

Perfis de aço formados a frio: Instabilidade por distorção

CARLOS EDUARDO JAVARONI
FACULDADE DE ENGENHARIA - UNESP, BAURU, SP,
JAVARONI@FEB.UNESP.BR

ROBERTO MARTINS GONÇALVES
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS - USP, SÃO CARLOS, SP,
GONCALVE@SC.USP.BR

OSVALDO LUIS MANZOLI
FACULDADE DE ENGENHARIA - UNESP, BAURU, SP,
OMANZOLI@FEB.UNESP.BR

RESUMO

Este trabalho apresenta e discute a instabilidade por distorção da seção transversal para os perfis de aço formados a frio quando sujeitos à flexão. São apresentados os resultados obtidos em um programa de ensaio de perfis tipo U enrijecido, cujo modo de falha predominante foi a instabilidade por distorção. Os resultados experimentais são comparados com os resultados analíticos obtidos de acordo com os procedimentos da norma brasileira NBR 14.762:2001.

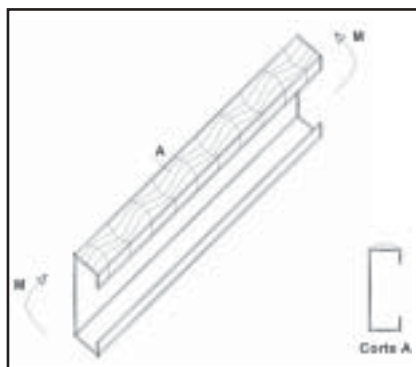
1. INTRODUÇÃO

Os perfis de aço estão sujeitos aos modos de falha por instabilidade sob carregamentos menores que aqueles que correspondem à plastificação total ou parcial da sua seção transversal, fato que pode reduzir significativamente a sua resistência de projeto.

O fenômeno da instabilidade está presente em todos os elementos sujeitos a esforços de compressão, sejam esses oriundos de solicitações por compressão axial, momento fletor ou cisalhamento.

A instabilidade do perfil pode ser classificada como sendo do tipo local ou global, podendo ocorrer um tipo ou interação entre eles. O tipo de instabilidade está condicionado às características geométricas dos perfis e às condições de vínculos e de carregamentos.

Na figura 1.a ilustra-se o fenômeno da instabilidade local de chapa da mesa de um perfil tipo U com enrijecedores de borda (Ue) sujeito à flexão, enquanto que, na figura 1.b pode-se observar a ocorrência da flambagem local da mesa em experimento realizado por Javaroni (1999).



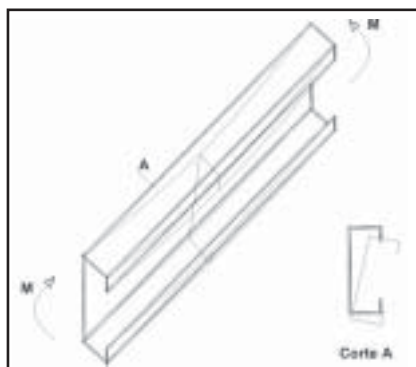
a) Esquema ilustrativo para um perfil tipo Ue.



b) Falha em ensaio à flexão.

Figura 1: Flambagem local para a mesa comprimida de um perfil tipo Ue fletido.

A segunda forma de instabilidade envolve uma combinação de flexão e flexo-torção, típica de vigas sem contenção lateral, denominada flambagem lateral com torção (FLT), como ilustrado na figura 2 (JAVARONI, 1999).



a) FLT.



b) Falha em ensaio à flexão.

Figura 2: Flambagem lateral com torção de vigas.

Um outro modo de instabilidade local que pode caracterizar a falha do perfil é aquele no qual ocorre a distorção da seção transversal em seu próprio plano, envolvendo deslocamentos laterais e rotações das partes componentes do perfil.

A figura 3 ilustra a ocorrência da instabilidade por distorção para um perfil tipo U enrijecido (JAVARONI,2002), podendo-se observar os deslocamentos laterais e a rotação na junção da alma com a mesa.

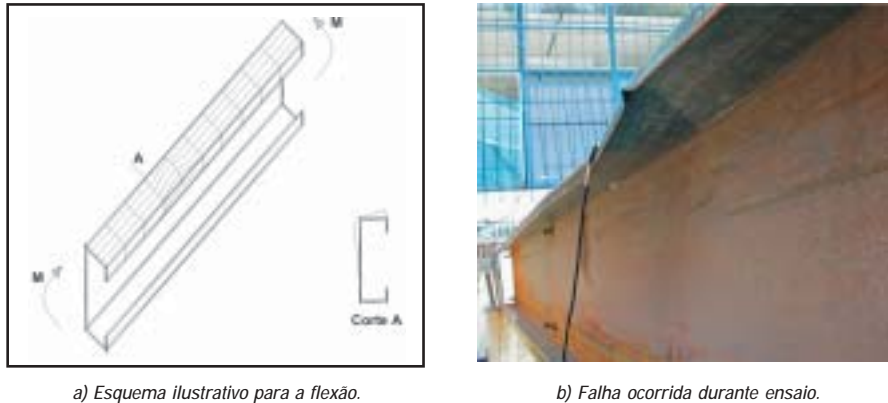


Figura 3: Flambagem por distorção para a mesa comprimida de um perfil tipo Ue fletido.

Hancock, Murray, Ellifritt (2001) traz uma ampla discussão sobre os modos de flambagem para os perfis de aço formados a frio.

O presente artigo apresenta os resultados de um estudo teórico-experimental sobre a instabilidade distorcional em perfis tipo U enrijecidos fletidos. Os resultados experimentais também são comparados com aqueles obtidos de acordo com a norma brasileira.

2. A INSTABILIDADE POR DISTORÇÃO

A flambagem por distorção da seção transversal tem obtido uma atenção especial de grande número de pesquisadores nos últimos anos.

Para as barras comprimidas, a flambagem por distorção caracteriza-se por apresentar rotação de cada aba e enrijecedor em torno da junção alma e aba, em sentidos opostos, e translação (ver figura 4a).

Quando submetidas à flexão, ocorre a flambagem da parte comprimida da alma juntamente com a aba, podendo ocorrer translação da junção da alma com a mesa na direção normal à alma, figura 4.b, ou não, figura 4.c. Na primeira situação, tem-se a flambagem por distorção da mesa com a alma e na segunda situação ocorre a distorção entre enrijecedor e mesa.

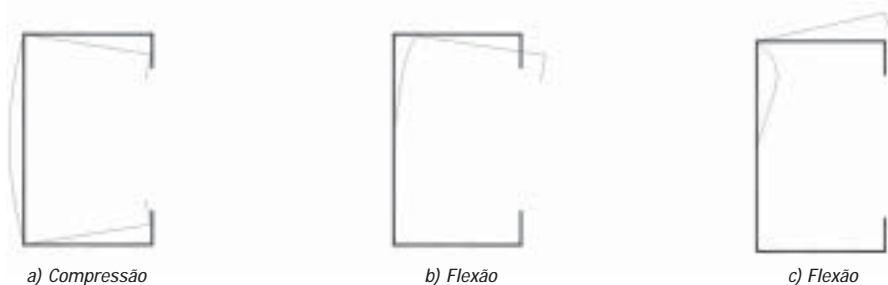


Figura 4: Instabilidade por distorção

Vários métodos analíticos para a análise da instabilidade por distorção têm proposto modelar a mesa e enrijecedor como uma coluna sobre base elástica. Esta base elástica é representada por molas, cujas constantes dependem da rigidez à flexão do elemento plano adjacente e de suas condições de contorno.

Praticamente, todos modelos utilizam a teoria de Vlasov (1962), como por exemplo, o modelo de Hausler (1964) e os modelos de Hancock (1985, 1997).

Dentre os diversos modelos, merece destaque o modelo de Hancock (1997) para a determinação da carga crítica de instabilidade por distorção para os perfis de aço formados a frio, comprimidos e fletidos, tendo-se em vista ser esse o modelo utilizado como base para as prescrições da norma brasileira NBR 14.762, ABNT (2001).

O modelo representativo desse modo de instabilidade idealiza a mesa e enrijecedor do perfil como uma barra comprimida apoiada elasticamente na alma e sujeita à instabilidade por flexo-torção. Este apoio é representado por uma mola lateral e outra mola rotacional, como ilustra a figura 5. A seção assim formada é considerada indeformável no seu plano.

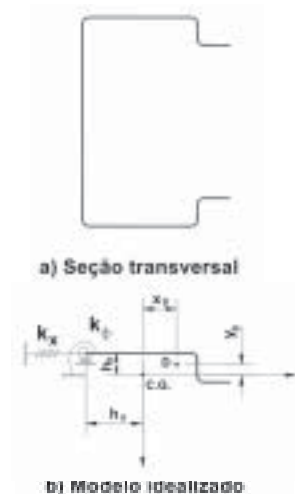


Figura 5: Modelo idealizado para a instabilidade por distorção.

A expressão analítica para o cálculo da carga crítica é obtida a partir das equações gerais da instabilidade por flexo-torção, Timoshenko, Gere (1961); Vlasov (1962), aplicadas ao caso de uma barra comprimida com apoio elástico contínuo.

Inicialmente, o problema é resolvido para uma barra comprimida e posteriormente alterado para as barras fletidas. Esta alteração corresponde a uma modificação no coeficiente da mola rotacional.

Para um perfil comprimido, a distorção das mesas ocorre em sentidos opostos, podendo-se idealizar a alma como um elemento restrito nas extremidades, com momentos fletores iguais e contrários ali aplicados, figura 6.a.

Já para um perfil fletido, a distorção dá-se apenas na mesa comprimida, idealizando-se a alma do perfil como um elemento restrito nas extremidades, com momento fletor aplicado a apenas uma extremidade, figura 6.b.

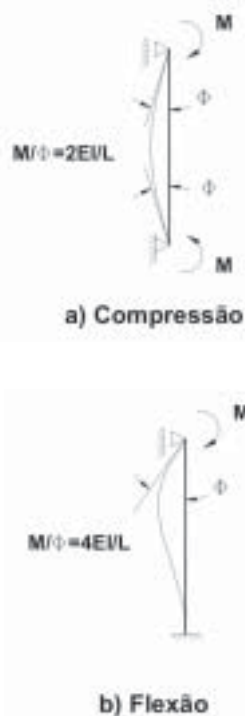


Figura 6: Apoios idealizados para as almas dos perfis.

Dessa forma, o cálculo da tensão crítica é feito de acordo com o mesmo procedimento para as barras comprimidas e para as barras fletidas, dobrando-se o coeficiente da mola rotacional para as barras fletidas.

3. Análise experimental

Com o objetivo de analisar o comportamento dos perfis tipo U enrijecidos sujeitos ao modo de falha por distorção quando solicitados à flexão, foram realizados 24 (vinte e quatro) ensaios nesses perfis, variando-se as dimensões das suas seções transversais.

Os vãos, carregamentos, travamentos laterais e dimensões das seções transversais foram escolhidos prevendo-se a ocorrência da flambagem por distorção.

3.1. Metodologia empregada

Os perfis ensaiados foram conformados a frio por prensagem, com comprimento de 6 metros, sendo o aço empregado na confecção dos

perfis aquele denominado comercialmente como USI-SAC 300.

O lote de aço foi caracterizado através de ensaios em 16 corpos-de-prova à tração simples, obtendo-se como valores médios:

- Tensão limite de escoamento $f_y = 340$ MPa;
- Tensão limite de ruptura à tração $f_u = 447$ MPa;
- Alongamento médio de 28%.

Na tabela 1 encontram-se as dimensões das seções transversais utilizadas e suas principais características geométricas.

Os perfis foram ensaiados com vão de 6 metros, sob uma única situação de carregamento, conforme ilustra a figura 7, Javaroni (2002).

Os travamentos laterais, indicados por X na figura 7, tanto nos apoios quanto nos pontos intermediários, foram obtidos através do ensaio dos perfis aos pares, possibilitando a ligação entre os mesmos, como ilustrado na figura 8. Assim, o programa experimental compreendeu um total de 48 perfis ensaiados.

Tabela 1 – Características geométricas dos perfis ensaiados

Perfil	A (cm ²)	I _x (cm ⁴)	I _y (cm ⁴)	x (cm)	x ₀ (cm)	f ₀ (cm)	C _w (cm ⁶)
Ue 250x85x25x2,25	10,24	967,0	98,9	2,43	6,15	11,92	12 731
Ue 250x85x25x2,65	11,99	1 128,3	114,2	2,43	6,12	11,88	14 699
Ue 300x85x25x2,25	11,37	1 491,1	104,4	2,20	5,69	13,14	18 944
Ue 300x85x25x2,65	13,32	1 736,7	120,5	2,20	5,66	13,10	21 896
Ue 360x85x25x2,25	12,49	2 154,3	108,8	2,01	5,30	14,47	26 670
Ue 360x85x25x2,65	14,64	2 511,5	125,6	2,01	5,27	14,42	30 851
Ue 360x85x25x3,00	16,51	2 817,5	139,7	2,01	5,25	14,38	34 378
Ue 400x85x25x2,25	13,62	2 973,6	112,6	1,86	4,97	15,85	35 980

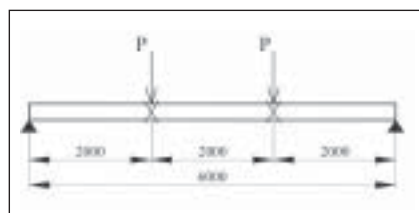


Figura 7: Esquema de carregamento para os ensaios à flexão.



Figura 8: Travamento lateral entre perfis.



Para cada seção transversal foram ensaiados 3 (três) conjuntos idênticos (6 perfis), medindo-se os deslocamentos e as deformações ocorridas na seção do meio do vão.

A força foi aplicada através de um atuador hidráulico sobre um perfil tipo I apoiado sobre os travamentos intermediários entre os perfis. A intensidade da força aplicada foi medida por uma célula de carga devidamente calibrada.

As medidas das forças, dos deslocamentos e das deformações foram feitas através do sistema de aquisição de dados System 5000 da Measurements Group, Inc.

3.2. Apresentação dos resultados experimentais

Na tabela 2 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios realizados.

Os valores experimentais (PENS) foram obtidos pela média dos resultados de 3 ensaios para cada tipo de perfil. Os valores de M_u foram obtidos de acordo com o esquema estático apresentado acima, figura 7.

Para todos os ensaios realizados, o modo de falha foi o de instabilidade por distorção da seção transversal. A figura 9 ilustra esse modo para dois ensaios de diferentes perfis.

Tabela 2: Resultados experimentais obtidos.

Perfil	P _{ENS} (kN)	M _u (kN.m)
Ue 250x85x25x2,25	11,14	22,29
Ue 250x85x25x2,65	14,12	28,24
Ue 300x85x25x2,25	15,99	31,98
Ue 300x85x25x2,65	17,23	34,46
Ue 350x85x25x2,25	17,16	34,32
Ue 350x85x25x2,65	16,53	33,32
Ue 350x85x25x3,00	23,26	46,52
Ue 400x85x25x2,25	18,42	36,84

4. A norma brasileira NBR 14.762:2001

A norma brasileira NBR 14.762 prevê a determinação da resistência ao momento fletor em vista dos estados

2007

limites de início de escoamento da seção efetiva, flambagem lateral com torção e flambagem por distorção da seção transversal.

4.1. Início de escoamento da seção efetiva

O momento fletor resistente nominal referente ao escoamento da seção efetiva é dado por:

$$M_R = W_{ef} f_y \quad (1)$$

W_{ef} é o módulo de resistência elástico da seção efetiva calculado com base nas larguras efetivas dos elementos adotando-se $\sigma = f_y$.



a) Perfil Ue 250x85x25x2,65



b) Perfil Ue 400x85x25x2,25

Figura 9: Falha ocorrida nos ensaios.

4.2. Flambagem lateral com torção

O momento fletor resistente nominal referente à flambagem lateral com torção, tomando-se um trecho compreendido entre seções contidas lateralmente, é dado por:

$$M_R = \rho_{FLT} W_{c,ef} f_y \quad (2)$$

sendo $W_{c,ef}$ o módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra comprimida calculado com base nas larguras efetivas dos elementos adotando-se $\sigma = \rho_{FLT} f_y$.

ρ_{FLT} é o fator de redução associado à flambagem lateral com torção calculado em função de λ_0 , como a seguir:

$\lambda_0 \leq 0,6$	$0,6 < \lambda_0 < 1,336$	$\lambda_0 \geq 1,336$
$\rho_{FLT} = 1,0$	$\rho_{FLT} = 1,11(1 - 0,278\lambda_0^2)$	$\rho_{FLT} = 1/\lambda_0^2$

onde:

$$\lambda_0 = (W_c f_y / M_e)^{0,5}$$

W_c é o módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra comprimida;

M_e é o momento fletor de flambagem lateral com torção, em regime elástico, sendo que, para seções monossimétrica sujeitas à flexão em torno do eixo de simetria (eixo x), pode ser calculado como:

$$M_e = C_b r_0 (N_{ey} N_{et})^{0,5} \quad (3)$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{(K_y L_y)^2} \quad (4)$$

$$N_{et} = \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 EC_w}{(K_t L_t)^2} + GI_t \right] \quad (5)$$

$$C_b = \frac{12,5M_{max}}{2,5M_{max} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} \quad (6)$$

Na expressão de C_b , M_{max} é o máximo valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, no trecho analisado. M_A , M_B e M_C são os valores dos momentos fletores solicitantes de cálculo, em módulo, no 1°, 2° e 3° quartos do trecho analisado, figura 10.

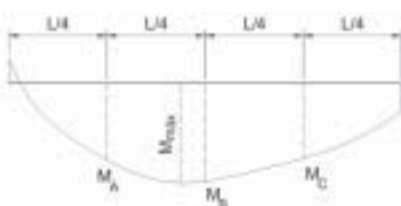


Figura 10: Diagrama de momento fletor – Coeficiente C_b

4.3. Flambagem por distorção da seção transversal

Para as barras com seção transversal aberta sujeitas à flambagem por distorção, o momento fletor resistente nominal deve ser calculado pela seguinte expressão:

$$M_R = M_{dist} \quad (7)$$

onde M_{dist} é o momento fletor de flambagem por distorção, dado por:

$$\frac{\lambda_{dist} < 1,414}{M_{dist} = W_c f_y (1 - 0,25I_{dist}^2)} \quad \left| \quad \frac{\lambda_{dist} \geq 1,414}{M_{dist} = W_c f_y / \lambda_{dist}^2} \right.$$

$$k_\phi = \frac{Et^3}{2,73(b_w + 0,06L_d)} \left[1 - \frac{1,11\sigma_{dist}}{Et^2} \left(\frac{b_w^4 L_d^2}{12,56L_d^4 + 2,192b_w^4 + 13,39L_d^2 b_w^2} \right) \right]$$

As propriedades geométricas A_d ; I_x ; I_y ; I_{xy} ; I_t ; h_x e h_y devem ser calculadas para a seção transversal constituída apenas pela mesa e pelo enrijecedor de borda da seção, como ilustra a figura 5.

O valor de σ_{dist} deve ser calculado, em primeira aproximação, fazendo-se $k_\phi = 0$ na expressão de α_1 .

4.4. Aplicação aos modelos ensaiados

Aplicando o procedimento da norma brasileira ao perfil Ue 250x85x25x2,65 tem-se:

a. FLT

$$N_\phi = \frac{\pi^2 \times 20.500 \times 114,2}{(200)^2} = 577,64 \text{ kN}$$

$$N_{et} = \frac{1}{(11,88)^2} \left[\frac{\pi^2 \times 20.500 \times 14.699}{(200)^2} + 7.885 \times 0,281 \right] = 549,88 \text{ kN}$$

$C_b = 1,0$ (momento fletor constante no trecho)

$$M_e = 1,0 \times 11,88 \times (577,64 \times 549,88)^{0,5} = 6.695,44 \text{ kN.cm}$$

$$\lambda_0 = (90,26 \times 34 / 6.695,44)^{0,5} = 0,677 \Rightarrow \rho_{FLT} = 0,9686$$

$$\sigma_{FLT} = 0,9686 \times 34 = 32,93 \text{ kN.m} \Rightarrow M = 29,72 \text{ kN.m}$$

b. Distorção

Para a seção transversal formada pela mesa comprimida e enrijecedor tem-se as seguintes propriedades geométricas:

onde:

$$\lambda_{dist} = (f_y / \sigma_{dist})^{0,5}$$

$$\sigma_{dist} = (0,5EA_d) \{ \alpha_1 + \alpha_2 - [(\alpha_1 + \alpha_2)^2 - 4\alpha_3]^{0,5} \}$$

$$\alpha_1 = (\eta / \beta_1) (\beta_2 + 0,039 I_t L_d^2) + k\phi / (\beta_1 \eta E)$$

$$\alpha_2 = \eta (I_y - 2 y_o \beta_3 / \beta_1)$$

$$\alpha_3 = \eta (\alpha_1 I_y - \eta \beta_3^2 / \beta_1)$$

$$\beta_1 = h_x^2 + (I_x + I_y) / A_d$$

$$\beta_2 = I_x b_f^2$$

$$\beta_3 = I_{xy} b_f$$

$$\beta_4 = \beta_2 = I_x b_f^2$$

$$L_d = 4,8 (0,5 I_x b_f^2 b_w t^3)^{0,25}$$

$$\eta = (\pi / L_d)^2$$

$$A_d = 2,915 \text{ cm}^2; h_x = -5,21591 \text{ cm}; h_y = -0,28409 \text{ cm};$$

$$I_x = 1,1581 \text{ cm}^4; I_y = 22,8126 \text{ cm}^4; I_{xy} = 2,7196 \text{ cm}^4 \text{ e } I_t = 0,0682 \text{ cm}^4.$$

O cálculo de σ_{dist} em primeira aproximação fornece:

$$L_d = 73,9061 \text{ cm} \quad \eta = 0,0018 \text{ cm}^{-2}$$

$$\beta_1 = 35,4289 \text{ cm}^2 \quad \beta_2 = 83,6727 \text{ cm}^6 \quad \beta_3 = 23,1166 \text{ cm}^6 \quad \beta_4 = 83,6727 \text{ cm}^6$$

$$\alpha_1 = 0,0050 \text{ cm}^2 \quad \alpha_2 = 0,0419 \text{ cm}^2 \quad \alpha_3 = 0,0002 \text{ cm}^2$$

$$\sigma_{dist} = 25,5525 \text{ kN/cm}^2$$

$$k_y = 4,2729$$

Com o valor calculado de k_y , calcula-se o novo valor de $\alpha_1 = 0,0083$, de onde encontra-se $\alpha_{dist} = 47,17 \text{ kN/cm}^2$.

Sendo assim:

$$\lambda_{dist} = (34/47,17)^{0,5} = 0,849 \quad \Rightarrow \quad \sigma_{dist} = 27,87 \text{ kN/cm}^2 \quad \Rightarrow \quad M = 25,15 \text{ kN.m.}$$

c. Resistência ao momento fletor

Dos valores dos momentos flectores encontrados, observa-se que o modo distorcionnal é crítico e fornece:

$$M_R = 25,15 \text{ kN.m}$$

5. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

A tabela 3 apresenta os resultados da norma brasileira em comparação com os obtidos experimentalmente.

Tabela 3: Resultados experimentais e teóricos.

Perfil	M_{EXPER} (kN.m)	M_{NBR} (kN.m)	M_{EXPER}/M_{NBR}
Ue 250x85x25x2,25	22,29	20,74	1,075
Ue 250x85x25x2,65	28,24	25,15	1,123
Ue 300x85x25x2,25	31,98	25,60	1,249
Ue 300x85x25x2,65	34,46	31,46	1,095
Ue 350x85x25x2,25	34,32	30,50	1,125
Ue 350x85x25x2,65	33,32	37,82	0,881
Ue 350x85x25x3,00	46,52	44,10	1,055
Ue 400x85x25x2,25	36,84	35,04	1,051

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2001) Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. NBR-14.762. ABNT, Rio de Janeiro, 2001.
- HANCOCK, G. J. (1985) Distortional buckling of steel storage rack columns. Journal of Structural Engineering, ASCE, v.111, n.12, p.2770-2783, May.
- HANCOCK, G. J. (1997) Design for distortional buckling of flexural members. Thin-Walled Structures, v.27, n.1, p.3-12.
- HANCOCK, G. J.; MURRAY, T. M.; ELLIFRITT, D. S. (2001) Cold-formed steel structures to the AISI specification. Marcel Dekker, Inc. New York.
- HAUSLLER, R. W. (1964) Strength of elastically stabilized beams. Journal of the Structural Division, ASCE, v.90, n.ST3, p.219-263, June.
- JAVARONI, C. E. (1999). Perfis de aço conformados a frio submetidos à flexão: Análise teórico-experimental. São Carlos, 1999. 255p. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.
- JAVARONI, C. E. (2002). Perfis de aço conformados a frio: instabilidade por distorção na flexão. Relatório Técnico. Faculdade de Engenharia, Unesp/Baurur.
- TIMOSHENKO, S. P.; GERE, J. M. (1961) Theory of elastic stability. 2.ed. New York: McGraw-Hill. 541p.
- VLASSOV, B. Z. (1962) Pièces longues en voiles minces. Paris: Eyrolles. 655p.
- Bridge Design Specifications. A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc., New York.

6. CONCLUSÃO

Foram apresentados os procedimentos e resultados de um programa experimental em perfis formados a frio submetidos a flexão. Nesses ensaios o modo de falha foi o de instabilidade por distorção da seção transversal.

Os resultados foram comparados com o procedimento da norma brasileira e apresentados na tabela 3.

Pode-se constatar que os resultados têm, em geral, boa correlação. Em particular, os resultados da norma brasileira que mais se afastam dos experimentais são aqueles referentes aos perfis Ue 300x85x25x2,25 para menos e Ue 350x85x25x2,65 para mais.

Observa-se que os resultados experimentais do conjunto Ue 350x85x25x2,65 apresentaram valores inferiores aos obtidos para o conjunto Ue 350x85x25x2,25. Depois de verificados os procedimentos e resultados do ensaio, não se constatou nenhum fato que compromettesse esse comportamento inesperado.

O procedimento da norma brasileira, embora trabalhoso para o cálculo manual, é de fácil utilização e conduz a resultados bastante satisfatórios para o uso em projetos correntes. Destaca-se o fato que o modo de falha previsto pela norma brasileira correspondeu ao modo de falha ocorrido no ensaio.

7. AGRADECIMENTO

Os autores agradecem à Fundação de Amaro à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo financiamento deste trabalho.