

Estudo numérico da instabilidade local de perfis estruturais de aço de seção aberta submetidos à compressão centrada

Ana Lydia R. Castro e Silva¹, Ricardo H. Fakury², Estevam B. Las Casas³, Dinar R. Z. Camotim⁴

Trabalho recebido em 04/04/2005 e aprovado para publicação em 13/06/2005.

Resumo

Neste trabalho, inicialmente, serão obtidos numericamente, por meio do programa comercial ABAQUS, os valores dos coeficientes de flambagem elástica das placas que formam as mesas e a alma dos perfis estruturais I e U de aço e as abas das cantoneiras, sob compressão centrada, levando em conta a esbeltez dos elementos componentes desses perfis. Em seguida, com tais coeficientes, serão determinados os valores da relação largura-espessura dessas placas abaixo dos quais não ocorre instabilidade local. Finalmente, os valores dos coeficientes de flambagem e da relação largura-espessura serão comparados com os resultados simplificados adotados pela norma brasileira de projeto de estruturas de aço, NBR 8800, que são iguais aos da especificação americana do AISC/LRFD.

Palavras-chave: estruturas de aço, instabilidade local, perfis I, U e cantoneiras, método dos elementos finitos.

¹ Prof. do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (DEES-EE/UFMG), Av. Contorno, 842/ 2º. andar. Centro. 30110-060. Belo Horizonte, MG, Brasil. Tel +55 31 3238-1027. E-mail: analydiarc@ufmg.br

² Prof. Dr. do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (DEES-EE/UFMG), Av. Contorno, 842/ 2º. andar. Centro. 30110-060. Belo Horizonte, MG, Brasil. Tel +55 31 3238-1972. E-mail: fakury@dees.ufmg.br

³ Prof. Dr. do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (DEES-EE/UFMG), Av. Contorno, 842/ 2º. andar. Centro. 30110-060. Belo Horizonte, MG, Brasil. Tel +55 31 3238-1028. E-mail: estevam@ufmg.br

⁴ Prof. Dr. do Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal. E-mail: dcamotim@civil.ist.utl.pt

1. Introdução

As barras integrantes das estruturas de aço possuem seção transversal normalmente composta por placas planas, delgadas, ligadas entre si ao longo de uma ou de duas de suas bordas longitudinais. Essas barras, quando submetidas à compressão centrada, podem entrar em colapso pela instabilidade das placas componentes, em um fenômeno conhecido como instabilidade local, sendo também referido muitas vezes como flambagem local.

O procedimento da norma brasileira de projeto de estruturas de aço atualmente em vigor, a NBR 8800 (1986), e também do texto-base de revisão dessa norma (2003), para consideração da instabilidade local, é o mesmo da especificação americana do AISC/LRFD (1999), e não considera com maior rigor a influência das condições de contorno das placas. Assim, são adotados coeficientes de flambagem elástica aproximados, situados entre as situações limites de vinculação das bordas das placas (livres, perfeitamente rotuladas ou perfeitamente engastadas).

Neste trabalho, serão obtidos numericamente, por meio do programa comercial ABAQUS (Hibbitt, Karlsson and Sorensen, 1998), que utiliza o método dos elementos finitos, valores mais corretos dos coeficientes de flambagem elástica (identificados pelo símbolo K_p), das placas componentes das mesas e da alma dos perfis I duplamente simétricos, de forma similar a Castro e Silva, Fakury and Camotim (2004), e dos perfis U de aço, levando-se em conta a esbeltez relativa entre esses elementos, e das abas das cantoneiras, levando-se em conta sua esbeltez (serão consideradas apenas as cantoneiras de abas iguais), sob compressão centrada. Com os coeficientes K_p , serão determinados os valores máximos da relação largura-espessura, $(b/t)_{máx}$, da alma e das mesas dos perfis I e U e das abas das cantoneiras abaixo dos quais não ocorre instabilidade local. Os valores de K_p e de $(b/t)_{máx}$ obtidos serão comparados com os resultados simplificados adotados pela norma brasileira NBR 8800 (1986).

Os perfis I são constituídos por uma placa vinculada nas duas bordas longitudinais (alma), e por quatro placas vinculadas apenas em uma borda longitudinal (meias-mesas), conforme se vê na Fig. 1-a. Os perfis U são similares aos I, porém com apenas duas mesas de um dos lados da alma, de acordo com a Figura 1-b. As cantoneiras de abas iguais são formadas por duas placas idênticas vinculadas apenas em uma borda longitudinal, segundo a Figura 1-c.

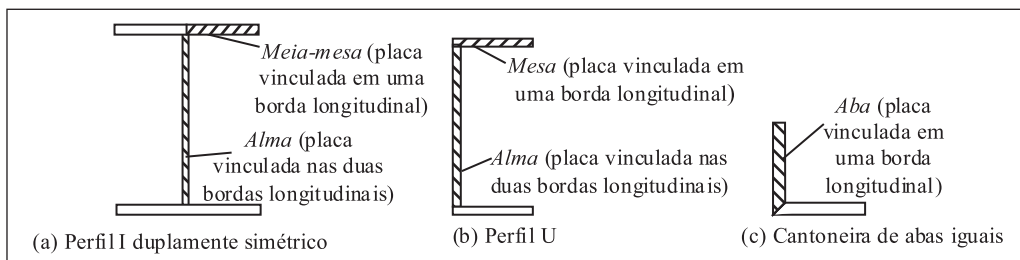


Figura 1: Elementos constituintes dos perfis estruturais

2. Bases teóricas da instabilidade elástica de placas

A instabilidade de placas tem sido exaustivamente estudada por diversos autores ao longo das últimas décadas, que sempre recorreram a métodos numéricos de análise. Com o avanço tecnológico e computacional, esse tipo de problema encontrou soluções mais consistentes, com grande aplicação do método dos elementos finitos (MEF), podendo-se citar Zienkiewicz and Taylor (1988) e Maquoi (1995) e do método das faixas finitas (MFF) e suas variantes, citando-se como referência Cheung (1976).

Tomando, como ilustração, uma placa retangular de espessura constante, perfeitamente plana, de material isotrópico, elástico, sem tensões residuais, perfeitamente rotulada em todas as bordas, com dimensões a e b , submetida à compressão uniaxial uniforme (Fig. 2) e assumindo como válidas as hipóteses de Kirchhoff para placas delgadas (Ugural 1981, Oñate 1992), pode-se obter a tensão crítica elástica pelo método de Lévy, encontrado corriqueiramente na literatura (Ugural 1981), chegando-se a:

$$\sigma_{cr} = K_p \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b} \right)^2 \quad (1)$$

onde K_p é o coeficiente de flambagem da placa, dado por

$$K_p = \left(m \frac{b}{a} + \frac{1}{m} \frac{a}{b} \right)^2 \quad (2)$$

e E é o módulo de elasticidade longitudinal do material, t a espessura da placa, ν o coeficiente de Poisson do material, a o comprimento das bordas longitudinais da placa, b o comprimento das bordas transversais carregadas da placa e m o número de semi-ondas que surgem na direção do carregamento.

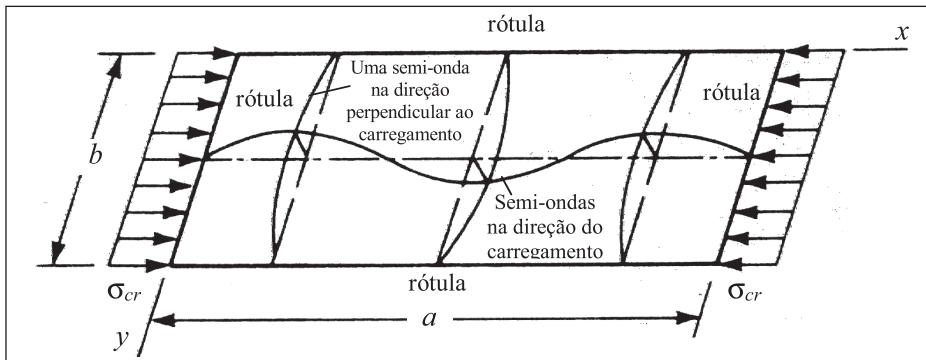


Figura 2: Semi-ondas de instabilidade local de placa submetida à compressão uniaxial

Na placa estudada, para $m = 1, 2, 3$, etc., obtêm-se os valores de K_p ilustrados no caso C da Figura 3 (as duas bordas longitudinais rotuladas), em função da relação entre os lados (a/b). Observa-se que K_p tende a um valor mínimo, igual a 4, independentemente do tipo de vinculação das bordas transversais carregadas. Para outras

condições de contorno das bordas longitudinais, são obtidos valores diferentes de K_p , também mostrados na Figura 3, sempre em função da relação a/b entre os lados da placa (Salmon and Johnson 1996). O tipo de vinculação (rótula ou engaste) das bordas transversais carregadas (largura b) só tem efeito significativo no valor da tensão crítica para valores muito pequenos de a/b , inferiores a aproximadamente 5, situação pouco usual nas placas pertencentes aos perfis na prática.

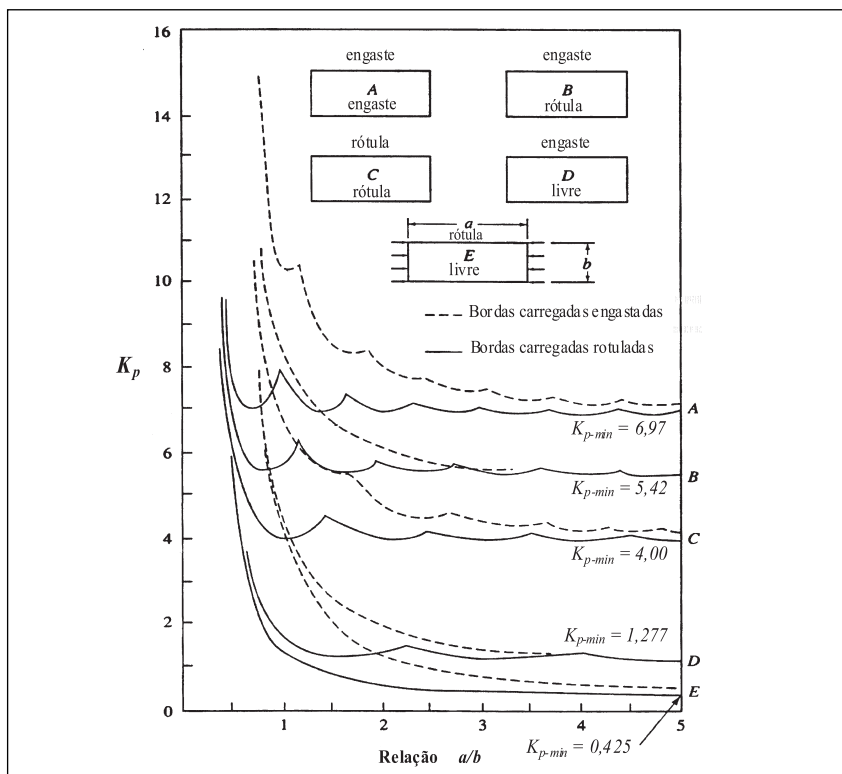


Figura 3: Valores de K_p para as condições de contorno usuais (Salmon and Johnson 1996)

Esses resultados têm sido comprovados por meio de estudos numéricos e normalmente são escolhidos como tópico de calibragem e aplicação de métodos de análise computacional para placas. Como exemplos, podem ser citados os trabalhos de Bradford and Azhari (1995, 1997).

3. Procedimento da NBR 8800 (1986)

Para valores da relação largura-espessura (b/t) que não superem $(b/t)_{máx}$, a instabilidade da placa não se manifesta, uma vez que o escoamento completo da seção transversal ocorre antes (Fig. 4). Para valores de b/t entre os limites $(b/t)_{máx}$ e $(b/t)_{sup}$, por causa das tensões residuais (σ_r), a instabilidade ocorre em regime elastoplástico, e

a tensão crítica é obtida através de uma curva de transição empírica (que pode, simplificada, ser substituída por uma reta). Para valores de b/t superiores a $(b/t)_{sup}$, a instabilidade ocorre em regime elástico e o valor da tensão crítica é dado pela Equação (1).

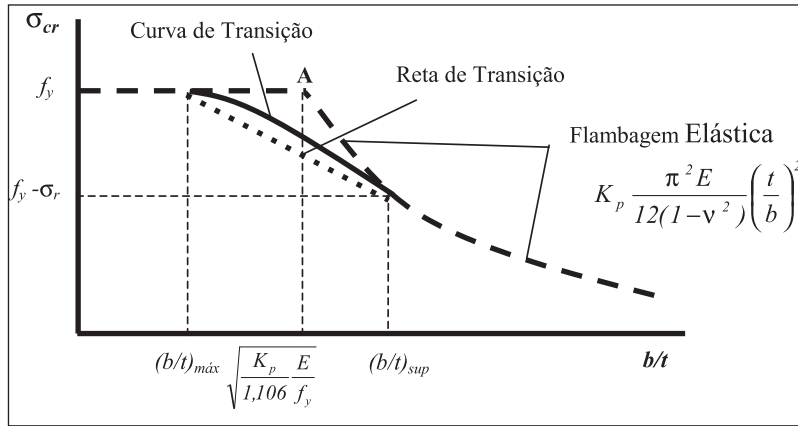


Figura 4: Relação entre a tensão crítica de instabilidade e a esbeltez da placa

Desprezando a influência das tensões residuais (σ_r) e supondo um diagrama ideal elastoplástico, não haveria instabilidade local da placa se:

$$\sigma_{cr} = K_p \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b} \right)^2 \geq f_y \quad (3)$$

Substituindo-se o coeficiente de Poisson, ν , por seu valor para o aço, igual a 0,3, obtém-se a seguinte condição para que não ocorra a instabilidade:

$$\frac{b}{t} \leq \sqrt{\frac{K_p E}{1,106 f_y}} \quad (4)$$

Essa condição está representada pelo ponto A na Figura 4, situado acima da curva de transição. Para levar em conta as tensões residuais, a NBR 8800 (1986) reduz o valor obtido na Equação (4), multiplicando-o pelo coeficiente empírico 0,7. Assim, o valor de $(b/t)_{máx}$, é dado por:

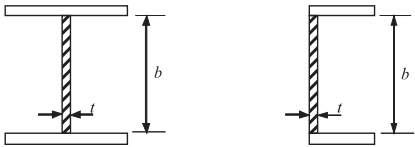
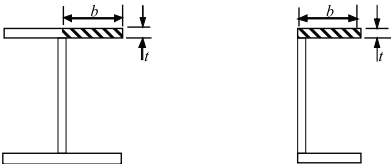
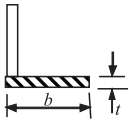
$$\left(\frac{b}{t} \right)_{máx} = 0,7 \sqrt{\frac{K_p E}{1,106 f_y}} = 0,6656 \sqrt{K_p \frac{E}{f_y}} \quad (5)$$

A Tabela 1 mostra os valores de K_p empregados pela NBR 8800 (1986) para alma e mesas dos perfis I e U e os respectivos valores de $(b/t)_{máx}$. Nota-se que essa norma adotou, procurando estar do lado da segurança, um valor de K_p mais próximo de uma borda longitudinal perfeitamente rotulada, no caso das mesas, ou das duas bordas longitudinais perfeitamente rotuladas, no caso da alma, usando aproximadamente a seguinte expressão de interpolação:

$$K_q = \frac{2,4K_{p,r} + K_{p,e}}{3,4} \quad (6)$$

onde $K_{p,r}$ é o coeficiente de flambagem da placa com borda(s) perfeitamente rotulada(s) e $K_{p,e}$ o coeficiente de flambagem da placa com borda(s) perfeitamente engastada(s). Para as abas das cantoneiras, a NBR 8800 (1986) emprega o valor de K_p das placas com uma borda longitudinal perfeitamente rotulada e outra livre, ou seja, 0,425 (caso E da Fig. 3). Desse modo, pela Equação (5), obtém-se $(b/t)_{\max}$ igual a $0,44(E/f_y)^{1/2}$, conforme se vê também na Tabela 1.

Tabela 1: Valores de K_p e $(b/t)_{\max}$ segundo a NBR 8800 (1986)

Descrição dos elementos	Tipo de vinculação das bordas longitudinais	K_q	$(b/t)_{\max}$
Alma de perfis I e U (vinculada em duas bordas longitudinais)	 Entre e (4,00) (6,97)	4,88	$1,47 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
Meias-mesas de perfis I e mesas de perfis U (vinculadas em uma borda longitudinal)	 Entre e (0,425) (1,277)	0,68	$0,55 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
Abas de cantoneiras (vinculadas em uma borda longitudinal)	 (0,425)	0,425	$0,44 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

4. Análise numérica da instabilidade local

4.1 Perfis I e U

4.1.1 Procedimento

Usando o programa ABAQUS (Hibbitt, Karlsson and Sorensen 1998), foi estudada a estabilidade linear de seções de aço em perfis I e U. Esse programa permite considerar a instabilidade como um procedimento de perturbação linear, levando à obtenção dos autovalores de instabilidade, que nessa análise correspondem às cargas críticas de bifurcação. Após avaliação dos elementos disponíveis, optou-se por usar o elemento de casca S4. Trata-se de um elemento com deformação de membrana, de integração completa, que pode ser usado tanto para cascas espessas como para cascas finas.

Foram tratadas separadamente duas situações distintas de ocorrência de instabilidade local. Na primeira, considerou-se a instabilidade local dos perfis condicionada pelas mesas e, na segunda, condicionada pela alma.

Nas duas situações, foram tomadas seções de extremidade simplesmente apoiadas com imposição de deslocamento vertical das mesas igual ao deslocamento vertical dos nós de encontro entre mesa e alma. Além disso, foi adotada uma relação a/b da placa condicionante da instabilidade igual a 8, para evitar problemas de interferência da vinculação de extremidade no comportamento da barra.

Para o estudo da instabilidade local condicionada pelas mesas, foram adotados perfis I e U com as dimensões de alma, mesas e comprimento longitudinal mostrados na Figura 5. Escolheram-se perfis com diversas esbeltezes de alma ($\lambda_w = b_w/t_w$), mantidas fixas, e para cada uma dessas esbeltezes variou-se a esbeltez das mesas ($\lambda_f = b_f/t_f$). As esbeltezes dos elementos foram estabelecidas variando-se a sua espessura, de modo que ficasse claramente caracterizado o desencadeamento da instabilidade pelas mesas. Na geração da malha de elementos finitos, foram usados 600 elementos de 24 mm x 25 mm na alma e 600 elementos em cada mesa nos perfis I e 300 nos perfis U.

Para a instabilidade local condicionada pela alma, as dimensões adotadas para os perfis I e U estão também mostradas na Figura 5. Foram escolhidos perfis com várias esbeltezes de mesa ($\lambda_f = b_f/t_f$), mantidas fixas e, para cada uma dessas esbeltezes, variou-se a esbeltez da alma ($\lambda_w = b_w/t_w$). As esbeltezes das mesas foram escolhidas de modo que ficasse claramente caracterizado o desencadeamento da instabilidade pela alma. Na geração da malha de elementos finitos, foram usados 576 elementos de 50 mm x 25 mm na alma e 576 elementos em cada mesa nos perfis I e 288 nos perfis U.

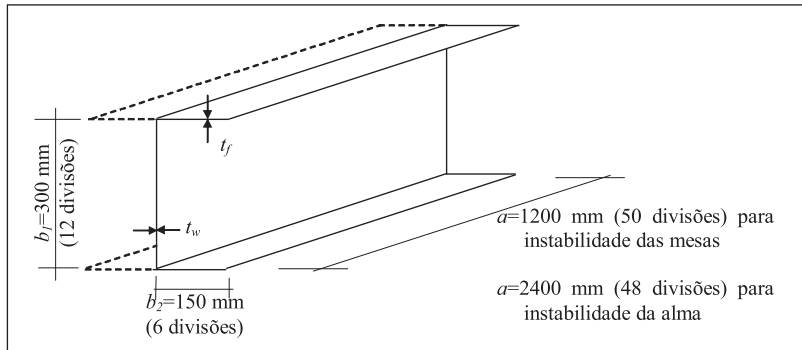


Figura 5: Dimensões dos Perfis I e U

Os valores de K_p foram determinados por meio da Equação (1), na qual a relação b/t foi adotada como a esbeltez do elemento condicionante da instabilidade (mesas ou alma) e o valor da tensão crítica foi obtido por meio do programa computacional. Por fim, foram obtidos valores parametrizados do coeficiente de flambagem elástica K_p em função da relação entre as esbeltezes da alma e das mesas dos perfis. Esses valores foram ajustados e utilizados no cálculo dos valores de $(b/t)_{max}$ por meio da Equação (5).

Na Fig. 6 pode ser vista a instabilidade local típica das mesas de um perfil I e de um perfil U, obtidas com o programa ABAQUS (Hibbitt, Karlsson and Sorensen 1998) e na Figura 7 a instabilidade local típica da alma desses perfis.

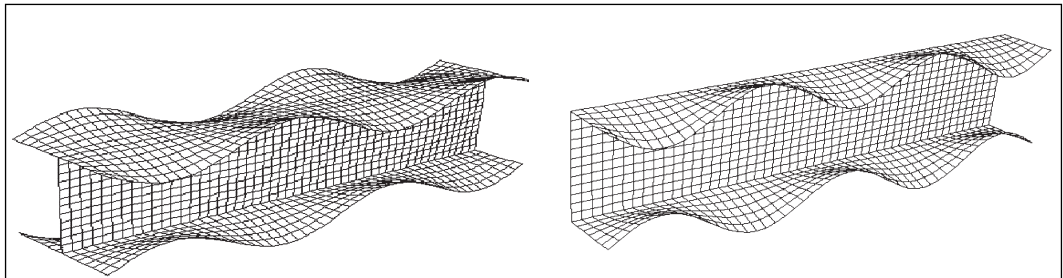


Figura 6: Perfis I e U com instabilidade local das mesas

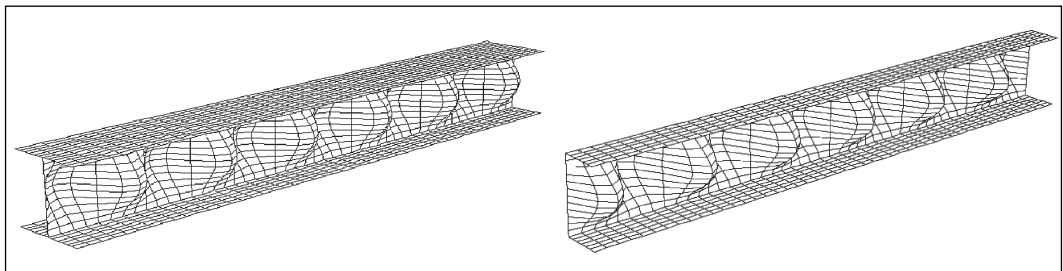


Figura 7: Perfis I e U com instabilidade local da alma

4.1.2 Resultados

Nas Figuras 8 e 9 têm-se as curvas dos valores parametrizados e ajustados de K_p e de $(b/t)_{m\acute{a}x}$, respectivamente, em função da relação entre as esbeltezes da alma e das mesas (λ_w/λ_f), considerando as situações da instabilidade local condicionada pela alma e pelas mesas dos perfis I e U. Como referência, são mostrados também os valores adotados pela NBR 8800 (1986) e os valores para placas isoladas para as situações limites de vinculação.

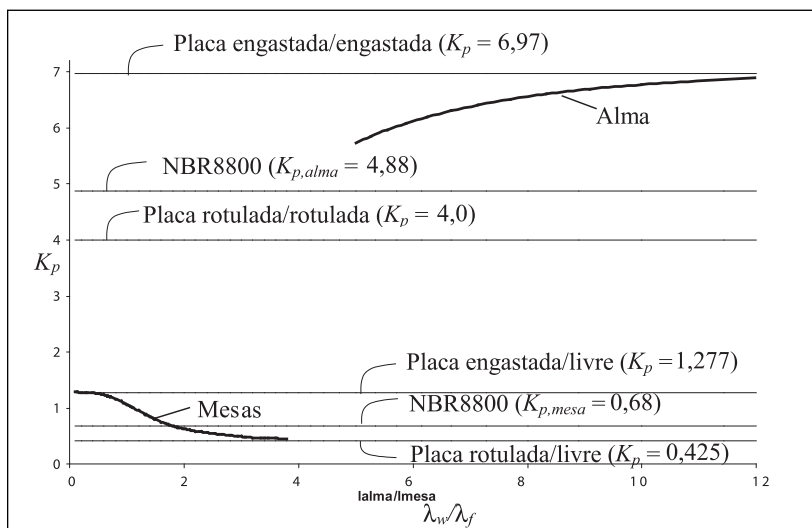


Figura 8: Valores parametrizados de K_p para instabilidade local da alma e das mesas

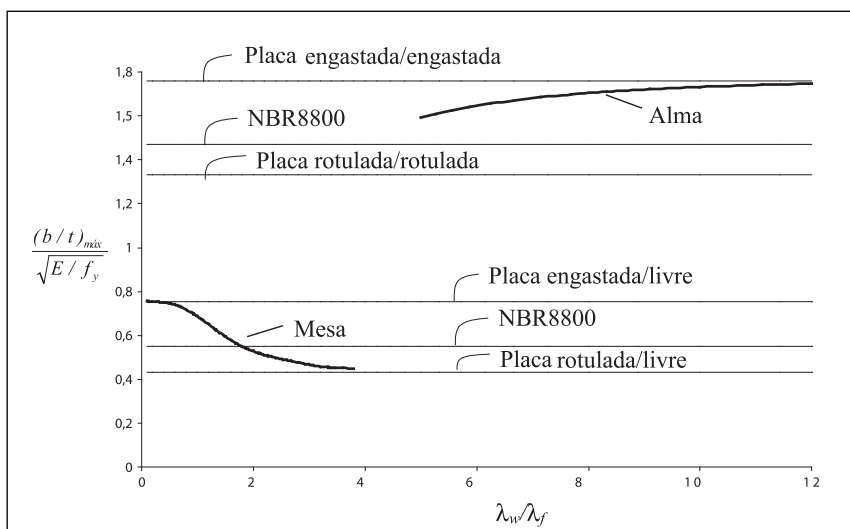


Figura 9: Valores parametrizados de $(b/t)_{m\acute{a}x}$ para instabilidade local da alma e das mesas

Verifica-se que, quando a relação entre as esbeltezes da alma e das mesas situa-se entre cerca de 3,8 e 5,0, não foram obtidos os valores de K_p e, conseqüentemente, de $(b/t)_{máx}$. Ao se pesquisar a instabilidade local da alma nesta faixa, foi observado que mesas e alma flambavam simultaneamente, com deslocamentos de, aproximadamente, a mesma magnitude, não permitindo a identificação, na análise numérica, do elemento condicionante da instabilidade local.

4.2 Cantoneiras de abas iguais

De forma similar aos perfis I e U, foi estudada a estabilidade linear de cantoneiras de abas iguais. Na geração da malha de elementos finitos, conforme a Figura 10, foram usados 100 elementos em cada aba. Foram processadas diversas cantoneiras, variando-se a largura (b) e a espessura (t) das abas, englobando relações b/t entre 4 e 20. O comprimento das cantoneiras, a , foi adotado sempre igual a 8 vezes a largura das abas. Ainda na Figura 10 pode ser vista a instabilidade local típica das abas de uma cantoneira.

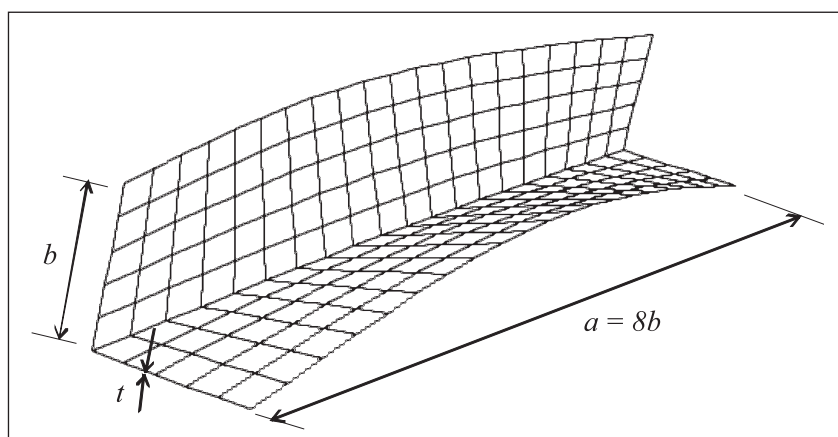


Figura 10: Malha de elementos finitos e instabilidade local das abas de uma cantoneira

Da análise com o ABAQUS (Hibbitt, Karlsson and Sorensen 1998), foram obtidos os valores do coeficiente de flambagem elástica K_p em função das esbeltezes das abas das cantoneiras, mostrados na Figura 11. Ainda nessa figura, como referência, vê-se também o valor adotado pela NBR 8800 (1986) (Tabela 1, $K_p = 0,425$), exatamente o mesmo das placas com uma borda longitudinal perfeitamente rotulada e a outra livre (caso E da Fig. 3).

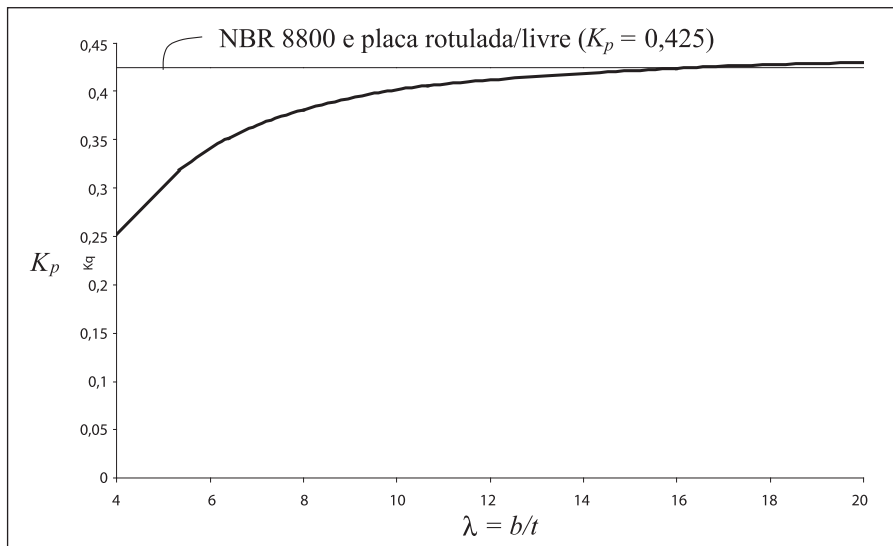


Figura 11: Valores de K_p para instabilidade local das abas das cantoneiras

Na Figura 12 são mostrados os valores de $(b/t)_{m\acute{a}x}$ das abas, obtidos a partir da Equação (5), tendo em vista os valores do coeficiente K_q mostrados na Figura 11.

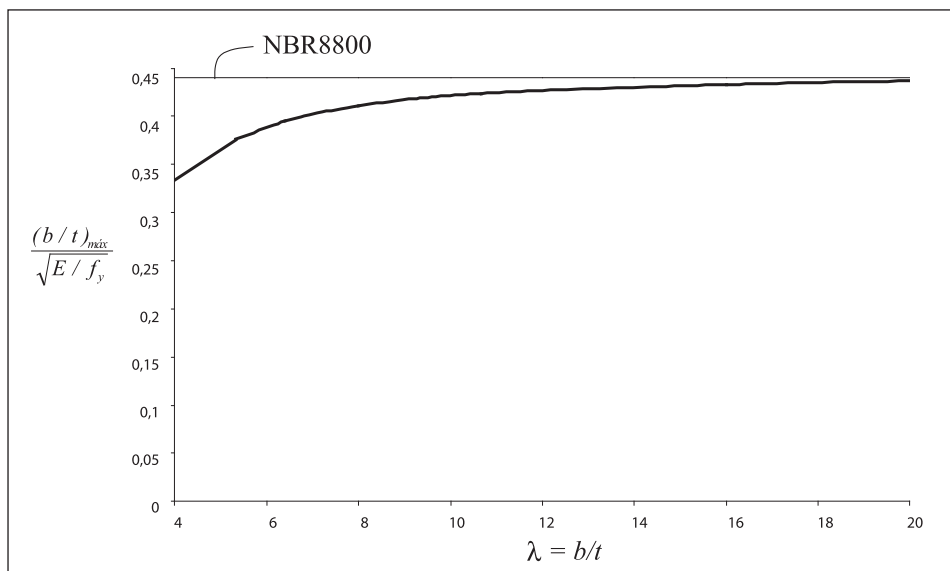


Figura 12: Valores de $(b/t)_{m\acute{a}x}$ para instabilidade local das abas das cantoneiras

5. Conclusões

5.1 Aspectos gerais

Neste trabalho, inicialmente, foi empregado o programa comercial ABAQUS (Hibbitt, Karlsson and Sorensen 1998) para obtenção dos valores dos coeficientes de flambagem elástica, K_p , das placas que formam as mesas e a alma dos perfis estruturais I e U de aço submetidos à compressão centrada, levando-se em conta a esbeltez relativa desses elementos, e as abas das cantoneiras, levando-se em conta sua esbeltez. Em seguida, os valores dos coeficientes K_p foram utilizados para determinação dos valores da relação largura-espessura da alma e das mesas dos perfis I e U e das abas das cantoneiras abaixo dos quais não ocorre instabilidade local. Finalmente, os valores dos coeficientes de flambagem e da relação largura-espessura obtidos foram comparados com os resultados simplificados adotados pela norma brasileira de projeto de estruturas de aço, NBR 8800 (1986) e pelo texto-base de revisão dessa norma (2003), que seguem o mesmo procedimento da especificação americana do AISC/LRFD (1999). Nos perfis I e U, o estudo foi feito considerando a ocorrência de instabilidade local condicionada pelas mesas ou pela alma.

5.2 Perfis I e U

Nos perfis I e U, para a instabilidade local condicionada pelas mesas, os resultados obtidos pelo programa ABAQUS (Hibbitt, Karlsson and Sorensen 1998) mostraram que os valores parametrizados de K_p variaram rigorosamente dentro dos limites de placas isoladas com uma borda longitudinal perfeitamente engastada e outra livre e com uma borda longitudinal perfeitamente rotulada e outra livre, dependendo da relação entre as esbeltezes da alma e das mesas (λ_w/λ_p), de acordo com a Fig. 8. Conseqüentemente, os valores de $(b/t)_{\max}$ também ficaram dentro desses limites. O valor adotado pela norma brasileira NBR 8800 (1986) para $(b/t)_{\max}$, igual a $0,55(E/f_y)^{1/2}$, conforme a Figura 9, foi atingido apenas para λ_w/λ_f igual a 1,8. Observa-se então que, quanto menores são os valores de λ_w/λ_f em relação ao limite 1,8, mais o comportamento das mesas se aproxima da placa com uma borda longitudinal perfeitamente engastada e outra livre, indicando que para essa situação o uso da norma brasileira conduz a resultados contrários à segurança. Por outro lado, quanto maiores são os valores de λ_w/λ_f em relação a 1,8, mais o comportamento das mesas se aproxima da placa com uma borda longitudinal perfeitamente rotulada e outra livre, indicando que nessa faixa o uso da norma brasileira conduz a resultados favoráveis à segurança.

Para a instabilidade local condicionada pela alma, os valores de K_p obtidos com o programa ABAQUS (Hibbitt, Karlsson and Sorensen 1998) ficaram próximos do valor

de placas com as bordas longitudinais perfeitamente engastadas, muito superiores ao valor de placas com as bordas longitudinais perfeitamente rotuladas e ainda bastante acima do valor adotado pela norma brasileira NBR 8800 (1986), segundo a Figura 8. Logo, os valores de $(b/t)_{\max}$ foram sempre superiores ao valor adotado pela norma brasileira, igual a $1,47(E/f_y)^{1/2}$, conforme a Figura 9, indicando que o uso da norma brasileira conduz a resultados favoráveis à segurança.

Deve-se salientar que as conclusões supracitadas são válidas dentro das hipóteses utilizadas neste trabalho, nos limites da relação entre as esbeltezes da alma e das mesas que permitem que a instabilidade local seja condicionada por um ou outro componente do perfil.

5.2 Cantoneiras

Nas cantoneiras de abas iguais, os valores de K_p obtidos com o programa ABAQUS (Hibbitt, Karlsson and Sorensen 1998) foram sempre inferiores ao valor de placas com uma borda longitudinal perfeitamente rotulada e outra livre, tendendo assintoticamente para este último conforme a esbeltez das abas, b/t , aumenta, de acordo com a Fig. 11. Da mesma forma, os valores de $(b/t)_{\max}$ foram sempre inferiores ao valor adotado pela norma brasileira NBR 8800 (1986), igual a $0,44(E/f_y)^{1/2}$, segundo a Figura 12.

Deve-se notar que, pela norma brasileira, não há instabilidade local quando a relação b/t não supera ao valor constante igual a $0,44(E/f_y)^{1/2}$. Pelos resultados obtidos pelo programa ABAQUS (Hibbitt, Karlsson and Sorensen 1998), esse limite varia entre $0,33(E/f_y)^{1/2}$, quando b/t é igual a 4, e $0,44(E/f_y)^{1/2}$, quando b/t é igual a 20, de acordo com a Figura 12. Mas fazendo uma análise mais acurada dessa figura, observa-se que a queda do limite é bem menos pronunciada que a queda de b/t e que se b/t não supera $0,44(E/f_y)^{1/2}$, também não superará ao valor fornecido pelo programa, para os aços normalmente empregados na prática, que possuem resistência ao escoamento, f_y , na faixa entre 250 MPa e 350 MPa. Pode-se concluir então que o procedimento da norma brasileira para as cantoneiras de abas iguais apresenta bom nível de precisão.

Agradecimentos

Ao CNPq, à CAPES e à FAPEMIG, que tornaram possível a elaboração deste trabalho.

Referências

- American Institute of Steel Construction (AISC)(1999). *Load and Resistant Factor Design*, AISC/LRFD, Chicago.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1986). NBR 8800: *Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2003). Texto-Base de Revisão da NBR 8800: *Projeto e Execução de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas Aço-Concreto de Edifícios*. Rio de Janeiro.

- Bradford, M.A. and Azhari, M. (1995). Buckling of Plates with Different End Conditions Using The Finite Strip Method. *Computers and Structures*, v. 56, n. 1, p. 75-83.
- Bradford, M. A. and Azhari, M. (1997). The Use of Bubble Functions for the Stability of Plates with Different End Conditions. *Engineering Structures*, v. 19, n. 2, p. 151-161.
- Castro e Silva, A. L. R.; Fakury, R. H. and Camotim, D. R. Z. (2004). Estudo Numérico da Instabilidade Local de Perfis Estruturais I de Aço Submetidos à Compressão Centrada. *XXV CILAMCE – Congresso Ibero-Latino-Americano de Métodos Computacionais em Engenharia*, Recife, Brasil.
- Cheung, Y. K. (1976). *Finite Strip Method in Structural Analysis*. Pergamon Press, Oxford.
- Hibbitt; Karlsson and Sorensen (1998). *ABAQUS/Standard – User's Manual*. v. I, II e III, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.
- Maquoi, R. (1995). *Steel Plated Structures – Ultimate Limit State of Plate and Box-Girders*. CIMS 358.
- Oñate, E. (1992). *Cálculo de Estructuras por el Método de Elementos Finitos – Análise Estático Lineal*. Barcelona.
- Salmon, C. G. and Johnson, J. E. (1996). *Steel Structures: Design and Behaviour: Emphasizing Load and Resistance Factor Design*. HarperCollins College Publishers Inc., 4rd ed.
- Ugural, A.C. (1981). *Stresses in Plates and Shells*. McGrawHill.
- Zienkiewicz, O. C. and Taylor, R. L. (1988). *The Finite Element Method*. 4th ed., 2 Vol., McGraw-Hill, London.

Numerical study of local buckling of open section steel profiles under uniaxial compression

Abstract

In this work, the elastic buckling coefficients values of plates corresponding to flanges and web of I-shaped and channel sections and legs of angles under uniaxial compression will be numerically obtained. The slenderness of the elements is considered and the commercial code ABAQUS is used in the analysis. The values of width-thickness ratios under which there is no local buckling of the plates will be evaluated based on these coefficients. Finally, the values obtained will be compared with the simplified results adopted by the Brazilian Standard, NBR 8800, which is similar to the AISC/LRFD American Specification.

Keywords: steel structures, structural instability, local buckling, finite element method.

1. Introduction

The component elements of steel structures usually have cross sections formed by thin plane plates, connected along one or two of their longitudinal edges. When submitted to uniaxial compression they can collapse by the instability of these plates due to local buckling.

In this work, more accurate values of the elastic buckling coefficients (identified by the symbol K_p) of plates corresponding to flanges and web of I-shaped sections and channels and legs of angles when submitted to uniaxial compression will be obtained. With the K_p coefficients, it will be evaluated the maximum values of the width-thickness ratio, $(b/t)_{max}$ for the considered elements of the sections, upper limit for local buckling. These K_p and $(b/t)_{max}$ values will be compared to the ones proposed by the Brazilian Standard Code, NBR 8800.

2. Elastic local buckling of plates

The buckling of plates has been thoroughly studied by several authors through the last few decades, and now it is possible to easily obtain the values of critical elastic buckling stress (σ_{cr}) for most of the support conditions in the edge plates. These stresses are dependent of the mechanical properties of the material (E and ν), the slenderness of the plate (b/t) and a elastic buckling coefficient (K_p), which is dependent of the ratio between the sides of the plate (a/b) and the number of semi-waves formed in the longitudinal direction (m). The values of the coefficient K_p are shown in Figure 3 as a function of a/b .

3. The brazilian standard - NBR 8800

NBR 8800 relates the occurrence of local buckling for any element of the steel profiles to the ratio between the critical buckling stress (σ_{cr}) and the slenderness (b/t) (Fig. 4). The considered values of K_p and the corresponding $(b/t)_{max}$ values are shown in Table 1.

4. Numerical analysis of local buckling

For I-shaped and channel sections two distinct occurrences of local buckling were studied. In the former, the local buckling of the section controlled by flange buckling was considered and, in the latter, by web buckling. The values of K_p were obtained using Eq. (1), where the slenderness (b/t) of the buckled element was used and the critical stress (σ_{cr}) obtained by ABAQUS (Fig. 8). The values of $(b/t)_{max}$ were evaluated based on Eq. (5) (see Fig. 9).

For the angles a similar analysis was performed, and the values of K_p as a function of the slenderness of the legs (Fig. 11) were also obtained, as well as the $(b/t)_{max}$ values (Fig. 12).

5. Results and conclusions

5.1 I-shaped sections and channels

For local buckling of the flanges, the values of K_p and $(b/t)_{max}$ obtained, as function of the relation of the slenderness of web and flanges (λ_w/λ_f) showed a variation between the limits of isolate plates. The value suggested by NBR 8800 for $(b/t)_{max}$ was reached only for λ_w/λ_f equal to 1.8. It can be observed that, for values of λ_w/λ_f under 1.8, the use of the Brazilian Standard leads to results contrary to safety, and for values of λ_w/λ_f above 1.8 the use of the Brazilian Standard leads to conservative results.

For local buckling of the web, the values of K_p obtained were close to the value for plates with both longitudinal borders clamped, above the value for plates with both longitudinal edges simply supported and the value suggested by NBR 8800. Therefore, $(b/t)_{max}$ values were also higher than the value proposed by the Brazilian Standard, indicating that the use of the code leads to safe results.

5.2 Angles

The values of K_p obtained for angles were consistently lower than for plates with one longitudinal border simply supported and the other free, tending asymptotically to this last one as the slenderness of the flanges, b/t , rises. Similarly, the values of $(b/t)_{max}$ were always lower than the value proposed in NBR 8800. After an accurate analysis of this case, it can be concluded that the procedure of the Brazilian Standard for angles is appropriate and precise.