Revista da Estrutura de Aço - REA

Recebido: 15/08/2023 Aprovado: 04/12/2023

Volume 12. Número 3 (dezembro/2023). p.191-210 - ISSN 2238-9377

Revista indexada no Latindex e Diadorim/IBICT



Análise numérica paramétrica de perfis de aço formados a frio em seção duplo U afastados com travejamento em quadro sob compressão

Leonardo Henrique de Lima Silva¹ e Wanderson Fernando Maia^{2*}

¹Engenheiro Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos – SP, e-mail: leohlima96@gmail.com

² Professor, Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora – MG, e-mail: wanderson.maia@ufjf.br

Parametric numerical analysis of cold-formed steel members in double channel battened columns under compression

Resumo

O trabalho analisa o comportamento de barras em seção duplo "U" afastadas com travejamento em quadro, compostas por perfis de aço formadas a frio sob compressão. Foi realizada análise numérica não-linear, via Método dos Elementos Finitos, utilizando duas seções, variando o comprimento das barras e o número de chapas separadoras, adotando nos modelos imperfeições geométricas iniciais referentes aos modos de flambagem local e global de flexão e imperfeição de material. O modo de instabilidade global foi crítico para barras mais longas e com menor número de chapas separadoras, e o modo local foi crítico para barras com comprimento menor e com mais chapas separadoras. Os resultados obtidos foram comparados com resultados experimentais e numéricos obtidos por outros autores e com valores de procedimentos normativos, que se mostraram contra a segurança em alguns casos.

Palavras-chave: Perfis de aço formados a frio. Seção duplo "U". Análise numérica não-linear.

Abstract

This paper analyzes the behavior of double U channel section battened columns composed of cold-formed steel under axial compression. Nonlinear Finite Element Method analysis was performed using two sections, varying the length and the number of connections, introducing in the models initial geometric imperfections referring to the local and global-flexural buckling modes and imperfection of material. The global instability mode was critical for longer columns with a smaller number of connections, and the local instability mode was critical for columns with shorter length and with more connections. The results of the analysis were compared with experimental and numerical results obtained by other authors and with the values resulting from normative procedures, which proved to be against safety in some cases.

Keywords: Cold-formed steel members. Double channel section. Nonlinear numerical analysis.

* autor correspondente

1 Introdução

Diante dos desafios impostos à Engenharia de Estruturas, em um mercado com princípios progressivamente exigentes, os perfis de aço formados a frio se destacam como alternativa às estruturas tradicionais. Com elevada resistência mecânica, fabricação simples e barata, consumo reduzido de material, elevada qualidade e precisão construtiva, esses perfis têm potencial para promover redução no custo final da obra. Ressalta-se a crescente aplicação em barras de contraventamento, estruturas treliçadas, elementos auxiliares em ligações e no Sistema Steel Frame. Entretanto, a reduzida espessura das chapas que compõem os perfis resulta em modos de instabilidade distintos dos apresentados por perfis laminados e soldados, necessitando de dimensionamento específico, com verificações adicionais de estabilidade.

A composição de uma barra composta consiste na ligação de dois ou mais perfis de forma contínua ou intermitente, sendo, geralmente, a força normal resistente mais crítica no segundo caso. Essa redução na força normal resistente das barras está ligada ao efeito elevado nos deslocamentos produzidos pela força cortante resultante da compressão dos elementos e precisa ser considerada. As barras compostas, como a seção duplo "U" afastadas com travejamento em quadro (Figura 1), buscam aumentar a força normal resistente dos elementos e necessitam de verificação de dois modos críticos de instabilidade: o (i) modo global de flexão e o (ii) modo local.



Figura 1 – Seção duplo "U" com travejamento em quadro (Rocha e Maia (2019))

A norma brasileira de dimensionamento de perfis de aço formados a frio (ABNT NBR 14762:2010) não possui procedimento para o dimensionamento de barras compostas de aço formadas a frio especificamente, somente exigindo que no caso de presilhas a esbeltez dos perfis componentes não pode superar a metade do índice de esbeltez

máximo do conjunto; já para o caso de travejamento em treliça a limitação para os perfis componentes é o índice de esbeltez máximo do conjunto, inferior a 140. Porém, a utilização de chapas regularmente espaçadas, que configura o travejamento em quadro, não é abordado pela norma.

Para a consideração da flambagem por flexão de barras compostas, a norma norte americana (ANSI/AISI S100:2020) apresenta equação para cálculo de um índice de esbeltez modificado para seções em contato. O procedimento consiste em substituir a esbeltez original da barra por uma esbeltez efetiva que considera as condições de vinculação e a distância entre conexões ao longo do comprimento (Equação 1).

$$\left(\frac{KL}{r}\right)_{m} = \sqrt{\left(\frac{KL}{r}\right)_{0}^{2} + \left(\frac{a}{r_{i}}\right)^{2}}$$
(1)

Onde:

 $\left(\frac{KL}{r}\right)_0$ é o índice de esbeltez da barra composta.

a é a distância entre conexões.

*r*_i é o raio de giração mínimo de cada barra individual.

A ANSI/AISI S100:2020 estabelece ainda que a força normal resistente e o espaçamento entre conexões devem contemplar as seguintes recomendações: (i) limitação da distância entre conexões de forma que a relação "a/r_i" não supere metade do índice de esbeltez máximo da barra composta; (ii) conexão por solda nas extremidades de todos os elementos com um comprimento mínimo igual à largura máxima da seção ou por parafusos espaçados longitudinalmente a uma distância máxima de quatro diâmetros, distribuídos por um comprimento igual a 1,5 vezes a largura máxima da seção e (iii) resistência das conexões a uma força de 2,5% da força normal resistente de compressão da barra composta, em qualquer direção.

Com o intuito de analisar barras compostas em duplo U afastadas, Dabaon, Ellobody e Ramzy (2015) realizaram análises experimental e numérica, variando a distância entre chapas separadoras, distância entre perfis, comprimento das barras e tipo de aço. Os resultados obtidos mostraram que os procedimentos normativos adotados foram contrários à segurança nos casos que predominou instabilidade local. O mesmo

comportamento foi observado por Rocha e Maia (2019) que realizaram análise numérica baseada nos resultados experimentais de Dabaon, Ellobody e Ramzy (2015).

Buscando complementar a análise de Rocha e Maia (2019), este trabalho utilizou inicialmente a mesma seção, as mesmas configurações e condições de vinculação nos modelos, distinguindo-se principalmente pelas dimensões das chapas separadoras, reduzidas pela metade (largura e espessura). Com isso, buscou-se analisar a influência das dimensões das chapas separadoras na força normal resistente, bem como o número de chapas e comprimento dos perfis (esbeltez global), introduzindo imperfeições geométricas iniciais e de material. Além disso, extrapolou os estudos de Rocha e Maia (2019) e Dabaon, Ellobody e Ramzy (2015) variando a espessura da seção (esbeltez local). Os resultados obtidos na análise numérica foram comparados com resultados de Rocha e Maia (2019) e da ANSI/AISI S100:2020, buscando verificar se os resultados obtidos condizem com as recomendações normativas.

2 Análises experimental e numérica de referência

Em um estudo com barras compostas em seção duplo "U" com travejamento em quadro, Dabaon, Ellobody e Ramzy (2015) apresentaram resultados experimentais de cinco configurações. A rotação em relação ao eixo y nas extremidades das barras foi permitida e restringidas em relação ao eixo x e à torção. A configuração das barras ensaiadas pode ser observada na Figura 2. Os valores médios de resistência ao escoamento (f_v), resistência à ruptura (f_u) e módulo de elasticidade (E) de 310 MPa, 436 MPa e 210 GPa, respectivamente, foram obtidos experimentalmente. As barras ensaiadas (seção 2U 100x30x2,00) tem as seguintes dimensões: 2210 mm de comprimento, seção com 2 mm de espessura, 4 mm de raio interno de dobra, 30 mm de largura da mesa e 100 mm de altura da alma. Além disso, as chapas separadoras e de topo são de 6 e 20 mm de espessura, respectivamente. A distância entre os perfis "U" variou em 25, 50 e 75 mm e o espaçamento entre chapas separadoras em 150, 300 e 400 mm. Os resultados obtidos e a comparação com procedimentos normativos estão apresentados na Tabela 1, onde os números da nomenclatura utilizada referemse à distância entre perfis, comprimento das barras e espaçamento entre chapas separadoras, respectivamente.



Figura 2 – Configuração das barras ensaiadas (Adaptado de Dabaon, Ellobody e Ramzy (2015))

Tabela 1 – Comparação dos resultados experimentais de Dabaon, Ellobody e Ramzy (2015)
com os obtidos com base nos procedimentos normativos

	Análise E	Experimental		Previsões teóricas					
Barra	N _{EXP} (kN)	Modo de Falha	N _{NAS e AS/NZS} (kN)	N _{EC3} (kN)	N _{NAS} /N _{EXP}	N _{EC3} /N _{EXP}			
B25-2210-300	109,9	F	88,6	80,4	0,81	0,73			
B50-2210-300	119,1	F + L	128,9	122,9	1,08	1,03			
B75-2210-300	125,3	L	147,4	144,1	1,18	1,15			
B50-2210-150	133,1	F	129,4	115,8	0,97	0,87			
B50-2210-400	112,3	L	121,9	122,7	1,09	1,09			

N_{EXP} é a força normal resistente obtida nos ensaios experimentais de Dabaon, Ellobody e Ramzy (2015).

N_{NAS e AS/NZS} é a força normal resistente calculada de acordo com a norma norte americana (NAS: 2007) e australiana e neozelandesa (AS/NZS: 1996).

N_{EC3} é a força normal resistente calculada de acordo a norma europeia (Eurocode 3: 2006).

L é instabilidade local. F é instabilidade de flexão. F + L é a combinação das instabilidades por flexão e local.

Adaptado de Dabaon, Ellobody e Ramzy (2015)

Os mesmos autores realizaram análise numérica extrapolando o estudo para outras configurações após a sua validação. Com base nos resultados, concluíram que as normas norte-americana (NAS: 2007), australiana e neozelandesa (AS/NZS: 1996) e europeia (Eurocode 3: 2006) resultaram em valores contra a segurança nos casos em que predominou a instabilidade local (Figura 3), entretanto, se mostraram conservadoras nos casos onde a instabilidade por flexão preponderou (Figura 4).



(a) Experimental
(b) Numérico
(c) Detalhes
Figura 3 – Configuração das barras ensaiadas (Instabilidade local)
(Adaptado de Dabaon, Ellobody e Ramzy (2015))



Figura 4 – Configuração das barras ensaiadas (Instabilidade por flexão) (Adaptado de Dabaon, Ellobody e Ramzy (2015))

Rocha e Maia (2019) utilizaram o programa ANSYS para validar um modelo numérico com base nos resultados experimentais de Dabaon, Ellobody e Ramzy (2015). Os resultados obtidos na análise numérica são apresentados e comparados na Tabela 2.

Barra -	Análise e	experimental	Anális	NI /NI	
	N _{EXP} (kN)	Modo de falha	N _{EF} (kN)	Modo de falha	IN _{EF} / IN _{EXP}
B25-2210-300	109,9	F	105,7	F	0,96
B50-2210-300	119,1	F + L	118,4	F	0,99
B75-2210-300	125,3	L	126,5	F + L	1,01
B50-2210-150	133,1	F	128,5	F + L	0,97
B50-2210-400	112,3	L	114,1	F	1,02

Tabela 2 – Comparação entre os resultados de Rocha e Maia (2019) e Dabaon, Ellobody e Ramzy (2015)

N_{EXP} é a força normal resistente obtida nos ensaios experimentais de Dabaon, Ellobody e Ramzy (2015). N_{FF} é a força normal resistente obtida na análise numérica de Rocha e Maia (2019).

L é instabilidade local. F é instabilidade por flexão. F + L é a combinação das instabilidades por flexão e local.

Rocha e Maia (2019)

Além disso, Rocha e Maia (2019) extrapolaram o estudo de Dabaon, Ellobody e Ramzy (2015) mantendo a seção e dimensões de chapas separadoras, mas variando o comprimento das barras, as distâncias entre perfis e chapas separadoras. Analisaram ainda a influência de imperfeições geométricas iniciais, considerando quatro casos: sem imperfeições; imperfeição associada ao modo local igual a 0,14 da espessura do perfil; imperfeição global de flexão de 1/1500 do comprimento das barras e inserção das duas imperfeições. Nestes casos, observou-se que a imperfeição local exerceu maior influência em perfis menos esbeltos globalmente, ao passo que nos mais esbeltos preponderou a imperfeição global por flexão. Concluíram que a identificação e consideração das imperfeições geométricas iniciais são necessárias, por sua grande influência na força normal resistente. De acordo com Rocha e Maia (2019), os resultados obtidos com base na ABNT NBR 14762:2010, utilizando a esbeltez modificada da ANSI/AISI S100:2020, se mostraram contra a segurança na maioria dos casos estudados. Observou-se que o modo de falha por instabilidade local predominou com o aumento da distância entre os perfis e que a força normal resistente das barras diminuiu com o aumento da distância entre chapas separadoras.

3 Análise numérica

Para a análise numérica realizada no trabalho foi utilizado o programa ANSYS, que é desenvolvido com base no Método dos Elementos Finitos. O elemento utilizado para

modelar os perfis "U", chapas separadoras e as chapas de extremidades foi o SHELL 181, que é ideal para análise não-linear de cascas com pequena espessura sujeitas a grandes deformações e rotações, de acordo com o manual do programa.

A análise numérica foi realizada utilizando as seções 2U 100x30x2,00 e 2U 100x30x3,00, em que os parâmetros variados foram o comprimento dos perfis (esbeltez global) e o número de chapas separadoras. Para a construção dos modelos, a linha média das seções foi utilizada como referência na inserção das dimensões geométricas e seus cantos foram arredondados. Foi adotada uma malha quadrada com elementos com 1cm de lado aproximadamente, excetuando-se os cantos divididos em dois elementos. As chapas de extremidades foram modeladas de forma que o Centro de Gravidade (CG) da seção transversal da barra composta coincidisse com uma linha de nós da malha da chapa e com o eixo que mobiliza as conexões (eixo y) (Figura 5), possibilitando a aplicação de compressão centrada, simulando rótulas e permitindo rotação em relação ao eixo y (Roty) nas duas extremidades, no entanto, restringindo as demais rotações (Rotx e Rotz). Com relação aos deslocamentos, em uma das extremidades os mesmos foram impedidos nas três direções (Ux, Uy e Uz), enquanto na outra foram impedidos nas direções "x" e "y" e acoplado na direção longitudinal "z" para aplicação do deslocamento/força. Para a ligação das chapas separadoras, estas foram construídas de forma que sua malha coincidisse com a malha dos perfis, sendo realizado o acoplamento de deslocamentos dos nós nas três direções. A Figura 5 representa um modelo utilizado no estudo.



Figura 5 – Ilustração de um dos modelos construídos

O modelo trilinear (Figura 6) adotado para as análises numéricas deste trabalho foi utilizado em simulações por Maia (2008), apresentando resultados muito satisfatórios para os casos em que o modelo reológico do material não era conhecido. Além da não linearidade do material, a não linearidade geométrica também foi considerada. O método iterativo e incremental "Newton-Raphson Completo" foi utilizado para a resolução do sistema não-linear, onde a matriz de rigidez tangente é atualizada por interação. Utilizando a ferramenta "Automatic Load Stepping" do ANSYS, foram aplicados deslocamentos nos modelos. A ferramenta atualiza automaticamente o incremento aplicado, respeitando limites superior e inferior definidos. A convergência em termos de deslocamentos foi o critério de parada utilizado, onde verifica se a precisão da solução obtida é suficiente. Um erro de 0,1%, que é recomendado pelo manual do ANSYS, foi adotado no trabalho.



Figura 6 – Curva tensão x deformação: modelo aproximado trilinear (Maia (2008))

As imperfeições geométricas iniciais foram adotadas a partir de uma análise de estabilidade elástica utilizando o programa ANSYS, que resulta em um autovalor (força crítica) e um autovetor (deformada da barra). Assim, identificou-se separadamente os modos críticos de flambagem local e global de flexão para cada barra (Figura 7). Com as configurações deformadas para cada modo crítico, adotou-se um critério para o aumento ou redução da amplitude, gerando uma reorganização de todos os nós da malha dos elementos finitos da barra, adotando-se sempre a combinação mais desfavorável na sobreposição de imperfeições. Para imperfeições associadas ao modo local, o valor utilizado foi de 0,14t (t = espessura do perfil), como apresentado por Schafer e Peköz (1998) e para o modo global de flexão o valor de L_{barra}/1500. Esse mesmo procedimento foi utilizado por Chodraui (2006), Maia et al (2016) e Macedo e Maia (2020). Além disso, Rocha e Maia (2019) aplicou e concluiu que as imperfeições

geométricas iniciais têm influência elevada na resistência das barras em duplo U, evidenciando a necessidade da identificação e consideração.



Figura 7 – Configuração das imperfeições adotadas para os modelos

4 Resultados e discussão

Com o objetivo de complementar o estudo realizado por Rocha e Maia (2019), inicialmente as barras analisadas foram as mesmas utilizadas na análise dos autores (2U 100x30x2,00), porém com algumas mudanças na configuração. A distância entre perfis foi fixada em 50 mm. O comprimento das barras variou de acordo com o estudo anterior (600, 1000, 1400, 2200, 3000, 4200 e 5000 mm). O número de chapas separadoras variou de acordo com o comprimento das barras (de 1 a 13), sem uma distância fixada e procurando manter a simetria ao longo do comprimento. Além disso, com o objetivo de analisar a influência das dimensões das chapas separadoras na força normal resistente das barras, a largura e espessura foram reduzidas pela metade em relação ao trabalho de Rocha e Maia (2019) e as chapas separadoras de extremidade desconsideradas. As chapas separadoras foram adotadas com largura de 50 mm e espessura de 3,0 mm. O critério de parada na inserção de chapas separadoras para cada comprimento foi a tendência de estabilização da força normal resistente.

Na Tabela 3 são apresentados os resultados obtidos na análise numérica e a comparação com os resultados do estudo de Rocha e Maia (2019). Para a comparação foram considerados o mesmo comprimento das barras e o mesmo número de chapas separadoras dos dois estudos. Vale ressaltar que a posição e distância entre chapas separadoras nas duas análises são ligeiramente diferentes devido às modificações na configuração dos modelos aplicadas neste trabalho.

	-		
N _{CH}	N _{EF} ¹ (kN)	N _{EF} ² (kN)	N_{EF}^{1}/N_{EF}^{2}
2	130,7	130,8	1,00
3	128,8	131,1	0,98
4	123,0	122,3	1,00
6	114,4	115,5	0,99
8	100,0	96,5	1,04
11	68,2	64,0	1,07
13	51,8	48,4	1,07
	N _{CH} 2 3 4 6 8 11 13	N _{CH} N _{EF} ¹ (kN) 2 130,7 3 128,8 4 123,0 6 114,4 8 100,0 11 68,2 13 51,8	N_{CH} N_{EF}^{1} (kN) N_{EF}^{2} (kN)2130,7130,83128,8131,14123,0122,36114,4115,58100,096,51168,264,01351,848,4

Tabela 3 – Comparação entre os resultados da análise numérica do presente trabalho e os obtidos por Rocha e Maia (2019) – Seção 2U 100x30x2,0

L é o comprimento da barra composta.

N_{CH} é o número de chapas separadoras.

N_{EF}¹ é a força normal resistente obtida na análise numérica de Rocha e Maia (2019).

N_{EF}² é a força normal resistente obtida na análise numérica do presente trabalho.

Observa-se, na Tabela 3, que a redução das dimensões das chapas separadoras e supressão das chapas separadoras de extremidade praticamente não influenciou a força normal resistente das barras de menor comprimento (600 a 2200 mm), enquanto nas barras de maior comprimento (3000 a 5000 mm) a redução foi de 4,0 a 7,0%.

Na Tabela 4 são apresentados os resultados obtidos na análise numérica da seção 2U 100x30x2,00 comparados com os calculados de acordo com a ABNT NBR 14762:2010 considerando barra composta, adotando o índice de esbeltez modificado apresentado pela ANSI/AISI S100:2020 (N_{NBR}), e considerando barras isoladas (N_{NBR2}). Os resultados obtidos para a seção 2U 100x30x3,00 são apresentados na Tabela 5, bem como os resultados normativos e a comparação entre eles. A Figura 8 apresenta a comparação dos resultados da análise numérica com os calculados pela ABNT NBR 14762:2010 considerando barra composta, adotando o índice de esbeltez modificado apresentado pela ANSI/AISI S100:2020 (N_{NBR}). Já a Figura 9 apresenta o ganho na força normal resistente com a inserção das chapas separadoras para as duas seções analisadas.

Tabela 4 – Comparação entre os resultados da análise numérica e os obtidos pela ABNT NBR 14762:2010 (Seção 2U 100x30x2,0)

L (mm) (λ _y)	N _{CH}	a (mm)	a/r _i	N _{EF} (kN)	Modo de falha	Ganho (%)	N _{NBR} (kN)	N _{ef} /N _{nbr}	N _{NBR2} (kN)	N _{ef} /N _{NBR2}
	0	600	69,0	127,9	F+L	-	129,1	0,99		0,98
	1 3	300	35,0	125,3	L + F	-2,03	151,0	0,83		0,96
600	2	200	23,0	130,8	L + F	2,27	155,4	0,84	121.0	1,00
(λ _y =18,3)	3	150	18,0	135,1	L + F	5,63	156,9	0,86	131,0	1,03
	4	120	14,0	142,6	L + F	11,49	157,6	0,90		1,09
	5	100	12,0	151,2	L + F	18,22	158,0	0,96		1,15

Continua...

...continuação da Tabela 4

L (mm) (λ _y)	N _{CH}	a (mm)	a/r _i	N _{EF} (kN)	Modo de falha	Ganho (%)	N _{NBR} (kN)	N _{EF} /N _{NBR}	N _{NBR2} (kN)	N _{ef} /N _{nbr2}
	0	1000	115,0	123,1	F + L	-	78,8	1,56		1,48
	1	500	58,0	121,3	F+L	-1,46	134,1	0,90		1,46
	2	333	39,0	129,0	F+L	4,79	145,6	0,89		1,55
1000	3	250	29,0	131,1	F+L	6,50	149,5	0,88		1,58
() -30.6)	4	200	23,0	132,7	F+L	7,80	151,4	0,88	83,1	1,60
(Ny=30,0)	5	167	20,0	135,1	F+L	9,75	152,5	0,89		1,63
	6	143	17,0	137,6	F+L	11,78	153,1	0,90		1,66
	7	125	15,0	139,0	F+L	12,92	153,5	0,91		1,67
	8	111	13,0	146,7	F+L	19,17	153,8	0,95		1,77
	0	1400	161,0	104,0	F+L	-	40,4	2,57		2,41
	1	700	81,0	100,8	F+L	-3,08	110,5	0,91		2,33
	2	467	54,0	117,1	F+L	12,60	131,3	0,89		2,71
1400	3	350	41,0	121,9	F+L	17,21	138,9	0,88		2,82
$(\lambda - 42.8)$	4	280	33,0	122,3	F+L	17,60	142,4	0,86	43,2	2,83
(Ny-42,0)	5	233	27,0	125,8	F+L	20,96	144,4	0,87		2,91
	6	200	23,0	124,8	F+L	20,00	145,6	0,86		2,89
	7	175	21,0	126,5	F + L	21,63	146,4	0,86		2,93
	8	156	18,0	128,8	F + L	23,85	146,9	0,88		2,98
	0	2200	253,0	53,2	F	-	16,4	3,24		3,02
	1	1100	127,0	56,5	F	6,20	54,6	1,03		3,21
	2	733	85,0	85,0	F+L	59,77	92,3	0,92		4,83
2200	3	550	, 64,0	101,8	F+L	, 91,35	109,3	0,93		5,78
(2200)	4	440	51,0	109,6	F+L	106,02	117,7	0,93	17,6	6,23
(X _y =67,3)	5	367	43,0	113,3	F+L	112,97	122,2	0,93		6,44
	6	314	, 37,0	, 115,5	F+L	, 117,11	, 124,9	0,92		6,56
	7	275	32,0	115,9	F+L	117,86	126,6	0,92		6,59
	8	244	, 29,0	117,8	F+L	121,43	, 127,8	0,92		6,69
	0	3000	345,0	26,8	F	-	8,8	3,05		2,82
	1	1500	173,0	32,8	F	22,39	29,4	1,12		3,45
	2	1000	115,0	, 53,3	F	98,88	, 51,8	1,03		5,61
	3	750	87,0	69,1	F+L	157,84	70,6	0,98		7,27
3000	4	600	, 69,0	, 79,5	F+L	196,64	, 83,7	0,95	9,5	8,37
(λ _y =91,7)	5	500	, 58,0	86,5	F+L	222,76	91,6	0,94	,	9,11
	6	429	50,0	,90,9	F+L	239,18	96,7	0,94		9,57
	7	375	44,0	94,4	F+L	252,24	99,6	0,95		9,94
	8	333	39,0	96,5	F+L	260,07	101,7	0,95		10,16
	0	4200	483,0	12,7	F	-	4,5	2,82		2,65
	1	2100	242,0	17,2	F	35,43	15,0	1,15		3,58
	2	1400	161,0	29,2	F	129,92	26,4	1,11		6,08
	3	1050	, 121,0	38,8	F	205,51	36,0	1,08		8,08
	4	840	97.0	45.9	F	261.42	43.3	1.06		9.56
4200	5	700	81.0	51.0	F+L	301.57	48.7	1,05		10.63
(λ _v =128.4)	6	600	69.0	54.8	F + L	331.50	52.6	1,04	4,8	11.42
., -, -,	7	525	61.0	57.7	F + L	354.33	55.5	1,04		, _ 12.02
	8	467	54.0	59.8	F + L	370.87	57.7	1.04		12.46
	9	420	49.0	61.6	F+L	385.04	59.4	1.04		12.83
	10	382	44.0	62.9	F+L	395.28	60.7	1.04		13.10
	11	350	41,0	64,0	F+L	403,94	, 61,7	1,04		13,33

Continua...

...continuação da Tabela 4

L (mm) (λ _y)	Nсн	a (mm)	a/r _i	N _{EF} (kN)	Modo de falha	Ganho (%)	N _{NBR} (kN)	N _{ef} /N _{nbr}	N _{NBR2} (kN)	N _{ef} /N _{Nbr2}
	0	5000	575,0	8,6	F	-	3,2	2,69		2,69
	1	2500	288,0	12,1	F	40,70	10,6	1,14		3,78
	2	1667	192,0	20,8	F	141,86	18,6	1,12		6,50
	3	1250	144,0	28,0	F	225,58	25,4	1,10		8,75
	4	1000	115,0	33,3	F	287,21	30,6	1,09		10,41
	5	833	96,0	37,1	F+L	331,40	34,4	1,08		11,59
5000	6	714	83,0	39,9	F+L	363,95	37,1	1,08	2 7	12,47
(λ _y =152,9)	7	625	72,0	42,1	F+L	389,53	39,2	1,07	5,2	13,16
	8	556	64,0	43,8	F+L	409,30	40,7	1,08		13,69
	9	500	58,0	45,1	F+L	424,42	41,9	1,08		14,09
	10	455	53 <i>,</i> 0	46,1	F+L	436,05	42,8	1,08		14,41
	11	417	48,0	47,0	F+L	446,51	43,5	1,08		14,69
	12	385	45,0	47,5	F + L	452,33	44,1	1,08		14,84
	13	357	42,0	48,4	F+L	462,79	44,6	1,09		15,13

L é o comprimento da barra composta.

 λ_y é a esbeltez da barra em relação ao eixo que mobiliza as conexões (Figura 2) .

N_{CH} é o número de chapas separadoras.

a é o comprimento destravado da barra ou distância entre as chapas separadoras.

 r_{i} é o raio de giração mínimo da barra individual.

 N_{EF} é a força normal resistente obtida na análise numérica.

L é instabilidade local e F é instabilidade por flexão.

"Ganho" é a porcentagem de aumento da força normal resistente em relação à barra sem chapas.

 N_{NBR} é a força normal resistente obtida com base na ABNT NBR 14762:2010 considerando barra composta, adotando o índice de esbeltez modificado da ANSI/AISI S100:2020.

N_{NBR2} é a força normal resistente obtida com base na ABNT NBR 14762:2010 considerando barras isoladas.

Tabela 5 – Comparação entre os resultados da análise numérica e os obtidos pela ABNT NBR
14762:2010 (Seção 2U 100x30x3,0)

L(mm) (λ _γ)	N _{сн}	a (mm)	a/r _i	N _{EF} (kN)	Modo de falha	Ganho (%)	N _{NBR} (kN)	N _{ef} /N _{nbr}	N _{NBR2} (kN)	N _{ef} /N _{NBR2}
	0	600	69,0	215,4	F+L	-	203,1	1,06		1,05
	1	300	35,0	217,5	L + F	1,0	256,1	0,85		1,06
600	2	200	23,0	241,9	L + F	12,3	267,3	0,90	204.9	1,18
(λ _y =18,2)	3	150	18,0	254,1	L + F	18,0	271,4	0,94	204,0	1,24
	4	120	14,0	255,5	L + F	18,6	273,3	0,93		1,25
	5	100	12,0	264,4	L + F	22,7	274,3	0,96		1,29
	0	1000	115,0	179,9	F + L	-	113,1	1,59		1,52
	1	500	58,0	178,1	F + L	-1,0	215,2	0,83		1,50
	2	333	39,0	197,5	F + L	9,8	242,4	0,81		1,67
1000	3	250	29,0	211,8	F + L	17,7	252,7	0,84		1,79
() = 20.2)	4	200	23,0	219,8	F + L	22,2	257,7	0,85	118,6	1,85
(Ay-50,5)	5	167	20,0	225,5	F + L	25,3	260,3	0,87		1,90
	6	143	17,0	230,7	F + L	28,2	262	0,88		1,95
	7	125	15,0	232,9	F + L	29,5	263,1	0,89		1,96
	8	111	13,0	238,9	F + L	32,8	263,8	0,91		2,01
	0	1400	161,0	148,9	F + L	-	57,8	2,58		2,44
1400	1	700	81,0	146,5	F + L	-1,6	165,7	0,88	61 1	2,40
(λ _y =42,4)	2	467	54,0	175,8	F+L	18,1	209,3	0,84	01,1	2,88
	3	350	41,0	185,1	F + L	24,3	227,1	0,82		3,03

Continua...

...continuação da Tabela 5

L (mm) (λ _y)	N _{CH}	a (mm)	a/r _i	N _{EF} (kN)	Modo de falha	Ganho (%)	N _{NBR} (kN)	N _{ef} /N _{NBR}	N _{NBR2} (kN)	N _{ef} /N _{NBR2}
	4	280	33.0	191 7	F + I	28.7	235.9	0.81		3 14
	5	233	27.0	196	F+L	31.6	240.8	0.81		3.21
1400	6	200	23.0	201.3	F + L	35.2	243.8	0.83	61.1	3.29
(λ _γ =42,4)	7	175	21.0	202.1	F+L	35.7	245.8	0.82	0 =) =	3.31
	8	156	18,0	206,6	F+L	38,8	247,1	0,84		3,38
	0	2200	253,0	79,59	F	-	23,4	3,40		3,24
	1	1100	127,0	80,9	F	1,6	78,7	1,03		3,29
	2	733	85,0	122,2	F+L	53,5	134,8	0,91		4,97
2200	3	550	64,0	148,7	F + L	86,8	164,9	0,90		6,04
(2200)	4	440	51,0	160,9	F + L	102,2	181,1	0,89	24,6	6,54
(Λ _y =66,7)	5	367	43,0	168,5	F+L	111,7	190,4	0,88		6,85
	6	314	37,0	171	F+L	114,9	196,4	0,87		6,95
	7	275	32,0	174,7	F+L	119,5	200,3	0,87		7,10
	8	244	29,0	175,6	F+L	120,6	203,1	0,86		7,14
	0	3000	345,0	39,2	F	-	12,6	3,11		2,93
	1	1500	173,0	47	F	19,9	42,3	1,11		3,51
	2	1000	115,0	76,7	F	95,7	75,3	1,02		5,72
2000	3	750	87,0	100	F+L	155,1	103,6	0,97		7,46
3000	4	600	69,0	115,8	F + L	195,4	123,5	0,94	13,4	8,64
(Λ _y =90,9)	5	500	58,0	126,9	F + L	223,7	135,8	0,93		9,47
	6	429	50,0	134,5	F + L	243,1	143,7	0,94		10,04
	7	375	44,0	139,7	F + L	256,4	149,1	0,94		10,43
	8	333	39,0	143,8	F + L	266,8	153	0,94		10,73
	0	4200	483,0	18,4	F	-	6,4	2,88		2,63
	1	2100	242,0	24,7	F	34,2	21,6	1,14		3,53
	2	1400	161,0	42	F	128,3	38,4	1,09		6,00
	3	1050	121,0	56,1	F	204,9	52,9	1,06		8,01
	4	840	97,0	66,6	F	262,0	64	1,04		9,51
4200	5	700	81,0	74,4	F + L	304,3	72,2	1,03	7.0	10,63
(λ _y =127,2)	6	600	69,0	80,2	F + L	335,9	78,3	1,02	7,0	11,46
	7	525	61,0	84,4	F + L	358,7	82,8	1,02		12,06
	8	467	54,0	87,8	F + L	377,2	86,2	1,02		12,54
	9	420	49,0	90,4	F + L	391,3	88,9	1,02		12,91
	10	382	44,0	92,6	F + L	403,3	90,9	1,02		13,23
	11	350	41,0	94,4	F + L	413,0	92,5	1,02		13,49
	0	5000	575,0	12,4	F	-	4,5	2,76		2,64
	1	2500	288,0	17,4	F	40,3	15,2	1,14		3,70
	2	1667	192,0	30	F	141,9	27,1	1,11		6,38
	3	1250	144,0	40,6	F	227,4	37,3	1,09		8,64
	4	1000	115,0	48,5	F	291,1	45,1	1,08		10,32
5000	5	833	96,0	54,2	F+L	337,1	51	1,06		11,53
(A _y =151,4)	р 7	/14	83,U	58,6	F + L	372,6	55,3	1,06	4,/	12,47
	/	025 EEC	/2,0	01,8 64 2	r+L r.,	398,4 410 F	58,4	1,06		13,15
	ð	550	04,U	04,3 66 2	r+L c.,	418,5 121 7	8,00 ה ה	1,00		13,08 14 11
	9 10		58,U	5,00 مع		434,1 110 1	02,7 67 1	1,00		14,11 1 <i>4</i> /7
	1U 11	433 /17	0,CC 010/0	60.5	ΓŦL Ε⊥Ι	440,4 150 0	04,1 65 0	1,00 1 04		14,4/
	11 17	41/ 20E	40,U 15 0	70 A	ΓŦL ΕμΙ	430,9 167 7	05,5 66 7	1,00		14,74
	12 12	202 257	43,0 12 0	70,4 71 /	Г + L Г ⊥ I	407,7 175 0	67	1 07		14,90 15 10
Parâmetros co	nforme	anresenta	do na Tah	71,4 ela 4	ιτL	0,017	07	1,07		13,13







Os modos típicos de instabilidade resultantes da análise numérica das barras podem ser observados nas Figuras 10, 11 e 12. O panorama de tensões de von Mises no exato momento em que a barra atinge resistência máxima na simulação também é ilustrado nas figuras.



Figura 10 – Instabilidade local e distribuição de tensões de von Mises (Seção 2U 100x30x2,0 – L=600mm)



Figura 11 – Instabilidade local e por flexão e distribuição de tensões de von Mises (Seção 2U 100x30x2,0 – L=1000mm)



Figura 12 – Instabilidade local e por flexão e distribuição de tensões de von Mises (Seção 2U 100x30x3,0 – L=1000mm)

Com os resultados apresentados, é possível concluir que para barras menos esbeltas globalmente é maior a influência da imperfeição local com intensidade de 0,14t introduzida nos modelos, já a imperfeição global de flexão igual a L_{barra}/1500 possui maior influência quanto maior for o comprimento da barra. Ressalta-se que apesar de na maioria dos casos os dois modos de falha serem observados, existe a predominância do modo colocado em primeiro lugar nas tabelas. Além disso, nota-se que a influência conjunta das duas imperfeições é mais evidente nos comprimentos de 1000 e 1400 mm, independentemente do número de chapas separadoras, caracterizando a combinação mais evidente das duas instabilidades.

Comparando os resultados da análise numérica com os valores obtidos com base no procedimento da ABNT NBR 14762:2010 considerando barra composta, adotando o índice de esbeltez modificado da ANSI/AISI S100:2020, observa-se que o procedimento resultou em um dimensionamento contra a segurança na maioria dos casos, destacando-se as barras menos esbeltas globalmente, onde predomina a instabilidade local. Vale ressaltar que para a maioria dos casos a limitação "(a/r_i) $\leq 0,5\lambda$ " recomendada pela ANSI/AISI S100:2020 não é obedecida, sendo necessárias no mínimo 7 chapas separadoras para os casos aqui estudados. Para a seção 2U 100x30x2,0 a relação "N_{EF}/N_{NBR}" variou de 0,83 a 1,15, sendo contrária à segurança para os comprimentos 600, 1000, 1400, 2200 e 3000, enquanto para os comprimentos

4200 e 5000 o procedimento foi conservador. Para a seção 2U 100x30x3,0 a relação " N_{EF}/N_{NBR} " variou de 0,81 a 1,14, sendo contrária à segurança para os comprimentos 600, 1000, 1400, 2200 e 3000, enquanto para os comprimentos 4200 e 5000 o procedimento foi conservador. Vale ressaltar que as relações " N_{EF}/N_{NBR} " mostradas não levaram em consideração as barras sem chapas separadoras. Já o dimensionamento pela ABNT NBR 14762:2010, adotando barras isoladas, onde desconsidera-se as chapas separadoras ao longo do comprimento, resultou excessivamente conservador na maioria dos casos nas duas seções, inclusive para as barras sem chapas separadoras.

A inserção de chapas separadoras influenciou diretamente no ganho de força normal resistente das barras, mostrando que quanto menor o espaçamento entre chapas separadoras maior é a resistência das barras, ao mesmo tempo que evidencia a ocorrência de instabilidade local, principalmente para barras mais esbeltas. Observa-se que o ganho de resistência com a inserção de chapas separadoras é mais significativo para as barras mais longas, apresentando uma tendência de estabilização. Para a seção 2U 100x30x2,0 o ganho foi de 18,2% para o comprimento de 600 mm (5 chapas separadoras) e 462,8% para o comprimento de 5000 mm (13 chapas separadoras). Para a seção 2U 100x30x3,0 o ganho foi de 22,7% para o comprimento de 600 mm (5 chapas separadoras) e 475,8% para o comprimento de 5000 mm (13 chapas separadoras).

Comparando os resultados das duas seções (2U 100x30x2,0 e 2U 100x30x3,0) analisadas numericamente, observa-se que o aumento da espessura das chapas que compõem as seções resultou em um aumento da força normal resistente, sendo que para as barras de menor comprimento o ganho de resistência foi mais expressivo em relação às barras mais esbeltas. Apesar disso, o aumento da espessura das chapas não influenciou no comportamento e modo de falha das seções, bem como o dimensionamento pelo procedimento normativo.

5 Conclusão

A análise numérica realizada em perfis de aço formados a frio, em seção duplo "U" resultaram em valores coerentes com os obtidos nas análises realizadas por Rocha e

Maia (2019). Observa-se que a redução nas dimensões geométricas das chapas separadoras e supressão das chapas de extremidade, praticamente não influenciaram a força normal resistente das barras para comprimentos menores e tiveram pouca relevância nos maiores comprimentos. Diante disso, a extrapolação do estudo foi possível, variando o número de chapas separadoras e a espessura da chapa que compõe a seção dos perfis.

Os resultados obtidos reforçam as conclusões de Rocha e Maia (2019) no que diz respeito às imperfeições geométricas, demonstrando que as imperfeições locais exercem maior influência nas seções menos esbeltas globalmente e as imperfeições globais nas mais esbeltas globalmente. Além disso, reforça-se a necessidade da identificação e consideração das imperfeições geométricas iniciais na análise numérica.

A comparação dos resultados obtidos na análise numérica e do procedimento da ABNT NBR 14762:2010, considerando barra composta e adotando índice de esbeltez modificado da ANSI/AISI S100:2020, demonstram que os valores normativos foram contrários à segurança, em especial para as barras menos esbeltas globalmente. Além disso, em comparação com os resultados da mesma norma, considerando barras isoladas, os valores foram excessivamente conservadores, principalmente para barras mais esbeltas globalmente.

A extrapolação do estudo utilizando a seção 2U 100x30x3,0 para composição da barra composta resultou em aumento da força normal resistente, com maior influência nos perfis menos esbeltos globalmente. Entretanto, o comportamento e modo de falha dos perfis foram os mesmos observados na primeira seção estudada (2U 100x30x2,0).

Compreende-se que baseado nos resultados deste trabalho existe a necessidade de mais estudos que complementem o conhecimento do comportamento dessas seções, explorando todas as varáveis do problema buscando reafirmar os resultados obtidos.

6 Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela bolsa concedida.

7 Referências bibliográficas

AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE. **ANSI/AISI S100: North American specification for the design of cold-formed steel structural members**. Washington, DC, AISI, 2020.

ANSYS. Structural Nonlinearities. v.13.0, Houston, USA, 2011.

AS/NZS. Australian/New Zealand Standard. Cold-formed steel structures. Sydney, Austrália: Standards Austrália, 1996.

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. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

DABAON, M.; ELLOBODY, E.; RAMZY, K. Experimental investigation of built-up cold-formed steel section battened columns. **Thin-Walled Structures**, v. 92, p. 137–145, 2015.

DABAON, M.; ELLOBODY, E.; RAMZY, K. Nonlinear behavior of built-up cold-formed steel section battened columns. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 110, p. 16-28, 2015.

EC3. Eurocode 3: design of steel structures – Part 1-3: General rules – Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. BS EN 1993-1-3. Brussels: European Committee for Standardization, 2006.

MACEDO, G. C.; MAIA, W. F. "Análise numérica de perfis de aço formados a frio em seção "I" constituída por duplo "U" submetidos à compressão. **Colloquium Exactarum**, v. 12, p. 95-110, 2020.

MAIA, W. F. **Sobre a estabilidade de cantoneiras de aço formadas a frio submetidas à compressão**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

MAIA, W. F.; VIEIRA JUNIOR, L. C. M.; SCHAFER, B. W. Schafer; MALITE, M. Experimental and numerical investigation of cold-formed steel double angle members under compression. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 121, p. 398-412, 2016.

NAS. North American specification for the design of cold-formed steel structural members. Washington, DC: American Iron and Steel Institute, 2007.

ROCHA, M. S.; MAIA, W. F. Estudo do comportamento de perfis de aço formados a frio em seção duplo "U" costa a costa submetidos à compressão. In: Oitavo Congresso Latino-Americano da Construção Metálica – Construmetal. ABCEM – Associação Brasileira da Construção Metálica, v. 2, p. 338-358, 2019.

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