

ANÁLISE TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE BARRAS EM DUPLA CANTONEIRA DE AÇO FORMADA A FRIO SUBMETIDAS À COMPRESSÃO

Wanderson Fernando Maia¹ & Maximiliano Malite²

Resumo

Apresenta-se no trabalho análises numérica e experimental sobre o comportamento de barras em dupla cantoneira submetidas à compressão centrada e excêntrica. Nas análises variou-se o número de chapas separadoras buscando estudar a eficiência das mesmas na força normal resistente das barras. Os resultados mostraram que a introdução de chapas separadoras melhorou significativamente o comportamento das barras, principalmente para compressão excêntrica. Para comparação dos resultados, inicialmente foram adotadas duas hipóteses de cálculo com base no procedimento da ABNT NBR 14762: 2010, considerando compressão centrada. Na primeira considerou-se cada cantoneira como uma barra isolada independente da presença das chapas separadoras; na segunda considerou-se barra composta. Em geral, os resultados das análises numérica e experimental apresentaram valores intermediários aos obtidos pelas duas hipóteses adotadas. Os resultados mostram que a partir de certo número de chapas separadoras a força tende a permanecer praticamente constante.

Palavras-chave: Estruturas de aço. Perfis de aço formados a frio. Dupla cantoneira.

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF COLD-FORMED STEEL DOUBLE ANGLE MEMBERS UNDER COMPRESSION

Abstract

This paper presents a numerical and experimental study of double angle members connected by batten plates under concentric and eccentric axial compression. The number of batten plates is varied to study the influence on the nominal axial strength. The use of batten plates significantly increases the strength of the system, especially for members under eccentric compression. Two design hypotheses based on ABNT NBR 14762: 2010 are compared to the results obtained: (i) non-composite action (no interaction between angles), with only local, flexural, and flexural-torsional buckling considered; (ii) composite action (full interaction between angles), and only considering local and minor-axis flexural buckling of the pair of angles. Numerical and experimental results for angles connected by bolted batten plates fall in between the design curves defined by methods (i) and (ii). However, the strength remains practically constant after a certain number of batten plates are connected.

Keywords: Steel structures. Cold-formed steel members. Double angle.

1 INTRODUÇÃO

A busca por estruturas cada vez mais leves e arrojadas levam à utilização de componentes cada vez mais esbeltos, isso faz com que a engenharia estrutural necessite sempre de procedimentos

¹ Doutor em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, wfmaia@sc.usp.br

² Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, mamalite@sc.usp.br

de dimensionamento que acompanhem esta evolução. A utilização de perfis de aço formados a frio é um exemplo de aplicação que necessita cada vez mais de pesquisas. Os grandes avanços nos processos de fabricação têm levado à utilização mais corrente de aços com elevada resistência mecânica e, por consequência, reduzida espessura das chapas que compõem os perfis. Com isso, diferentes modos de instabilidade que até então não eram observados passam a merecer atenção especial. Pesquisas teóricas e experimentais têm sido realizadas a fim de se caracterizar e descrever o comportamento estrutural destes elementos, buscando soluções de cálculo econômicas e seguras.

As cantoneiras de aço formadas a frio são exemplos de componentes que vem sendo cada vez mais utilizados, como barras de estruturas treliçadas, barras de contraventamentos e elementos auxiliares em ligações. As tradicionais cantoneiras laminadas a quente apresentam em geral abas compactas, portanto, não sujeitas ao modo de instabilidade local e pouco propensas ao modo de instabilidade global por flexo-torção para a faixa usual de comprimento. Entretanto, as cantoneiras simples formadas a frio, em geral com paredes delgadas (elevadas relações largura/espessura), apresentam dois modos de instabilidade: (i) modo global de flexão, dominante no caso de barras longas, e um modo coincidente local-chapa/global de flexo-torção, que é crítico para barras de menor comprimento. A cantoneira enrijecida apresenta um melhor desempenho estrutural, principalmente quanto à instabilidade local.

As barras compostas em dupla cantoneira, com travejamento em quadro, são constituídas por duas seções idênticas dispostas paralelamente, afastadas entre si e ligadas uma a outra apenas em alguns pontos ao longo do comprimento, por meio de chapas separadoras (Figura 1). Apesar de ser um sistema bastante utilizado, principalmente por cantoneira simples, não existem estudos específicos sobre seu comportamento, como consequência as normas de cálculo não fornecem subsídios para o projeto desse componente estrutural.



Figura 1 – Sistemas em dupla cantoneira simples com chapas separadoras

É relevante estudar o comportamento de barras em dupla cantoneira, já que neste caso, além dos modos de instabilidade associados à cantoneira isolada, poderão ocorrer modos de instabilidade associados à barra composta em função da presença das chapas separadoras, que tendem a modificar o comportamento do sistema. A cantoneira enrijecida surge como uma alternativa para ser utilizada em barras compostas, por apresentar um comportamento estrutural bem definido.

Apresenta-se no trabalho análises numérica e experimental sobre o comportamento de barras em dupla cantoneira simples e enrijecida com chapas separadoras. A análise numérica foi realizada no programa ANSYS. Nas análises numérica e experimental variou-se o número de chapas

separadoras buscando estudar a eficiência das mesmas na força resistente à compressão das barras. Além disso, variou-se também a forma de conexão entre chapas separadoras e cantoneiras (parafusadas e soldadas) bem como a rigidez das mesmas.

Para comparação dos resultados obtidos, inicialmente foram adotadas duas hipóteses de cálculo com base no procedimento da ABNT NBR 14762:2010, considerando compressão centrada. Na primeira hipótese considerou-se cada cantoneira como uma barra isolada independente da presença das chapas separadoras, admitindo-se instabilidade local, global por flexo-torção e global por flexão, ou seja, o procedimento recomendado para o dimensionamento de cantoneira isolada. Na segunda hipótese, considerou-se barra composta admitindo-se apenas instabilidade local e global por flexão em relação ao eixo principal de menor inércia do conjunto. Com os resultados obtidos nas análises numérica e experimental são recomendados procedimentos para o dimensionamento desse elemento estrutural.

2 ANÁLISE EXPERIMENTAL

Foi realizada uma série de ensaios em dupla cantoneira simples (2L 60x2,00) e enrijecida (2Le 50x13x2,00) formadas a frio e cantoneira laminada (2L 50x5), totalizando 78 (setenta e oito) ensaios. Em todos os casos foram ensaiadas barras com força centrada, aplicada por meio de uma chapa espessa (12,5 mm) soldada nas extremidades, e barras com força excêntrica aplicada nas abas. Todas as barras em dupla cantoneira enrijecida (2Le 50x13x2,00) e dupla cantoneira laminada (2L 50x5) foram ensaiadas com extremidades fixas. No caso da dupla cantoneira simples formada a frio (2L 60x2,00) também foram ensaiadas barras com rotação livre em relação ao eixo de menor inércia do conjunto, neste caso, o comprimento teórico (L_c) foi admitido como sendo $L_{\text{barra}} + 135$ mm, correspondendo à distância entre os eixos de rotação dos dispositivos de apoio inferior e superior da máquina de ensaios.

Foram ensaiadas barras com diferentes índices de esbeltez, além disso, também variou-se o número de chapas separadoras. Na maioria dos ensaios foram utilizadas chapas separadoras parafusadas, o que permitiu sua reutilização. Também foram adotadas chapas separadoras soldadas com o objetivo de se comparar os resultados. Os ensaios de dupla cantoneira laminada (2L 50x5) foram realizados com objetivo de serem utilizados como referência, já que neste caso, por se tratar de uma seção compacta não está sujeita ao modo de instabilidade local e é pouco propensa ao modo de instabilidade global por flexo-torção. Os ensaios foram realizados apenas para um comprimento, no entanto, foram realizados ensaios sob compressão centrada e excêntrica variando-se o número de chapas separadoras. As propriedades mecânicas do aço e as dimensões das seções ensaiadas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas do aço e dimensões das seções ensaiadas

Seção	Aba (mm)	Enrijecedor (mm)	Espessura (mm)	f_y (MPa)	f_u (MPa)	E (MPa)
L 60x2,00	60	-	2,00	350	499	200000
L 50x5,00	50,8	-	4,76	307	455	200000
Le 50x13x2,00	50	13	2,00	350	499	200000

f_y – resistência ao escoamento do aço;
 f_u – resistência à ruptura do aço;
 E – módulo de elasticidade do aço.

3 ANÁLISE NUMÉRICA

As simulações numéricas foram realizadas no programa ANSYS. Em todas as simulações foi utilizado o elemento SHELL 181 para modelagem das cantoneiras e dos perfis “U” das extremidades. Também foi utilizado o elemento SOLID 45 para modelagem dos dispositivos de extremidades da máquina de ensaios para os modelos ensaiados com rotação livre em relação ao eixo de menor inércia do conjunto.

A estratégia adotada para inserção das imperfeições geométricas iniciais foi a mesma utilizada por MAIA et al. (2010). Inicialmente foi realizada uma análise de autovalor, que fornece como resultado tanto o autovalor (valor de força crítica) como o autovetor (deformada da barra) para os modelos. Nesta análise buscou-se identificar os modos críticos isolados de interesse para cada seção: coincidente local/flexo-torção e global de flexão para dupla cantoneira simples; local, flexo-torção e flexão para dupla cantoneira enrijecida. A partir da configuração deformada referente a cada um dos modos críticos escolhidos para cada caso, foi adotado um critério a fim de se aumentar ou reduzir esta amplitude, obtendo assim uma nova geometria de todos os nós da malha de elementos finitos da barra. As análises de autovalor/autovetor foram realizadas para os modelos sem chapas separadoras, ou seja, duas barras independentes. As imperfeições adotadas para todos os modelos, independente do número de chapas separadoras, foram sempre adotadas em relação à deformada das barras isoladas.

Com relação à amplitude das imperfeições geométricas iniciais foram utilizados os valores de imperfeições apresentados por SCHAFER & PEKÖZ (1998). Para dupla cantoneira simples foram adotadas imperfeições do tipo 2 associadas ao modo coincidente local/flexo-torção, enquanto para dupla cantoneira enrijecida foram adotadas imperfeições do tipo 1 associada ao modo local e do tipo 2 associada ao modo de flexo-torção. Para imperfeição associada ao modo de flexão foi adotado o valor de $L_c/1500$.

Com relação às chapas separadoras, foram realizadas duas simulações: na primeira adicionou-se uma chapa na face externa das abas fazendo coincidir os nós das chapas separadoras com os nós das cantoneiras, com isso promoveu-se a compatibilização de deslocamentos dos mesmos. Na segunda simulação, optou-se por fazer acoplamento de nós na posição das chapas separadoras. Foram acoplados dois nós de cada cantoneira localizados no centro das abas. Os nós tiveram as translações acopladas nas três direções.

4 RESULTADOS

4.1 Dupla cantoneira simples

Na Tabela 2 são apresentados os resultados da análise experimental da dupla cantoneira simples (2L 60x2,00) comparados com os resultados da análise numérica e das hipóteses teóricas adotadas. Os resultados da análise experimental das barras com chapas separadoras parafusadas são comparados com os resultados da análise numérica em que foi feito o acoplamento de deslocamentos de nós na posição das chapas separadoras. Os resultados da análise experimental das barras com chapas separadoras soldadas são comparados com os resultados da análise numérica em que foram modeladas as chapas separadoras. Nas Figuras 2 a 4 os resultados das análises experimental e numérica são comparados com os resultados das hipóteses teóricas adotadas. Nas Figuras 5 a 8 são apresentados típicos modos de instabilidade observados nas análises numérica e experimental.

Tabela 2 – Resultados da análise experimental comparados com os resultados das simulações numéricas e das hipóteses teóricas adotadas: perfil 2L 60x2,00 ($f_y = 350$ MPa)

Barra	Análise experimental		Análise numérica					
	N _{Exp} (kN)	Modo de falha	0 (FT) e 0 (F)			0,64t (FT) e L _c /1500 (F)		
			N _{EF} (kN)	Modo de falha	N _{Exp} /N _{EF}	N _{EF} (kN)	Modo de falha	N _{Exp} /N _{EF}
Extremidades fixas (compressão excêntrica)								
Chapas separadoras parafusadas								
L 600-0	72,2	FT/F*	71,6	FT/F*	1,01	71,9	FT/F*	1,00
L 600-1P	74,0	FT	73,1	FT/F	1,01	72,2	FT/F	1,02
L 600-2P	76,0	FT	76,9	FT/F	0,99	75,1	FT/F	1,01
N _{c,R} ⁽¹⁾ = 30,5 kN	N _{c,R} ⁽²⁾ = 76,8 kN							
L 1200-0	58,5	FT/F*	48,8	FT/F*	1,20	49,2	FT/F*	1,19
L 1200-0	50,4	FT/F*	48,8	FT/F*	1,03	49,2	FT/F*	1,02
L 1200-1P	55,4	FT/F*	54,3	FT/F	1,02	52,6	FT/F	1,05
L 1200-2P	50,6	FT/F/F*	60,7	FT/F	0,83	59,5	FT/F	0,85
L 1200-3P	56,2	FT/F/F*	72,5	FT/F	0,78	67,0	FT/F	0,84
L 1200-4P	62,5	FT/F/F*	75,3	FT/F	0,83	70,9	FT/F	0,88
L 1200-5P	72,9	FT/F	72,2	FT/F	1,01	69,8	FT/F	1,04
N _{c,R} ⁽¹⁾ = 29,8 kN	N _{c,R} ⁽²⁾ = 67,2 kN							
L 1800-0	34,1	FT/F*	33,4	FT/F*	1,02	33,8	FT/F*	1,01
L 1800-1P	45,0	FT/F/F*	43,2	FT/F	1,04	41,6	FT/F	1,08
L 1800-2P	42,8	FT/F/F*	47,8	FT/F	0,90	47,0	FT/F	0,91
L 1800-3P	41,1	FT/F/F*	57,8	FT/F	0,71	56,8	FT/F	0,72
L 1800-4P	53,5	FT/F/F*	64,5	FT/F	0,83	60,9	FT/F	0,88
N _{c,R} ⁽¹⁾ = 28,7 kN	N _{c,R} ⁽²⁾ = 53,6 kN							
L 2400-0	28,8	FT/F*	24,4	FT/F*	1,18	24,8	FT/F*	1,16
L 2400-1P	36,5	FT/F/F*	35,0	FT/F	1,04	33,7	FT/F	1,08
L 2400-2P	40,4	FT/F/F*	37,0	FT/F	1,09	34,9	FT/F	1,16
L 2400-5P	34,8	FT/F/F*	56,2	FT/F	0,62	51,5	FT/F	0,68
N _{c,R} ⁽¹⁾ = 19,9 kN	N _{c,R} ⁽²⁾ = 38,9 kN							
Chapas separadoras soldadas								
L 1800-1S	46,9	FT/F/F*	52,9	FT/F	0,89	52,1	FT/F	0,90
L 1800-2S	53,3	FT/F/F*	60,1	FT/F	0,89	54,2	FT/F	0,98
L 1800-3S	64,5	FT/F	60,4	FT/F	1,07	57,0	FT/F	1,13
L 1800-4S	56,1	FT/F	68,1	FT/F	0,82	66,8	FT/F	0,84
N _{c,R} ⁽¹⁾ = 28,7 kN	N _{c,R} ⁽²⁾ = 53,6 kN							
L 2400-1S	29,3	FT/F/F*	42,2	FT/F	0,69	40,4	FT/F	0,73
L 2400-1SR	34,8	FT/F/F*	42,2	FT/F	0,82	40,4	FT/F	0,86
L 2400-2S	43,7	FT/F/F*	43,1	FT/F	1,01	42,5	FT/F	1,03
L 2400-5S	52,0	FT/F	60,4	FT/F	0,86	57,7	FT/F	0,90
N _{c,R} ⁽¹⁾ = 19,9 kN	N _{c,R} ⁽²⁾ = 38,9 kN							
Extremidades fixas (compressão centrada)								
Chapas separadoras parafusadas								
LC 1200-0	58,0	FT	-	-	-	48,8	FT	1,19
LC 1200-1P	61,7	FT	-	-	-	74,0	FT	0,83
LC 1200-2P	69,6	FT	-	-	-	79,9	FT	0,87
LC 1200-3P	68,1	FT	-	-	-	79,3	FT	0,86
LC 1200-4P	70,4	FT	-	-	-	83,7	FT	0,84
N _{c,R} ⁽¹⁾ = 30,5 kN	N _{c,R} ⁽²⁾ = 76,8 kN							

Tabela 2 – continuação

Barra	Análise experimental		Análise numérica					
	N _{Exp} (kN)	Modo de falha	0 (FT) e 0 (F)			0,64t (FT) e L _c /1500 (F)		
			N _{EF} (kN)	Modo de falha	N _{Exp} /N _{EF}	N _{EF} (kN)	Modo de falha	N _{Exp} /N _{EF}
Flexão livre em relação ao eixo de menor inércia do conjunto (compressão excêntrica)								
Chapas separadoras parafusadas								
L 1200-0	35,5	FT/F*	32,7	FT/F*	1,09	33,1	FT/F*	1,07
L 1200-1P	42,5	FT/F	45,6	FT/F	0,93	43,8	FT/F	0,97
L 1200-2P	39,4	FT/F	44,6	FT/F	0,88	42,0	FT/F	0,94
L 1200-3P	44,0	FT/F	48,6	FT/F	0,91	47,0	FT/F	0,94
L 1200-4P	52,8	FT/F	49,1	FT/F	1,08	47,5	FT/F	1,11
N _{c R} ⁽¹⁾ = 29,6 kN		N _{c R} ⁽²⁾ = 64,4 kN						

Legenda:

LC X – N

L – cantoneira simples; C – compressão centrada; X – comprimento da barra; N – número de chapas separadoras.

FT – instabilidade por flexo-torção de cantoneira individual.

F – instabilidade por flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto.

F* – instabilidade por flexão em relação ao eixo paralelo à aba conectada.

N_{c,R}⁽¹⁾ – calculado com base na ABNT NBR 14762:2010 admitindo cantoneira isolada.

N_{c,R}⁽²⁾ – calculado com base na ABNT NBR 14762:2010 admitindo flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto.

O modo de instabilidade predominante na análise experimental da dupla cantoneira simples formada a frio (2L 60x2,00) foi flexo-torção de barra isolada com comprimento de semi-onda limitado pelas chapas separadoras. Para as barras mais curtas a inserção de chapas separadoras pouco interferiu na força resistente das barras, assim como observado na análise numérica, isso pode ser função do modo de instabilidade, já que neste caso, observou-se apenas flexo-torção e sabe-se que para cantoneira simples a força que tende a causar instabilidade por flexo-torção independe do comprimento da barra. Para comprimentos maiores a inserção de chapas separadoras melhorou de forma significativa o comportamento das barras. Neste caso, além do modo de flexo-torção também observou-se modo de flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto. Algumas barras com chapas separadoras parafusadas apresentaram instabilidade por flexão em relação ao eixo paralelo à aba conectada, neste caso, as ligações parafusadas não fornecem restrição ao giro, com isso quando há instabilidade de uma das barras a tendência é que a outra acompanhe. Para barras com chapas separadoras soldadas também observou-se essa tendência em alguns casos, principalmente para 1 e 2 chapas separadoras, mas de forma menos pronunciada, já que neste caso, a ligação das chapas fornece restrição ao giro.

Na análise numérica os modos de instabilidade observados foram flexo-torção e flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto. Em geral, os resultados da simulação numérica em que foi feito o acoplamento de deslocamento de nós na posição das chapas separadoras foram bastante coerentes com os resultados da análise experimental de barras com chapas separadoras parafusadas. Os resultados da análise numérica em que foram modeladas as chapas separadoras foram muito próximos dos resultados da análise experimental das barras com chapas separadoras soldadas. Com relação às imperfeições geométricas iniciais, observa-se que a adoção das mesmas pouco interferiu nos resultados já que os valores são muito baixos se comparados ao valor da excentricidade imposta pela aplicação da força nas abas.

No caso de barras com chapas separadoras parafusadas, alguns resultados da análise experimental foram muito baixos ao serem comparados com os resultados da análise numérica. Como na análise numérica procurou-se trabalhar com modelos simples, as simplificações adotadas para simular a ligação entre chapas separadoras e cantoneiras não permitiu o giro, fato que ocorreu na análise experimental.

Comparando os resultados da análise experimental de barras com chapas separadoras parafusadas com os valores das hipóteses teóricas adotadas, observou-se a mesma tendência dos resultados da análise numérica (modelos com acoplamento de deslocamentos de nós na posição das chapas separadoras), ou seja, valores intermediários aos obtidos nas hipóteses teóricas adotadas inicialmente. Resultados experimentais de barras isoladas tenderam para a hipótese que considerou barra isolada e com o aumento do número de chapas separadoras os valores tenderam para a hipótese que considerou flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto. Observa-se que apenas nos casos onde houve predominância de instabilidade por flexão os valores da análise experimental ultrapassaram os resultados obtidos pela hipótese que considerou barra composta.

Para as barras com chapas separadoras soldadas observou-se um significativo aumento na força normal resistente, além disso, para 2 chapas separadoras os valores experimentais e numéricos (modelos com chapas separadoras) já ultrapassam a hipótese teórica que considerou flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto.

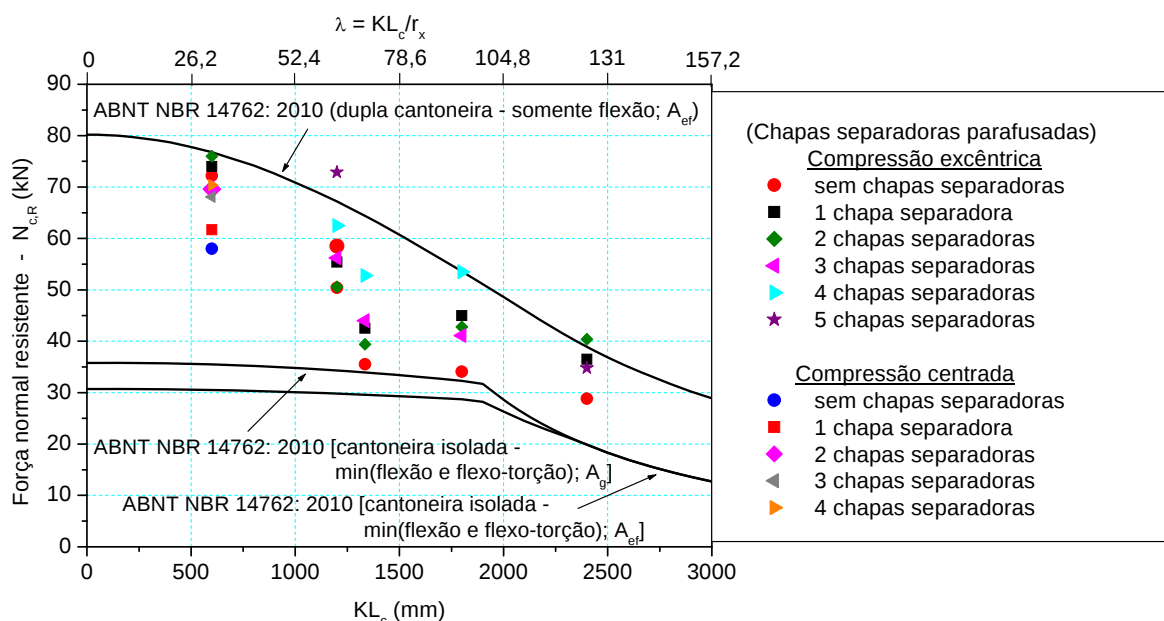


Figura 2 – Resultados da análise experimental comparados com os resultados das hipóteses teóricas adotadas (perfil: 2L 60x2,00) – Chapas separadoras parafusadas.

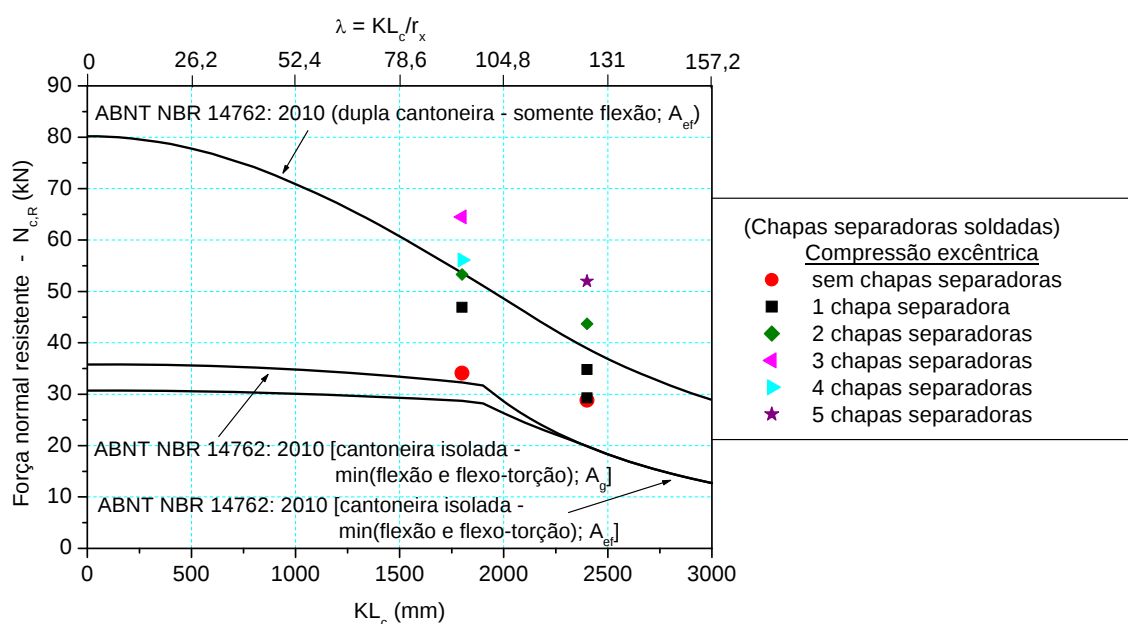


Figura 3 – Resultados da análise experimental comparados com os resultados das hipóteses teóricas adotadas (perfil: 2L 60x2,00) – Chapas separadoras soldadas.

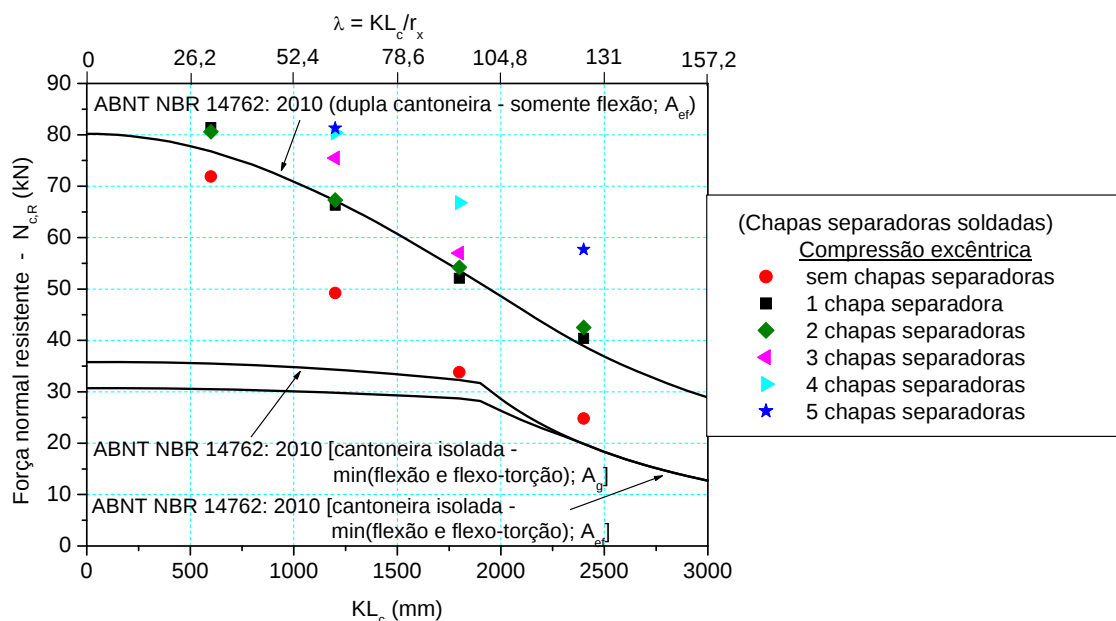


Figura 4 – Resultados da análise numérica comparados com os resultados das hipóteses teóricas adotadas (perfil: 2L 60x2,00) – Chapas separadoras soldadas – Imperfeições: 0,64t (FT) e $L_c/1500$ (F).

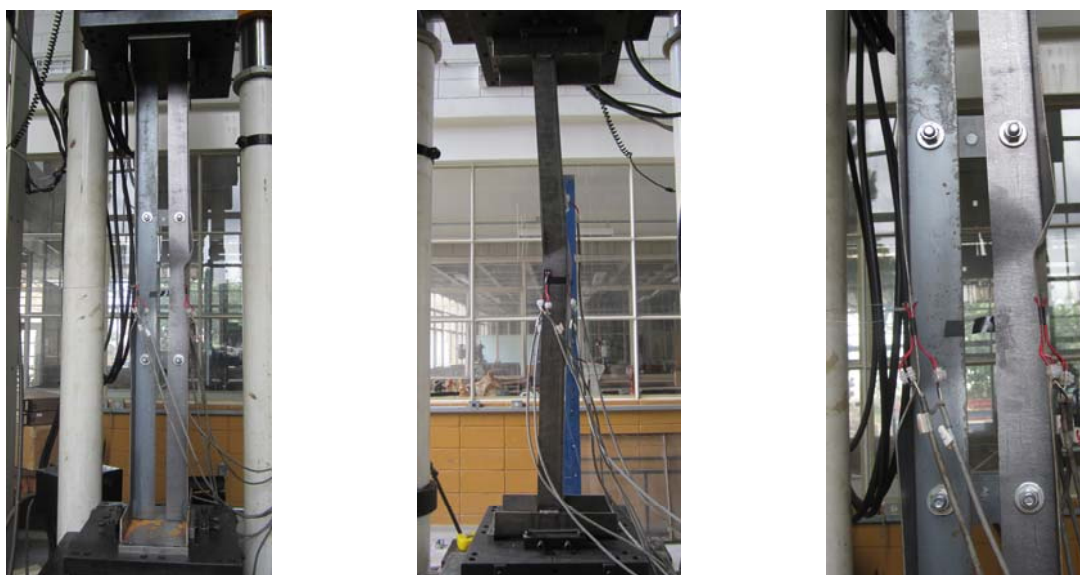


Figura 5 – Instabilidade por flexo-torção (FT)/flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto (F) ($L_c = 1200$ mm – Compressão excêntrica).

Com os resultados obtidos, entende-se que quando as chapas separadoras restringirem o giro (soldadas ou conectadas por 2 parafusos) pode-se adotar como procedimento de cálculo a hipótese que considera apenas modo global de flexão e modo local. No caso das chapas separadoras parafusadas (1 parafuso) entende-se que seria contra a segurança adotar o mesmo procedimento, com isso, o mais correto seria adotar o procedimento que considera barras isoladas. No entanto, como alternativa e a favor da economia, entende-se que ao considerar os modos globais de flexão e flexo-torção pode-se considerar a área efetiva igual a área bruta. Outra alternativa seria a utilização do procedimento proposto pela ABNT NBR 8800: 2008 para cantoneiras simples conectadas pela aba, em que no cálculo da força axial de flambagem elástica considera apenas o modo global de flexão em relação ao eixo paralelo à aba conectada, mas com um comprimento de flambagem equivalente. Neste caso, deve considerar o cálculo da área efetiva.

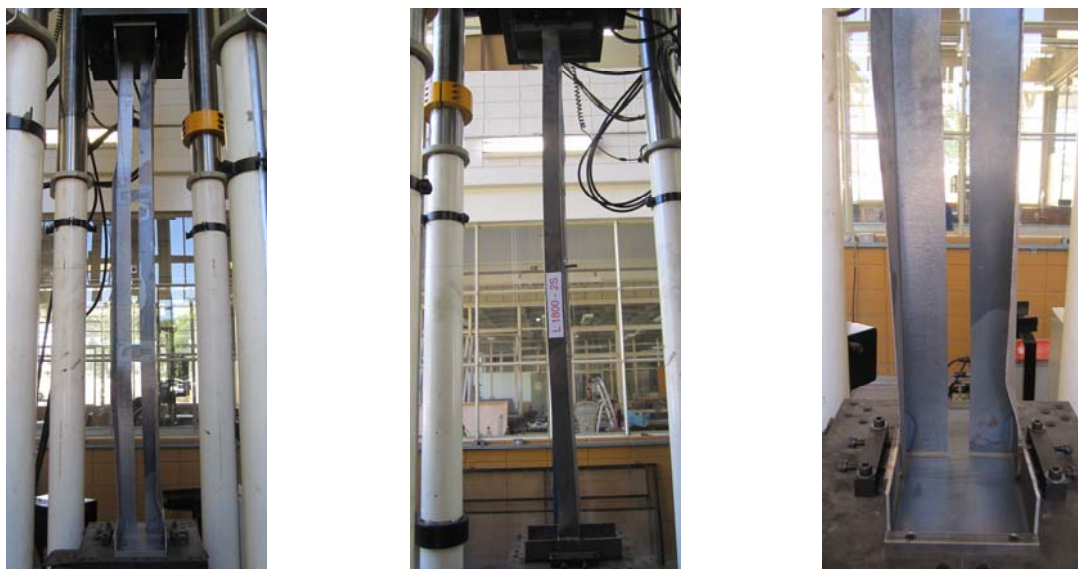


Figura 6 – Instabilidade por flexo-torção (FT)/flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto (F)/flexão em relação ao eixo paralelo à aba conectada (F*) ($L_c = 1800$ mm – Compressão excêntrica).

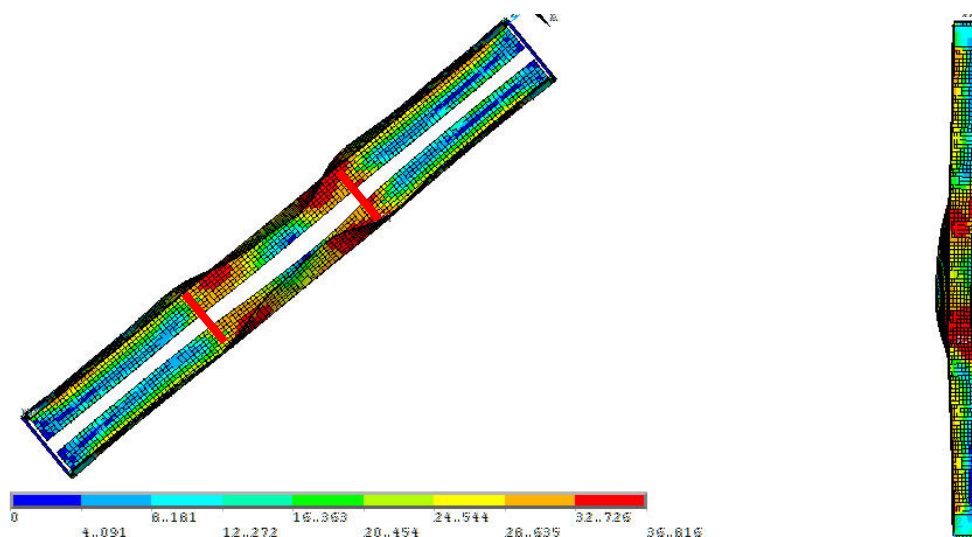


Figura 7 – Instabilidade por flexo-torção/flexão e distribuição de tensões de von Mises (Compressão excêntrica – Acoplamento de nós).

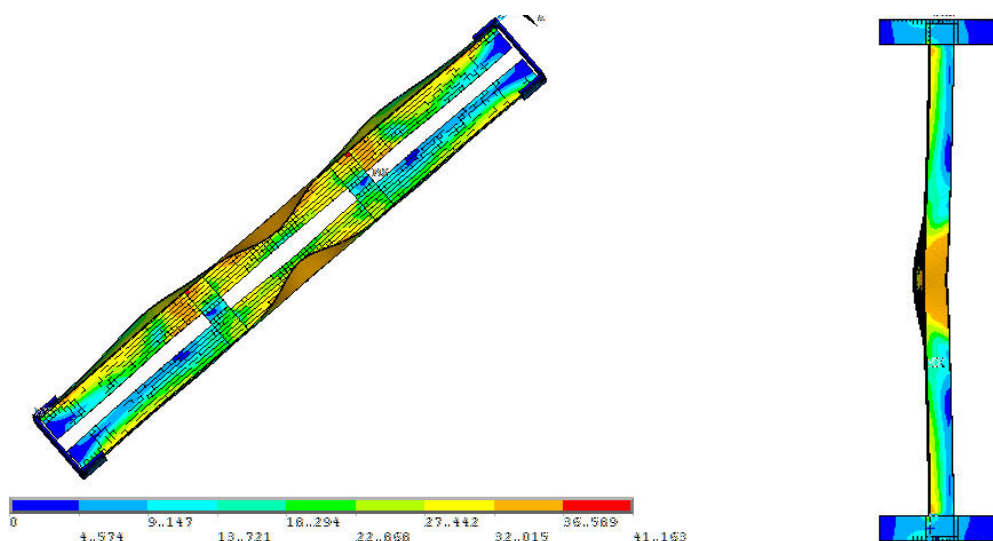


Figura 8 – Instabilidade por flexo-torção/flexão e distribuição de tensões de von Mises (Compressão excêntrica – Chapas separadoras).

4.2 Dupla cantoneira enrijecida

Na Tabela 3 são apresentados os resultados da análise experimental da dupla cantoneira enrijecida (2Le 50x13x2,00) comparados com os resultados da análise numérica e das hipóteses teóricas adotadas. Os resultados da análise experimental das barras com chapas separadoras parafusadas são comparados com os resultados da análise numérica em que foi feito o acoplamento de deslocamentos de nós na posição das chapas separadoras. Os resultados da análise experimental das barras com chapas separadoras soldadas são comparados com os resultados da análise numérica em que foram modeladas as chapas separadoras. Nas Figuras 9 a 11 os resultados das análises experimental e numérica são comparados com os resultados das hipóteses teóricas adotadas. Nas Figuras 12 a 15 são apresentados típicos modos de instabilidade observados nas análises numérica e experimental.

Tabela 3 – Resultados da análise experimental comparados com os resultados das simulações numéricas e das hipóteses teóricas adotadas: perfil 2Le 50x13x2,00 ($f_y = 350$ MPa)

Barra	Análise experimental		Análise numérica					
	N _{Exp} (kN)	Modo de falha	0 (L); 0 (FT) e 0 (F)			0,14t (L); 0,64t (FT) e L _c /1500 (F)		
			N _{EF} (kN)	Modo de falha	N _{Exp} /N _{EF}	N _{EF} (kN)	Modo de falha	N _{Exp} /N _{EF}
Extremidades fixas (compressão excêntrica)								
Chapas separadoras parafusadas								
Le 600-0	81,8	FT/F*	80,3	FT/F*	1,02	78,4	FT/F*	1,04
Le 600-1P	111,3	FT	102,8	FT	1,08	98,3	FT	1,13
Le 600-2P	113,6	FT	105,0	FT	1,08	102,6	FT	1,11
N _{c,R} ⁽¹⁾ = 63,7 kN	N _{c,R} ⁽²⁾ = 149,2 kN							
Le 1200-0	57,0	FT/F*	54,3	FT/F*	1,05	52,4	FT/F*	1,09
Le 1200-1P	81,1	FT/F/F*	72,3	FT/F	1,12	71,5	FT/F	1,13
Le 1200-2P	83,4	FT/F*	78,9	FT/F	1,06	77,3	FT/F	1,08
Le 1200-3P	102,2	FT/F/F*	95,2	FT/F	1,07	93,3	FT/F	1,09
Le 1200-4P	108,4	FT/F	98,2	FT/F	1,10	95,1	FT/F	1,14
N _{c,R} ⁽¹⁾ = 38,8 kN	N _{c,R} ⁽²⁾ = 115,2 kN							
Le 1800-0	36,4	FT/F*	37,6	FT/F*	0,97	36,1	FT/F*	1,00
Le 1800-1P	62,0	FT/F/F*	54,7	FT/F	1,13	54,3	FT/F	1,14
Le 1800-2P	63,2	FT/F/F*	60,7	FT/F	1,04	59,3	FT/F	1,07
Le 1800-3P	73,9	FT/F/F*	75,2	FT/F	0,98	72,8	FT/F	1,02
Le 1800-4P	69,3	FT/F/F*	80,9	FT/F	0,86	78,3	FT/F	0,89
N _{c,R} ⁽¹⁾ = 31,9 kN	N _{c,R} ⁽²⁾ = 74,9 kN							
Le 2400-0	18,7	FT/F*	27,5	FT/F*	0,68	26,0	FT/F*	0,72
Le 2400-0R	24,0	FT/F*	27,5	FT/F*	0,87	26,0	FT/F*	0,92
Le 2400-1P	44,4	FT/F/F*	40,5	FT/F	1,10	40,2	FT/F	1,10
Le 2400-2P	52,9	FT/F/F*	48,3	FT/F	1,10	46,9	FT/F	1,13
Le 2400-5P	45,7	FT/F/F*	72,3	FT/F	0,63	68,9	FT/F	0,66
N _{c,R} ⁽¹⁾ = 20,4 kN	N _{c,R} ⁽²⁾ = 43,3 kN							
Chapas separadoras soldadas								
Le 1800-1S	61,5	FT/F/F*	58,9	FT/F	1,04	55,2	FT/F	1,11
Le 1800-2S(1)	78,3	FT/F/F*	72,1	FT/F	1,09	70,3	FT/F	1,11
Le 1800-2S(2)	83,4	FT/F/F*	76,1	FT/F	1,10	73,7	FT/F	1,13
Le 1800-3S	95,6	FT/F/F*	85,9	FT/F	1,11	82,4	FT/F	1,16
Le 1800-41S	96,2	FT/F	91,6	FT/F	1,05	87,6	FT/F	1,10
Le 1800-42S	102,4	FT/F	95,2	FT/F	1,08	91,7	FT/F	1,12
N _{c,R} ⁽¹⁾ = 31,9 kN	N _{c,R} ⁽²⁾ = 74,9 kN							

Tabela 3 – continuação

Barra	Análise experimental		Análise numérica					
	N _{Exp} (kN)	Modo de falha	0 (L); 0 (FT) e 0 (F)			0,14t (L); 0,64t (FT) e L _c /1500 (F)		
			N _{EF} (kN)	Modo de falha	N _{Exp} /N _{EF}	N _{EF} (kN)	Modo de falha	N _{Exp} /N _{EF}
Extremidades fixas (compressão excêntrica)								
Chapas separadoras soldadas								
Le 2400-1S	45,0	FT/F/F*	45,6	FT/F	0,99	45,0	FT/F	1,00
Le 2400-2S	66,2	FT/F	58,5	FT/F	1,13	56,9	FT/F	1,16
Le 2400-5S	80,2	FT/F/F*	81,1	FT/F	0,99	77,0	FT/F	1,04
N _{c,R} ⁽¹⁾ = 20,4 kN	N _{c,R} ⁽²⁾ = 43,3 kN							
Extremidades fixas (compressão centrada)								
Chapas separadoras parafusadas								
LeC 1200-0	77,1	FT	-	-	-	76,1	FT/F*	1,01
LeC 1200-1P	91,3	FT	-	-	-	88,9	FT	1,03
LeC 1200-2P	108,9	FT	-	-	-	95,6	FT	1,14
LeC 1200-3P	115,0	FT	-	-	-	114,0	FT	1,01
LeC 1200-4P	107,6	FT	-	-	-	118,6	FT	0,91
N _{c,R} ⁽¹⁾ = 63,7 kN	N _{c,R} ⁽²⁾ = 149,2 kN							

Legenda:

LeC X – N(M)

Le – cantoneira enrijecida; C – compressão centrada; X – comprimento da barra; N – número de chapas separadoras; (M) – chapas separadoras soldadas – (1): chapa com 50 mm de largura;

(2): chapa com 100 mm de largura.

FT – Instabilidade por flexo-torção de cantoneira individual.

F – instabilidade por flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto.

F* – instabilidade por flexão em relação ao eixo paralelo à aba conectada.

 $N_{c,R}^{(1)}$ – calculado com base na ABNT NBR 14762:2010 admitindo cantoneira isolada.

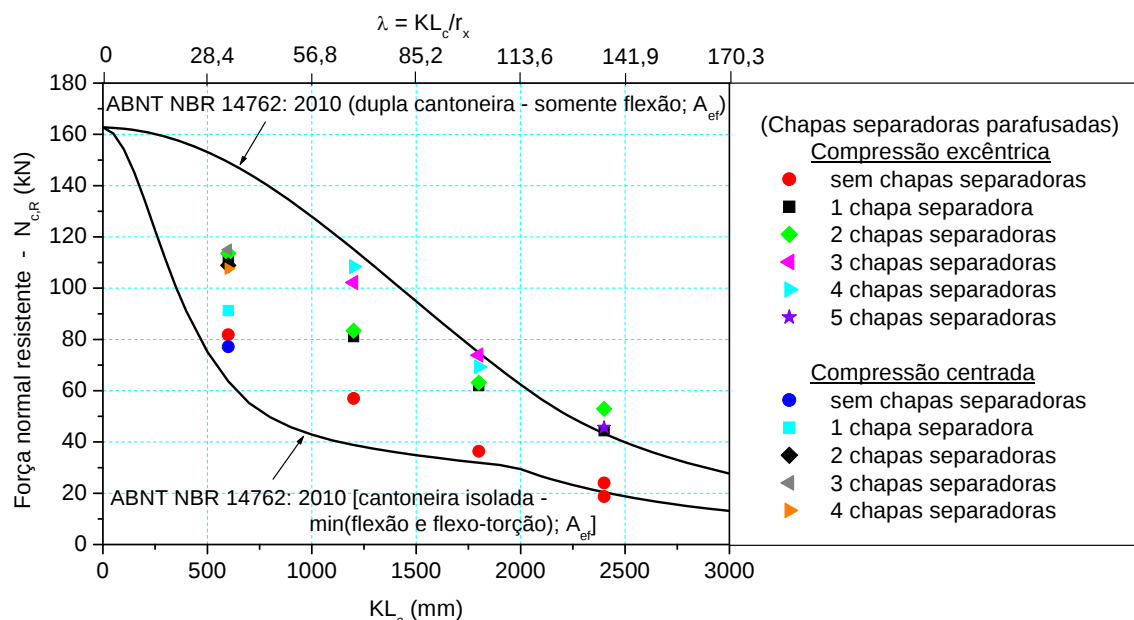
 $N_{c,R}^{(2)}$ – calculado com base na ABNT NBR 14762:2010 admitindo flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto.


Figura 9 – Resultados da análise experimental comparados com os resultados das hipóteses teóricas adotadas (perfil: 2Le 50x13x2,00) – Chapas separadoras parafusadas.

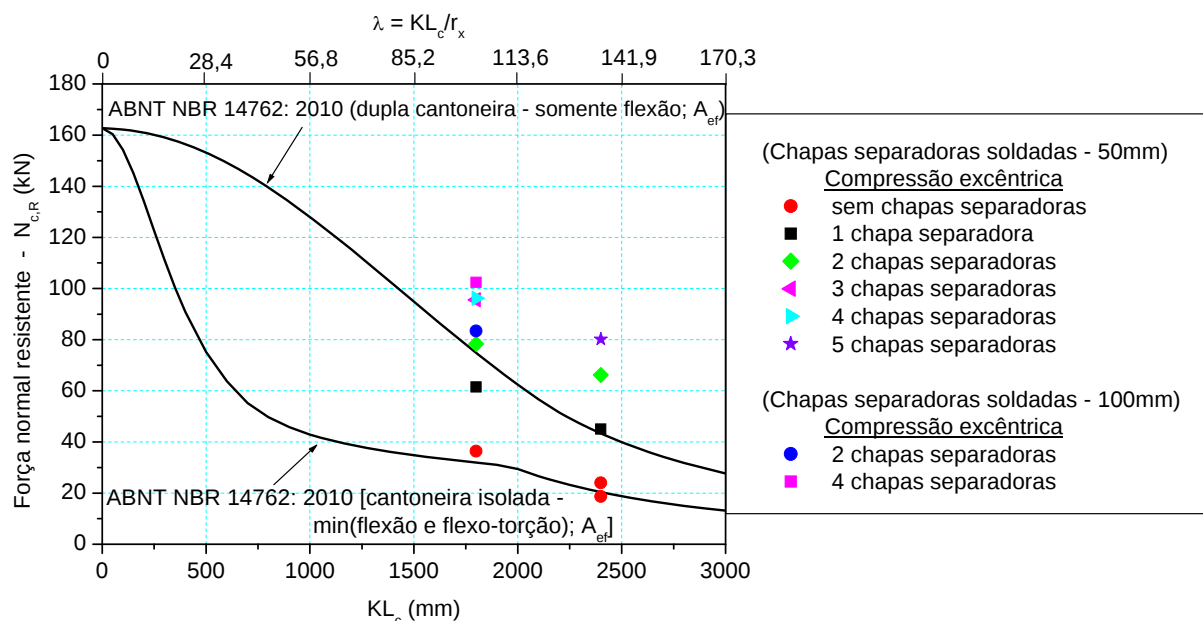


Figura 10 – Resultados da análise experimental comparados com os resultados das hipóteses teóricas adotadas (perfil: 2Le 50x13x2,00) – Chapas separadoras soldadas.

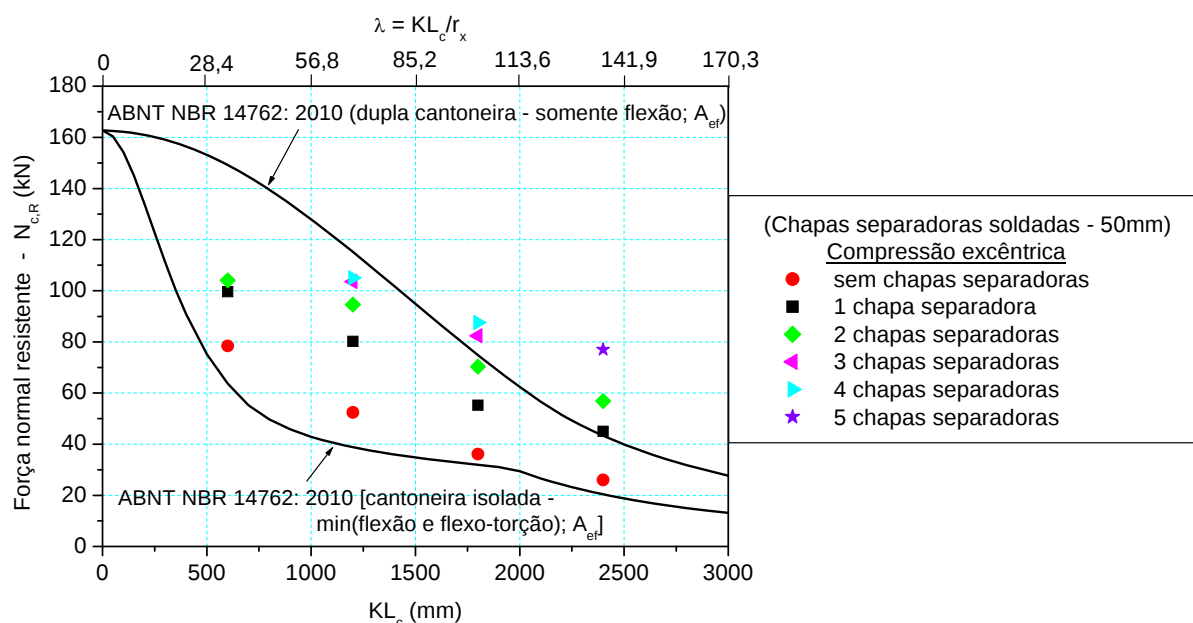


Figura 11 – Resultados da análise numérica comparados com os resultados das hipóteses teóricas adotadas (perfil: 2Le 50x13x2,00) – Chapas separadoras soldadas – Imperfeições: 0,14t (L); 0,64t (FT) e $L_c/1500$ (F).

Nos resultados da análise experimental da dupla cantoneira enrijecida (2Le 50x13x2,00) observou-se que o modo de instabilidade predominante também foi o de flexo-torção, no entanto, a inserção de chapas separadoras melhorou de forma significativa o comportamento das barras, inclusive no caso das barras mais curtas, já que no caso da cantoneira enrijecida a força que tende a causar instabilidade por flexo-torção depende do comprimento. Assim como ocorreu na análise experimental da dupla cantoneira simples, algumas barras com chapas separadoras parafusadas também apresentaram instabilidade por flexão em relação ao eixo paralelo à aba conectada. Assim como no caso da dupla cantoneira simples, o fato também ocorreu para as barras mais longas, ou seja, barras com tendência de instabilidade por flexão. Os resultados também foram baixos ao serem

comparados com os resultados da análise numérica. Para barras com chapas separadoras soldadas também observou-se essa tendência em alguns casos, principalmente para 1 e 2 chapas separadoras, mas de forma menos pronunciada, já que neste caso, a ligação das chapas fornece restrição ao giro.

Da mesma forma que aconteceu na análise da dupla cantoneira simples, os resultados da simulação numérica em que foi feito o acoplamento de deslocamento de nós na posição das chapas separadoras foram bastante coerentes com os resultados da análise experimental de barras com chapas separadoras parafusadas. Os resultados da análise numérica em que foram modeladas as chapas separadoras foram muito próximos dos resultados da análise experimental das barras com chapas separadoras soldadas. Com relação às imperfeições geométricas iniciais, também observou-se que a adoção das mesmas pouco interferiu nos resultados já que os valores são muito baixos se comparados ao valor da excentricidade imposta pela aplicação da força nas abas.

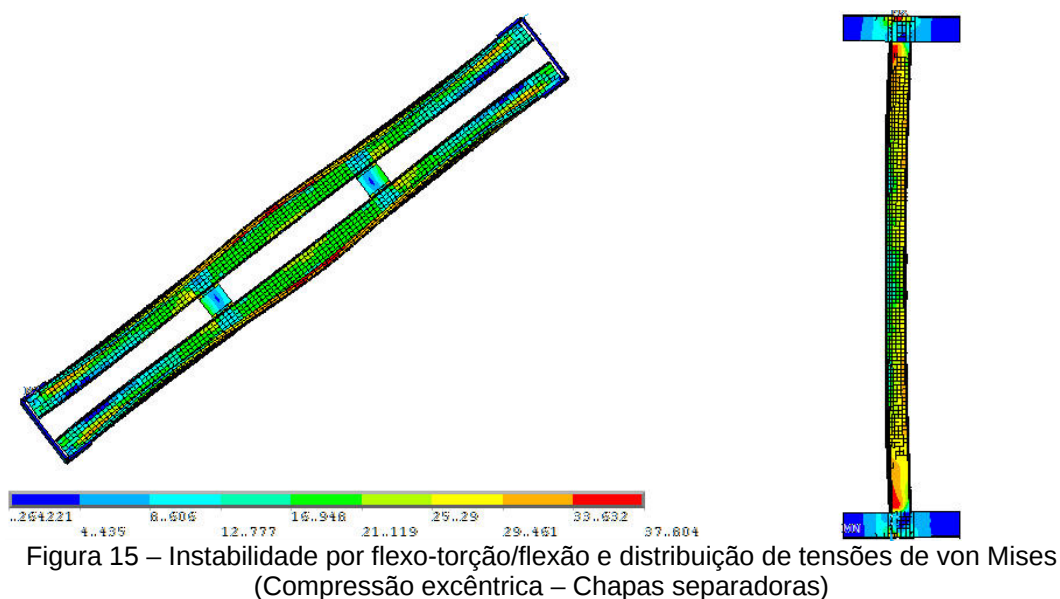
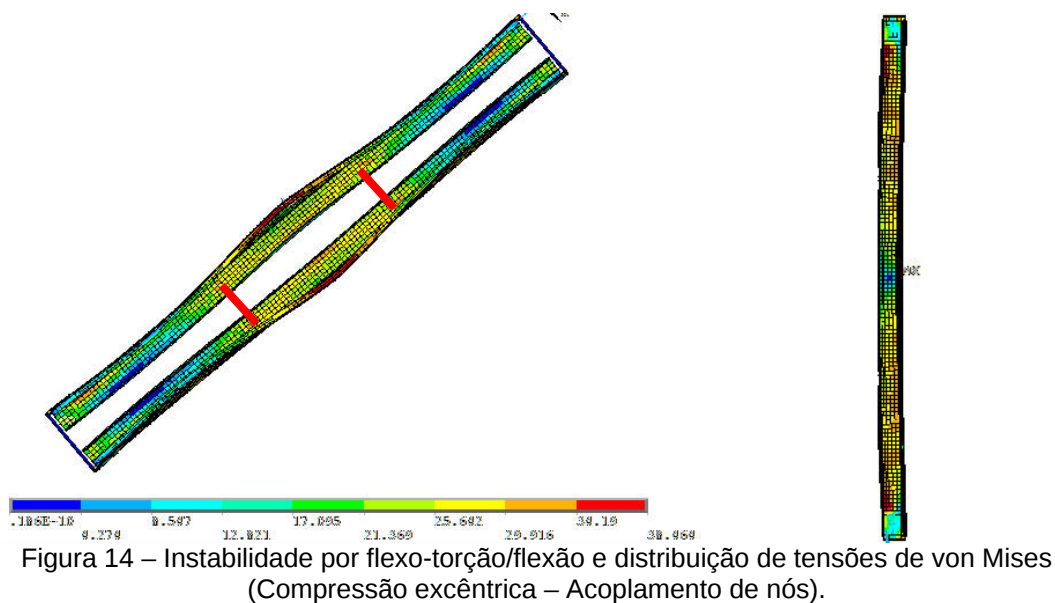


Figura 12 – Instabilidade por flexo-torção (FT)/flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto (F)/flexão em relação ao eixo paralelo à aba conectada (F^*) ($L_c = 1800$ mm – Compressão excêntrica).



Figura 13 – Instabilidade por flexo-torção (FT)/flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto (F)/flexão em relação ao eixo paralelo à aba conectada (F^*) ($L_c = 1800$ mm – Compressão excêntrica).

Comparando os resultados da análise experimental com os valores das hipóteses teóricas adotadas, observou-se a mesma tendência dos resultados da análise numérica, ou seja, valores intermediários aos obtidos nas hipóteses teóricas. Resultados experimentais de barras isoladas tenderam para a hipótese que considerou barra isolada e com o aumento do número de chapas separadoras os valores tenderam para a hipótese que considerou flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto. Observa-se que apenas nos casos onde houve predominância de instabilidade por flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto os valores das análises numérica e experimental ultrapassaram os resultados obtidos pela hipótese que considerou barra composta. O mesmo comportamento foi observado tanto no caso de barras com chapas separadoras parafusadas quanto soldadas. No entanto, observou-se um significativo aumento na força normal resistente no caso de barras com chapas separadoras soldadas, principalmente para as barras que apresentaram tendência de flexão em relação ao eixo paralelo à aba conectada.



5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos mostraram que as barras compostas em dupla cantoneira simples e enrijecida com chapas separadoras apresentam comportamento bastante interessante. Foram observados modos de instabilidade por flexo-torção, por flexão e combinação dos modos. Em geral os resultados das análises numérica e experimental apresentaram valores intermediários aos obtidos com base nas duas hipóteses teóricas adotados inicialmente, ou seja, considerando cantoneira isolada (modos local e mínimo entre global de flexão e global de flexo-torção) e dupla cantoneira (modos local e global de flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto). Em geral, os resultados das análises numérica e experimental de barras isoladas foram conservadores ao serem comparados com os valores obtidos pela hipótese que considerou barra isolada, com a inserção das chapas separadoras os resultados tenderam para a hipótese que considerou barra composta.

Com relação à análise numérica, o modelo numérico adotado mostrou-se bastante adequado, observa-se que de uma forma geral ele conseguiu reproduzir de forma bastante coerente os resultados obtidos na análise experimental, tanto no caso de chapas separadoras parafusadas quanto nas chapas separadoras soldadas. Com isso, entende-se que o modelo pode ser extrapolado para outras seções, no sentido de investigar diferentes índices de esbeltez local e global.

Com relação às hipóteses de cálculo, para barras em dupla cantoneira simples, entende-se que se forem adotadas chapas separadoras que restringem o giro (chapas separadoras soldadas ou com dois parafusos na direção da solicitação) pode-se adotar como procedimento de cálculo a hipótese que considera apenas modos local e global de flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto. Entende-se que a não consideração do modo global de flexo-torção é coberta pela consideração da área efetiva da seção. Observa-se que nesse caso para duas chapas separadoras os valores das análises numérica e experimental já atingem os valores da hipótese teórica. Para as barras com chapas separadoras parafusadas, a favor da segurança, seria mais coerente adotar como procedimento de cálculo a hipótese que considera barra isolada.

Para a dupla cantoneira enrijecida os resultados das análises numérica e experimental foram intermediários aos valores obtidos pelas duas hipóteses de cálculo adotadas inicialmente, atingindo os valores do procedimento que considerou apenas modo local e global por flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto apenas para barras mais longas, ou seja, barras que apresentaram tendência de instabilidade por flexão. O comportamento foi observado tanto para barras com chapas separadoras soldadas quanto parafusadas. Com isso, entende-se que o mais correto é adotar como procedimento de cálculo a hipótese que considera barra isolada.

Um fato interessante observado nas análises numérica e experimental é que, em muitos casos, barras com uma chapa separadora apresentou melhor comportamento que barras com duas chapas separadoras, mostrando a necessidade de se ter uma chapa separadora no meio do comprimento. Com isso, entende-se que o ideal é trabalhar com número impar de chapas separadoras, ou seja, no mínimo três.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, CAPES e FIPAI pelos recursos financeiros concedidos.

7 REFERÊNCIAS

ANSYS. **Structural nonlinearities**. v.13.0, Houston, USA, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **ABNT NBR 14762: 2010**. Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro, Brasil, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **ABNT NBR 8800: 2008**. Projeto e execução de estruturas de aço e de estruturas mistas aço-concreto de edifícios – Procedimento. Rio de Janeiro, Brasil, 2008.

MAIA, W. F.; MUNAIAR NETO, J.; MALITE, M. (2010). Theoretical analysis of cold-formed steel battened double angle members under compression. In: LaBoube, R.A.; Yu, W.W. (Ed). **Recent research and developments in cold-formed steel design and construction** (20th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, St. Louis, USA, November 3 & 4, 2010). Missouri University of Science & Technology, Rolla, Missouri, USA, v. 1. p. 121-135.

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