

SOBRE PERFIS DE AÇO FORMADOS A FRIO COMPOSTOS POR DUPLA CANTONEIRA COM SEÇÃO “T” SUBMETIDOS À COMPRESSÃO

Davi Fagundes Leal¹ & Jorge Munaiar Neto²

Resumo

Neste trabalho, foram desenvolvidos modelos numéricos em elementos finitos para a investigação do comportamento estrutural de perfis de aço formados a frio compostos por dupla cantoneira com seção “T” submetidos à compressão. Por meio de análises não-lineares, foi avaliada a influência de diversos fatores, como: forma de introdução do carregamento (compressão centrada ou excêntrica), condições de vinculação, esbeltez global e local, imperfeições geométricas e número de presilhas. Os resultados numéricos indicam que os valores de força normal de compressão resistente, obtidos conforme a ABNT NBR 14762:2010, podem resultar bastantes conservadores. Adicionalmente, a quantidade de presilhas se mostrou bastante influente, tanto na capacidade resistente quanto nos modos de instabilidade predominantes. Por fim, o trabalho prevê uma investigação introdutória sobre esses perfis em situação de incêndio, cujas análises termoestruturais realizadas apresentam tempos de resistência ao fogo bem abaixo do mínimo especificado pela ABNT NBR 14432:2001, apontando à necessidade do uso de revestimento contra fogo nesse tipo de perfil.

Palavras-chave: Perfis de aço formados a frio. Modelagem numérica. Compressão. Estabilidade estrutural. Incêndio.

NUMERICAL STUDY OF DOUBLE BACK-TO-BACK COLD-FORMED STEEL ANGLES UNDER COMPRESSION

Abstract

A finite element numerical analysis was performed to understand how the axial strength of double back-to-back cold-formed steel angles is influenced by: loading condition (concentric and eccentric axial compression), boundary condition, global slenderness, geometric imperfections, cross-section thickness, and connection spacing. This paper also presents preliminary results on the behavior of the same built-up cross-section under high temperatures. The study shows that the nominal axial strength according to ABNT NBR 14762:2010 is conservative in most cases. The thermo-structural analysis revealed that according to the minimum fire resistance specified at ABNT NBR 14432:2001 all the built-up cross-sections analyzed need fire protection. The connection spacing (bolted connection with stitch plates in-between the angles) and the presence of a connection at mid-length alter the buckling mode and significantly increases the strength of the member.

Keywords: Cold-formed steel double angles. Numerical analysis. Compression. Structural stability. Fire.

¹ Mestre em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, daviusp@sc.usp.br

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

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, dentre os perfis de aço formados a frio (PFF) mais utilizados em sistemas estruturais correntes, merecem destaque aqueles compostos por duas cantoneiras ligadas entre si por meio de presilhas parafusadas, apresentando seção transversal na forma de “T”. Embora tenha utilização bastante difundida, pouco se sabe sobre seu comportamento estrutural, principalmente em relação aos modos de instabilidade a ele associados, evidenciando a necessidade de mais pesquisas sobre o assunto.

2 METODOLOGIA

Os estudos foram realizados por meio de modelos numéricos desenvolvidos com os recursos do código computacional ANSYS 11.0 e analisados com base no Método dos Elementos Finitos, considerando-se as não-linearidades geométricas e de material. Inicialmente, foram realizadas análises dos perfis sob compressão centrada, a partir das quais se calibrou o modelo numérico por meio de comparação com os resultados experimentais apresentados em CHODRAUI (2006). Em seguida, o comportamento estrutural dos PFF em questão foi investigado sob compressão excêntrica, situação essa mais comumente encontrada na prática. Finalmente, realizou-se um estudo introdutório desses mesmos perfis em situação de incêndio por meio de análises numéricas termoestruturais. Maiores informações sobre a metodologia utilizada estão apresentadas em LEAL (2011).

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Análises à temperatura ambiente

As análises à temperatura ambiente foram realizadas em perfis situados dentro de uma faixa de esbeltez usual na prática da engenharia, englobando situações com compressão **centrada** e **excêntrica**.

3.1.1 Geometria dos modelos

Para os modelos submetidos à **compressão centrada**, foram criadas geometrias semelhantes àquelas adotadas nos ensaios apresentados em CHODRAUI (2006), sendo modelados dispositivos de apoio com acoplamentos e restrições nodais capazes de simular rótulas cilíndricas posicionadas em relação aos eixos principais de inércia da seção do perfil. As dimensões da seção transversal das cantoneiras foram fixadas em 60x60x2,38mm, com o espaçamento entre as mesmas igual a 5,0mm. Os cantos arredondados dos perfis foram modelados com raio médio igual a 1,5.t, e a influência da esbeltez global foi verificada por meio da variação do comprimento do perfil, a saber:

a-) *Rótula no eixo de menor inércia do conjunto (eixo-x): 910mm, 1485mm, 2055mm, 2630mm (índice de esbeltez igual a 55, 85, 115 e 145, respectivamente).*

b-) *Rótula no eixo de maior inércia do conjunto (eixo-y): 1355mm, 1885mm, 2415mm, 2925mm (índice de esbeltez igual a 56, 76, 96 e 115, respectivamente).*

Foram utilizadas duas presilhas para os perfis com a rótula cilíndrica posicionada segundo o eixo-x e três presilhas para aqueles com a rótula cilíndrica posicionada segundo o eixo-y, sendo igualmente espaçadas ao longo do comprimento em ambos os casos. A conexão das presilhas com os perfis foi modelada por meio de acoplamentos nodais nas regiões dos parafusos.

Para os modelos submetidos à **compressão excêntrica**, foram empregadas duas seções transversais diferentes, sendo mantidas as abas das cantoneiras com 60mm e variando a espessura de suas chapas entre os valores 1,5mm e 3,0mm (seções 60x60x1,5mm e 60x60x3,0mm). Também

neste caso, a distância entre as cantoneiras que compõem o perfil (espessura das presilhas) e o raio médio de dobramento foram adotados iguais a 5,0mm e 1,5.t, respectivamente. Os perfis foram analisados com os seguintes comprimentos:

a-) Seção 60x60x1,5mm: 695mm, 1175mm, 1745mm, 2320mm, 2895mm (índice de esbeltez igual a 30, 55, 85, 115 e 145, respectivamente).

b-) Seção 60x60x3,0mm: 500mm, 875mm, 1445mm, 2010mm, 2580mm, 3145mm (índice de esbeltez igual a 20, 40, 70, 100, 130 e 160, respectivamente).

O número de presilhas utilizadas variou de zero (perfis cujas cantoneiras são unidas apenas pelas chapas de ligação) a um máximo igual a 4. Para os dispositivos de apoio do perfil, foram modelados sólidos de topo engastados e conectados a uma chapa de ligação em cada extremidade. O carregamento excêntrico foi introduzido por meio de uma ligação parafusada a apenas uma das abas de cada cantoneira, tendo dois parafusos de diâmetro igual a 19mm em cada extremidade.

3.1.2 Malha e elementos finitos utilizados

A discretização dos perfis sob **compressão centrada** foi feita utilizando-se basicamente dois elementos finitos disponibilizados no ANSYS: **SHELL 181**, para as chapas das cantoneiras; e **SOLID 45**, para os sólidos de topo e para as presilhas. Também foi utilizado o par de elementos de contato **CONTA 173** e **TARGE 170** para eliminar problemas de interpenetração das chapas. Baseando-se nas modelagens numéricas apresentadas em ALMEIDA (2007) e em MAIA (2008), foram inseridas malhas mapeadas com elementos de, aproximadamente, 1cm x 1cm, conforme ilustrado na Figura 1a.

Para os perfis analisados sob **compressão excêntrica**, foram utilizados, além dos elementos **SHELL 181** e **SOLID45** empregados nos modelos sob compressão centrada, o elemento **SOLID 95** para a discretização das chapas de ligação. Na região das ligações, os elementos foram inseridos com forma triangular para melhor descrever o contorno dos furos. Foram empregados, também, os elementos de contato equivalentes aos elementos base, a saber: o par **CONTA 173** e **TARGE 170** para as malhas com os elementos SHELL 181 e SOLID 45; e o par **CONTA 174** e **TARGE 170** para as malhas com o elementos SOLID 95, conforme representado na FIGURA 1b.

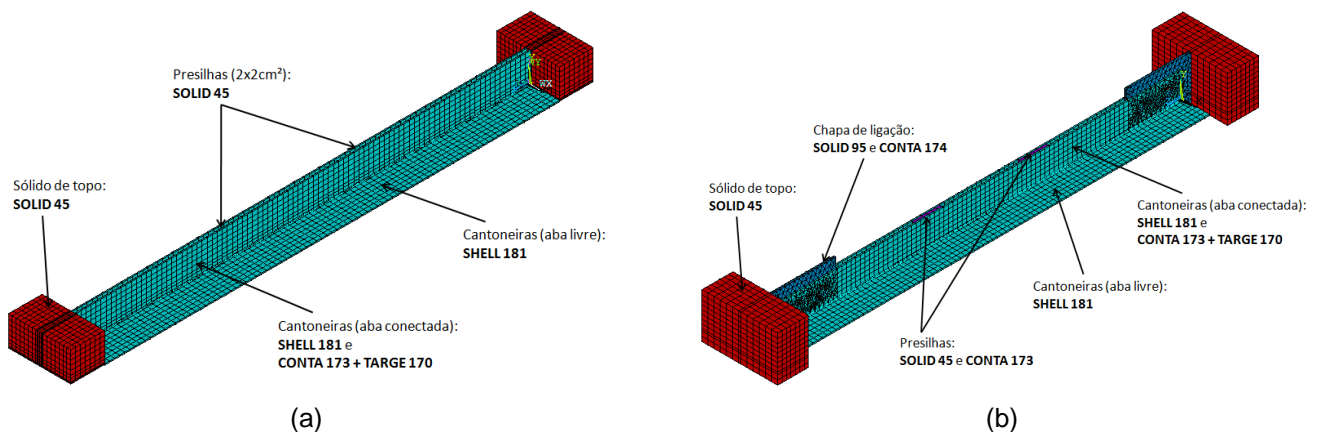


Figura 1 – Malha e elementos finitos utilizados nos modelos (a) sob **compressão centrada** e (b) sob **compressão excêntrica**.

3.1.3 Imperfeições geométricas iniciais

Em LEAL (2011) são apresentados os resultados de uma ampla análise de sensibilidade para a seleção de imperfeições geométricas iniciais que melhor descrevem o comportamento dos perfis em questão, tomando-se os resultados experimentais apresentados em CHODRAUI (2006) como base para comparações. A Figura 2 mostra as *formas* das imperfeições geométricas globais e locais

inseridas nos modelos numéricos com carregamento centrado. Imperfeições semelhantes foram adotadas também nos modelos sob compressão excêntrica.

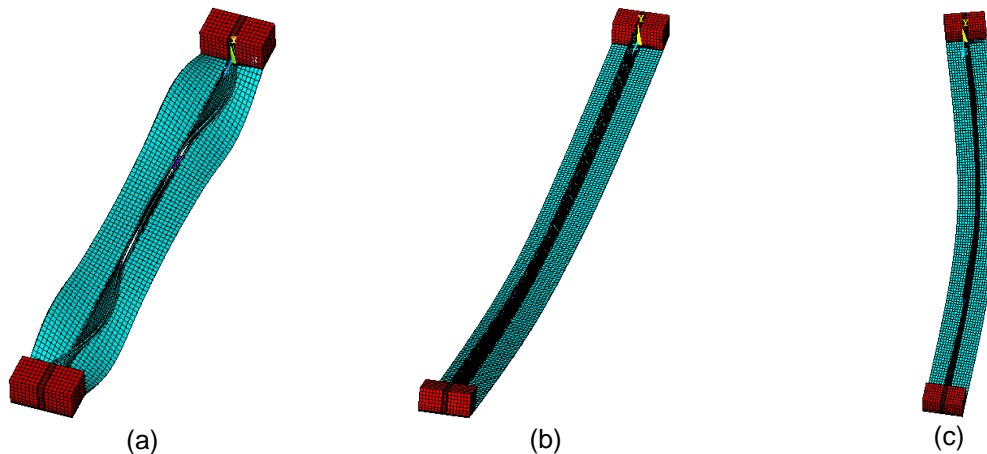


Figura 2 – Configurações deformadas (ampliadas) das imperfeições geométricas iniciais: (a) imperfeições locais/torcionais; (b) imperfeição global; (c) imperfeição global para o caso da rótula no eixo-y.

3.1.4 Materiais utilizados

Para os modelos sob **compressão centrada** aproveitaram-se, para fins de comparação, os resultados obtidos nos ensaios de caracterização do aço realizados em CHODRAUI (2006), nos quais se obteve resistência ao escoamento $f_y = 375\text{MPa}$ e resistência à ruptura $f_u = 513\text{MPa}$. No caso dos modelos cujos perfis foram submetidos à **compressão excêntrica**, foi utilizada a curva *Tensão x Deformação* de um aço com $f_y = 350\text{MPa}$ e $f_u = 498\text{MPa}$.

3.2 Análises a temperaturas elevadas

Os estudos realizados para a investigação a temperaturas elevadas envolveram análises numéricas **térmicas** e **termoestruturais**, de forma simular a atuação simultânea de ações térmicas (Incêndio-Padrão) e mecânicas (compressão centrada). A geometria dos perfis e as condições de vinculação empregados nas análises a temperaturas elevadas foram os mesmos adotados para os perfis analisados sob compressão centrada à temperatura ambiente, para o caso da rótula cilíndrica posicionada no eixo-x (eixo de menor inércia) da seção transversal.

3.2.1 Análise térmica

Na modelagem, buscou-se reproduzir uma situação de incêndio sem compartimentação. Com isso, todas as faces dos perfis foram consideradas expostas à ação térmica. Para a discretização das cantoneiras e das presilhas, foram utilizados os equivalentes térmicos dos elementos finitos empregados nas análises à temperatura ambiente e no modelo termoestrutural, a saber: elemento **SHELL 131**, para as chapas das cantoneiras; e **SOLID 70**, para as presilhas (Figura 3a). Para a consideração da transferência de calor por radiação e por convecção para as chapas do perfil, foi empregado, ainda, o elemento finito **SURF 152**, conforme Figura 3b.

As propriedades atribuídas ao elemento SURF 152 foram: *fator de emissividade*, *constante de Stefan-Boltzmann* e *coeficiente de transferência de calor por convecção*, para os quais foram adotados os valores de 0,7, $5,67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}^4$ e $25 \text{W/m}^2\text{C}$, respectivamente. A evolução da temperatura dos gases do ambiente nos modelos foi regida pela exposição dos perfis ao *Incêndio Padrão* proposto pela ABNT NBR 14432:2001, em concordância com a ISO 834-1:1999.

Sobre perfis de aço formados a frio compostos por dupla cantoneira com seção “T” submetidos à compressão

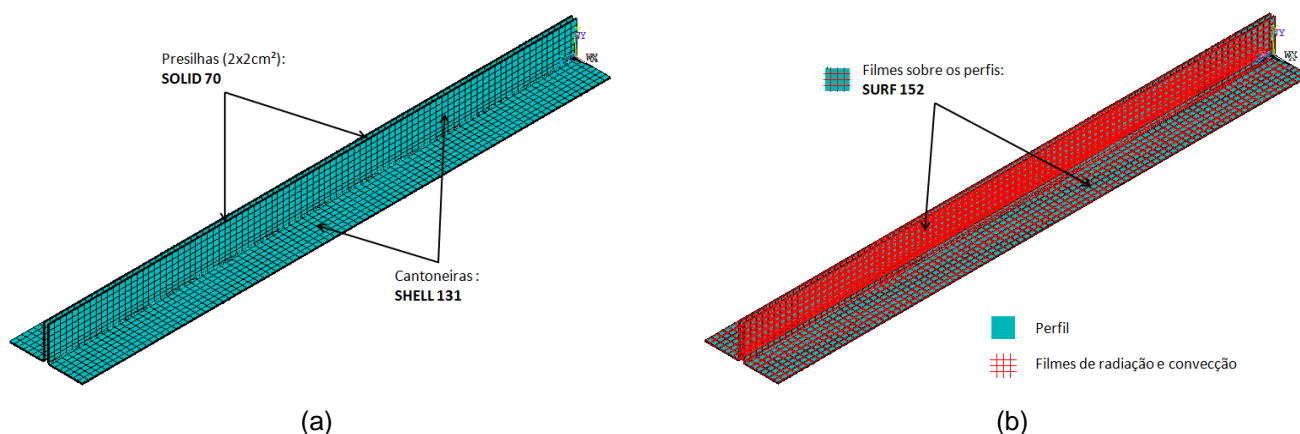


Figura 3 – Malhas e correspondentes elementos finitos utilizados: (a) nas análises térmicas e (b) na disposição dos filmes de radiação e convecção nas faces do perfil.

3.2.2 Análise termoestrutural

De forma semelhante aos modelos analisados a temperatura ambiente, foram empregados os elementos finitos **SHELL 181** e **SOLID 45**, conforme ilustrado na Figura 4.

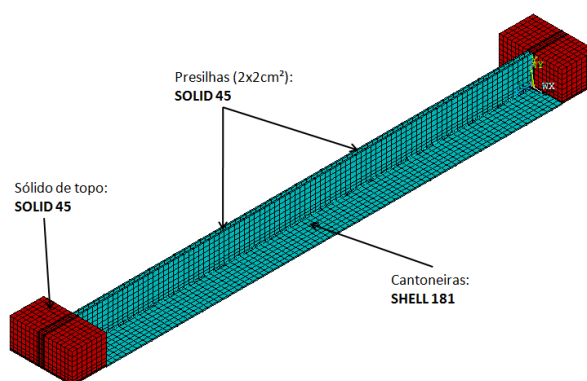


Figura 4 – Malha e elementos finitos utilizados nas análises termoestruturais.

A relação constitutiva adotada para o aço foi aquela proposta na EN 1993-1-2:2010, para temperaturas variando entre 20°C e 1100 °C. Com isso, os efeitos da ação térmica foram considerados por meio dos clássicos coeficientes de redução das propriedades mecânicas do aço. Ao contrário dos modelos analisados à temperatura ambiente, onde o carregamento foi aplicado na forma de incrementos de deslocamentos, nas análises a temperaturas elevadas o carregamento foi introduzido por meio de incrementos de força, estratégia mais coerente quando da associação com a ação térmica. Foram aplicados três níveis de carregamento (compressão centrada), sendo estes correspondentes a 30%, 50% e 70% da capacidade resistente dos perfis à temperatura ambiente. Não foi considerada restrição axial e seus efeitos na capacidade resistente dos perfis.

4 RESULTADOS

4.1 Compressão centrada à temperatura ambiente

Visando considerar a variabilidade das imperfeições geométricas iniciais, foram analisados modelos com diferentes magnitudes para tais imperfeições, cujos resultados finais constam nas Tabelas 1 e 2. A idéia é comparar resultados das análises numéricas e de ensaios experimentais com aqueles obtidos por meio de procedimentos normativos, especialmente os da ABNT NBR 14762:2010.

Tabela 1 – Resultados numéricos e comparação com ensaios experimentais e com valores normativos

Perfil 60x60x2,38mm - Rótula cilíndrica no eixo-x								
L _{perfil} (mm)	N _{n,NBR} (kN)	N _{exp} (kN)	ANÁLISE NUMÉRICA				N _{n,NBR} / N _{FEM}	N _{exp} / N _{FEM}
			Imperfeições: local e global	N _{FEM} (kN)	Modo 2L	Modo L		
910 (λ _x =55)	48,5	62,0	0,64t e L/1500	91,6	F* + T + L	T	0,53	0,68
			0,94t e L/1500	90,6	F* + T + L	T	0,54	0,68
			0,64t e L/1000	91,5	F* + T + L	T	0,53	0,68
			0,94t e L/1000	90,4	F* + T + L	T	0,54	0,69
1485 (λ _x =85)	48,3	70,0	0,64t e L/1500	77,7	F* + FT + L*	FT*	0,62	0,90
			0,94t e L/1500	77,7	F* + FT + L	FT	0,62	0,90
			0,64t e L/1000	77,5	F* + FT + L*	FT*	0,62	0,90
			0,94t e L/1000	77,5	F* + FT + L	FT	0,62	0,90
2055 (λ _x =115)	48,1	63,0	0,64t e L/1500	64,2	F + FT* + L	FT	0,75	0,98
			0,94t e L/1500	62,9	F + FT* + L	FT	0,76	1,00
			0,64t e L/1000	63,7	F + FT* + L	FT	0,76	0,99
			0,94t e L/1000	62,5	F + FT* + L	FT	0,77	1,01
2630 (λ _x =145)	42,6	46,0	0,64t e L/1500	48,6	F + L*	FT*	0,88	0,95
			0,94t e L/1500	48,0	F + L*	FT*	0,89	0,96
			0,64t e L/1000	47,6	F + L*	FT*	0,89	0,97
			0,94t e L/1000	47,1	F + L*	FT*	0,90	0,98

t – espessura das chapas do perfil; L_{perfil} – comprimento do perfil; λ – índice de esbeltez do perfil;
 N_{n,NBR} – força de compressão resistente (nominal) obtida conforme ABNT NBR 14762:2010;
 N_{exp} – força de compressão resistente obtida em CHODRAUI (2006);
 N_{FEM} – força de compressão resistente obtida na análise numérica (ANSYS);
 Modo 2L – modo de instabilidade referente ao perfil composto;
 Modo L – modo de instabilidade das cantoneiras isoladas entre presilhas;
 F = instabilidade global por flexão em torno do eixo-x (de menor inércia);
 T = instabilidade global por torção;
 FT = instabilidade global por flexo-torção;
 FT(T) = instabilidade global por flexo-torção com predominância de torção;
 L = instabilidade local (de chapa);
 * Modo de instabilidade pouco pronunciado.

Tabela 2 – Resultados numéricos e comparação com ensaios experimentais e com valores normativos

Perfil 60x60x2,38mm - Rótula cilíndrica no eixo-y								
L _{perfil} (mm)	N _{n,NBR} (kN)	N _{exp} (kN)	ANÁLISE NUMÉRICA				N _{n,NBR} / N _{FEM}	N _{exp} / N _{FEM}
			Imperfeições: local e global	N _{FEM} (kN)	Modo 2L	Modo L		
1355 (λ _y =56)	47,5	71,0	0,64t e L/1500	83,9	FT(T) + L*	T*	0,57	0,85
			0,94t e L/1500	84,2	FT(T) + L*	T*	0,56	0,84
			0,64t e L/1000	83,7	FT(T) + L*	T*	0,57	0,85
			0,94t e L/1000	84,0	FT(T) + L*	T*	0,57	0,85
1885 (λ _y =76)	46,2	63,0	0,64t e L/1500	72,2	FT(T) + L*	T*	0,64	0,87
			0,94t e L/1500	72,1	FT(T) + L*	T*	0,64	0,87
			0,64t e L/1000	71,8	FT(T) + L*	T*	0,64	0,88
			0,94t e L/1000	71,6	FT(T) + L*	T*	0,65	0,88
2415 (λ _y =96)	44,2	53,0	0,64t e L/1500	62,1	FT + L*	T*	0,71	0,85
			0,94t e L/1500	62,3	FT + L*	T*	0,71	0,85
			0,64t e L/1000	61,9	FT + L*	T*	0,71	0,86
			0,94t e L/1000	62,1	FT + L*	T*	0,71	0,85
2925 (λ _y =115)	41,3	48,0	0,64t e L/1500	52,1	FT	T*	0,79	0,92
			0,94t e L/1500	52,1	FT	T*	0,79	0,92
			0,64t e L/1000	52,2	FT	T*	0,79	0,92
			0,94t e L/1000	52,3	FT	T*	0,79	0,92

Obs.: os termos desta tabela têm os mesmos significados apresentados na tabela anterior.

São apresentadas na Figura 5 configurações deformadas e a distribuição de tensões (*von Mises*) nas chapas de alguns dos perfis no instante em que ocorre a perda de sua capacidade resistente. Para *compressão centrada*, nota-se que o modo de instabilidade global por flexo-torção da seção composta, associado a instabilidades localizadas (flexo-torção da cantoneira simples), é quem determina o colapso deste tipo de perfil, exceto para situações em que a esbelteza global é muito elevada, tendendo modos globais por flexão. O mesmo foi observado em CHODRAUI (2006).

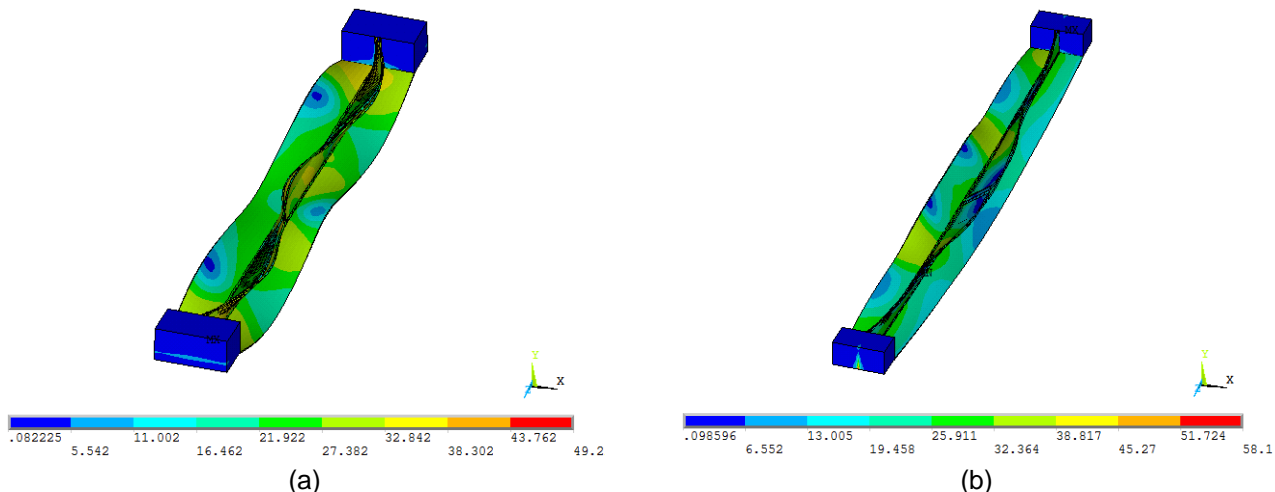


Figura 5 – Tensões de *von Mises* (kN/cm^2) e deformadas (amplificada) no limite da capacidade resistente do perfil: (a) $L_{\text{perfil}}=910\text{mm}$ – Rótula no eixo-x e (b) $L_{\text{perfil}}=1355\text{mm}$ – Rótula no eixo-y.

São apresentados na Figura 6 os valores de força de compressão resistente ($N_{c,R}$) resultantes das análises numéricas, comparados com CHODRAUI (2006). Os gráficos ilustram curvas referentes às previsões da ABNT NBR 14762:2010 e da ANSI/AISI S100 (2007) para a resistência nominal à compressão dos perfis analisados em função do comprimento das peças. Para a mesma Figura 6, valem: **Experimental** - como resultados apresentados em CHODRAUI (2006); **Modelos MEF** - como resultados das análises numéricas (média dos valores obtidos); **NBR-FT e AISI-FT** - como curvas referentes ao dimensionamento do perfil via ABNT NBR 14762:2010 e ANSI/AISI S100 (2007), considerando flambagem por flexão e por flexo-torção; e **NBR-Fx, NBR-Fy, AISI-Fx e AISI-Fy** - como curvas referentes ao dimensionamento do perfil via ABNT NBR 14762:2010 e ANSI/AISI S100 (2007), considerando, para a força axial de flambagem global elástica, apenas a flambagem por flexão.

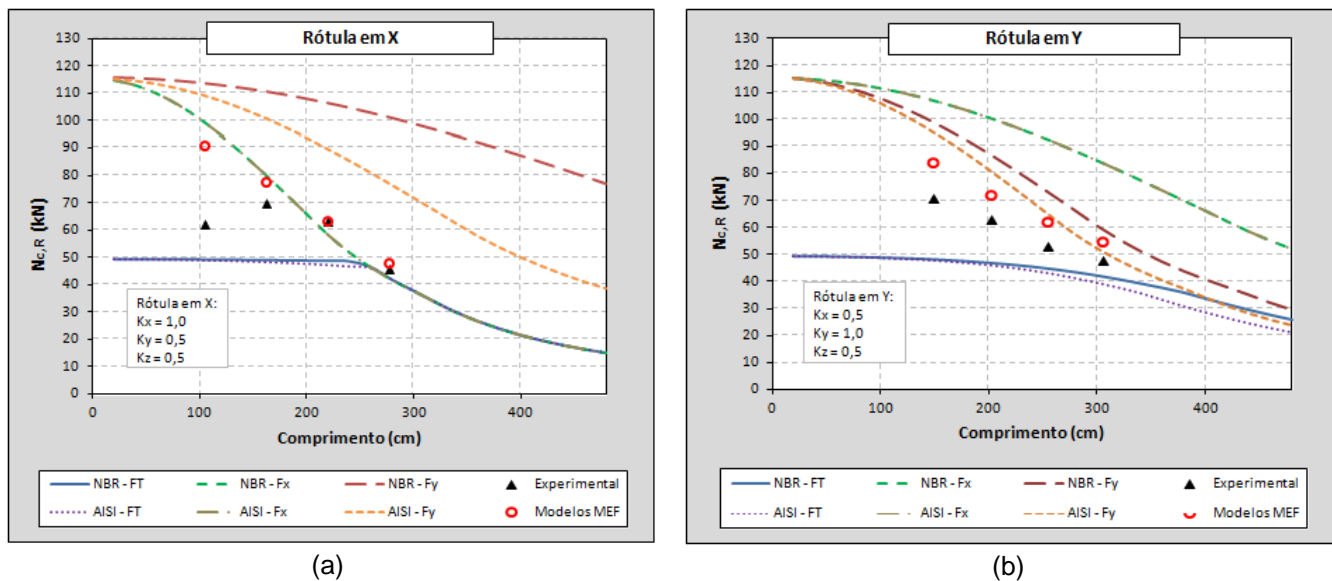


Figura 6 – Resultados numéricos, experimentais e previsões normativas, para as condições de vínculo como: (a) Rótula cilíndrica no eixo-x e (b) Rótula cilíndrica no eixo-y.

Pela Figura 6, apesar de os resultados numéricos e experimentais apontarem o modo de instabilidade por flexo-torção como o principal responsável pela falha da maioria dos perfis analisados, nota-se que os valores de força resistente alcançados apresentaram significativos desvios em relação às curvas de dimensionamento resultantes das normas (curvas NBR-FT e AISI-FT). No caso dos perfis com rótula cilíndrica posicionada segundo o eixo de menor inércia da seção, as curvas referentes à flambagem por flexão em torno desse mesmo eixo (curvas NBR-Fx e AISI-Fx) descrevem com boa aproximação os resultados numéricos. Já os perfis modelados com rótula para flexão no eixo de maior inércia apresentaram valores entre as curvas de flexão em torno do eixo que contém as rótulas (curvas NBR-Fy, AISI-Fy) e as de flexo-torção (NBR-FT e NBR-FT). Portanto, comparando-se com os resultados numéricos e experimentais, percebe-se que os valores de resistência calculados com base nas prescrições normativas para os perfis dupla cantoneira com seção “T” podem resultar bastantes conservadores, principalmente no caso dos perfis com menor esbeltez global.

4.2 Compressão excêntrica à temperatura ambiente

- **Perfis com espessura de chapa igual a 3,0mm**

A Tabela 3 são apresentados resultados obtidos nas análises numéricas para os perfis cuja seção considera 60x60x3,0mm como dimensões de interesse.

Tabela 3 – Resultados das análises numéricas: seção 60x60x3,0mm – Compressão excêntrica

Perfil 60x60x3,0mm – Compressão excêntrica								
L _r (mm)	Número de Presilhas	N _{n,NBR} (kN)	ANÁLISE NUMÉRICA				N _{FEM,m} (kN)	N _{n,NBR} / N _{FEM,m}
			Imperfeições: local e global	N _{FEM} (kN)	Modo 2L	Modo L		
380 (λ _x =20)	0	96,6	0,64t e L/1500	116,6	L	FT + L	116,4	0,83
			0,94t e L/1500	116,1	L	FT + L		
	1		0,64t e L/1500	133,7	F* + T + L	T	133,0	0,73
			0,94t e L/1500	132,3	F* + T + L	T		
	2		0,64t e L/1500	142,8	F* + T + L	T	141,8	0,68
			0,94t e L/1500	140,8	F* + T + L	T		
755 (λ _x =40)	0	96,1	0,64t e L/1500	105,9	L	FT + L	105,6	0,91
			0,94t e L/1500	105,2	L	FT + L		
	1		0,64t e L/1500	113,7	F + T* + L	FT + L	113,1	0,85
			0,94t e L/1500	112,5	F + T* + L	FT + L		
	2		0,64t e L/1500	123,4	F + T + L	FT	123,4	0,78
			0,94t e L/1500	123,3	F + L	FT		
1325 (λ _x =70)	0	94,2	0,64t e L/1500	80,0	L	FT	80,5	1,17
			0,94t e L/1500	80,9	L	FT		
	1		0,64t e L/1500	99,2	F + T* + L	FT	98,3	0,96
			0,94t e L/1500	97,4	F + T* + L	FT		
	2		0,64t e L/1500	103,4	F + T* + L	FT	102,7	0,92
			0,94t e L/1500	102,0	F + T* + L	FT		
3	0,64t e L/1500	112,6	F + T + L	FT	111,7	0,84		
	0,94t e L/1500	110,7	F + T + L	FT				
1890 (λ _x =100)	0	90,4	0,64t e L/1500	59,0	L	FT	59,2	1,53
			0,94t e L/1500	59,3	L	FT		
	1		0,64t e L/1500	90,5	F + L	FT	89,2	1,01
			0,94t e L/1500	87,9	F + L	FT		
	2		0,64t e L/1500	94,3	F + FT* + L	FT	93,5	0,97
			0,94t e L/1500	92,7	F + FT* + L	FT		
	3		0,64t e L/1500	102,6	F + FT + L	FT	101,6	0,89
			0,94t e L/1500	100,6	F + FT + L	FT		
4	0,64t e L/1500	107,3	F + FT + L	FT	105,5	0,86		
	0,94t e L/1500	103,7	F + FT + L	FT				

Tabela 3 (continuação) – Resultados das análises numéricas: seção 60x60x3,0mm – Compressão excêntrica

L _r (mm)	Número de Presilhas	N _{n,NBR} (kN)	ANÁLISE NUMÉRICA				N _{n,NBR} / N _{FEM,m}	
			Imperfeições: local e global	N _{FEM} (kN)	Modo 2L	Modo L		N _{FEM,m} (kN)
2460 (λ _x =130)	0	82,7	0,64t e -L/1500	44,6	L	FT	44,7	1,85
			0,94t e -L/1500	44,8	L	FT		
	1		0,64t e -L/1500	78,9	F + FT* + L	FT	78,0	1,06
			0,94t e -L/1500	77,1	F + FT* + L	FT		
	2		0,64t e -L/1500	82,6	F + FT* + L	FT	82,2	1,01
			0,94t e -L/1500	81,7	F + FT* + L	FT		
	3		0,64t e -L/1500	94,0	F + L	FT	93,2	0,89
			0,94t e -L/1500	92,3	F + T* + L	FT		
4	0,64t e -L/1500	98,1	F + L	FT	97,4	0,85		
	0,94t e -L/1500	96,7	F + L	FT				
3030 (λ _x =160)	0	70,4	0,64t e -L/1500	34,7	L	FT	34,7	2,03
			0,94t e -L/1500	34,6	L	FT		
	1		0,64t e -L/1500	68,2	F + L	FT	67,1	1,05
			0,94t e -L/1500	66,0	F + L	FT		
	2		0,64t e -L/1500	68,5	F + FT + L	FT	67,8	1,04
			0,94t e -L/1500	67,0	F + FT + L	FT		
	3		0,64t e -L/1500	80,1	F + FT + L	FT	79,8	0,88
			0,94t e -L/1500	79,4	F + FT + L	FT		
	4		0,64t e -L/1500	84,7	F + FT + L*	FT*	84,4	0,83
			0,94t e -L/1500	84,0	F + FT + L*	FT*		

λ_x – índice de esbeltez do perfil;
L_r – comprimento do perfil tomado de centro a centro de ligação;
N_{FEM,m} – valor médio das forças de compressão resistentes obtidas nas análises numéricas (ANSYS);
Obs.: os demais termos desta tabela têm os mesmos significados apresentados na tabela anterior.

São apresentadas, na Figura 7, as configurações deformadas de alguns dos perfis modelados com duas presilhas no instante em que ocorre a perda de sua capacidade resistente. Ao contrário dos modelos analisados sob compressão centrada, o modo global por flexo-torção da peça composta não foi predominante para os perfis com espessura igual a 3,0mm submetidos à compressão excêntrica. À exceção dos perfis menos esbeltos, onde os modos torcionais surgiram com mais clareza, o que se percebe é que o modo global de flexão em torno do eixo de menor inércia é, em conjunto com as instabilidades locais (flexo-torção das cantoneiras simples entre presilhas), o principal aspecto responsável pelo colapso do perfil.

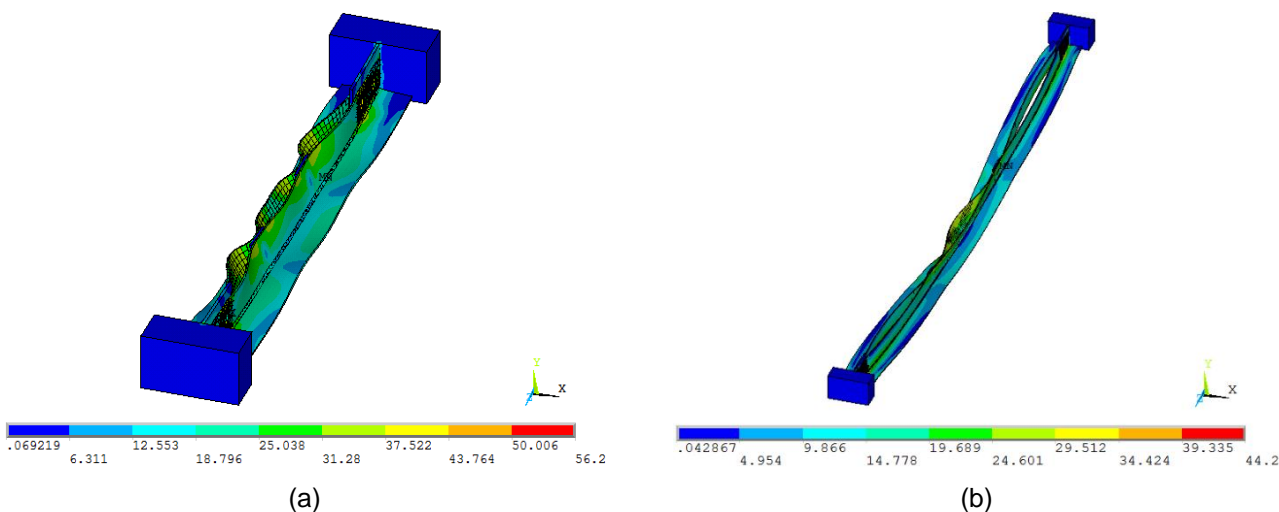


Figura 7 – Tensões de von Mises (kN/cm²) e deformadas (escala aumentada) no limite da capacidade resistente do perfil (a) L_{perfil}=875mm e (b) L_{perfil}=2580mm – Compressão excêntrica.

Contudo, à medida que se aumenta a quantidade de presilhas ao longo do comprimento dos perfis, nota-se que o modo global por flexo-torção da seção composta passa a ter maior influência na estabilidade da barra, embora seu aparecimento não seja tão evidente quanto a flexão da peça (ver Figura 8b). Na situação sem presilhas, o comportamento dos perfis é equivalente ao de duas cantoneiras simples trabalhando individualmente, sem qualquer interação entre elas, resultando no modo global por flexo-torção característico das cantoneiras sob compressão (Figura 8a). Tal comportamento isolado reflete diretamente na resistência desses perfis, cujos valores de força de compressão resistente estão bem abaixo dos apresentados pelos perfis com uma ou mais presilhas.

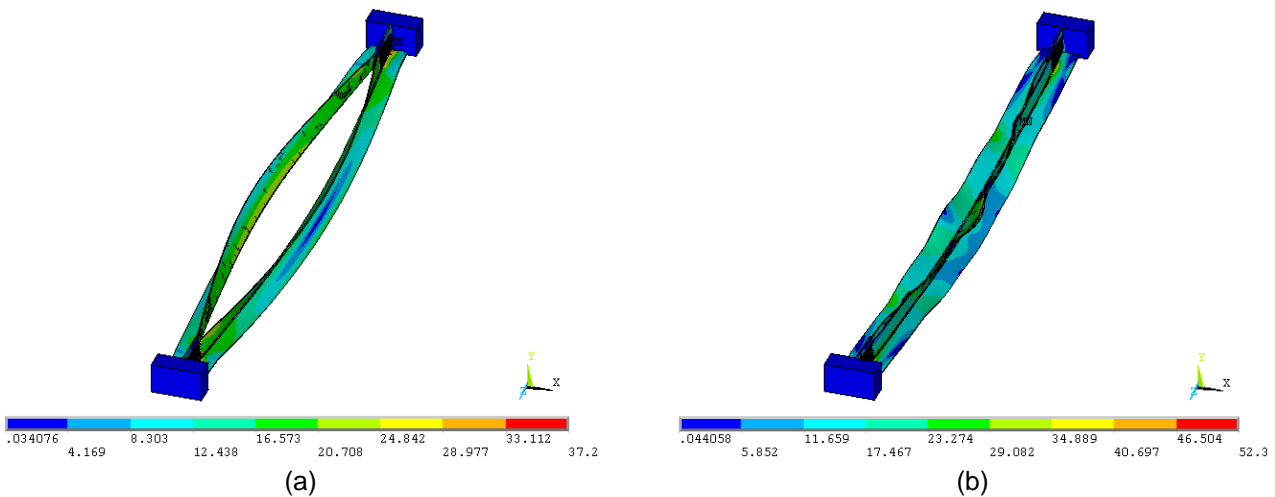


Figura 8 – Tensões de *von Mises* (kN/cm^2) e deformadas (escala aumentada): (a) perfil sem presilhas e (b) perfil com quatro presilhas – *Compressão excêntrica*.

São mostrados na Figura 9 os valores médios de resistência ($N_{FEM,m}$) obtidos por meio dos modelos numéricos juntamente com as previsões da ABNT NBR 14762:2010 e da ANSI/AISI S100 (2007). Como a ligação parafusada não funciona como um vínculo perfeitamente engastado ou mesmo como uma rótula, o elemento estrutural foi considerado sob duas condições de vinculação distintas: elemento bi-rotulado ($K_x=K_y=1,0$), e elemento semi-engastado em relação ao eixo de menor inércia ($K_x=0,8$ e $K_y=1,0$) – Figuras 9a e 9b, respectivamente.

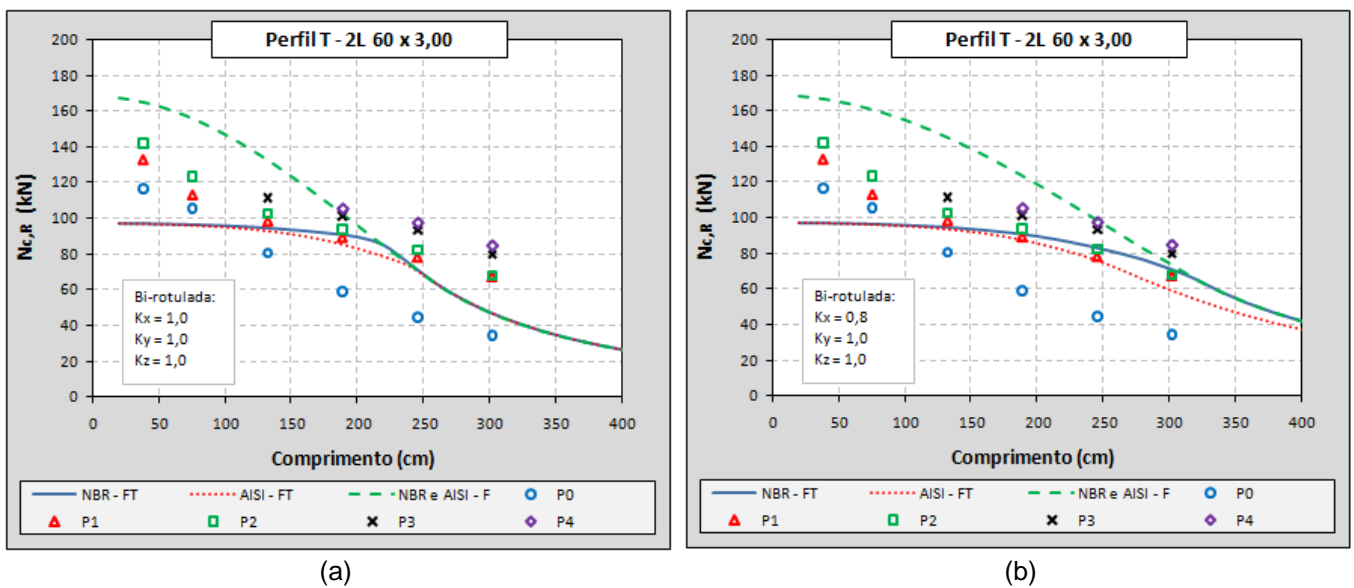


Figura 9 – Resultados numéricos, experimentais e previsões normativas para a compressão excêntrica: (a) elemento bi-rotulado e (b) elemento semi-engastado.

A legenda presente nos gráficos tem o mesmo significado daquela apresentada para a compressão centrada, sendo considerada para a curva “NBR e AISI-F” apenas a flambagem global por flexão em torno do eixo de menor inércia. Os termos P0, P1, P2, P3 e P4 referem-se aos resultados numéricos dos perfis com 0, 1, 2, 3 e 4 presilhas, respectivamente.

Nota-se que as curvas resultantes dos procedimentos normativos (curvas NBR-FT e AISI-FT) têm melhor aproximação com os resultados numéricos quando se consideram as ligações como sendo semi-rígidas ($K_x=0,8$), exceto para os casos sem presilhas, que serão discutidos adiante. Outro fato importante observado é que, mais uma vez, os valores de força de compressão resistente previstos pelas prescrições normativas para os perfis com menor esbeltez global resultaram conservadores.

• **Perfis com espessura de chapa igual a 1,5mm**

A Tabela 4 mostra os resultados obtidos nas análises numéricas para os perfis cuja seção considera 60x60x1,5mm como dimensões de interesse.

Tabela 4 – Resultados das análises numéricas com o perfis **60x60x1,5mm** – Compressão excêntrica

Perfil 60x60x1,5mm – Compressão excêntrica							
L_r (mm)	Número de Presilhas	$N_{n,NBR}$ (kN)	ANÁLISE NUMÉRICA				$N_{n,NBR} / N_{FEM}$
			Imperfeições: local e global	N_{FEM} (kN)	Modo 2L	Modo L	
575 ($\lambda_x=30$)	0	12,4	0,64t e L/1500	41,2	L	FT + L	0,30
	1			48,0	F* + L	L	0,26
	2			49,4	T + L	T + L	0,25
1055 ($\lambda_x=55$)	0	12,4	0,64t e L/1500	34,6	L	FT	0,36
	1			40,1	F + T* + L	FT	0,31
	2			39,5	F + T* + L	FT	0,31
	3			39,4	F + L	L	0,31
1625 ($\lambda_x=85$)	0	12,3	0,64t e L/1500	24,2	L	FT	0,51
	1			31,1	F + FT* + L	FT	0,40
	2			31,7	F + FT* + L	FT	0,39
	3			38,2	F + FT + L	FT	0,32
	4			38,1	F + FT + L	FT	0,32
2200 ($\lambda_x=115$)	0	12,2	0,64t e L/1500	17,1	L	FT	0,71
	1			24,1	F + FT + L	FT	0,51
	2			24,6	F + FT + L	FT	0,50
	3			29,3	F + FT + L	FT	0,42
	4			31,0	F + FT + L	FT	0,39
2775 ($\lambda_x=145$)	0	12,0	0,64t e L/1500	12,6	L	FT	0,95
	1			19,4	F + FT + L	FT	0,62
	2			20,3	F + FT + L	FT	0,59
	3			24,1	F + FT + L	FT	0,50
	4			24,2	F + FT + L	FT	0,50

Obs.: os termos desta tabela têm os mesmos significados apresentados na tabela anterior.

Neste caso de perfis com cantoneiras de 1,5mm de espessura, as análises numéricas revelam maior interação entre os três modos de instabilidade característicos dos perfis monossimétricos (flexão, flexo-torção e local), onde a predominância de um em relação ao outro varia em função do comprimento das peças, conforme se observa nos exemplos da Figura 10 (resultados de perfis com duas presilhas). Novamente, o aumento do número de presilhas reduziu o comportamento isolado das cantoneiras que compõem os perfis, que tendem a trabalhar como uma peça única (se aproximam do comportamento de um perfil “T”), semelhantemente ao que é apresentado na Figura 8.

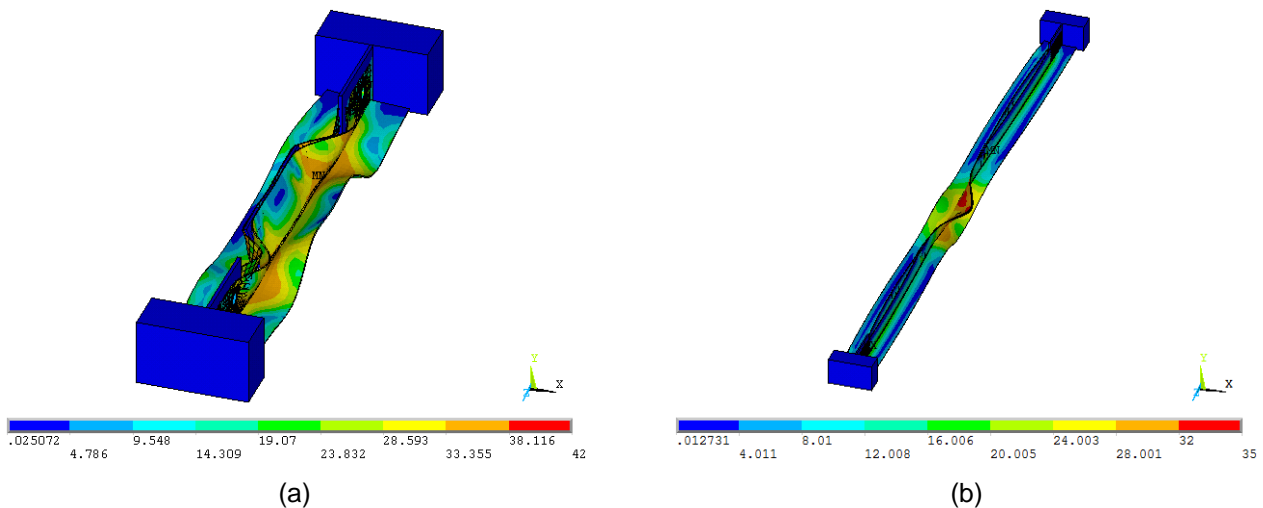


Figura 10 – Tensões de *von Mises* (kN/cm^2) e deformadas (escala aumentada) no limite da capacidade resistente do perfil (a) $L_{\text{perfil}}=695\text{mm}$ e (b) $L_{\text{perfil}}=2320\text{mm}$ – *Compressão excêntrica*.

São mostrados na Figura 11 os valores de resistência (N_{FEM}) obtidos por meio dos modelos numéricos juntamente com as previsões da ABNT NBR 14762:2010 e da ANSI/AISI/AISI S100 (2007).

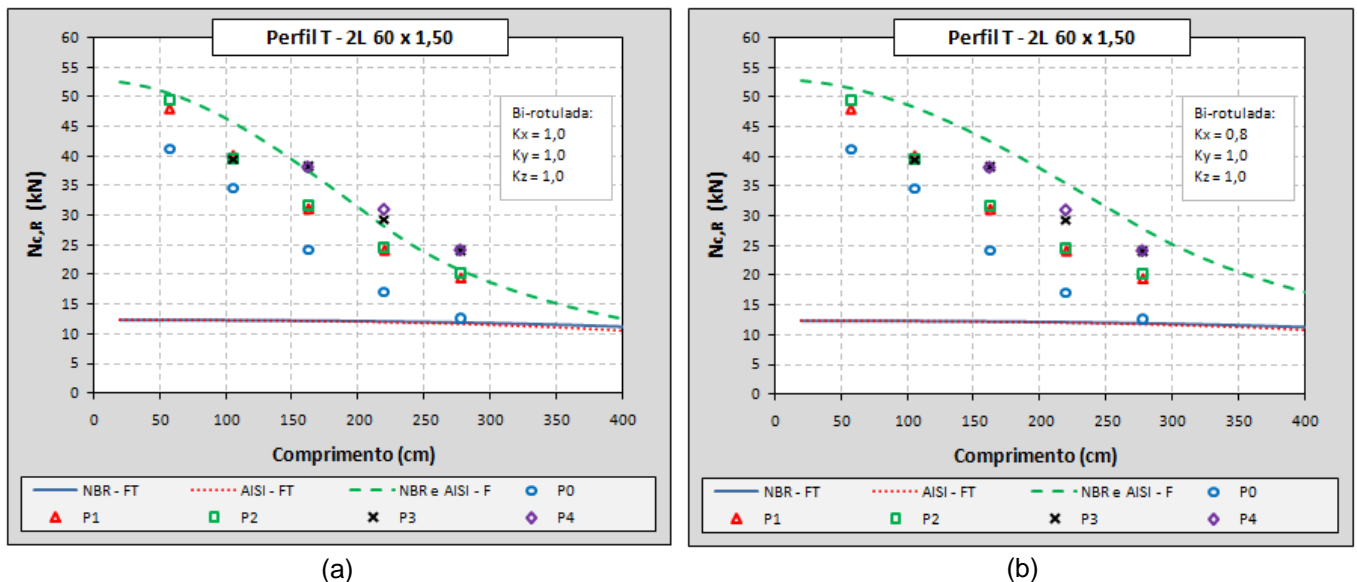


Figura 11 – Resultados numéricos, experimentais e previsões normativas para a *compressão excêntrica*: (a) elemento bi-rotulado e (b) elemento semi-engastado.

A redução da espessura das chapas faz com que os valores da força de compressão resistente calculados de acordo com as normas (curvas NBR-FT e AISI-FT) resultem bem inferiores aos resultados das análises numéricas, que tendem a valores intermediários às curvas de flexão e de flexo-torção. Neste caso, a utilização do coeficiente de flambagem $K_x = 0,8$ não reduz as diferenças encontradas entre os resultados teóricos e os numéricos em razão de os perfis analisados estarem dentro da faixa de esbeltez cujo dimensionamento é comandado pela flexo-torção em vez da flexão.

Finalmente, para o caso dos perfis analisados sem presilhas, os resultados foram também comparados com o que prevê a ABNT NBR 8800:2008 para cantoneiras simples conectadas por uma das abas. Essa comparação pode ser visualizada por meio da Figura 12, onde se percebe boa aproximação das curvas com os resultados numéricos para a situação sem presilhas (pontos “P0”), o que pode ser um indício de que tal metodologia também pode ser aplicada para cantoneiras de chapas finas conformadas a frio. Nota-se que o aumento do número de presilhas resulta num ganho considerável de resistência, principalmente quando se passa de um número par para um número

ímpar de presilhas, conforme mostrado nas Tabelas 3 e 4 e na Figura 12. Ou seja, os resultados numéricos indicam que os perfis em questão aumentam de forma significativa sua força de compressão resistente quando se insere uma presilha na metade do seu comprimento.

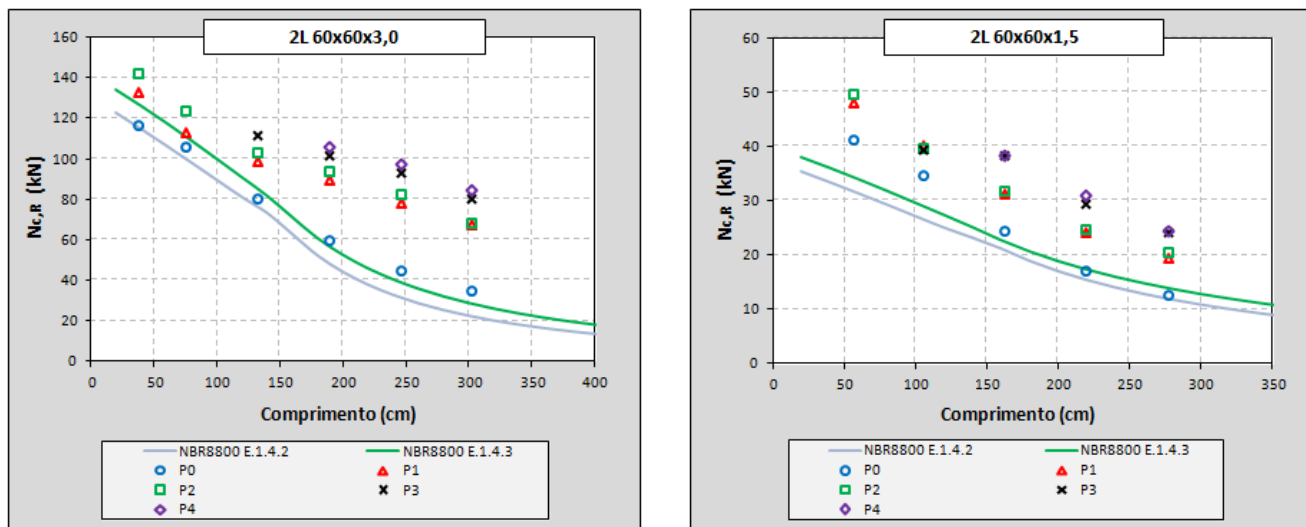


Figura 12 – Resistência à compressão: resultados numéricos e previsões da ABNT NBR 8800:2008 para a resistência de duas cantoneiras simples conectadas por uma aba.

4.3 Análises em temperaturas elevadas

A Tabela 5 resume os principais resultados das análises termomecânicas, realizadas apenas em caráter exploratório.

Tabela 5 – Resultados das análises termomecânicas.

PERFIL	L_{perfil} (mm)	L_r (mm)	λ	F (kN)		t_{cr} (min)	T_{cr} (°C)
2L 60x2,38mm (rótula no eixo-x) $K_x=1,0$ e $K_y=0,5$	910	1045	55	27,5	30%	6,3	597
				45,8	50%	4,3	518
				64,1	70%	2,5	349
	1485	1620	85	23,3	30%	6,7	599
				38,9	50%	4,8	530
				54,4	70%	2,6	362
	2055	2190	115	19,3	30%	7,4	617
				32,1	50%	5,1	544
				44,9	70%	3,4	441
	2630	2765	145	14,6	30%	7,3	614
				24,3	50%	5,2	545
				34,0	70%	3,5	448

L_{perfil} – comprimento do perfil;
 L_r – comprimento do perfil mais o dispositivo de apoio (67,5mm em cada extremidade);
 λ – índice de esbelteza do perfil (em relação ao eixo-x);
F – força axial de compressão aplicada (ação mecânica);
 t_{cr} – tempo de resistência ao fogo; T_{cr} – temperatura em que ocorreu o colapso.

Algumas das configurações deformadas e a distribuição de temperaturas nas chapas, no instante em que ocorre a falha dos perfis (pontos de alongamento máximo), são mostradas na Figura 13, na qual podem ser visualizados os valores apresentados na Tabela 5 para a temperatura máxima (T_{cr}) atingida nos perfis enquanto ainda resistentes às ações mecânicas e térmicas (perfis com carregamento mecânico igual a 70% de sua capacidade resistente à temperatura ambiente).

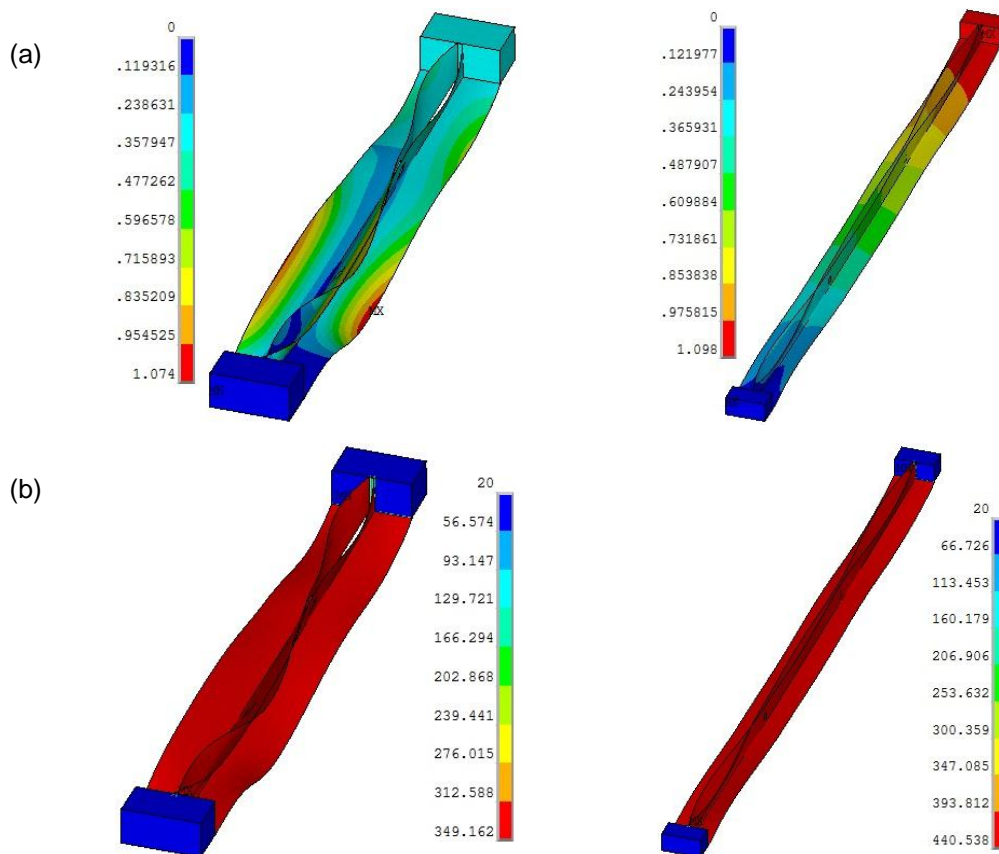


Figura 13 – Resultados das análises termoe estruturais: (a) deslocamentos (cm) em escala ampliada e (b) máxima temperatura (°C) atingida pelos perfis com índices de esbelte $\lambda = 55$ e $\lambda = 115$.

Conforme esperado, os resultados das análises numéricas apontam para tempos de resistência ao fogo bastante reduzidos e temperaturas de colapso relativamente baixas se comparados com aqueles normalmente resultantes de análises realizadas com perfis soldados ou laminados. Tais resultados são conseqüência do elevado *fator de massividade* (ou *fator de forma*) que se obtém nos perfis estudados, os quais, associado à elevada condutividade térmica do aço e à condição de incêndio sem compartimentação, acaba conduzindo a uma rápida degradação das propriedades mecânicas do material. Portanto, os resultados indicam a necessidade do uso de algum tipo de revestimento contra o fogo neste tipo de perfil, para que sejam atendidas as prescrições normativas referentes à segurança estrutural em situações de incêndios.

5 CONCLUSÕES

Os resultados indicam que os valores de força normal de compressão resistente, obtidos conforme a ABNT NBR 14762:2010, podem resultar bastantes conservadores para os PFF compostos por dupla cantoneira com seção “T”, principalmente nos casos de menor esbelte global. Apesar de os resultados numéricos e experimentais apontarem o modo de instabilidade por flexo-torção como o principal responsável pela falha da maioria dos perfis analisados, nota-se que os resultados de força de compressão resistente tendem a valores intermediários às curvas referentes à flambagem por flexão e por flexo-torção, seguindo a tendência da curva de flambagem por flexão em alguns casos. Adicionalmente, a quantidade e a distribuição das presilhas se mostram bastante influentes, tanto na força de compressão resistente como nos modos de instabilidade predominantes dos perfis. Nesse contexto, a utilização de uma presilha na metade do comprimento da barra mostrou-se ideal no que se refere ao ganho de capacidade resistente. Para os casos sem presilhas, as análises numéricas indicam que o dimensionamento proposto pela ABNT NBR 8800:2008 para o caso de cantoneiras sob

compressão conectadas por uma aba podem ser aplicadas também para cantoneiras formadas a frio. Finalmente, as análises numéricas realizadas em temperaturas elevadas apresentam como resultado tempos de resistência ao fogo bem abaixo do valor mínimo especificado pela ABNT NBR 14432:2001, indicando que esse elemento estrutural pode apresentar sérios problemas referentes à segurança em situação de incêndio. Portanto, os estudos apontam à necessidade do uso de proteção térmica nesses perfis e de pesquisas mais aprofundadas sobre o assunto.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC/USP e ao CNPq pelo apoio e pela estrutura disponibilizada para o desenvolvimento da pesquisa.

7 REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, S. J. C. **Análise numérica de perfis de aço formados a frio comprimidos considerando imperfeições geométricas iniciais**. 206p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE. **North American specification for the design of cold-formed steel structural members**. Washington: AISI, 2007.
- ANSYS INC. **Ansys Release 11.0** – Documentation, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14323**: Dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1999.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14432**: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14762**: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- CHODRAUI, G. M. B. **Análise teórica e experimental de perfis de aço formados a frio submetidos à compressão**. 310p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. ENV 1993-1-3: **EUROCODE 3**: Design of steel structure. Part 1.3: General rules. Supplementary rules for cold-formed thin gauge members and sheeting. Brussels, 1996.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. NP EN 1993-1-2: **EUROCODE 3**: Design of steel structure. Part 1.2: General rules. Structural fire design. Brussels, 2010.
- LEAL, D. F. **Sobre perfis de aço formados a frio compostos por dupla cantoneira com seção “T” submetidos à compressão**. 247p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.
- MAIA, W. F. **Sobre a estabilidade de cantoneiras de aço formadas a frio submetidas à compressão**. 196p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

- SCHAFFER, B. W.; PEKÖZ, T. Computational modeling of cold-formed steel: characterizing geometric imperfections and residual stresses. **Journal of Constructional Steel Research**, v47, p193-210, 1998.
- TRAHAIR, N. S. **Flexural-Torsional Buckling of Structures**. 1ed. London: E & FN Spon, 1993. 363p.
- YU, W. W. **Cold-formed steel design**. 3ed. New York: John Wiley & Sons, 2000. 750p.