

MODELOS NUMÉRICOS DE PERFIS DE AÇO FORMADOS A FRIO COMPRIMIDOS: ÊNFASE ÀS IMPERFEIÇÕES GEOMÉTRICAS INICIAS

Saulo José de Castro Almeida⁽¹⁾, Jorge Munaiar Neto⁽²⁾, Maximiliano Malite⁽³⁾

Resumo

Neste trabalho são apresentadas análises numéricas de perfis de aço formados a frio submetidos à compressão centrada. Trata-se de uma investigação, realizada por meio de elementos finitos, com vistas à análise da influência de imperfeições geométricas iniciais presentes em perfis U simples e U enrijecido, sob os aspectos de sua forma, amplitude e sentido. As imperfeições geométricas são adotadas na forma de modos de flambagem (autovetores) local, global e distorcional obtidos de análises elásticas de autovalor, observando a suscetibilidade a tais modos para cada seção. Primeiramente, as imperfeições são avaliadas de forma isolada e, em seguida, de forma acoplada (conjunta). Para fins de obtenção da força de colapso, fica examinada a possibilidade de empregar modos de flambagem isolados para representar as imperfeições geométricas. Por fim, fica demonstrada a importância de se investigar a influência do sentido da imperfeição global na resposta estrutural de barras comprimidas em análises numéricas, em que as imperfeições são representadas pela associação de modos de flambagem.

Palavras-chave: Estruturas de aço. Perfis formados a frio. Análise numérica. Imperfeições geométricas.

⁽¹⁾ Doutorando em Engenharia de Estruturas, 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, tel. +55 16 3373-9457, fax.+55 16 3373-9482, e-mail: saulojca@sc.usp.br

⁽²⁾ Professor Doutor, 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, tel. +55 16 3373-9487, fax.+55 16 3373-9482, e-mail: jmunaiar@sc.usp.br

⁽³⁾ Professor Associado, 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, tel. +55 16 3373-9468, fax.+55 16 3373-9482, e-mail: mamalite@sc.usp.br

1 INTRODUÇÃO

Perfis U simples e enrijecido de aço formados a frio são utilizados em diversas aplicações na prática das construções metálicas, tais como pilares, tesouras, vigamento de galpões e elementos secundários de pontes, caracterizando-os como seções “monossimétricas” das mais empregadas. Esses perfis resultam, em geral, bastante sensíveis às imperfeições geométricas iniciais, as quais têm sido investigadas, em especial, por meio de ferramentas numéricas, das quais se destaca a análise via elementos finitos. No entanto, até o presente momento, nenhuma regra geral foi estabelecida quanto à modelagem numérica das imperfeições geométricas iniciais empregando a técnica dos elementos finitos. Conforme mencionado em Kaitila (2002), isso se deve principalmente à pequena quantidade dos dados disponíveis, bem como à qualidade dos mesmos.

O presente trabalho tem por objetivo desenvolver, por meio do aplicativo computacional ANSYS, análises de sensibilidade da força axial de compressão resistente de perfis de aço formados a frio, com seções tipo U simples e U enrijecido, às amplitudes, forma e sentido das imperfeições geométricas iniciais (global, local e distorcional), atuando isoladamente ou acopladas, considerando, simultaneamente, não linearidades do material e geométrica.

2 IMPERFEIÇÕES GEOMÉTRICAS INICIAIS – Breve abordagem

A representação das imperfeições geométricas, por meio de seus modos de flambagem elástica tem sido largamente utilizada em análises numéricas. Todavia, ainda há pouco consenso quanto a qual modo de flambagem, ou conjunto de modos, melhor representa a distribuição das imperfeições.

De acordo com Yang e Hancock (2004), imperfeições iniciais baseadas em um único modo de flambagem, proveniente do estudo de autovalor, pode conduzir a resultados não conservativos devido a possibilidade da ocorrência de interação entre alguns modos.

Na investigação numérica apresentada em Kaitila (2002), notou-se que as maiores discrepâncias entre forças últimas experimentais e numéricas geralmente correspondem aos casos em que as imperfeições local ou global atuaram isoladamente. Na última referência consta ainda que a imperfeição geométrica inicial seja modelada mediante combinação de modos local e global. Ressalta também que a imperfeição do tipo local deve ser considerada como uma combinação de, no mínimo, dois modos de flambagem.

A correlação entre o sentido da imperfeição e a força última de barras comprimidas sugere aspecto relevante conforme destacado em Mulligan e Peköz (1984), em que foram identificadas forças últimas diferentes para excentricidades de sentidos contrários.

Em Yang e Hancock (2004), ao investigar numericamente a imperfeição do tipo distorcional, identificou-se a influência do sentido da configuração deformada sobre a força última das barras. Geralmente a imperfeição do tipo I-I (inward-inward), conduziu a menores valores de força última quando comparados aos obtidos com imperfeições do tipo O-O (open-open), destacando-se que I-I e O-O referem-se ao movimento de fechamento e abertura das abas, respectivamente.

Em Lecce e Rasmussen (2005), em que foram medidas imperfeições iniciais em perfis U enrijecidos, com e sem enrijecedor intermediário, é mencionado que a tendência geral entre o movimento das abas e o sentido da imperfeição indica que quando a barra desenvolve apenas uma semi-onda no modo distorcional, tem-se que o movimento das abas segue o mesmo sentido prescrito pela imperfeição. Todavia, a correlação entre o movimento das abas e as imperfeições não é tão evidente quando são desenvolvidas mais que uma semi-onda.

Com relação às amplitudes das imperfeições do tipo global, é consenso que os valores $L/1000$ ou $L/1500$ sejam adotados. Para as imperfeições dos tipos, local e distorcional, equações analíticas têm sido empregadas para os limites de amplitudes das mesmas, como, por exemplo, a equação proposta em Walker (1975) e também apresentada em Yang e Hancock (2004), bem como a equação proposta pela norma britânica BS 5950 (1998). Uma alternativa que vem sendo empregada nas investigações mais recentes é o método probabilístico de determinação da máxima amplitude de imperfeição, apresentado em Schafer e Peköz (1998).

3 CONSTRUÇÃO DOS MODELOS NUMÉRICOS

O pacote computacional ANSYS foi utilizado para realizar as análises não lineares, para se obter a força máxima e os modos de falha. A estratégia de modelagem numérica adotada foi análoga àquela empregada em Chodraui (2006) e explorada em Almeida (2007). Em síntese, as simulações numéricas foram divididas em duas fases: primeiramente foram realizadas análises de autovalor para obtenção dos modos de flambagem de interesse; em seguida, foram realizadas análises em que foram consideradas e inseridas não linearidades geométrica e do material a fim de obter a força última e o modo de falha das barras comprimidas. Os modelos numéricos desenvolvidos foram construídos em concordância com

o programa experimental apresentado em Chodraui (2006), em que foram investigadas as resistências últimas de perfis U (simples e enrijecido) de aço formados a frio comprimidos, com extremidades rotuladas em torno do eixo de menor inércia.

3.1 Elementos finitos utilizados

Para discretização dos modelos em elementos finitos, em observância aos estudos realizados em Almeida (2007), foram utilizados elementos do tipo SHELL tanto para o perfil como para a chapa de topo. O elemento de casca utilizado foi o SHELL181, com quatro nós e seis graus de liberdade por nó: três rotações (ROTX, ROTY e ROTZ) e três translações (UX, UY e UZ).

3.2 Relação constitutiva adotada

As análises numéricas foram realizadas com base nas relações constitutivas obtidas experimentalmente e apresentadas em Chodraui (2006), corrigidas mediante a Eq. (1) e Eq. (2), onde σ_{true} e ϵ_{true} são denominadas “tensão total verdadeira” e “deformação total verdadeira” respectivamente, enquanto σ_{nom} e ϵ_{nom} são denominados valores nominais de tensão e deformação, ambos obtidos por meio de ensaio de tração.

$$\sigma_{\text{true}} = \sigma_{\text{nom}} (1 + \epsilon_{\text{nom}}) \quad (1)$$

$$\epsilon_{\text{true}} = \ln(1 + \epsilon_{\text{nom}}) \quad (2)$$

3.3 Condições de contorno

Os modelos foram construídos procurando simular as reais condições experimentais dos aparelhos de apoio das barras, conforme empregado em Chodraui (2006). Os modelos incluem chapas rígidas conectadas aos nós de cada extremidade da barra, projetadas conforme aspectos apresentados em Almeida (2007), onde se investigou as características desta chapa. Para simular a condição de vínculo de barras simplesmente apoiadas apenas em relação ao eixo de menor inércia, foi gerada uma malha em que se considera uma linha de nós passando pelo centróide da seção do perfil, conforme ilustra a Figura 1, cujos nós pertencentes a essa linha foram acoplados em relação aos deslocamentos na direção do eixo z, em cada extremidade do modelo. A compressão uniforme, por sua vez, foi imposta por meio de

incrementos de deslocamentos, aplicados aos nós pertencentes à linha que passa pelo centróide da extremidade móvel, conforme Figura 1.

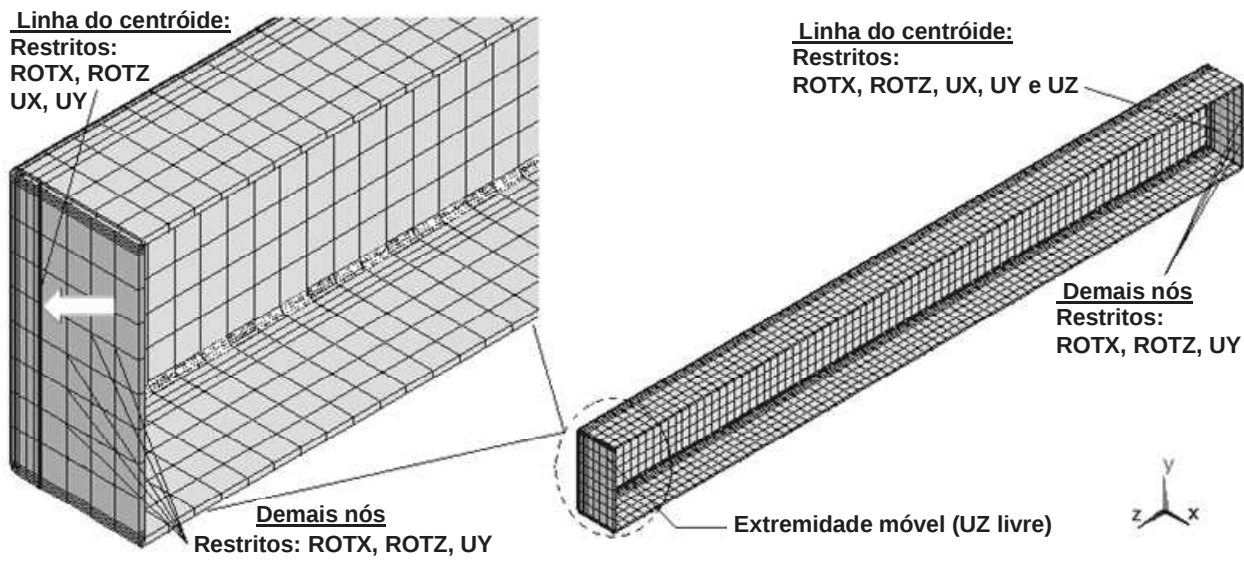


Figura 1 – Esquematização do modelo: discretização e condições de contorno adotadas

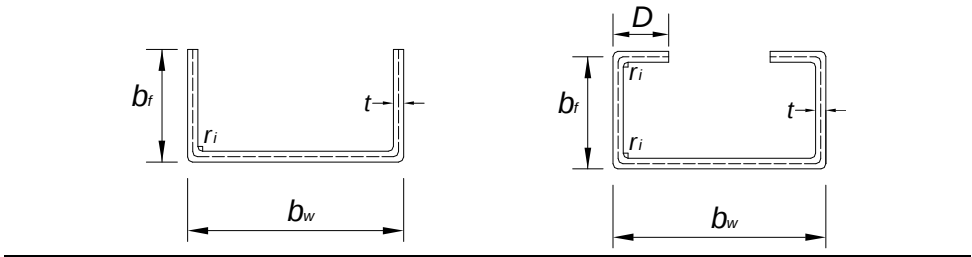
4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE ÀS IMPERFEIÇÕES GEOMÉTRICAS INICIAIS

Os modelos numéricos foram organizados em grupos de perfis do tipo U simples (grupos 1 e 2) e do tipo U enrijecido (grupos 3 e 4), cujas dimensões e propriedades do material são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Dimensões das seções e propriedades do material (Adaptada de Chodraui (2006))

Grupo	Seção	Dimensões das seções					Material	
		D (mm)	b_f (mm)	b_w (mm)	t^* (mm)	r_i (mm)	E (GPa)	f_y (MPa)
1	U225	-----	50	100	2,38	2,38	205	375
2	U375	-----	50	100	3,88	3,88	205	288
3	Ue225	25	50	125	2,38	2,38	205	375
4	Ue375	25	50	125	3,88	3,88	205	288

* espessura média real dos perfis



As barras investigadas possuem relação l_{ey}/r_y , com valores em torno de 60, 90, 120 e 150 em cada grupo, em que l_{ey} é o comprimento efetivo de flambagem no eixo de menor inércia e r_y o raio de giração em torno deste mesmo eixo. A nomenclatura empregada para representar os modelos investigados, possibilita visualizar o tipo de perfil, sua espessura nominal e seu comprimento. Por exemplo, a nomenclatura U225L850 indica perfil U simples com espessura nominal igual a 2,25 mm e comprimento igual a 850 mm. A imperfeição geométrica foi adotada de acordo a suscetibilidade aos modos de flambagem local, global e distorcional de cada tipo de seção, conforme Figura 2.

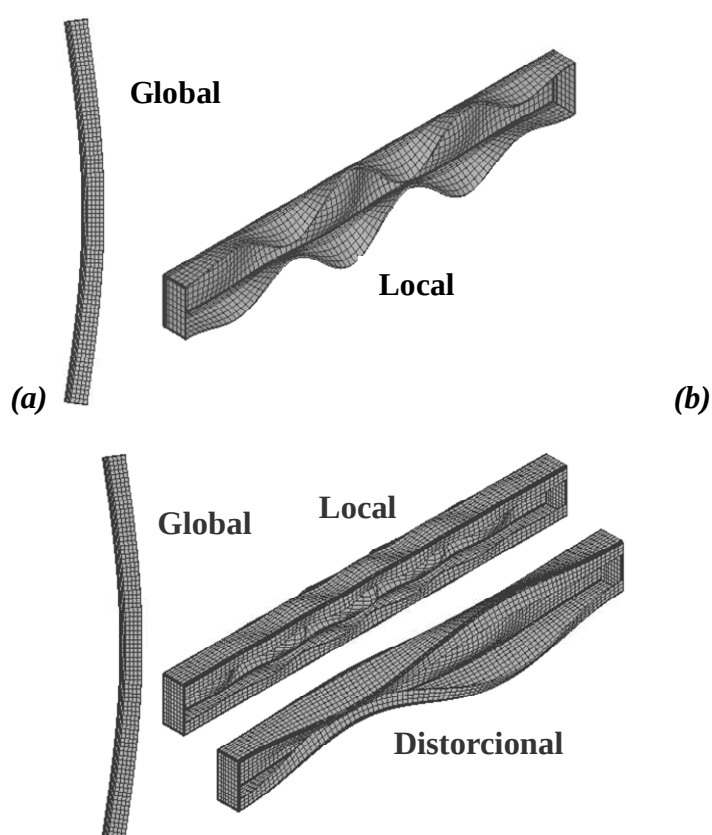
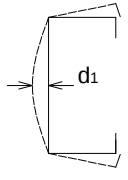
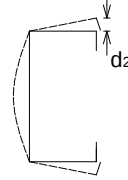
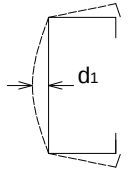
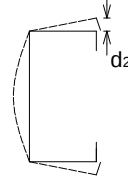


Figura 2: Modos de flambagem considerados para implementar as imperfeições. (a) U simples e (b) U enrijecido

Quanto às amplitudes das imperfeições, para as imperfeições localizadas os valores investigados foram adotados em concordância com aqueles sugeridos em Schafer e Peköz (1998) conforme Tabela 2, onde os tipos 1 e 2 referem-se às amplitudes local e distorcional, respectivamente, enquanto que para a imperfeição do tipo global, foram adotados valores de amplitude iguais a $L/500$, $L/1000$, $L/1500$ e $L/5000$. Vale lembrar que os sentidos dos modos de flambagem, local, distorcional e global, fornecidos pelo ANSYS na análise de autovalor,

foram aqui convencionados como sendo positivos quando das análises de sensibilidade às imperfeições geométricas.

Tabela 2: Análise probabilística CDF* para imperfeições tipo 1 e tipo 2 (Adaptada de Schafer e Peköz (1998))

$P(\Delta > d)$	Tipo 1	Tipo 2		
	d_1/t	d_2/t		
0,75	0,14	0,64		
0,50	0,34	0,94		
0,25	0,66	1,55		
CDF* - Função de distribuição acumulada.			Tipo 1	Tipo 2

4.1 Sensibilidade às imperfeições geométricas: análise isolada

A análise isolada de sensibilidade às imperfeições foi realizada para avaliar a influência de cada tipo de imperfeição, a saber, local, global e distorcional, na resposta estrutural das barras submetidas à compressão. Para cada comprimento efetivo foi adotado como aproximação das imperfeições geométricas, local e distorcional, o primeiro modo puro fornecido pelo ANSYS, ou seja, aquele modo local e distorcional que apresentasse pouca ou nenhuma interação com outros modos. A análise de sensibilidade acerca da imperfeição do tipo global foi realizada conservando o sentido do modo global de flexão apresentado pelo ANSYS (convencionado anteriormente como positivo), cuja configuração deformada para todos os modelos corresponde à compressão na alma, conforme Figura 3.

Os resultados da análise isolada de sensibilidade estão mostrados nas tabelas 3, 4 e 5 referente às forças últimas alcançadas por cada barra. Nas tabelas 3, 4 e 5 a relação l_{ey}/r_y é o índice de esbeltez das barras, F_{teste} é a força última experimental. $F_{25\%}$, $F_{50\%}$ e $F_{75\%}$, são as forças últimas obtidas numericamente para as imperfeições localizadas com probabilidades de excedência de 25%, 50% e 75%, respectivamente, enquanto que $F_{L/500}$, $F_{L/1000}$, $F_{L/1500}$ e $F_{L/5000}$, são aquelas obtidas para imperfeições globais de $L/500$, $L/1000$, $L/1500$ e $L/5000$, respectivamente.

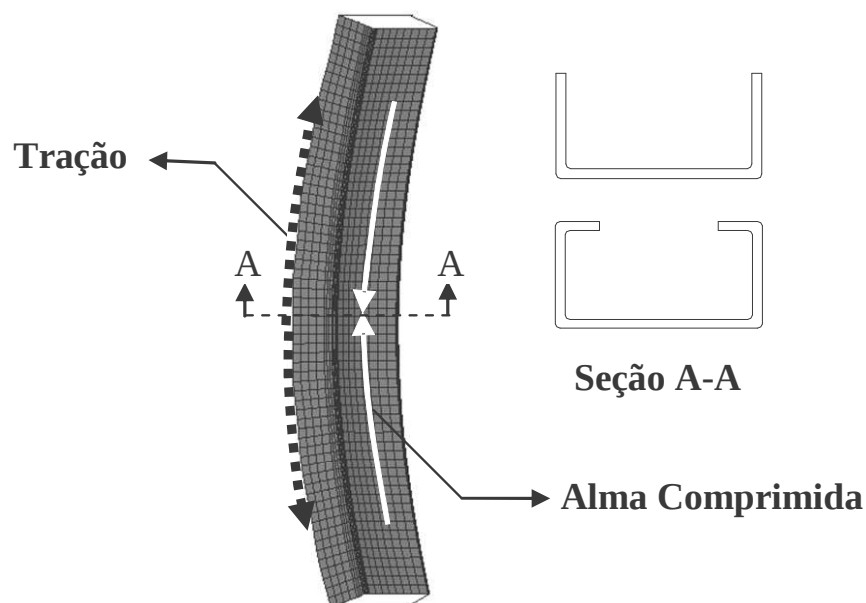


Figura 3 – Sentido positivo da imperfeição global: alma comprimida pelo momento fletor

Tabela 3: Análise de sensibilidade à imperfeição local: relação experimental-numérica da força máxima

Grupo	Modelo	$\frac{l_{ey}}{r_y}$	F_{teste} (KN)	$\frac{F_{teste}}{F_{25\%}}$	$\frac{F_{teste}}{F_{50\%}}$	$\frac{F_{teste}}{F_{75\%}}$	$\frac{F_{75\%}}{F_{25\%}}$
1	U225L850	60	119	1,59	1,34	1,14	1,38
	U225L1320	90	89	1,51	1,20	0,98	1,53
	U225L1800	120	55	1,25	1,00	0,85	1,49
	U225L2270	150	44	1,38	1,13	1,02	1,36
2	U375L850	60	175	1,28	1,13	1,05	1,22
	U375L1320	90	146	1,36	1,14	1,07	1,29
	U375L1800	120	87	1,13	0,94	0,90	1,27
	U375L2270	150	60	1,11	0,95	0,87	1,27
3	Ue225L1015	60	168	1,27	1,17	1,08	1,18
	Ue225L1575	90	132	1,26	1,11	0,98	1,28
	Ue225L2130	120	75	0,99	0,86	0,77	1,28
	Ue225L2700	150	63	1,19	1,07	1,00	1,20
4	Ue375L985	60	282	1,45	1,30	1,20	1,20
	Ue375L1530	90	173	1,07	0,95	0,89	1,21
	Ue375L2070	120	106	0,89	0,77	0,73	1,22
	Ue375L2615	150	108	1,59	1,34	1,14	1,17
			Média	1,25	1,08	0,98	
			COV	0,148	0,144	0,136	
			Desvio Padrão	0,186	0,155	0,133	

Tabela 4: Análise de sensibilidade à imperfeição distorcional: relação experimental-numérica da força máxima

Grupo	Modelo	$\frac{l_{ey}}{r_y}$	F_{teste} (KN)	$\frac{F_{teste}}{F_{25\%}}$	$\frac{F_{teste}}{F_{50\%}}$	$\frac{F_{teste}}{F_{75\%}}$	$\frac{F_{75\%}}{F_{25\%}}$
3	Ue225L1015	60	168	1,08	1,02	0,99	1,10
	Ue225L1575	90	132	1,02	0,98	0,96	1,06
	Ue225L2130	120	75	0,76	0,73	0,72	1,04
	Ue225L2700	150	63	1,00	0,98	0,98	1,02
4	Ue375L985	60	282	1,45	1,32	1,27	1,14
	Ue375L1530	90	173	1,05	0,98	0,96	1,10
	Ue375L2070	120	106	0,73	0,69	0,68	1,07
	Ue375L2615	150	108	1,14	1,10	1,08	1,05
			Média	1,03	0,98	0,96	
			COV	0,221	0,205	0,197	
			Desvio Padrão	0,227	0,200	0,188	

Tabela 5: Análise de sensibilidade à imperfeição global (sentido positivo): relação experimental-numérica da força máxima

Grupo	Modelo	$\frac{l_{ey}}{r_y}$	$\frac{F_{teste}}{F_{L/500}}$	$\frac{F_{teste}}{F_{L/1000}}$	$\frac{F_{teste}}{F_{L/1500}}$	$\frac{F_{teste}}{F_{L/5000}}$	$\frac{F_{L/5000}}{F_{L/500}}$
1	U225L850	60	0,93	0,89	0,88	0,84	1,11
	U225L1320	90	0,99	0,92	0,89	0,85	1,17
	U225L1800	120	0,96	0,89	0,86	0,81	1,19
	U225L2270	150	1,16	1,07	1,05	1,02	1,15
2	U375L850	60	1,06	1,02	1,00	0,98	1,08
	U375L1320	90	1,18	1,10	1,07	1,01	1,18
	U375L1800	120	1,02	0,95	0,91	0,84	1,21
	U375L2270	150	1,05	0,97	0,94	0,90	1,17
3	Ue225L1015	60	1,11	1,00	0,98	0,91	1,21
	Ue225L1575	90	1,09	1,01	0,98	0,93	1,18
	Ue225L2130	120	0,93	0,85	0,82	0,77	1,20
	Ue225L2700	150	1,15	1,07	1,05	1,00	1,14
4	Ue375L985	60	1,30	1,24	1,23	1,19	1,09
	Ue375L1530	90	1,04	0,97	0,94	0,90	1,16
	Ue375L2070	120	0,89	0,82	0,79	0,73	1,22
	Ue375L2615	150	1,30	1,20	1,17	1,11	1,17
			Média	1,07	1,00	0,97	0,92
			COV	0,115	0,119	0,125	0,134
			Desvio Padrão	0,123	0,119	0,121	0,124

De acordo com as relações entre as forças últimas (máxima e mínima) alcançadas numericamente e apresentadas na última coluna das tabelas 3, 4 e 5, tem-se que: (i) perfis U simples e enrijecido com esbeltez global, l_{ey}/r_y , iguais a 90 e 120 foram os mais suscetíveis às

imperfeições local e global; (ii) os perfis U enrijecidos com relação l_{ey}/r_y em torno de 60 foram os que se apresentaram mais suscetíveis à imperfeição do tipo distorcional, (iii) em geral, os perfis U simples apresentaram maior suscetibilidade à imperfeição local que os perfis U enrijecidos, enquanto que os dois tipos de perfis foram similarmente sensíveis à imperfeição global.

Os resultados das tabelas 3, 4 e 5 também mostram que, em geral, os valores de amplitude das imperfeições que promovem melhor concordância entre as forças últimas experimentais e numéricas foram: (i) 0,66t (probabilidade de excedência de 25%) para o modo local; (ii) 1,55t (probabilidade de excedência de 25%) para o modo distorcional e (iii) L/500 para o modo global, adotando-se a média, coeficiente de variação e desvio padrão, como parâmetros de referência.

4.2 Sensibilidade às imperfeições geométricas: análise acoplada

A análise acoplada de sensibilidade às imperfeições foi realizada com vistas a avaliar de forma mais realista a consideração das imperfeições geométricas. Mediante a combinação de modos de flambagem, as imperfeições, localizada e global, foram inseridas nos modelos numéricos, conforme Eq. (3) e Eq. (4). As respostas estruturais numéricas das barras foram examinadas.

a-) Para perfis U simples (i adotado igual a 500, 1000, 1500 e 5000)

$$\begin{aligned} I_{75\%} &= \frac{L}{i} \times \text{modo global} + 0,14t \times \text{modo local} \\ I_{50\%} &= \frac{L}{i} \times \text{modo global} + 0,34t \times \text{modo local} \\ I_{25\%} &= \frac{L}{i} \times \text{modo global} + 0,66t \times \text{modo local} \end{aligned} \quad (3)$$

b-) Para perfis U enrijecidos (i adotado igual a 500, 1000, 1500 e 5000)

$$\begin{aligned} I_{75\%} &= \frac{L}{i} \times \text{modo global} + 0,14t \times \text{modo local} + 0,64t \times \text{modo distorcional} \\ I_{50\%} &= \frac{L}{i} \times \text{modo global} + 0,34t \times \text{modo local} + 0,94t \times \text{modo distorcional} \\ I_{25\%} &= \frac{L}{i} \times \text{modo global} + 0,66t \times \text{modo local} + 1,55t \times \text{modo distorcional} \end{aligned} \quad (4)$$

A Figura 4 mostra resultados das análises acopladas para combinações cujas imperfeições localizadas têm 75% e 25% de probabilidade de excedência, linhas cheias e tracejadas respectivamente. Conforme Figura 4a, para imperfeições localizadas com 25% de probabilidade de excedência, o aumento da imperfeição global conduziu algumas barras com seção U simples, a atingirem patamares mais elevados de forças últimas. Por outro lado, para os perfis U enrijecido, independente do comprimento efetivo da barra e da amplitude da imperfeição localizada as forças últimas sempre decrescem com o aumento da amplitude da imperfeição global, conforme Figura 4b.

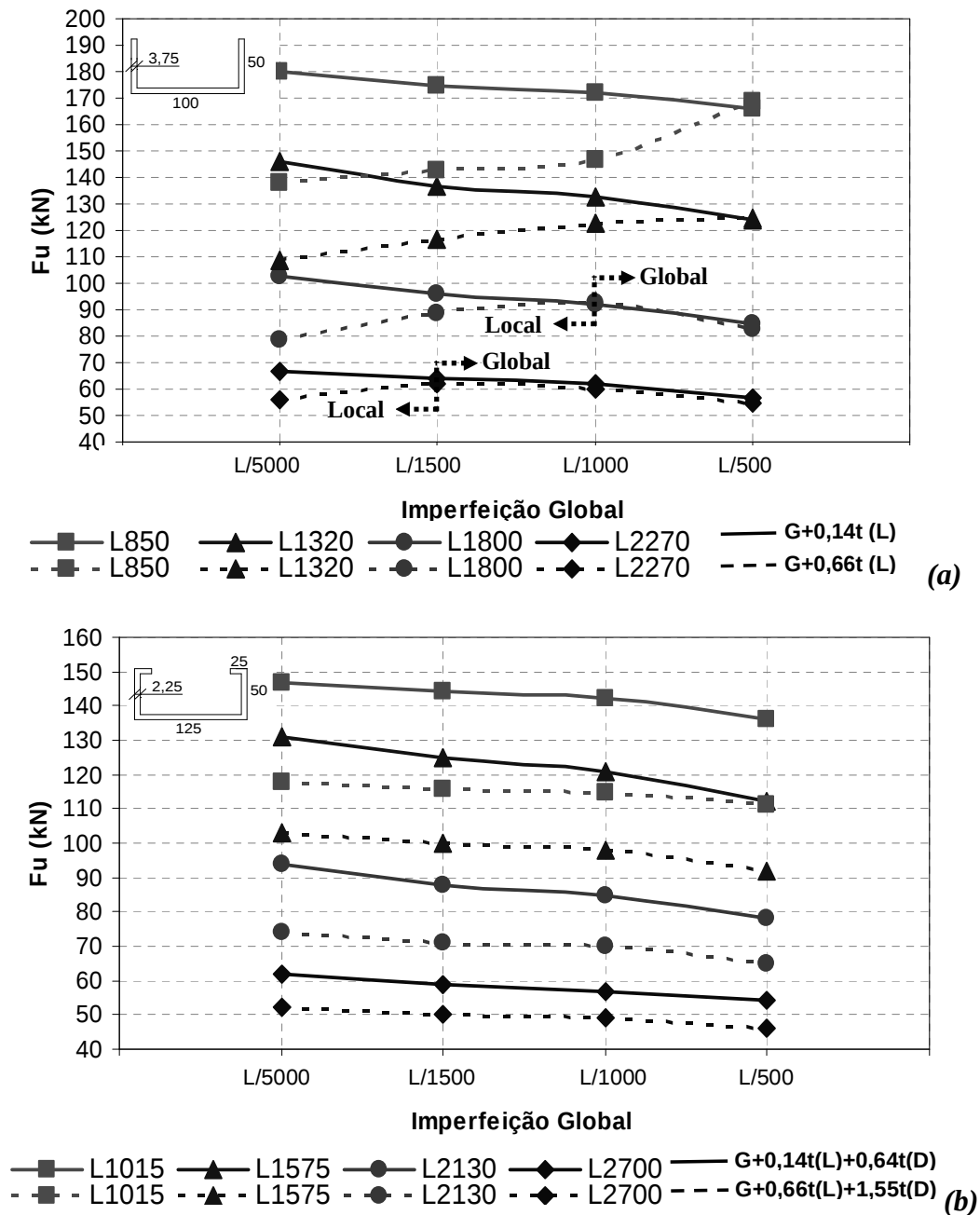


Figura 4: Sensibilidade à imperfeição conjunta: (a) U375 e (b) Ue225. Imperfeição global com sentido positivo

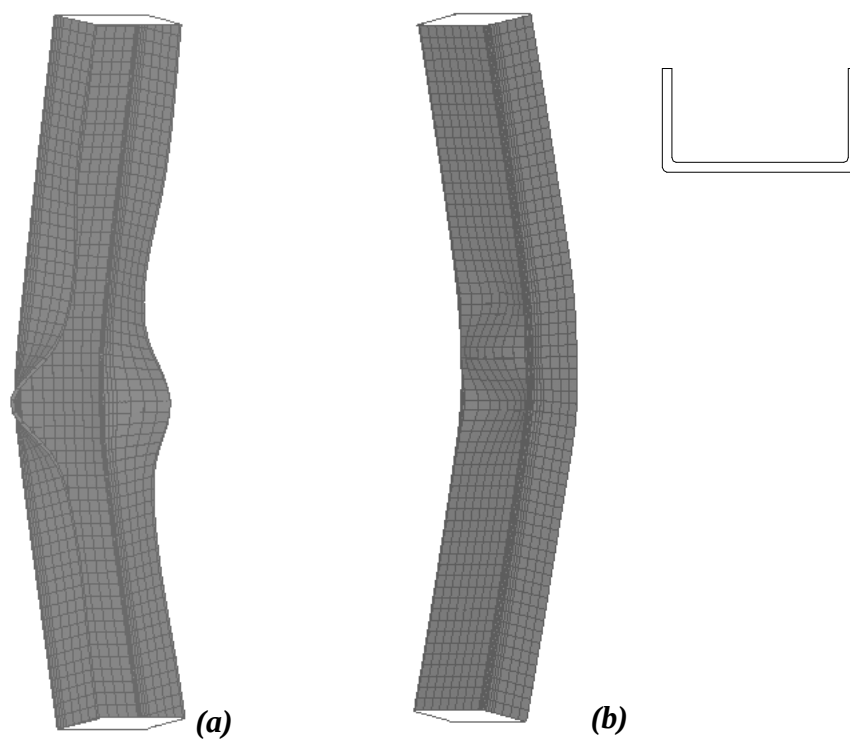
Numericamente, a diferença entre os comportamentos dos perfis U simples e enrijecido pode ser compreendida ao observar as configurações deformadas desenvolvidas para cada modo de flambagem individualmente para ambos os tipos de perfis. As respostas estruturais quanto à imperfeição apenas global foram qualitativamente semelhantes, com compressão na alma devido à curvatura desenvolvida, conforme esquematizam as figuras 5b e 6b. A imperfeição do tipo distorcional, por sua vez, apresentou pouca influência na resposta estrutural dos perfis U enrijecido investigados, conforme resultados da Tabela 4, e portanto, embora presente nas análises acopladas, foi desconsiderada na presente discussão.

Sendo assim, a divergência entre os comportamentos dos perfis U simples e U enrijecido, para os casos investigados, foi consequência das diferentes respostas estruturais dos perfis quanto à imperfeição apenas do tipo local, que podem ser melhores compreendidas mediante análise da estabilidade da alma e das mesas.

Para os perfis U simples, na análise isolada da imperfeição local, as mesas perderam estabilidade primeiro que a alma, deslocando o centróide da “seção efetiva” em direção a alma, e em decorrência disto, a curvatura desenvolvida pelo eixo das barras, promoveu tração na alma, conforme verificado nos modelos numéricos e apresentado na Figura 5a.

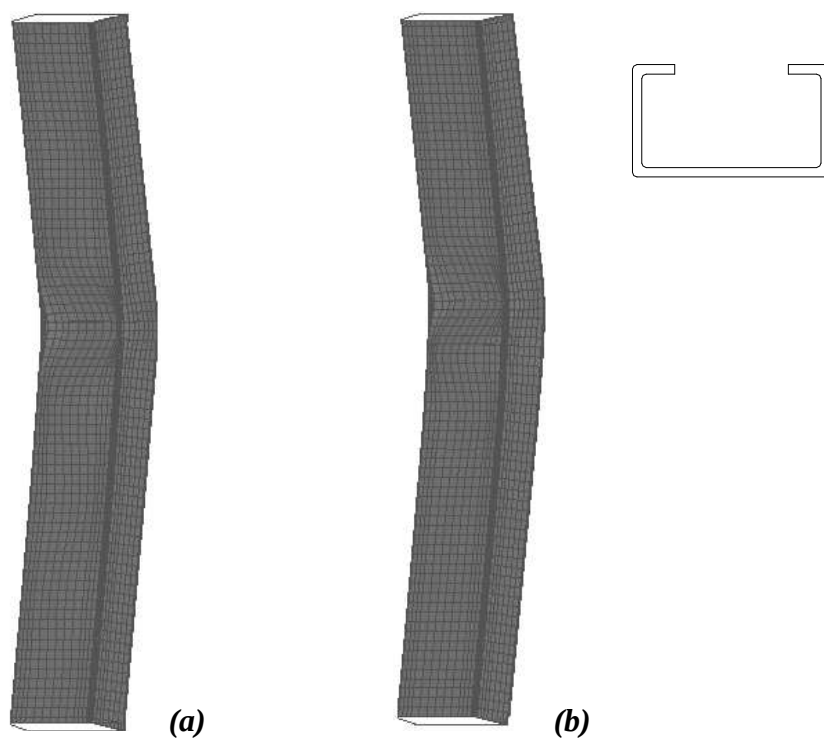
Em decorrência dos aspectos supracitados, para os perfis U simples, os modos local e global, desenvolveram curvaturas opostas como mostra a Figura 5, assim, a depender da combinação de amplitudes adotadas, um modo governa o comportamento da barra quando estes são acoplados. É o que apresenta alguns gráficos da Figura 4a, onde os trechos ascendentes indicam dominância do modo local enquanto que os descendentes, dominância do modo global.

Por outro lado, para os perfis U enrijecidos a curvatura desenvolvida pelo eixo das barras na análise isolada da imperfeição local, promoveu compressão na alma. Isso se deve à presença dos enrijecedores de borda que conferiram às mesas mais estabilidade que a alma, fazendo com que esta perdesse estabilidade primeiro que aquelas, deslocando o centróide da “seção efetiva” em direção aos enrijecedores de borda. Sendo assim, as barras desenvolveram curvaturas no mesmo sentido para os modos local e global, na análise isolada. Consequentemente um modo amplifica o efeito do outro na análise acoplada, motivo pelo qual as curvas apresentadas na Figura 4b são sempre decrescentes.



(a) Análise do modo local (b) Análise do modo global com sentido positivo

Figura 5: Análise isolada das imperfeições: configuração deformada no colapso para U simples



Análise do modo local (b) Análise do modo global com sentido positivo

Figura 6: Análise isolada das imperfeições: configuração deformada no colapso para U enrijecido

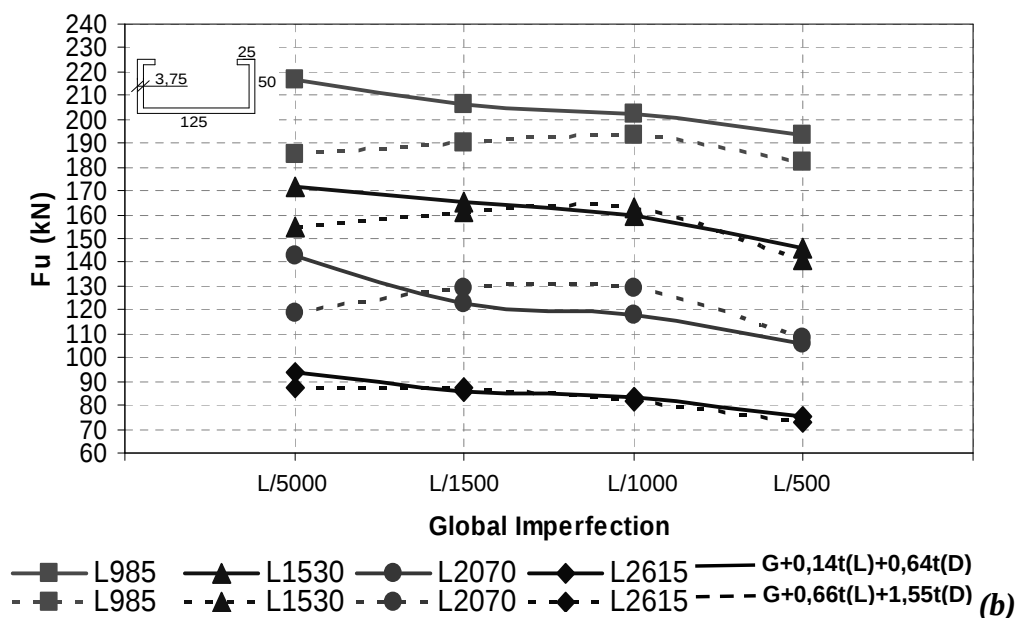
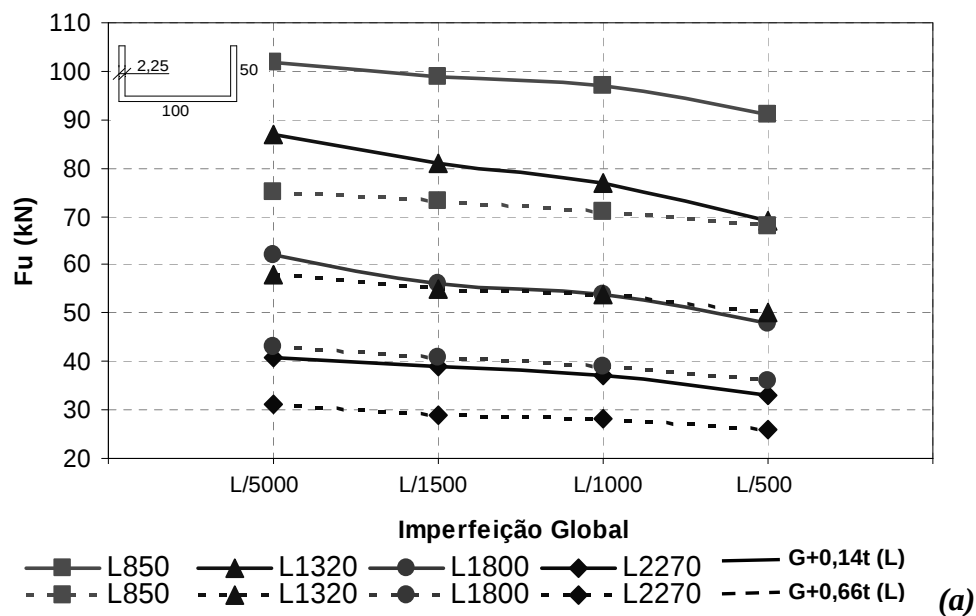
Mais importante que a diferença entre o comportamento dos perfis U simples e enrijecidos é destacar a importância de se considerar para ambos os tipos de perfis, o sentido da imperfeição global em análises numéricas, tendo em vista que a mudança desse sentido conduz tais perfis a diferentes respostas estruturais, sobretudo em análises acopladas.

4.3 Sensibilidade ao sentido das imperfeições

O sentido das imperfeições localizadas (local e distorcional) com mais de uma semi-onda, não interfere no comportamento estrutural das barras quando da análise isolada, conduzindo à mesma força última e configuração deformada, conforme observado em Almeida (2007). Nesse caso, as alterações encontradas nas respostas estruturais das barras comprimidas, em relação ao que foi obtido no item 4.2, são decorrentes da mudança do sentido da imperfeição global.

A Figura 7 mostra alguns resultados da análise acoplada utilizando o sentido negativo das imperfeições geométricas. Conforme Figura 7a, diferente do que foi encontrado no item 4.2, para os perfis U simples a força última sempre decresceu com o aumento da amplitude da imperfeição global. Com relação aos perfis U enrijecidos, a Figura 7b mostra que para imperfeições localizadas com 25% de probabilidade de excedência, a força última cresceu com a elevação da amplitude da imperfeição global até um valor limite e decresceu em seguida, enquanto que para imperfeições localizadas com 75% de probabilidade de excedência a força última foi sempre decrescente com o aumento da amplitude da imperfeição global.

Diante do exposto anteriormente, as configurações deformadas obtidas na análise isolada para as imperfeições locais, dos perfis U simples e U enrijecidos, apresentadas nas Figuras 5a e 6a, respectivamente, permanecem válidas na presente discussão. Por outro lado, nas análises realizadas nesta etapa, os sentidos das imperfeições globais são opostos àqueles apresentados nas Figuras 5b e 6b. Portanto as observações direcionadas anteriormente à Figura 7 já eram esperadas, tendo em vista que as curvaturas das imperfeições se tornariam iguais para os perfis U simples e opostas para os perfis U enrijecidos.



Imperfeição global com sentido *negativo*

Figura 7 – Sensibilidade à imperfeição conjunta: (a)U225 e (b)Ue375

Aspecto de maior relevância na presente discussão é que a combinação de modos de flambagem pode ser demasiada conservadora ao se adotar o sentido positivo das imperfeições para os perfis U enrijecido, conforme Figura 6, ou o sentido negativo das imperfeições para os perfis U simples. Para tais situações as imperfeições, local e global desenvolveram curvaturas no mesmo sentido.

A análise da importância do sentido das imperfeições para os perfis U simples e enrijecidos foi de certa forma simples. Todavia para barras com outras seções, elucidar os

resultados obtidos numa investigação semelhante, pode não ser processo tão modesto. Além disso, para outros perfis, o sentido da imperfeição pode ter uma relevância maior para o entendimento do comportamento e da resposta estrutural dos mesmos quando submetidos à compressão.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada uma análise numérica em elementos finitos sobre perfis de aço formados a frio submetidos à compressão centrada. Os modelos em elementos finitos consideraram as imperfeições geométricas e não linearidades do material e foram aferidos por resultados experimentais. Análises de sensibilidade quanto às imperfeições geométricas foram realizadas para cada tipo de perfil e comprimento efetivo e a influência das imperfeições geométricas na resposta estrutural dos perfis foi avaliada por duas estratégias numéricas, a saber, primeiramente representando as imperfeições geométricas por apenas um modo de flambagem proveniente da análise de autovalor, chamada análise isolada das imperfeições, e posteriormente pelo acoplamento de dois ou mais modos de flambagem, chamada análise acoplada das imperfeições.

Da análise isolada das imperfeições tem-se que: (i) a representação das imperfeições geométricas por um único modo de flambagem conduz a resultados satisfatórios em termos da força última. (ii) os perfis U simples investigados se mostraram mais suscetíveis à imperfeição do tipo local do que os perfis U enrijecidos e a sensibilidade à imperfeição global foi similar para os dois tipos de perfis. (iii) os perfis U simples e U enrijecidos com esbeltez global em torno de 90 e 120, foram os mais suscetíveis às imperfeições, local e global.

Da análise acoplada das imperfeições tem-se que: (i) a representação das imperfeições geométricas por meio da combinação de modos de flambagem precisa ser mais investigada. (ii) combinar modos de flambagem é uma boa estratégia para investigar a dominância de um tipo de imperfeição sobre a resposta estrutural, força última e configuração deformada no colapso, de barras comprimidas. (iii) em análises acopladas, o sentido da imperfeição global pode ser relevante para entender o comportamento estrutural de barras comprimidas e obter melhor concordância entre resultados numéricos e experimentais. (iv) o sentido da imperfeição global tem diferentes influências na configuração geométrica e força última dos perfis U simples e U enrijecidos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC/USP e a CAPES – *Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior* pelo apoio à pesquisa.

REFERÊNCIAS

Almeida, S.J.C. (2007). *Análise numérica de perfis de aço formados a frio comprimidos considerando imperfeições geométricas iniciais*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

ANSYS INC. (2004). Ansys Release 9.0 - Documentation.

British Standards Institution (1998). *Structural use of steel work in building - Code of Practice for design of cold formed thin gauge sections*. BS 5950-5, London.

Chodraui, G.M.B. (2006). *Análise teórica e experimental de perfis de aço formados a frio submetidos à compressão*. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

Kaitila, O. (2002). Imperfection Sensitivity Analysis of Lipped Channel Columns at High Temperatures. *Journal of Structural Steel Research*, 58(3), 333-351.

Lecce, M. and Rasmussen, K. J. R. (2005). *Experimental investigation of the distortional buckling of cold-formed stainless steel sections*. Research Report R844, Department of Civil Engineering, University of Sydney, Australia.

Mulligan, G. P. and Peköz T. (1984). Locally buckled thin-walled columns. *Journal of Structural Engineering*, Am Soc Civil Eng, 110(11), 2635-2654, November.

Schafer, B. W. and Peköz, T. (1998). Computational modeling of cold-formed steel: characterizing geometric imperfections and residual stresses. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 47, p. 193-210, January.

Yang, D. and Hancock, G.J. (2004). *Numerical simulation of high strength steel lipped-channel Columns*. Research Report R843, Department of Civil Engineering, University of Sydney, Australia.

Walker, A. C. (1975), apud Yang and Hancock (2004). *Design and analysis of cold-formed sections*. International Textbook Company Limited.

NUMERICAL MODELS OF COMPRESSED COLD FORMED STEEL MEMBERS: FOCUS ON GEOMETRIC IMPERFECTIONS

Abstract

A finite element analysis of cold-formed plain and lipped channel columns compressed between pinned ends is presented in this paper. A sensitivity analysis considering geometric imperfections was performed. The numerical analyses were carried out to investigate the effects of local, global and distortional imperfections on the columns ultimate load. Two ways to drive the modelling of imperfection were appreciated. Firstly, each type of the imperfection investigated was evaluated on the isolated way and, after that, in the sense of associated way. It was shown that the numerical models whose geometric imperfections were represented by single buckling mode, kept good agreement with tests results in terms of ultimate load. Regarding the use of coupled buckling modes to represent numerically the geometric imperfection, it was shown the importance of investigating the influence of the signal of the global imperfection on the structural response of compressed bars.

Key words: Steel structures. Cold formes steel members. Numerical analysis. Geometric imperfections.

1 DEVELOPMENT

A non-linear analysis is performed using the computer code ANSYS based on the finite element method. The applicative was used to simulate ultimate loads, axial shortening and buckling modes. The numerical models were developed in agreement with the experimental program presented in Chodraui (2006) (material properties and boundary conditions), where were investigated the cold-formed plain and lipped channels compressed between pinned ends. A four-node three-dimensional quadrilateral shell element with six degrees of freedom at each node finite element, SHELL181, was used. The boundary conditions for the column models are close to the simple support condition in relation to the minor axis and the uniform compression was imposed by increments of displacement. The geometric imperfections were included in the numerical models using a eigenvalue bukling analysis. Local, global and distortional buckling modes were adopted to represent the geometric imperfections, according to the susceptibility to such modes for each section type. The local and distortional imperfection amplitudes investigated are those suggested in Schafer and Peköz (1998), while the global ones were $L/500$, $L/1000$, $L/1500$ and $L/5000$. Two ways of considering the geometric imperfections were investigated. Firstly, the imperfections were represented by a single buckling mode and each type of the imperfection was evaluated isolatedly. After that, they were represented by coupling the buckling modes.

2 DISCUSSION AND CONCLUSIONS

The influence of the local, global and distortional imperfections on the structural response of the compressed members was investigated through the imperfections individual analysis. Plain channels suggested more susceptibility to local imperfection than lipped channels. On the other hand, global imperfection sensitivity was similar for both sections. Lipped channels with l_{ey}/r_y ratio approximately 60 performed more susceptible to distortional imperfection. According to the results, to represent the imperfections by a single mode, amplitudes equal to 0.66t (25% of exceedance probability) for local imperfection, 1.55t (25% of exceedance probability) for distortional imperfection (lipped channels) and L/500 for global imperfection, kept better agreement between experimental to numerical ultimate loads in terms of mean values, standard deviation and coefficient of variation.

In order to evaluate one more realistic way of considering the geometric imperfections, the coupled analysis of sensitivity to imperfections was performed. Through the combination of buckling modes, the imperfections, localized and global, were inserted in numerical models. The agreement between tests to numerical results was examined. The representation of geometric imperfections through a combination of buckling modes needs to be further investigated. Nevertheless, the combination of buckling modes is a good strategy to investigate the dominance of one type of imperfection over the structural response of compressed bars. The strategy showed itself dependent of the imperfections signs combination. For example, in the coupled analysis the sign of the global imperfection had different influence on the developed geometric configuration and strength of the simple channel and lipped channel, and was relevant to understanding the structural stability of compressed bars and get better agreement between numerical and experimental results. The analysis of the importance of the imperfections sign for simple and lipped channels was somewhat simple. However, for bars with other sections, elucidate the results obtained in a similar investigation may not be so simple. In addition, for other sections, the imperfection sign can have a greater relevance for understanding their behaviors and structural responses when subjected to compression.