

MODELAGEM NUMÉRICA DE PERFIS DE AÇO FORMADOS A FRIO COMPOSTOS POR DUPLA CANTONEIRA EM “T” SUBMETIDOS À COMPRESSÃO

Davi F. Leal, Jorge M. Neto, Maximiliano Malite

Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Av. Trabalhador São-Carlense, 400 – CEP 13566-590 – São Carlos, SP – Brasil, daviusp@sc.usp.br, jmunaiar@sc.usp.br, mamalite@sc.usp.br, <http://www.set.eesc.usp.br>

Palavras Chave: Perfis formados a frio, dupla cantoneira, instabilidade, modelagem numérica, elementos finitos.

Resumo. Em perfis formados a frio (PFF) submetidos a esforços de compressão, é comum a ocorrência do fim da sua capacidade resistente devido à caracterização dos chamados modos de instabilidade, que podem surgir de forma isolada – instabilidade global (por flexão, torção ou flexo-torção), local ou distorcional – ou ainda tendo a interação entre os mesmos. Dentre as seções mais utilizadas em PFF, destacam-se aquelas compostas por duas cantoneiras ligadas entre si por meio de chapas intermitentes (presilhas), apresentando a forma de “T”. Embora tenha a sua utilização bastante difundida, pouco se sabe sobre o comportamento estrutural deste tipo de perfil, principalmente em relação aos modos de instabilidade a ele associados. Neste trabalho, foram criados, com a utilização do programa ANSYS, modelos em elementos finitos com a finalidade de investigar o comportamento estrutural dos referidos perfis e avaliar se os valores da força normal de compressão resistente, obtidos de acordo com as prescrições da ABNT NBR 14762:2010, resultam satisfatórios. Inicialmente, foi realizada uma análise elástica de autovalor, a partir da qual se introduziram as imperfeições geométricas iniciais, com posteriores análises não-lineares do material e geométrica. Foram testadas, estrategicamente, variações no comprimento do perfil, na magnitude e sinal das imperfeições geométricas iniciais, e, ainda, a introdução de elementos de contato nas modelagens. Os resultados obtidos através da modelagem numérica foram comparados com resultados experimentais presentes na literatura, de forma a verificar a confiabilidade dos modelos criados, tendo alcançado correlações satisfatórias. Com isso, conseguiu-se calibrar um modelo numérico para um estudo mais aprofundado sobre o comportamento estrutural de PFF compostos por dupla cantoneira em seção “T”, principalmente no que se refere à verificação dos modos de instabilidade predominantes, das interações entre os mesmos e das previsões da ABNT NBR 14762:2010 para a capacidade resistente destes perfis.

1 INTRODUÇÃO

Perfis de aço formados a frio (PFF) são assim denominados por se tratar de elementos estruturais obtidos a partir de algum processo de conformação à temperatura ambiente, seja por dobramento, em uma prensa dobradeira; ou por perfilagem, em um conjunto de matrizes rotativas. Desta forma, são geralmente utilizadas chapas finas de aço para a sua produção, o que resulta em perfis com relações largura-espessura dos elementos que compõem a seção transversal maiores do que aquelas encontradas em perfis laminados ou soldados.

Tratando mais especificamente de peças solicitadas à compressão, essa elevada esbeltez local traz grande influência no comportamento estrutural do perfil, pois o torna ainda mais susceptível à ocorrência dos chamados modos de instabilidade local e distorcional (quando aplicável), além do clássico modo de instabilidade global (por flexão, torção ou flexo-torção). Ressalta-se que, devido a problemas de instabilidade, é comum que os perfis de paredes finas atinjam sua capacidade resistente mesmo apresentando valores de tensões inferiores à tensão de escoamento do material.

Dentre as seções mais utilizadas em PFF submetidos à compressão, destacam-se aquelas compostas por duas cantoneiras ligadas entre si por meio de chapas intermitentes (chapas separadoras ou presilhas), apresentando a forma de “T” (Figura 1). Este tipo de perfil é comumente empregado em diversos tipos de estrutura, como componentes de treliças, estruturas tridimensionais para coberturas, sistemas de contraventamento etc. Porém, apesar da sua larga utilização, pouco se sabe sobre o comportamento estrutural destes perfis, principalmente no que se refere aos modos de instabilidade a ele associados. Tal desconhecimento sobre o assunto acaba limitando as normas de PFF no que se refere à especificação de procedimentos de cálculo para o projeto deste tipo de perfil.



Figura 1: Dupla cantoneira com seção “T”

Além disso, em Maia et al. (2008) e Maia et al. (2009) se destaca que cantoneiras simples submetidas à compressão apresentam comportamento estrutural bem particular quando comparadas aos demais perfis, nas quais observam-se dois modos críticos na análise de estabilidade elástica: um modo global de flexão, no caso de barras mais longas; e um modo coincidente local-chapa/global de flexo-torção, que é crítico para barras de menor comprimento. Desta forma, é interessante um estudo mais aprofundado sobre o comportamento de barras compostas por dupla cantoneira, uma vez que, além dos modos de instabilidade referentes às cantoneiras isoladas, poderão ocorrer modos de instabilidade associados à barra composta em função da presença das chapas separadoras (presilhas), que tendem a modificar o comportamento do sistema.

Neste trabalho, é apresentado um estudo que visa dar base a um melhor entendimento do comportamento estrutural dos PFF constituídos por duas cantoneiras unidas por presilhas, formando uma seção “T”. Para isto, foram criados, com a utilização do programa ANSYS, modelos em elementos finitos dos referidos perfis submetidos à compressão centrada, de onde se pôde verificar, dentre outros resultados, as respectivas cargas críticas e os modos de instabilidades predominantes. Este estudo visa, ainda, verificar se os valores da força normal de compressão resistente, obtidos de acordo com as prescrições da ABNT NBR 14762:2010, resultam satisfatórios. Por fim, os resultados das análises numéricas foram comparados com resultados experimentais presentes na literatura, de maneira a verificar a confiabilidade dos modelos numéricos criados.

2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS PRESENTES NA LITERATURA

Por se tratar de uma seção ainda pouco estudada, existe uma pequena quantidade de resultados experimentais de PFF compostos por dupla cantoneira em “T” presentes na literatura. Desta forma, foram adotados como base de comparação os resultados dos ensaios apresentados em Chodraui (2006), onde se aplicou um carregamento centrado em oito corpos-de-prova por meio da utilização de apoios do tipo rótula cilíndrica posicionados no centróide da seção. Este tipo de apoio permite o giro da seção apenas em torno de um dos eixos baricêntricos (x e y), conforme mostrado na Figura 2.

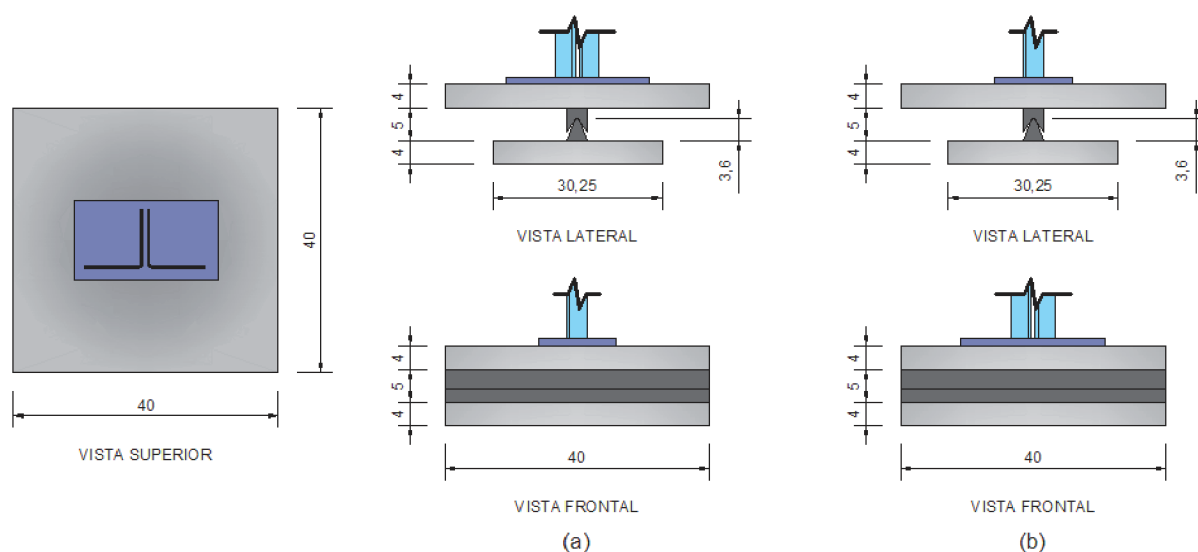


Figura 2: Dispositivos de apoio – (a) rótula cilíndrica em x e (b) rótula cilíndrica em y

O número de presilhas utilizadas foi definido de acordo com o espaçamento máximo sugerido pela ABNT NBR 14762, tendo um total de duas e três presilhas para os perfis com a rótula no eixo-x e no eixo-y, respectivamente. A distância entre as cantoneiras simples que compõem os perfis (espessura das presilhas) foi definida em 5,0mm e espessura das chapas das mesmas foi de 2,38mm. Além disso, ensaios em corpos-de-prova para a caracterização do material resultaram em: $f_y = 375\text{MPa}$ (resistência ao escoamento) e $f_u = 513\text{MPa}$ (resistência à ruptura). Algumas das propriedades geométricas dos perfis e um resumo dos resultados dos ensaios realizados estão apresentados na Tabela 1.

PERFIL	L_{perfil} (mm)	L_r (mm)	A (cm^2)	λ_x (cm)	λ_y (cm)	Ensaio N_{exp} (kN)	Modo de Falha ¹
2L 60x2,38mm (rótula p/ flexão em “x”)	910	1045	5,53	55	20	62	L/T
	1485	1620	5,53	85	30	70	L/T
	2055	2190	5,53	115	41	63	L/T
	2630	2765	5,53	145	52	46	F
2L 60x2,38mm (rótula p/ flexão em “y”)	1355	1490	5,53	39	56	71	L/T (T)
	1885	2020	5,53	53	76	63	L/T
	2415	2550	5,53	67	96	53	L/T
	2925	3060	5,53	80	115	48	L/T

x e y – eixos baricêntricos da seção;
 L_{perfil} – comprimento do perfil;
 L_r – comprimento do perfil mais o dispositivo de apoio (67,5mm em cada extremidade);
A – área da seção transversal;
 λ_x – esbeltez (eixo-x);
 λ_y – esbeltez (eixo-y);
 N_{exp} – força máxima registrada no ensaio;
¹Vide legenda abaixo:
F: instabilidade global por flexão;
L/T: instabilidade local/torcional;
L/T (T): instabilidade local/torcional com predominância de torção.

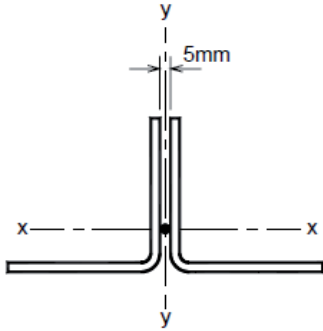


Tabela 1: Propriedades geométricas dos perfis e resumo dos resultados dos ensaios

3 ANÁLISE NUMÉRICA

3.1 Aspectos gerais

Os estudos apresentados neste trabalho baseiam-se em modelos construídos por meio do código ANSYS v9.0 e que visam retratar o comportamento dos perfis do tipo dupla cantoneira em questão, submetidos à compressão centrada. As análises numéricas, feitas via Método dos Elementos Finitos, foram divididas basicamente em duas análises elásticas, para a obtenção das imperfeições geométricas iniciais local e global, e uma análise não-linear física e geométrica, com a qual foram obtidos a carga crítica e o modo de colapso dos perfis.

Da mesma forma que os ensaios descritos anteriormente, foram fixados valores das dimensões da seção transversal e o número de presilhas, de modo a avaliar a influência da esbeltez por meio da variação apenas do comprimento das barras. Além disso, os apoios e suas respectivas condições de contorno foram modelados de acordo com as características apresentadas na Figura 2, tendo uma linha de nós coincidentes com um dos eixos baricêntricos da seção para simular a aplicação da compressão centrada e o funcionamento das rótulas cilíndricas. Na Figura 3 e na Tabela 2 estão apresentados os apoios e as condições de contorno (restrições nodais) empregados nos modelos.

A geometria das cantoneiras simples que compõem os perfis foi gerada a partir da linha de esqueleto da seção transversal, tendo suas propriedades geométricas calculadas de acordo com as equações disponíveis na ABNT NBR 6355:2003. Também foram considerados na modelagem os cantos arredondados dos perfis, resultantes do processo de fabricação. Quanto às tensões residuais, optou-se pela não utilização das mesmas, uma vez que o ganho de resistência nas regiões de dobramento devido ao trabalho a frio acaba por compensar o efeito destas tensões (Schafer, 1997).

Tipo de apoio	Nós das duas chapas de topo	Nós dos eixos baricêntricos (rótula) das chapas de topo	Nós da rótula de aplicação do carregamento	Nós da rótula oposta à aplicação do carregamento
Rótula em X	U_x, ROT_y, ROT_z	Acoplamento U_z	U_x, U_y, ROT_y, ROT_z	$U_x, U_y, U_z, ROT_y, ROT_z$
Rótula em Y	U_y, ROT_y, ROT_z	Acoplamento U_z	U_x, U_y, ROT_x, ROT_z	$U_x, U_y, U_z, ROT_x, ROT_z$

Obs.:
Entenda-se chapa de topo como a face externa do sólido equivalente (extremidades das barras).

x e y – eixos que contêm a seção transversal das barras;
z – eixo longitudinal das barras;

Graus de liberdade dos nós:
 U_x, U_y e U_z – translação na direção dos eixos x, y e z, respectivamente;
 ROT_x, ROT_y, ROT_z – rotação em torno dos eixos x, y e z, respectivamente.

Tabela 2: Restrições nodais dos apoios

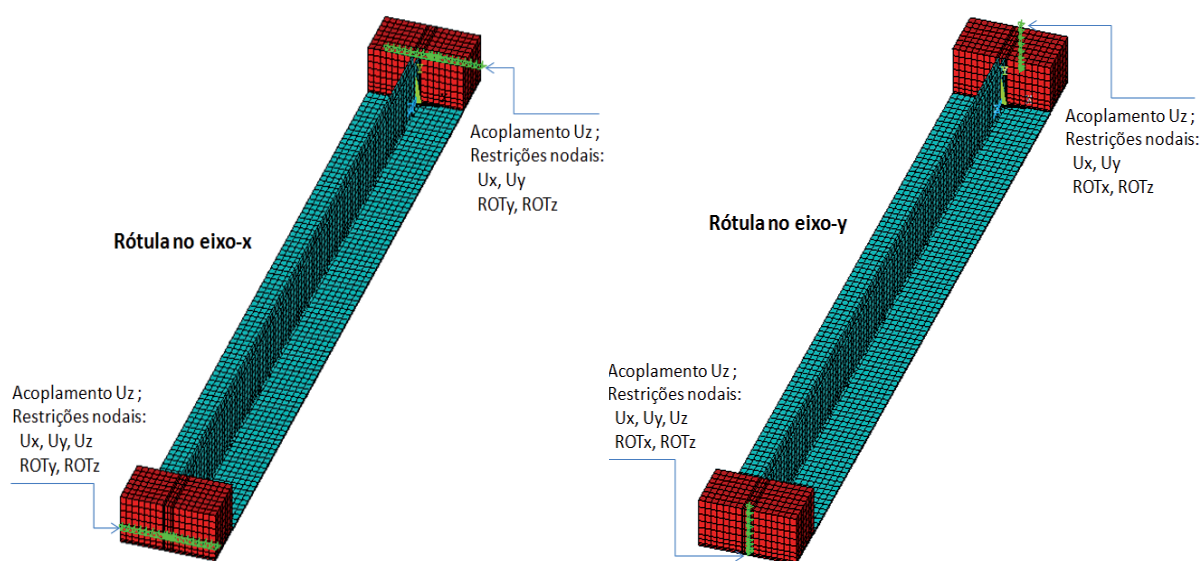


Figura 3: Restrições nodais simulando as rótulas cilíndricas

3.2 Malha e elementos finitos utilizados

Para criação dos modelos, foi utilizado o elemento finito SHELL 181 nas chapas que constituem os perfis, por se tratar de um elemento ideal em análises não-lineares de cascas de pequena espessura sujeitas a grandes deformações e rotações. Já para a discretização das presilhas e dos dispositivos de apoio, o elemento finito SOLID 45 se mostrou mais apropriado, pois facilitou a união dos nós das presilhas com os correspondentes nós dos perfis e também por serem os apoios modelados como sólidos de topo equivalentes.

Além dos elementos citados, como alguns modelos passaram a apresentar penetração entre as chapas das cantoneiras devido às deformações, optou-se pela utilização do par de elementos de contato CONTA 173 e TARGE 170, que foram inseridos nas faces internas das

abas ligadas pelas presilhas. Com isso, resolveram-se problemas de penetração e convergência nos modelos.

Baseando-se nas modelagens realizadas em Almeida (2007) e em Maia (2008), foi utilizada uma malha mapeada de aproximadamente 1cm x 1cm na discretização das cantoneiras que compõem os perfis, com a exceção das regiões curvas, cuja seção foi dividida em apenas dois elementos. Nos dispositivos de apoio, o tamanho dos elementos variou de forma a fazer coincidir os nós da região a ser unida ao perfil.

3.3 Modelo reológico

O modelo reológico empregado nas análises não-lineares foi o mesmo daquele obtido em ensaios de caracterização do aço realizados em Chodraui (2006), cuja curva Tensão x Deformação resultante é mostrada na Figura 4. Apesar de os perfis geralmente apresentarem tensões máximas abaixo da tensão de escoamento devido a problemas de instabilidade e, portanto, trabalharem no campo das pequenas deformações, optou-se pela inserção da não-linearidade física nos modelos por se tratar de um procedimento mais correto.

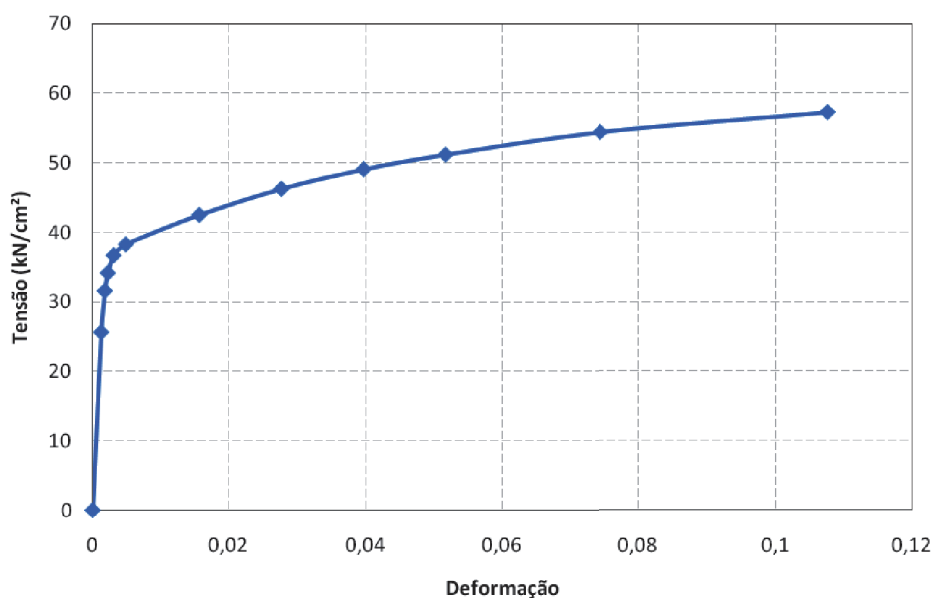


Figura 4: Modelo reológico adotado nas análises não-lineares

3.4 Imperfeições geométricas iniciais

As imperfeições geométricas iniciais inseridas na análise não-linear foram geradas a partir de duas prévias análises elásticas no ANSYS. Na primeira, buscou-se alcançar uma configuração deformada para os perfis tal que pudesse ser empregada como uma imperfeição geométrica inicial global na análise não-linear. Para isso, um carregamento unitário foi aplicado perpendicularmente ao eixo da barra no ponto central do seu comprimento. Já para a obtenção das imperfeições geométricas iniciais locais, foi feita uma análise elástica de autovalor e autovetor, a partir da qual foi importada a deformada referente ao primeiro modo local dentre os cinquenta modos requeridos na análise. A Figura 5 apresenta as imperfeições geométricas iniciais (em escala ampliada) empregadas em uma das análises não-lineares.

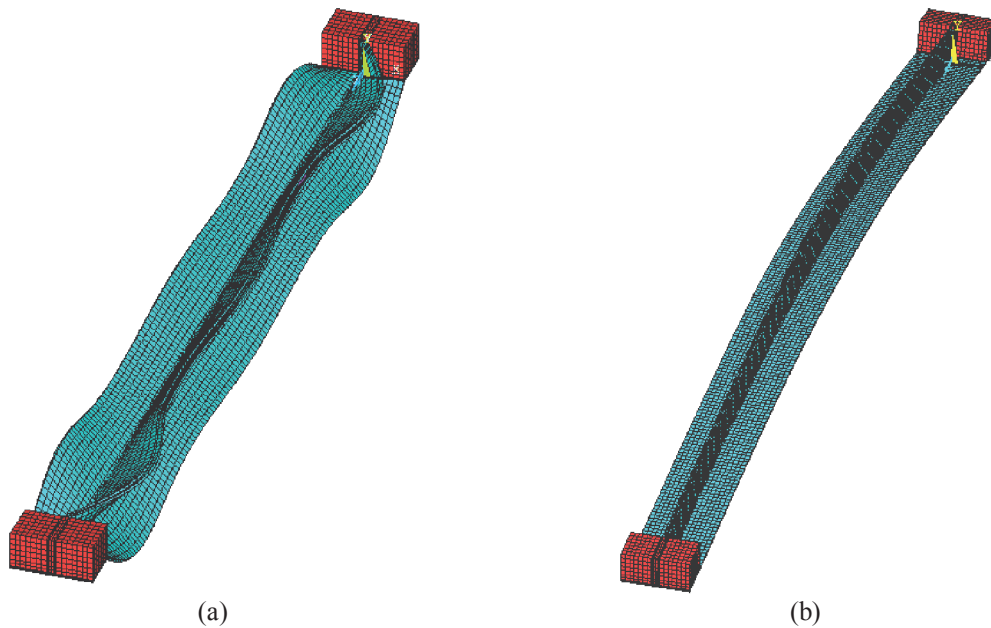


Figura 5: Imperfeições geométricas iniciais (a) local/torcional e (b) global em escala ampliada

Ainda em relação às imperfeições geométricas iniciais, foram testados alguns valores para a sua magnitude e também o sinal das imperfeições globais, com a finalidade de se fazer uma análise de sensibilidade nestes perfis dupla cantoneira em “T”. Assim, para a imperfeição geométrica global, foram utilizados os valores de $\pm L/10000$, $\pm L/500$ e $\pm L/350$, além dos tradicionais valores das normas americanas e européias: $\pm L/1500$ e $\pm L/1000$, respectivamente (onde L é o comprimento da barra). Para as imperfeições locais, foram adotados dois dos valores apresentados em Schafer & Peköz (1998) e que estão resumidos na Tabela 3, onde $P(\Delta > d)$ indica a probabilidade de que os valores de imperfeição geométrica inicial reais sejam maiores do que os valores sugeridos na referida tabela. Apenas os valores em destaque foram utilizados, pois, para as imperfeições maiores, o modelo já apresentava penetrações entre chapas antes mesmo de se iniciar a análise.

$P(\Delta > d)$	Imperfeições Locais
0,75	0,64.t
0,50	0,94.t
0,25	1,55.t
0,05	3,44.t
0,01	4,47.t
<i>t</i> – espessura da chapa do perfil. Apenas os valores hachurados foram utilizados.	

Tabela 3: Magnitude de imperfeições geométricas locais (adaptado de Schafer & Peköz, 1998)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nas Tabelas 4 e 5 e Figuras 6 a 8 são apresentados os resultados das análises de sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais comparados com as previsões teóricas e experimentais.

Rótula cilíndrica em X							
L _{perfil} (mm)	N _{c,R} (NBR) (kN)	N _{exp} (kN)	ANÁLISE NUMÉRICA			N _{c,R(NBR)} / N _{EF}	N _{exp} / N _{EF}
			Imperfeições (local e global)	N _{EF} (kN)	Modo de instabilidade		
910 (λ _x =55)	48,5	62,0	0,64t e +L/1500	92,0	F* + L/T	0,53	0,67
			0,64t e -L/1500	91,6	F* + L/T	0,53	0,68
			0,94t e +L/1500	91,3	F* + L/T	0,53	0,68
			0,94t e -L/1500	90,6	F* + L/T	0,54	0,68
			0,64t e +L/1000	92,0	F* + L/T	0,53	0,67
			0,64t e -L/1000	91,5	F* + L/T	0,53	0,68
			0,94t e +L/1000	91,5	F* + L/T	0,53	0,68
			0,94t e -L/1000	90,4	F* + L/T	0,54	0,69
			0t e +L/10000	92,3	F* + L	0,53	0,67
			0t e -L/10000	92,3	F* + L	0,53	0,67
			0t e +L/1000	NC	-	-	-
			0t e -L/1000	92,0	F* + L	0,53	0,67
			0t e +L/500	NC	-	-	-
			0t e -L/500	91,7	F* + L	0,53	0,68
			0t e +L/350	NC	-	-	-
0t e -L/350	NC	-	-	-			
1485 (λ _x =85)	48,3	70,0	0,64t e +L/1500	78,3	F* + L/T	0,62	0,89
			0,64t e -L/1500	77,7	F* + L/T	0,62	0,90
			0,94t e +L/1500	70,7	F + L	0,68	0,99
			0,94t e -L/1500	69,7	F + L	0,69	1,00
			0,64t e +L/1000	78,5	F* + L/T	0,62	0,89
			0,64t e -L/1000	77,5	F* + L/T	0,62	0,90
			0,94t e +L/1000	71,0	F + L	0,68	0,99
			0,94t e -L/1000	69,4	F + L	0,70	1,01
			0t e +L/10000	NC	-	-	-
			0t e -L/10000	NC	-	-	-
			0t e +L/1000	79,6	T	0,61	0,88
			0t e -L/1000	78,7	F + L	0,61	0,89
			0t e +L/500	80,0	T	0,60	0,88
			0t e -L/500	78,0	F + L	0,62	0,90
			0t e +L/350	80,3	T	0,60	0,87
0t e -L/350	76,5	F* + L	0,63	0,92			
2055 (λ _x =115)	48,1	63,0	0,64t e +L/1500	66,3	F* + L/T (L)	0,73	0,95
			0,64t e -L/1500	64,2	F + L/T (L)	0,75	0,98
			0,94t e +L/1500	64,9	F* + L/T (L)	0,74	0,97
			0,94t e -L/1500	62,9	F + L/T (L)	0,76	1,00
			0,64t e +L/1000	66,9	F* + L/T (L)	0,72	0,94

continua na próxima página...

...continuação da Tabela 4

Rótula cilíndrica em X							
L _{perfil} (mm)	N _{c,R} (NBR) (kN)	N _{exp} (kN)	ANÁLISE NUMÉRICA			N _{c,R(NBR)} / N _{EF}	N _{exp} / N _{EF}
			Imperfeições (local e global)	N _{EF} (kN)	Modo de instabilidade		
2055 (λ _x =115)	48,1	63,0	0,64t e -L/1000	63,7	F + L/T (L)	0,76	0,99
			0,94t e +L/1000	65,3	F* + L/T (L)	0,74	0,96
			0,94t e -L/1000	62,5	F + L/T (L)	0,77	1,01
			0t e +L/10000	NC	-	-	-
			0t e -L/10000	NC	-	-	-
			0t e +L/1000	77,5	F + L	0,62	0,81
			0t e -L/1000	65,3	F + L	0,74	0,96
			0t e +L/500	78,6	F + L	0,61	0,80
			0t e -L/500	63,0	F + L	0,76	1,00
			0t e +L/350	79,4	F + L	0,61	0,79
			0t e -L/350	60,6	F + L	0,79	1,04
2630 (λ _x =145)	42,6	46,0	0,64t e +L/1500	50,0	F + L*	0,85	0,92
			0,64t e -L/1500	48,6	F + L*	0,88	0,95
			0,94t e +L/1500	50,1	F + L*	0,85	0,92
			0,94t e -L/1500	48,0	F + L*	0,89	0,96
			0,64t e +L/1000	50,3	F + L*	0,85	0,91
			0,64t e -L/1000	47,6	F + L*	0,89	0,97
			0,94t e +L/1000	50,3	F + L*	0,85	0,91
			0,94t e -L/1000	47,1	F + L*	0,90	0,98
			0t e +L/10000	49,7	F + L*	0,86	0,93
			0t e -L/10000	50,0	F + L*	0,85	0,92
			0t e +L/1000	50,5	F + L*	0,84	0,91
			0t e -L/1000	48,4	F + L*	0,88	0,95
			0t e +L/500	52,3	F + L*	0,81	0,88
			0t e -L/500	45,1	F + L*	0,94	1,02
			0t e +L/350	53,8	F + L*	0,79	0,86
0t e -L/350	NC		-	-			

t – espessura das chapas do perfil;
L_{perfil} – comprimento do perfil (λ_x=L_c/r_x);
N_{c,R(NBR)} – força de compressão resistente obtida conforme ABNT NBR 14762:2010;
N_{exp} – força de compressão resistente obtida em Chodraui (2006);
N_{EF} – força de compressão resistente obtida via MEF;

F = instabilidade global por flexão;
T = instabilidade global por torção;
L/T = instabilidade local/torcional;
L/T (L) = instabilidade local/torcional com predominância do modo local;
* Modo de instabilidade pouco pronunciado;
NC = análise via MEF não convergiu.

Tabela 4: Resultados das análises não-lineares para a rótula no eixo-x

Rótula cilíndrica em Y							
L_{perfil} (mm)	$N_{c,R}$ (NBR) (kN)	N_{exp} (kN)	ANÁLISE NUMÉRICA			$N_{c,R(NBR)}$ / N_{EF}	N_{exp} / N_{EF}
			Imperfeições (local e global)	N_{EF} (kN)	Modo de instabilidade		
1355 ($\lambda_y=56$)	47,5	71,0	0,64t e L/1500	83,9	F* + L/T (T)	0,57	0,85
			0,94t e L/1500	84,2	L/T (T)	0,56	0,84
			0,64t e L/1000	83,7	F* + L/T (T)	0,57	0,85
			0,94t e L/1000	84,0	L/T (T)	0,57	0,85
			0t e L/10000	NC	-	-	-
1885 ($\lambda_y=76$)	46,2	63,0	0,64t e L/1500	72,2	F* + L/T (T)	0,64	0,87
			0,94t e L/1500	72,1	L/T (T)	0,64	0,87
			0,64t e L/1000	71,8	F* + L/T (T)	0,64	0,88
			0,94t e L/1000	71,6	L/T (T)	0,65	0,88
			0t e L/10000	71,8	F* + L/T (T)	0,64	0,88
2415 ($\lambda_y=96$)	44,2	53,0	0,64t e L/1500	62,1	F* + L/T (T)	0,71	0,85
			0,94t e L/1500	62,3	F* + L/T (T)	0,71	0,85
			0,64t e L/1000	NC	-	-	-
			0,94t e L/1000	NC	-	-	-
			0t e L/10000	62,1	F* + T	0,71	0,85
2925 ($\lambda_y=115$)	41,3	48,0	0,64t e L/1500	NC	-	-	-
			0,94t e L/1500	NC	-	-	-
			0,64t e L/1000	NC	-	-	-
			0,94t e L/1000	NC	-	-	-
			0t e L/10000	54,8	F* + T	0,75	0,88

t – espessura das chapas do perfil;
 L_{perfil} – comprimento do perfil ($\lambda_x=L_c/r_x$);
 $N_{c,R(NBR)}$ – força de compressão resistente obtida conforme ABNT NBR 14762:2010;
 N_{exp} – força de compressão resistente obtida em Chodraui (2006);
 N_{EF} – força de compressão resistente obtida via MEF;

F = instabilidade global por flexão;
T = instabilidade global por torção;
L/T = instabilidade local/torcional;
L/T (T) = instabilidade local/torcional com predominância de torção;
* Modo de instabilidade pouco pronunciado;
NC = análise via MEF não convergiu.

Tabela 5: Resultados das análises não-lineares para a rótula no eixo-y

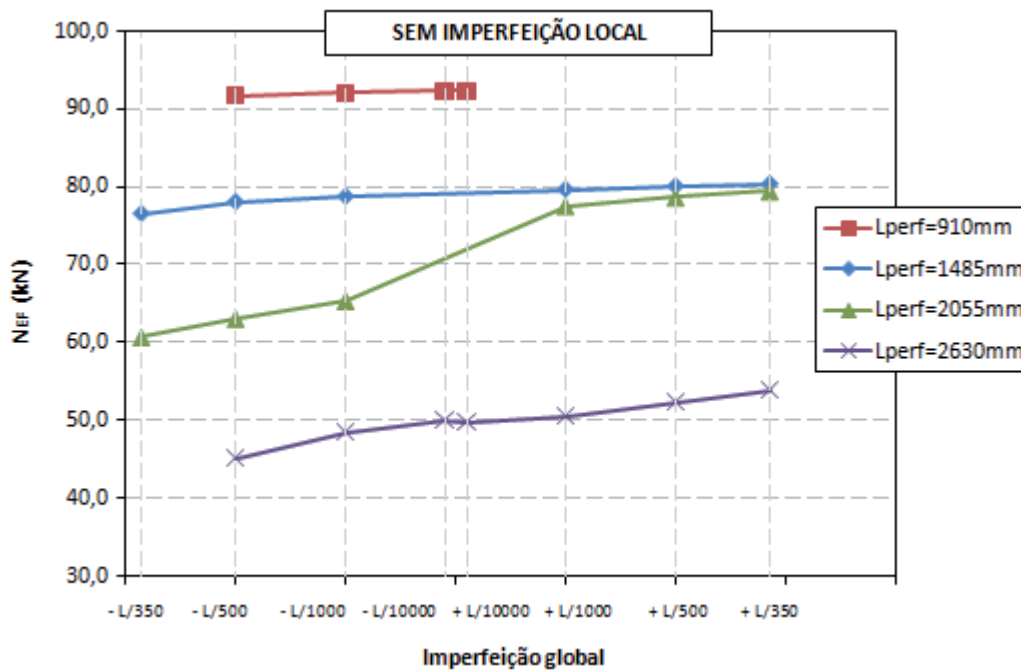


Figura 6: Análise de sensibilidade à imperfeição geométrica inicial global (sem imperfeições locais)
Rótula no eixo-x

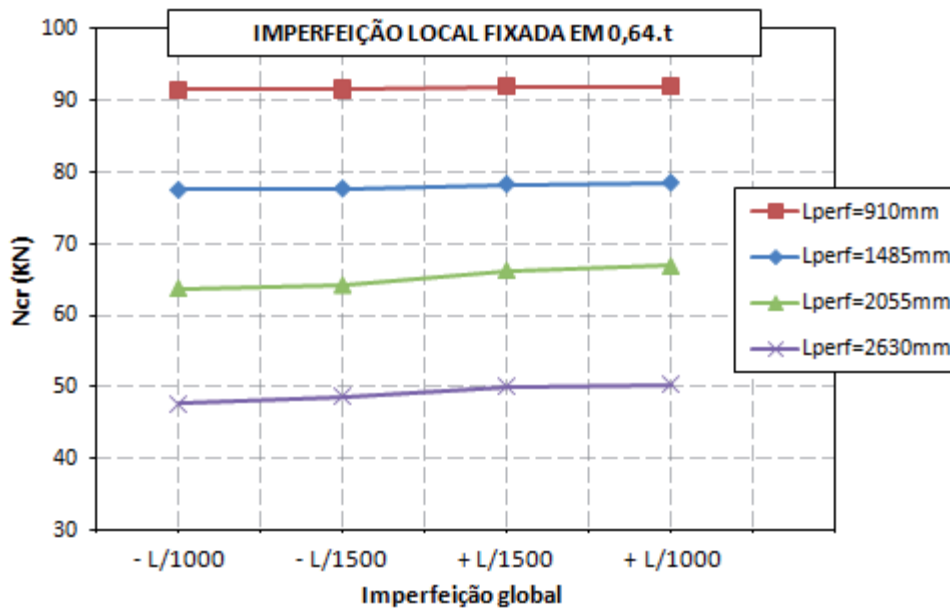


Figura 7: Análise de sensibilidade às imperfeições geométricas (imperfeição local fixada em 0,64.t)
Rótula no eixo-x

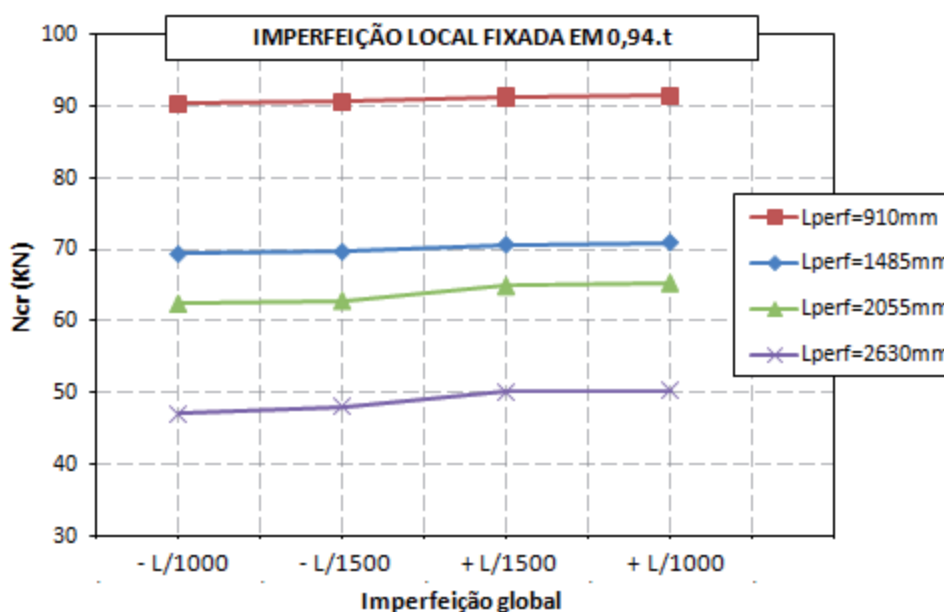


Figura 8: Análise de sensibilidade às imperfeições geométricas (imperfeição local fixada em 0,94.t)
Rótula no eixo-x

Fazendo um comparativo entre os resultados numéricos e os experimentais anteriormente apresentados (Tabela 1), nota-se uma coerência no comportamento estrutural dos modelos numéricos criados. Para a rótula no eixo-x (eixo baricêntrico de menor inércia), o fim da capacidade resistente se deu devido principalmente à ocorrência do modo de instabilidade local/torcional (L/T) em perfis com esbeltez menor, diferentemente dos perfis de maior comprimento, onde houve predominância do modo global por flexão (F). Já para a rótula no eixo-y (eixo baricêntrico de maior inércia), o modo local/torcional com predominância de torção (L/T(T)) foi quem comandou o colapso das barras, independentemente da esbeltez (ver Tabelas 4 e 5 e Figuras 9 a 11).

Em relação à força crítica, as Tabelas 4 e 5 mostram a boa correlação dos modelos em elementos finitos com os resultados dos ensaios, onde as diferenças foram consideradas satisfatórias dada a impossibilidade de se representar nos modelos todas as particularidades dos experimentos. Além disso, os valores obtidos para a força resistente conforme ABNT NBR 14762:2010 resultaram sempre inferiores aos dos modelos numéricos, principalmente para as barras com menor esbeltez global.

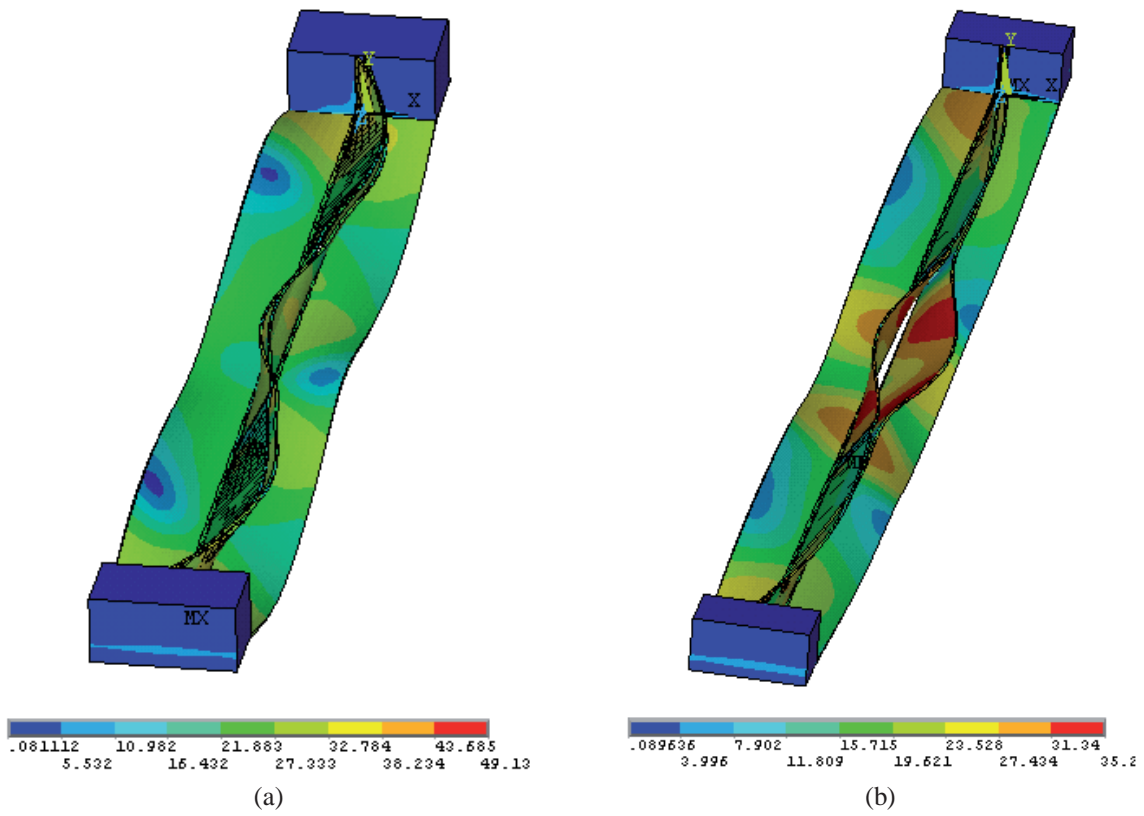


Figura 9: Tensões de Von Mises (kN/cm^2) e deformada no ponto crítico em escala aumentada
 (a) $L_{\text{perfil}} = 910\text{mm}$ e (b) $L_{\text{perfil}} = 1485\text{mm}$ - Rótula no eixo-x

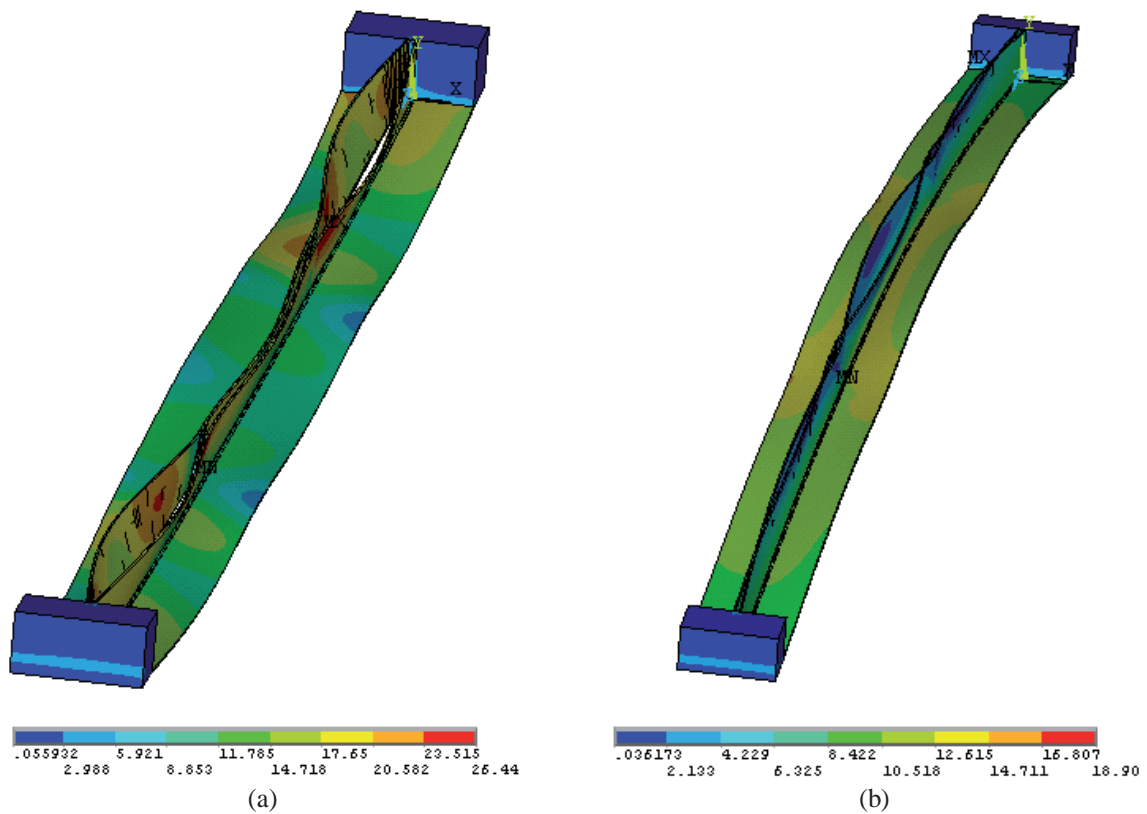


Figura 10: Tensões de Von Mises (kN/cm^2) e deformada no ponto crítico em escala aumentada
 (a) $L_{\text{perfil}} = 2055\text{mm}$ e (b) $L_{\text{perfil}} = 2630\text{mm}$ - Rótula no eixo-x

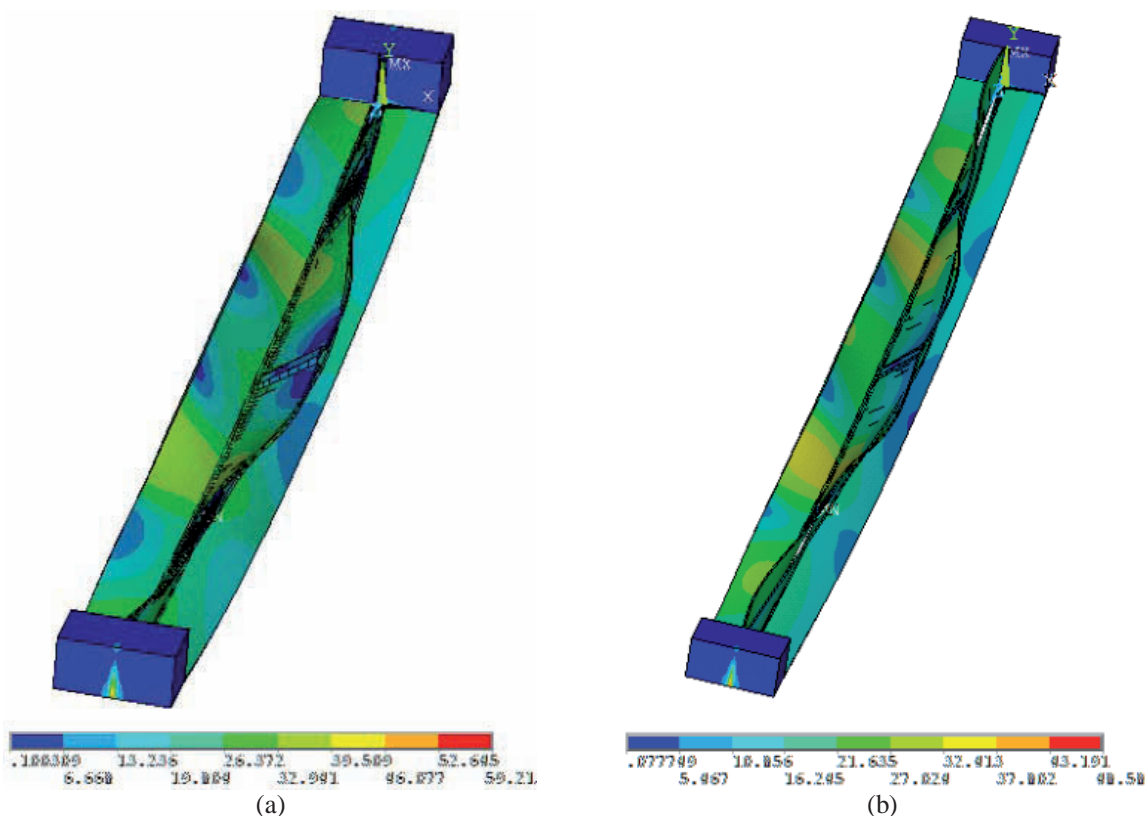


Figura 11: Tensões de Von Mises (kN/cm^2) e deformada no ponto crítico em escala aumentada
(a) $L_{\text{perfil}} = 1355\text{mm}$ e (b) $L_{\text{perfil}} = 1885\text{mm}$ - Rótula no eixo-y

Quanto à análise de sensibilidade dos perfis às imperfeições geométricas iniciais (Figuras 6 a 8), confirma-se a expectativa de maior influência da imperfeição global em barras com maior esbelteza, da mesma forma que as barras com esbelteza menor se mostraram mais sensíveis à variação das imperfeições locais. Além disso, barras com imperfeição geométrica inicial global com sinal negativo (tracionando as abas sem presilhas) apresentaram sistematicamente menor resistência do que aquelas com sinal positivo (comprimindo as abas sem presilhas), dando um indício de um “sinal crítico negativo” para este tipo de perfil.

Por fim, analisando a distribuição de tensões (*von Mises*) nos exemplos das Figuras 9 a 11, comprova-se a tendência dos perfis formados a frio em alcançar sua capacidade resistente mesmo apresentando tensões abaixo da tensão de escoamento do material. Em nenhum dos modelos as tensões ultrapassaram o limite do aço utilizado ($f_y = 37,5\text{kN/cm}^2$).

5 CONCLUSÕES

As análises numéricas feitas neste trabalho, juntamente com os resultados experimentais presentes na literatura e as previsões teóricas, indicam certa tendência para os modos de instabilidade que ocorrem em PFF formados por dupla cantoneira com seção “T” submetidos à compressão centrada. Para barras com apoios que permitem a rotação em torno do eixo de menor inércia de sua seção, os modos local/torcional e global por flexão se mostraram predominantes nos perfis com menor e maior esbelteza global, respectivamente. Já para as barras com dispositivos de apoio que permitem a rotação em torno do eixo de maior inércia de sua seção, verificou-se que o modo local/torcional é o crítico para os perfis usuais.

Em relação à sensibilidade dos perfis às imperfeições geométricas iniciais, nota-se que as imperfeições locais exercem maior influência sobre perfis com menor esbelteza global (embora

as diferenças nos resultados tenham sido pequenas), ao contrário dos perfis com maior esbelteza, nos quais a variação na magnitude das imperfeições globais implica numa maior variação da força crítica. Ainda em relação às imperfeições globais, os modelos numéricos apresentaram resultados para a força de compressão resistente menores para imperfeições com sinal negativo (tracionando as abas sem presilhas), dando um indício de um “sinal crítico negativo” para este tipo de perfil (Figura 6). Em geral, a magnitude e o sinal das imperfeições geométricas iniciais não alteraram de forma significativa o modo de instabilidade resultante.

Os resultados das análises numéricas vieram a reforçar ainda que os valores da força de compressão resistente obtidos via ABNT NBR 14762:2010 de fato resultam satisfatórios, uma vez que, independente da esbelteza global do perfil, estes resultaram sempre inferiores àqueles obtidos nos modelos em elementos finitos.

Finalmente, conclui-se que os modelos numéricos criados se mostraram confiáveis e servem como ferramenta para um estudo mais aprofundado sobre PFF compostos por dupla-cantoneira em seção “T” sob compressão com diferentes condições de contorno.

REFERÊNCIAS

- Almeida, S. J. C., Análise numérica de perfis de aço formados a frio comprimidos considerando imperfeições geométricas iniciais. São Carlos. 206 p. *Dissertação (Mestrado)* - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007.
- ANSYS INC. Ansys Release 9.0 – Documentation, 2004.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 6355: Perfis estruturais de aço formados a frio*. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- 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. São Carlos. 310p. *Tese (Doutorado)* – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2006.
- Maia, W. F.. Sobre a estabilidade de cantoneiras de aço formadas a frio submetidas à compressão. São Carlos. 196p. *Dissertação (Mestrado)* – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2008.
- Maia, W. F.; Munaiar Neto, J.; Malite, M.. Stability of cold-formed steel simple and lipped angles under compression. In: LaBoube, R.A.; Yu, W.W. (Ed). *Recent research and developments in cold-formed steel design and construction (19th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, St. Louis, USA, Oct. 14 & 15, 2008)*. Missouri University of Science & Technology, Rolla, Missouri, USA, 2008.
- Maia, W. F.; Munaiar Neto, J.; Malite, M.. Estabilidade de cantoneiras simples e enrijecidas de aço formadas a frio submetidas à compressão centrada e excêntrica. *Revista Minerva*, v. 6, p. 139-149, 2009.
- 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.
- Schafer, B. W.. Cold-Formed Steel Behavior and Design: Analytical and Numerical Modeling of Elements and Members with Longitudinal Stiffeners. *PhD. Dissertation*, Cornell University, Ithaca, 1997.