Dimensionamento de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios em Situação de Incêndio.

ABNT NBR 14762:2010. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por perfis formados a frio.

ABNT NBR 6355:2003. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Perfis Estruturais de Aço Formados a Frio - Padronização.

EN 1993-1-2:2005. Eurocode 3: Design of Steel Structures, Parte 1.2: General Rules, Structural Fire Design. European Committee for Standardization.

HANYA, K; KANNO, R. “Material Properties and Buckling Behavior of Cold -Formed Thin – Walled Steel Members Under Elevated Temperatures Due to Fire.” Euro Steel 2005, 5.1 – 77.

Simulia(2010).*Software ABAQUS/CAE, versão 6.10*.DessaultSystemesSimulia Corp., USA.

Local Buckling study of lipped channel profiles in fire

Abstract

This paper presents a study about the local buckling of cold formed lipped channel profiles in fire conditions. The variation of the strength reduction factor of steel for the design of class 4 sections at elevated temperatures, $k_{\sigma,\theta}$, depending on the slenderness ratio of the cross section was analyzed analytically and numerically. The analytical models considered are based on European and Brazilian standards. The numerical model is based on the finite element method. It was found that numerical results were different from the analytical results, which consider $k_{\sigma,\theta}$ varying only with temperature. Theoretical values of the reduction factor were obtained and a correlation established with the slenderness ratio of the cross section.

Keywords: Cold form profiles. Fire design. Local buckling.

1 Introduction

The cold formed profiles consist of very thin plates and are subject to local and distortional buckling. Under fire conditions, the knowledge about the behavior of these profiles is still limited and, therefore, more studies are needed.

Because of local buckling, slender profiles can reach the critical load before yielding of the section, invalidating the use of the reduction factor for the yield strength of steel at elevated temperature relative to the value at room temperature, $k_{y,\theta}$. The reduction factor $k_{y,\theta}$ is defined for a total strain of 2% in the stress-strain relationship of steel at elevated temperature.

Currently, the European standard EN 1993-1-2:2005 and the Brazilian standard review text ABNT NBR 14323:2011 specify the reduction factor $k_{\sigma,\theta}$ for the design of sections subject to local buckling, defined for a residual strain of 0.2% in the stress-strain relationship at elevated temperature. Figure 1 shows the variation of this factor, the reduction factor $k_{y,\theta}$ and the reduction for the modulus of elasticity, $k_{E,\theta}$.

Thus, for sections subjected to local buckling, i.e., with conventional elastic local buckling stress below the yield strength of steel, the reduction factor $k_{\sigma,\theta}$ is used. Otherwise, $k_{y,\theta}$ is employed. The ratio between $k_{\sigma,\theta}$ and $k_{y,\theta}$ can reach 0.65 and, according to EN 1993-1-2:2005 and the review text ABNT NBR 14323:2011, the reduction factor $k_{\sigma,\theta}$ should be used even when the elastic local buckling stress is slightly lower than the yield strength of steel.

It can be observed that according to the standards, there is a discontinuity in the treatment of local buckling at elevated temperatures, since the reduction factor $k_{y,\theta}$ is used in sections where local buckling doesn't occur while the factor $k_{\sigma,\theta}$ is used in sections where local buckling occurs just before the material reaches the yield strength.

The purpose of this work is to analyze the variation of the theoretical reduction factor $k_{\sigma,\theta}$ with slenderness ratio of the cross section, λ_p , in cold formed lipped channel profiles. To perform this study several profiles specified in the Brazilian standard ABNT NBR 6355:2003 were analyzed numerically, for the temperatures of 20 °C, 400 °C, 550 °C and 700 °C..

2 Conclusions

Due to the increasing use of cold formed profiles with very thin plates in commercial and residential constructions, it is important to understand the behavior of this type of profile in fire conditions. This paper presents a study of the local buckling in lipped channel profiles subjected at elevated temperatures.

It was analyzed analytically and numerically the variation of the reduction factor of yield strength of sections subjected to local buckling, $k_{\sigma,\theta}$, depending on the slenderness ratio of the cross section, λ_p . The analytical models considered are based on the European standard EN 1993-1-2:2005 and the Brazilian standard review text ABNT NBR 14323:2011. The numerical model is based on the finite element method. It was found that numerical results were different from the analytical results, which consider $k_{\sigma,\theta}$ varying only with temperature. Theoretical values of the reduction factor, called $k'_{\sigma,\theta}$, were obtained and a correlation was established with the slenderness ratio of the cross section.

For values of λ_p closer to 0.5, it was observed that the value of $k'_{\sigma,\theta}$ becomes very close to $k_{y,\theta}$. This value of slenderness is less than the limit that defines the sections that have local buckling at room temperature, around 0.776. The value 0.5 is still well below the limit even when the limit is multiplied by 0.85, as required by fire design standards, leading to a value of 0.66 for the limit at elevated temperatures.

For values of slenderness ratio between 0.5 and 1.0 the theoretical reduction factor is higher than the reduction factor provided by the standards.

To values of λ_p above 1.0, in general, the values of $k_{\sigma,\theta}$ are smaller than those proposed by the standards, with the variation apparently tending towards a constant value, on average.

It is important to notice, also, that, for higher values of the slenderness ratio, there is a greater dispersion of results, which may indicate that only the slenderness, as adopted in this work, is not the best choice to correlate with the variation of the reduction factor. A study to determine an expression for the variation of reduction factor with the slenderness of the section is being developed.