

Estabilidade de cantoneiras de aço formadas a frio submetidas à compressão

(On the stability of cold-formed steel angles under compression)

Gustavo Monteiro de Barros Chodraui

*Departamento de Engenharia de Estruturas. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo
E-mail: gchodraui@rocketmail.com*

Yared Shifferaw

*Department of Civil Engineering. Whiting School of Engineering. Johns Hopkins University, EUA
E-mail: yared@jhu.edu*

Maximiliano Malite

*Departamento de Engenharia de Estruturas. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo
E-mail: mamalite@sc.usp.br*

Benjamin William Schafer

*Department of Civil Engineering. Whiting School of Engineering. Johns Hopkins University, EUA
E-mail: schaffer@jhu.edu*

Resumo

O objetivo desse trabalho é examinar a estabilidade e resistência de cantoneiras submetidas à compressão centrada por meio de (i) análise numérica, (ii) análise experimental, (iii) clássico método das larguras efetivas e (iv) recente método da resistência direta (MRD), em que as cantoneiras não são relacionadas como perfis pré-qualificados. A análise de estabilidade elástica das cantoneiras formadas a frio é conduzida, inicialmente, por meio do método das faixas finitas, com o intuito de mostrar que o modo coincidente local-chapa/global-torsional é, realmente, importante, quando múltiplas meias-ondas são consideradas ao longo do comprimento da barra. Resultados de análise experimental são detalhados e utilizados para avaliar os procedimentos de cálculo atualmente em vigor. Tais resultados indicam que, no cálculo da força normal resistente, ignorar o modo local/torsional como um modo global e considerá-lo somente como um modo local pode resultar em uma decisão contra a segurança em algumas circunstâncias.

Palavras-chave: Cantoneira de aço formada a frio, estabilidade estrutural.

Abstract

The objective of this paper is to examine the stability and strength of concentrically loaded cold-formed steel angles as determined by (i) numerical methods, (ii) experiment, (iii) effective width and (iv) Direct Strength based design methods, in which angles are not pre-qualified sections. The elastic stability of cold-formed steel angle columns is examined primarily with the finite strip method to show that the coincident local-plate/global-torsion mode has some important behavior when multiple buckling half-wavelengths are considered along the length. A series of tests on single and double angles are detailed and the results used to examine existing design methods. The results indicate that the design practice of ignoring local/torsion buckling as a global mode and only considering it as a local mode may not be conservative in some circumstances.

Keywords: Cold-formed steel angle, buckling.

1. Introdução

As cantoneiras correspondem à forma mais simples entre os perfis metálicos e são amplamente empregadas em todos os segmentos da construção metálica, como componentes de estruturas treliçadas, barras de contraventamento e elementos auxiliares em ligações.

Atualmente, tem sido observada uma crescente demanda por cantoneiras formadas a frio, principalmente devido à maior oferta de aços planos e à possibilidade de se obter ampla gama de dimensões, incluindo as cantoneiras de abas desiguais e as cantoneiras com enrijecedores de borda, estas com melhor desempenho estrutural, principalmente do ponto de vista da instabilidade local.

Aparentemente, a análise estrutural de uma cantoneira simples (sem enrijecedores de borda) submetida à compressão constitui um problema simples e, portanto, já largamente conhecido. Entretanto as cantoneiras formadas a frio, em geral com paredes delgadas (elevadas relações largura-espessura), apresentam dois modos de instabilidade:

modo global de flexão, no caso de barras longas, e um modo coincidente local-chapa/global-torsional, que é crítico para barras de menor comprimento.

Embora existam procedimentos simplificados de cálculo, recomendados pelas normas, a consideração do modo local/torsional continua sendo um problema aberto. Alguns trabalhos recentes indicam que é conservador considerar o modo local/torsional como modo global no cálculo da força normal resistente, enquanto outros trabalhos apontam para a necessidade dessa abordagem.

Um item desse artigo é dedicado ao estudo das cantoneiras sob compressão centrada, sob a ótica de um procedimento simplificado via Método da Resistência Direta (MRD), uma vez que as cantoneiras não são pré-qualificadas para o método.

2. Estabilidade elástica

A análise elástica de estabilidade de uma cantoneira esbelta submetida à

compressão indica dois modos de instabilidade: o primeiro corresponde a um modo coincidente local-chapa/global-torsional e o segundo a um modo global de flexão (Figura 1a). Por exemplo, para a cantoneira L60x2,38 estudada por Chodraui (2006), a curva de estabilidade obtida via método das faixas finitas pelo programa CUFSM (Schafer & Ádány, 2006) é mostrada na Figura 1b. O gráfico relaciona a força crítica (N_{cr}) em função do comprimento de meia-onda. Assim, dois modos podem ser identificados: o primeiro, identificado como um modo local/torsional, não é de ocorrência usual na análise de perfis U e Z enrijecidos ou mesmo em outros perfis formados a frio convencionais, porque (i) não há pontos de mínimo definidos, (ii) os modos local e global-torsional são coincidentes, e (iii) o modo distorcional não é identificado.

As curvas de flambagem para os modos local-chapa e global-torsional são, matematicamente, coincidentes para cantoneiras de abas iguais, de espessura constante e sob compressão centrada. Rasmussen (2003, 2005) mostra esse

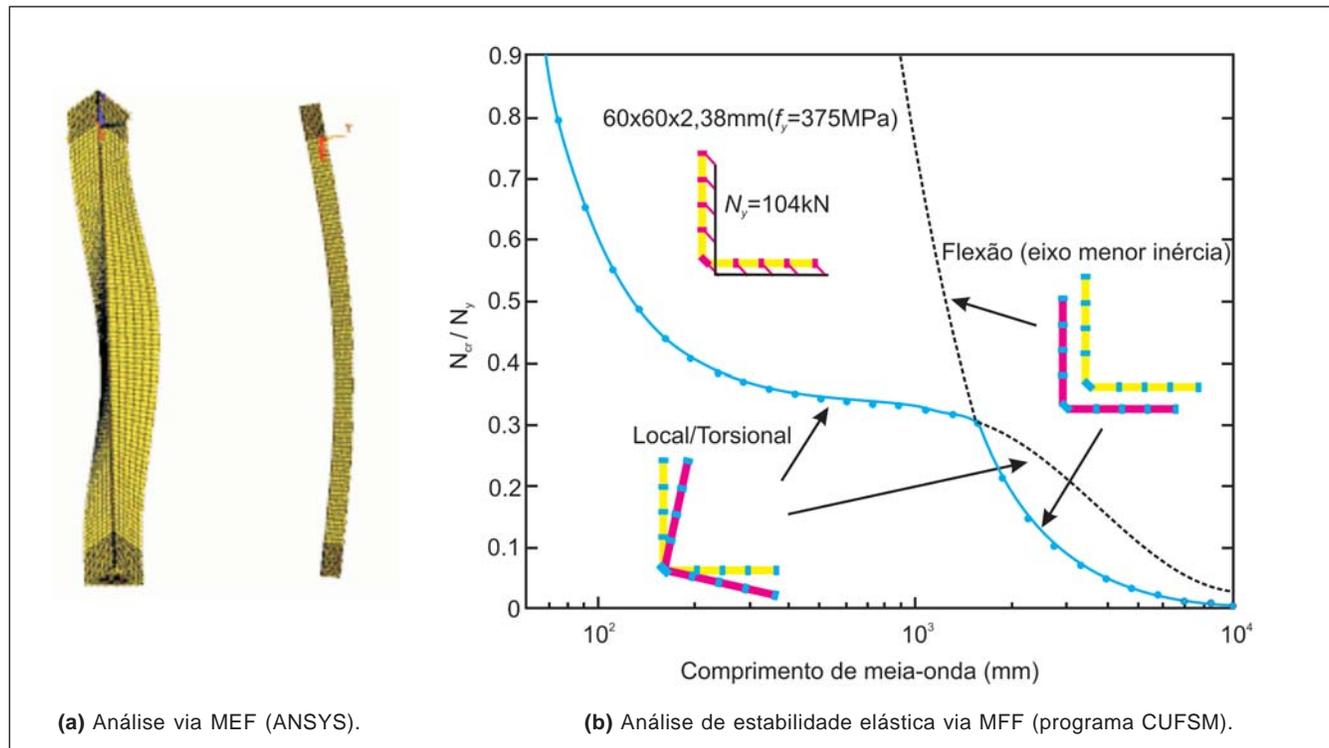


Figura 1 - Análise de estabilidade elástica: cantoneira submetida à compressão.

fato explicitamente. A coincidência de um modo local com um modo global causa confusão e dúvida no cálculo da força normal resistente, onde a inclusão da interação local-global é, geralmente, considerada crítica e conservadora à luz dos procedimentos de cálculo vigentes.

Considerando como os modos de instabilidade de uma cantoneira podem ou não podem interagir, é importante analisar mais profundamente como a instabilidade local/torsional e por flexão ocorrem para mais que uma meia-onda em um dado comprimento L . Para a análise via faixas finitas, o modo de instabilidade é dado por:

$$\varphi = (\text{modo } 2D) \text{sen}(m\pi z/L) \quad (1)$$

onde: (*modo 2D*) é a configuração deformada identificada na Figura 1b, m é o número de meias-ondas no comprimento L ($m = 1$ na Figura 1) e z é a ordenada ao longo do comprimento da barra. Para m meias-ondas, as curvas de flambagem da cantoneira indicada na Figura 1 são mostradas na Figura 2.

Considerando, por exemplo, N_{cr} para o comprimento L de 3.000mm, pode-se notar, na Figura 2, que: o valor mais baixo corresponde ao modo de flexão ($m = 1$), o segundo ao modo local/torsional (também $m = 1$), a partir do terceiro valor de N_{cr} (até o oitavo pelo menos), todos correspondem ao modo local/torsional com duas ou mais meias-ondas, porém com tendência para um mesmo valor de N_{cr} . Esse “platô” de valores N_{cr} , associados ao modo local/torsional, em função de m , é característico de um modo local e sugere que o modo local/torsional pode atuar como um modo local (com N_{cr} associado ao platô para elevados valores de m) e, também, como um modo global, pois para comprimentos elevados $m = 1$, o modo torsional passa para flexo-torção e a curva de estabilidade apresenta uma queda brusca, o que é típico nos modos globais. Além disso, quanto mais esbelta a aba da cantoneira, o platô dos valores de N_{cr} torna-se mais pronunciado.

A análise de estabilidade elástica pode, também, ser feita por elementos

de casca via MEF - foi empregado o programa ANSYS (1995). A vantagem, quando comparada à análise via MFF (foi empregado o programa CUFSM), é a facilidade com que condições de contorno mais complicadas podem ser tratadas. Para a cantoneira L60x2,38, foi adotada uma malha 10mm x 10mm de elementos SHELL 181, previamente avaliada para indicar sua adequada convergência. Os modos de instabilidade obtidos estão ilustrados na Figura 1a.

Para o modo de flexão, os resultados do ANSYS e CUFSM são, praticamente, coincidentes. Para o modo local/torsional, adotando restrição ao empenamento na modelagem do ANSYS, os autovalores (forças críticas) são ligeiramente superiores aos obtidos pelo CUFSM (sempre admite empenamento livre). Entretanto as diferenças são pequenas, porque, para a faixa de comprimento analisada, a resposta está na região do platô. Além disso, ao considerar K_L igual a 0,5L no CUFSM, para refletir a restrição ao empenamento, os auto-valores, praticamente, são coincidentes com os obtidos via ANSYS.

3. Análise experimental

Uma série de ensaios de compressão centrada em perfis de aço formados a frio, incluindo cantoneiras de abas iguais, foi, recentemente, realizada por Chodraui (2006). Os ensaios em cantoneira simples e dupla L60x2,38 (Figura 3) são, brevemente, apresentados.

Para as cantoneiras simples, os dispositivos de apoio permitiram rotação em torno do eixo de menor inércia, restringindo rotação em torno do eixo de maior inércia, bem como torção e empenamento (Figura 4a). O comprimento teórico L_r foi admitido como sendo $L_{\text{barra}} + 135\text{mm}$, correspondendo à distância entre os eixos de rotação dos dispositivos de apoio inferior e superior. Para as duplas cantoneiras, torção e empenamento foram restringidos em ambas as extremidades, mas a rotação em torno de um dos eixos principais foi liberada.

Os ensaios foram conduzidos com controle de deslocamento do pistão, em máquina servo-hidráulica, com taxa de deslocamento de 0,005mm/s. Os resulta-

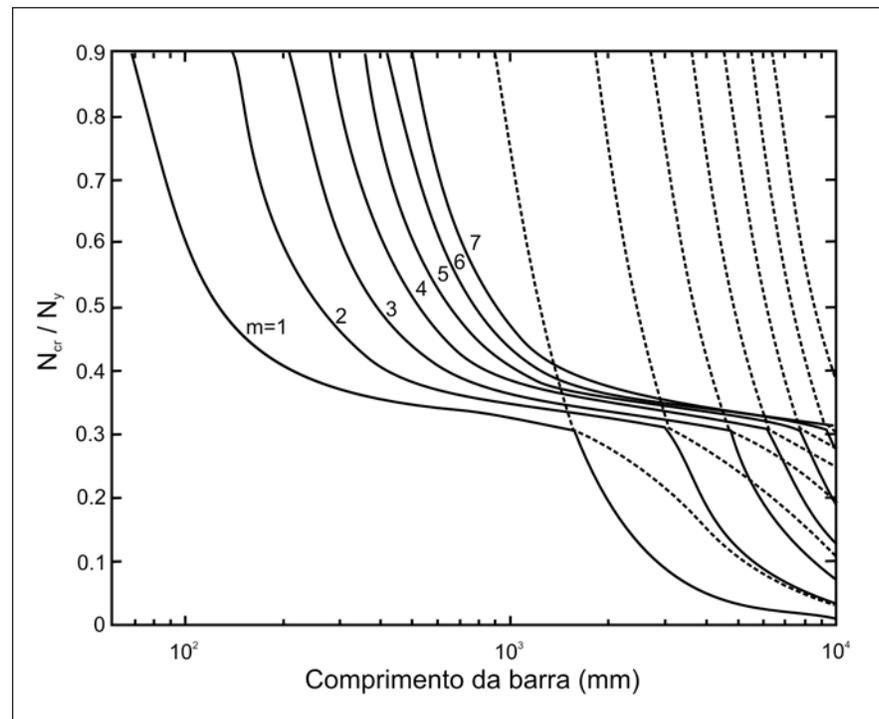


Figura 2 - Análise via MFF mostrando m meias-ondas em função do comprimento.

dos estão resumidos na Tabela 1. As propriedades mecânicas do material foram obtidas por meio de ensaios de tração em corpos-de-prova extraídos da parte central dos elementos, com valor médio de resistência ao escoamento $f_y = 37,5 \text{ kN/cm}^2$ e a espessura média resultou 2,38mm (o valor nominal é 2,25mm). Tais valores foram empregados em todas as análises subseqüentes.

Wilhoite et al. (1984) analisaram cantoneiras em aço de alta resistência, obtidas por dobramento, com ensaios em barras curtas (*stub columns*) e barras longas, com carregamento centrado.

Popovic et al. (1999) ensaiaram cantoneiras em aço galvanizado, obtidas por conformação em mesas de roletes, com extremidades rotuladas e engastadas.

Para os ensaios em barras rotuladas, foi aplicado carregamento com excentricidade de $L/1.000$, em ambos os sentidos, relativamente ao centróide, simulando uma excentricidade geralmente assumida pelas normas. Entretanto, na comparação com os resultados teóricos, tais barras são tratadas como carregadas pelo centróide da seção bruta.

4. Resultados experimentais obtidos por outros pesquisadores

Alguns pesquisadores têm realizado ensaios em cantoneiras formadas a frio, os quais são, brevemente, aqui resumidos. Por exemplo, Rasmussen (2003) cita os trabalhos de Popovic et al. (1999) e Wilhoite et al. (1984), cujos resultados para os ensaios de barras rotuladas estão apresentados nas Tabelas 2 a 4.

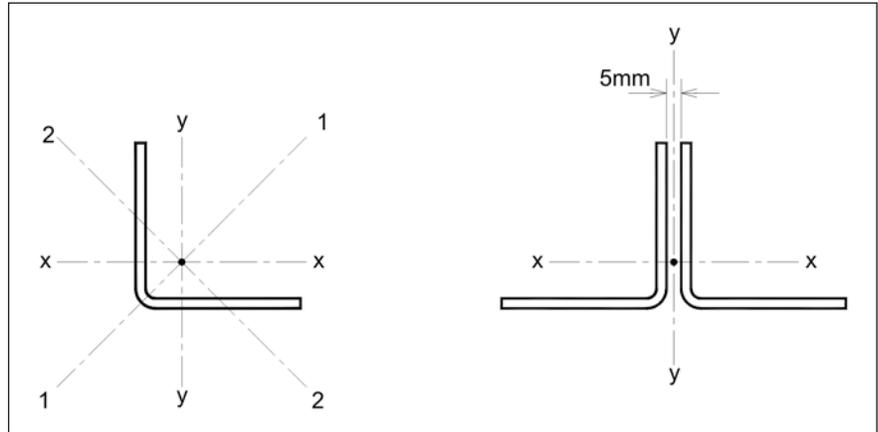
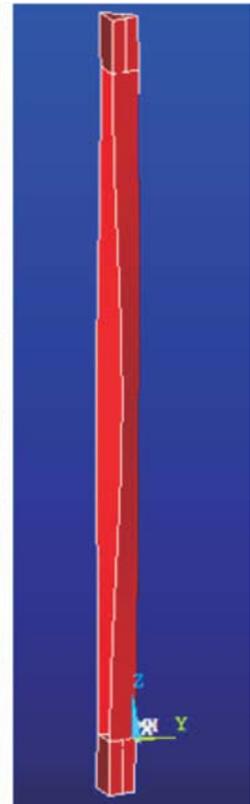


Figura 3 - Seção transversal da cantoneira simples e dupla.



(a) dispositivos de apoio (rótulas).



(b) modo local/torsional: ensaio e análise MEF.

Figura 4 - Ensaios de compressão realizados por Chodraui (2006).

Outros trabalhos relevantes são os de Prabhu (1982) e Young (2004). Nos ensaios de Prabhu, foram considerados apoios rotulados em relação a ambos os eixos principais e Young adotou ambas as extremidades engastadas. Tais ensaios não serão aqui detalhados, uma vez que seus resultados não são empregados nas análises subseqüentes.

Uma variável importante, na resposta estrutural, é a imperfeição inicial. Imperfeições geométricas globais, associadas à flexão em torno do eixo de menor inércia, foram medidas pelos pesquisadores. Popovic et al. (1999) relatam valores médios de $L/1.305$. Medições feitas por Chodraui (2006) indicaram uma faixa de $L/2.400$ a $L/1.650$. Imperfeições medidas por Prabhu (1982) variaram de $L/2.000$ a $L/500$ e Young (2004) relata um valor médio de $L/2.360$ nas barras analisadas em seu trabalho.

Nota-se, portanto, uma enorme variabilidade nas amplitudes das imperfeições globais, a qual depende de diversos fatores, como, por exemplo, o processo de conformação, fabricação (presença de soldas), manuseio, transporte, etc. Vale lembrar que as curvas de resistência à compressão, adotadas pelas normas, foram baseadas em imperfeições globais da ordem de $L/1.500$ a $L/1.000$.

5. Comparação com resultados teóricos - método das larguras efetivas

Rasmussen (2003, 2005) apresenta uma análise do emprego do método das larguras efetivas para cantoneiras, onde propõe (i) desconsiderar a torção no modo global e (ii) considerar a barra submetida à flexo-compressão devido ao deslocamento do centróide da seção efetiva em relação à seção bruta. Propõe, também, um método aproximado para cálculo manual.

Seu método pode ser considerado o mais ajustado em relação às atuais recomendações normativas, como a NAS (2004), que incluiu recomendações de

Tabela 1 - Resultados experimentais e previsões teóricas NAS (2004).

SEÇÃO	L_r (mm)	L_{barra} (mm)	A (cm ²)	Ensaio N_{ensaio} (kN)	NAS (2004) $N_{c,R}$ (kN)	$N_{ensaio} / N_{c,R}$
L 60x2,38	615	480	2,76	31	27	1,16
$K_1 L_r = 0,5 L_r$	970	835		29	27	1,09
$K_2 L_r = 1,0 L_r$	1.330	1.195		23	26	0,87
$K_1 L_r = 0,5 L_r$	1.685	1.550		21	22	0,94
2L 60x2,38	1.045	910	5,53	62	50	1,24
$K_x L_r = 1,0 L_r$	1.620	1.485		70	50	1,41
$K_y L_r = 0,5 L_r$	2.190	2.055		63	49	1,28
$K_1 L_r = 0,5 L_r$	2.765	2.630		46	44	1,05
2L 60x2,38	1.490	1.355		71	49	1,46
$K_x L_r = 0,5 L_r$	2.020	1.885		63	47	1,33
$K_y L_r = 1,0 L_r$	2.550	2.415		53	45	1,17
$K_1 L_r = 0,5 L_r$	3.060	2.925		48	42	1,13

Tabela 2 - Propriedades geométricas e mecânicas (Rasmussen 2003).

Propriedades	Wilhoite et al. (1984)	Popovic et al. (1999)
Aba (mm)	69,3	50,8
Espessura (mm)	3,00	2,31 / 3,79 / 4,70
f_y (kN/cm ²)	46,5	39,6
E (kN/cm ²)	20.300	20.300

Tabela 3 - Resultados de ensaios de Wilhoite et al. (1984) (Rasmussen 2003).

Barra	L_r (mm)	L_r / r_y	N_{ensaio} (kN)	N_{ensaio} / N_y
1	823	60,5	72,5	0,388
2	1.227	90,2	58,3	0,312
3	1.227	90,2	60,1	0,322
4	1.227	90,2	65	0,348
5	1.636	120,2	48,4	0,259
6	1.636	120,2	52,1	0,279
7	1.636	120,2	59,2	0,317

$N_y = 186\text{kN}$ (força normal de escoamento).

cálculo para elementos não-enrijecidos (elementos AL na designação da NBR 14762:2001) sob gradiente de tensões.

Um argumento comumente apresentado, para ignorar a torção no modo global (proposição *i* anterior), é que o modo torsional já é considerado na verificação do modo local, na determinação da área efetiva. Uma falha desse argumento é que o modo local/torsional segue a resposta pós-crítica caracterizada pelo modo local, contrário ao modo global. Além disso, é importante notar que para cantoneiras de elevada espessura (abas compactas), portanto totalmente efetivas, ou seja, área efetiva igual à área bruta, não haverá redução para considerar o modo local/torsional, independentemente do comprimento da barra, a menos que a torção seja considerada na análise do modo global.

Chodraui et al. (2006) examinaram a aplicação do método da largura efetiva em cantoneiras sob compressão centrada, desconsiderando o deslocamento do centróide da seção bruta para a seção efetiva, sendo a força normal de compressão resistente calculada com base em (i) curva de resistência associada ao modo global de flexão ou flexo-torção, resultando em uma tensão f_n e (ii) uma área efetiva associada à tensão f_n . Tal procedimento é comparado aos resultados experimentais para cantoneira simples e dupla, listadas na Tabela 1 (Figuras 5 e 6), e representa uma interpretação alternativa da norma norte-americana NAS (2004).

Pode-se observar, das Figuras 5 e 6, que ignorar o modo global de torção (a rigor flexo-torção) no cálculo de cantoneiras submetidas à compressão representa uma decisão contra a segurança. Tais resultados não são definitivos, uma vez que esse procedimento de cálculo, por um lado, admite torção no modo global, o que, segundo alguns trabalhos, resulta conservador e, por outro lado, tal procedimento desconsidera o deslocamento do centróide, o que constitui uma medida contra a segurança. Entretanto, como previamente discutido, em relação à Figura 2, há evidências que o modo local/torsional pode atuar como modo local e como modo global, e, as-

Tabela 4 - Resultados dos ensaios das barras rotuladas: Popovic et al. (1999).

Barra	L_r (mm)	t (mm)	N_{ensaio} (kN)	Modo de falha*
1	459	2,31	41,7	FT
2	458		47,2	FT
3	676		35,2	Acoplado
4	676		40,1	Acoplado-ST
5	862		30,9	Acoplado
6	863		47,5	F
7	1.088		25,1	Acoplado
8	1.088		32,1	F
9	1.285		17,7	Acoplado
10	1.286		24,7	F

FT = flexo-torção; Acoplado = flexão/flexo-torção; F = flexão em torno do eixo de menor inércia; ST = snapped-through.

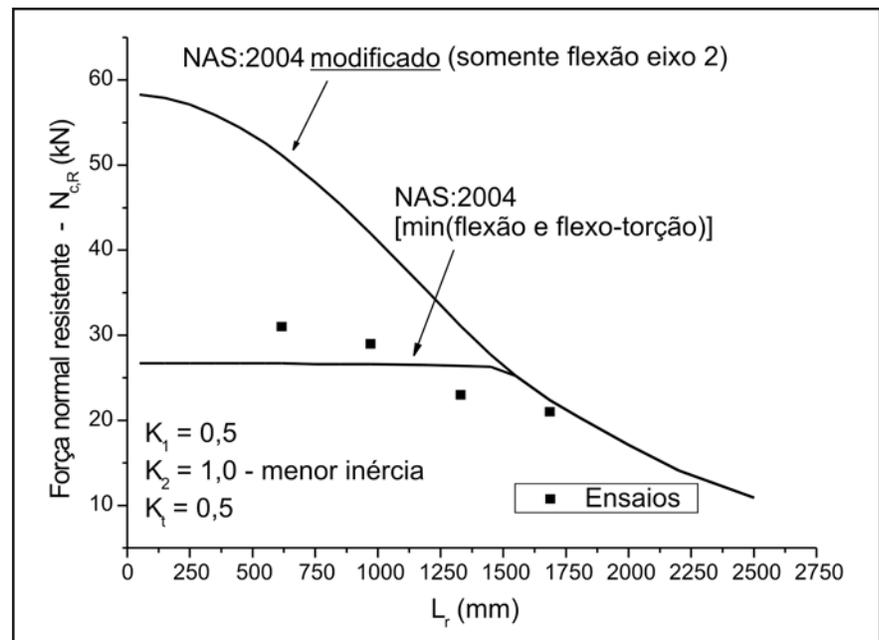


Figura 5 - Resultados experimentais em cantoneiras simples e NAS (2004).

sim, a hipótese de desconsiderar a torção no modo global, isto é, admitir apenas instabilidade por flexão, merece uma investigação mais detalhada.

6. Comparação com resultados teóricos - método da resistência direta

O método da resistência direta (MRD), apresentado no Apêndice 1 da NAS (2004), introduz uma metodologia alternativa ao clássico método das larguras efeti-

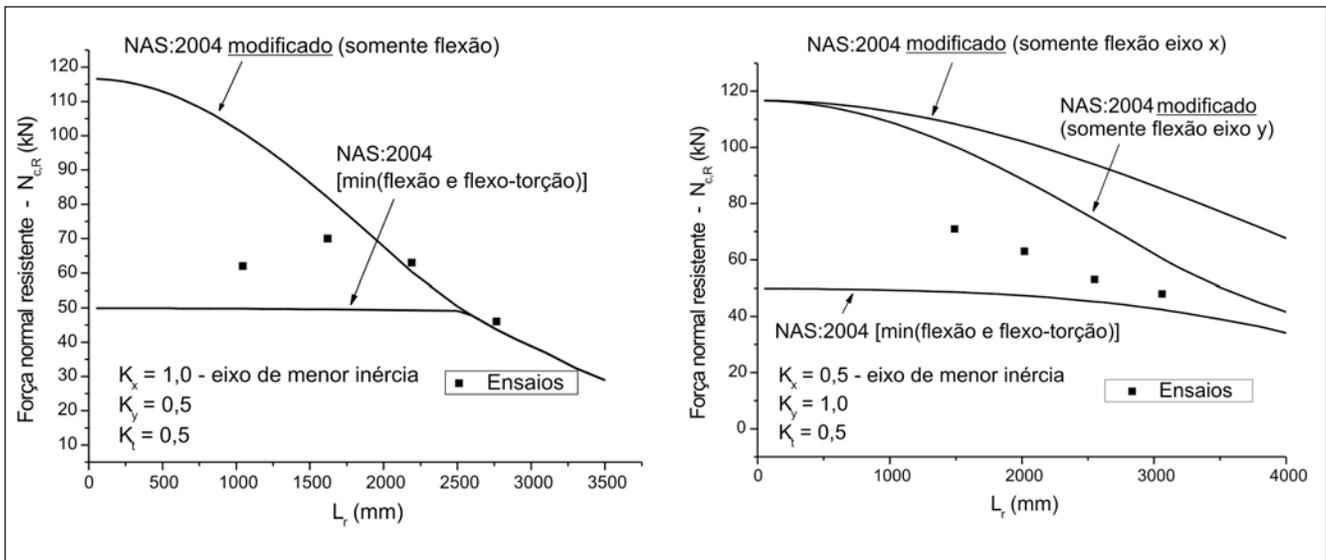


Figura 6 - Resultados experimentais em cantoneiras duplas e NAS (2004).

vas para cálculo da força normal e do momento-fletor resistente de perfis de aço formados a frio, onde os esforços resistentes são calculados diretamente com as propriedades geométricas da seção bruta.

Para barras submetidas à compressão, o MRD parte de uma análise de estabilidade elástica (cálculo das forças críticas elásticas N_{cr}) e da força normal de escoamento (N_y), para, então, determinar a força normal resistente. O método requer a avaliação dos valores de N_{cr} associados aos modos local, distorcional e global. Para cantoneiras simples, algumas dúvidas persistem quanto à consideração do modo local/torsional como um modo local, global ou ambos. O AISI (2006) sugere que o modo local/torsional pode ser assumido como modo local e global.

Recentemente, Rasmussen (2006) estendeu seu trabalho sobre cantoneiras para incluir uma abordagem a respeito do MRD. De maneira similar a Rasmussen (2005), discutido anteriormente, o trabalho (i) desconsidera a torção no modo global e (ii) considera, explicitamente, a excentricidade, assim requerendo uma análise de flexo-compressão mesmo para o caso de barras nominalmente submetidas à compressão centrada. Nesse caso, o procedimento proposto prevê

a análise de estabilidade elástica da cantoneira sob flexo-compressão, refletindo o fato que algumas excentricidades são favoráveis à resistência e outras não.

Chodraui et al. (2006) apresentam uma abordagem simplificada do MRD para cantoneiras simples sob compressão centrada, onde os efeitos explícitos da excentricidade são ignorados. Seis opções (a - f) são consideradas, como detalhadas na Tabela 5. As expressões do MRD são as recomendadas no Apêndice 1 da NAS (2004), porém admitindo várias possibilidades para N_{cr} .

As opções 'b' e 'c' seguem as recomendações de Rasmussen e outros e ignoram o modo local-torsional como modo global. A comparação entre resultados experimentais e teóricos, apresentada na Tabela 6, indica que tal hipótese é razoável para os dados de Wilhoite e Popovic, mas representa algo contra a segurança para os dados de Chodraui.

As opções 'a', 'e' e 'f' tratam o modo local/torsional como modo local e como modo global-torsional. É importante notar que as opções 'a' e 'e' são recomendadas pelo AISI (2006). Comparações apresentadas na Tabela 6 indicam boa concordância com os ensaios realizados por Chodraui (2006), mas conservadores para os dados de Wilhoite e Popovic.

A dispersão de resultados é mostrada e comparada com valores teóricos na Figura 7. Os dados de Popovic, em geral indicam uma tendência de ignorar a torção no modo global, considerando apenas a instabilidade por flexão. Já os dados de Wilhoite não permitem observar qualquer tendência, enquanto que os dados de Chodraui (2006) mostram pequena variação da força normal resistente em função do índice de esbeltez reduzido associado à instabilidade por flexão, refletindo a importância da consideração da torção na análise do modo global.

7. Análise numérica via MEF

A análise não-linear, via MEF, das barras ensaiadas por Chodraui (2006) foi desenvolvida, para melhor compreender a resposta estrutural em função de imperfeições geométricas globais e locais, bem como tensões residuais. Além disso, procurou-se estabelecer uma estratégia confiável de análise numérica, visando a futuras análises paramétricas.

Os modelos foram desenvolvidos no programa ANSYS, adotando malha 10mm x 10mm em elementos de casca SHELL 181. Os cantos dobrados foram, detalhadamente, modelados. As condi-

ções de contorno foram representativas dos ensaios, onde elementos sólidos SOLID 45 foram empregados para modelagem das chapas de extremidade e dispositivos de apoio, compatibilizados com os elementos de casca.

Imperfeições geométricas globais e locais foram implementadas nas barras. As configurações deformadas e a superposição das duas imperfeições foram feitas por meio de análise prévia de autovalor (Figura 1a). Para a configuração das imperfeições referente ao modo local/torsional foi adotada a do tipo II apresentada em Schafer e Peköz (1998), com amplitudes associadas a 25% e 75% de probabilidade de exceder o valor fixado. Para o modo global, a amplitude das imperfeições foi obtida por minimização de erros entre os valores medidos em laboratório e uma curva senoidal (meia-onda seno), usualmente adotada em análises dessa natureza.

Os resultados da análise numérica apresentaram boa concordância com os resultados experimentais, vide Tabela 7, resultandos, em geral, ligeiramente conservadores. Tal conclusão acena para uma consistência nos dados experimentais obtidos por Chodraui (2006).

8. Conclusões

As cantoneiras formadas a frio, de abas iguais e submetidas à compressão centrada, apresentam dois modos de instabilidade: (i) modo local-chapa/global-torsional e (ii) modo global de flexão. A coincidência entre o modo local-chapa e global-torsional dificulta a interpretação dos resultados da análise de estabilidade elástica e, conseqüentemente, o cálculo da força normal resistente. Analisando múltiplas meias-ondas (m), ao longo do comprimento da barra, pode-se mostrar que o modo local-chapa/global-torsional pode ser considerado como modo local (m > 1) e como modo global (m = 1).

Os resultados de ensaios realizados por Chodraui (2006) em cantoneiras simples e duplas são descritos e comparados com resultados obtidos pelo méto-

Tabela 5 - Opções analisadas para aplicação do MRD¹.

	a	b	c	d	e	f
N _{cre} (global)	min, (L/T, F)	F	F	min, (L/T, F)	min, (L/T, F)	min, (L/T, F)
N _{cr} (local)	L/T	L/T	L/T	-	L/T	L/T*
N _{crd} (distorcional)	-	-	L/T	-	L/T	-

¹ opção (e) é recomendada pelo AISI (2006).

L/T = N_{cr} para modo local/torsional (CUFSM com K_LL=0,5L).

Uma avaliação mais precisa é usar MEF com as reais condições de contorno.

Notar que o valor de N_{cr} para L/T é função do comprimento.

F = N_{cr} para instabilidade por flexão em torno do eixo principal de menor inércia.

L/T* = L/T, porém considerando apenas um comprimento, onde L/T=F (ver Figura 1).

Tabela 6 - Opções MRD comparadas com dados experimentais (relações ensaio/teórico).

Pesquisadores		Opções para aplicação do MRD					
		a	b	c	d	e	f
Wilhoite et al. (1984)	Média	1,27	1,04	1,04	1,14	1,27	1,32
	Desvio-padrão	0,12	0,18	0,17	0,10	0,12	0,14
Popovic et al. (1999)	Média	1,18	0,93	0,95	1,06	1,18	1,23
	Desvio-padrão	0,26	0,16	0,16	0,22	0,26	0,28
Chodraui et al. (2006)	Média	1,00	0,76	0,78	0,91	1,00	1,04
	Desvio-padrão	0,09	0,21	0,19	0,10	0,09	0,10

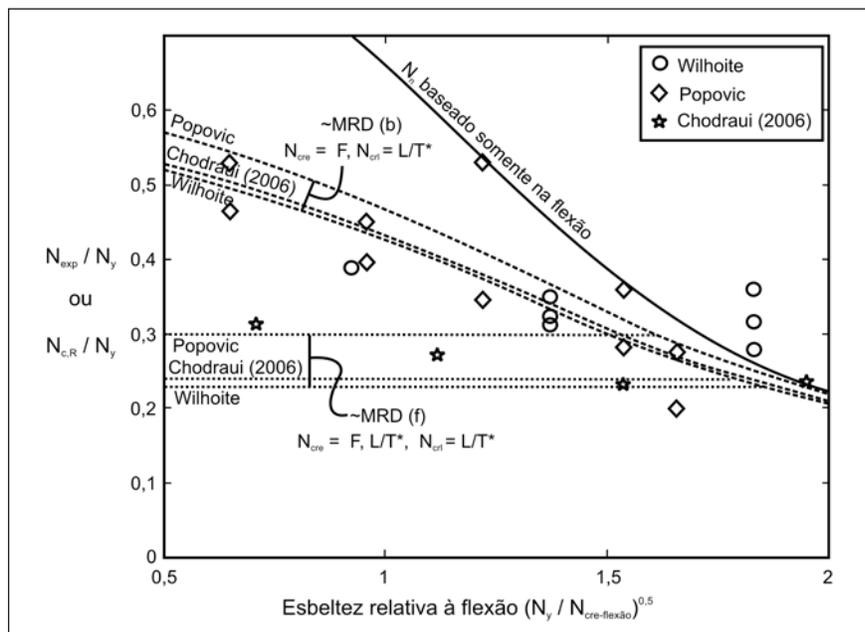


Figura 7 - Comparação entre resultados experimentais e previsões teóricas.

do das larguras efetivas e pelo método da resistência direta (MRD), indicando que a prática usual de ignorar a modo local/torsional como sendo um modo global pode resultar em uma prática contra a segurança. Tal constatação contradiz ensaios anteriores, realizados por outros pesquisadores, o que dificulta estabelecer conclusões definitivas, refletindo a necessidade de investigações mais aprofundadas.

Tomando como referência a investigação experimental realizada por Chodraui (2006), foi desenvolvida uma análise não-linear, via MEF, inserindo imperfeições geométricas locais e globais, concluindo que as imperfeições associadas ao modo local/torsional ($m > 1$) podem apresentar interações desfavoráveis com as imperfeições globais ($m = 1$).

Como conclusão geral, pode-se registrar que um procedimento de cálculo razoável, seja empregando larguras efetivas ou o MRD, consiste em tratar o modo local/torsional como modo local e, também, como modo global.

9. Agradecimentos

Agradecemos à FAPESP, à USIMINAS e à CMS-0448707 of the United States National Science Foundation pelo apoio financeiro, sem o qual essa pesquisa não poderia ter sido realizada.

10. Referências bibliográficas

AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE. *Direct Strength Method (DSM) Design Guide*. AISI, Washington, DC, 2006.

ANSYS. *Structural nonlinearities: user's guide for revision 5.1*. Houston. v.1, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 14762:2001*. Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro, 2001.

CHODRAUI, G. M. B. *Análise teórica e experimental de perfis de aço formados a frio submetidos à compressão*. Escola de Engenharia de São Carlos -

Tabela 7 - Resultados experimentais e da análise numérica via MEF.

L 60x2,38	N _{c,R} (kN)		
	K ₁ L _r = 0,5L _r ; K ₂ L _r = 1,0L _r ; K ₁ L _r = 0,5L _r		
L _r (mm)	MEF	Ensaio	Ensaio/MEF
	75% / 25%		75% / 25%
615	31 / 26	31	1,00 / 1,19
970	28 / 25	29	1,04 / 1,16
1.330	26 / 23	23	0,88 / 1,00
1.685	23 / 20	21	0,91 / 1,05
Média			0,96 / 1,10
Desvio-padrão			0,06 / 0,08

Universidade de São Paulo, 2006. (Tese de Doutorado).

CHODRAUI et al. Cold-formed steel angles under axial compression. In: LaBOUBE, R.A., YU, W.W. (Ed). *Recent research and developments in cold-formed steel design and construction* (18th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, Orlando, USA, Oct. 26-27, 2006). Rolla, University of Missouri-Rolla, 2006.

NORTH AMERICAN SPECIFICATION. *Supplement 2004 to the North American specification for the design of cold-formed steel structural members: Appendix I, Design of cold-formed Steel structural members using direct strength method*. AISI, Washington, DC, 2004.

POPOVIC, D. et al. Axial compression tests of cold-formed angles. *Journal of Structural Engineering, American Society of Civil Engineers*. v. 125, n.5, p. 515-523, 1999.

PRABHU, T.S. *Ultimate strength of cold-formed equal-leg single angles*. Canada: University of Windsor, Ontario. 1982. (M.S. Thesis).

RASMUSSEN, K.J.R. *Design of angle columns with locally unstable legs*. Department of Civil Engineering, Research Report No, R830. Australia: University of Sydney, 2003.

RASMUSSEN, K.J.R. Design of angle columns with locally unstable legs. ASCE, *Journal of Structural Engineering*, v. 131, n.10, p.1553-1560, 2005.

RASMUSSEN, K.J.R. Design of slender angle section beam-columns by the direct strength method. ASCE, *Journal of*

Structural Engineering, v. 132, n.2, p.2004-211, 2006.

SCHAFFER, B.W., PEKÖZ, T. Computational modeling of cold-formed steel: characterizing geometric imperfections and residual stresses. Elsevier, *Journal of Constructional Steel Research*, v. 47, n. 3, p.193-210, 1998.

SCHAFFER, B.W., PEKÖZ, T. Direct strength prediction of cold-formed steel members using numerical elastic buckling solutions. In: LaBOUBE, R.A., YU, W.W. (Ed). *Recent research and developments in cold-formed steel design and construction* (14th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, St. Louis, USA, Oct. 15-16, 1998). Rolla: University of Missouri-Rolla, 1998b.

SCHAFFER, B.W., ÁDÁNY, S. Buckling analysis of cold-formed steel members using CUFSM: conventional and constrained finite strip methods. In: LaBOUBE, R.A., YU, W.W. (Ed). *Recent research and developments in cold-formed steel design and construction* (18th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, Orlando, USA, Oct. 26-27, 2006). Rolla: University of Missouri-Rolla, 2006.

WILHOITE, G. et al. Behaviour and strength of angles in compression: an experimental investigation. ASCE, *Proceedings of the Structures Congress*, San Francisco. 1984.

YOUNG, B. Tests and Design of Fixed-Ended Cold-Formed Steel Plain Angle Columns. ASCE, *Journal of Structural Engineering*, v. 130, n.12, p.1931-1940. 2004.

Artigo recebido em 27/09/2006 e aprovado em 29/11/2006.