

Análise numérica e dimensionamento de perfis de aço formados a frio submetidos à compressão: seção “U enrijecido” com enrijecedores intermediários longitudinais

Samara Landim Ferreira¹, Wanderson Fernando Maia^{2*}

¹ Graduanda, Engenharia Civil, Universidade Federal de Juiz de Fora, Rua José Lourenço Kelmer, s/n, CEP 36036-900, Juiz de Fora, MG, Brasil,
e-mail: samara.landim@engenharia.ufjf.br

² Professor, Departamento de Estruturas, Universidade Federal de Juiz de Fora, Rua José Lourenço Kelmer, s/n, CEP 36036-900, Juiz de Fora, MG, Brasil,
e-mail: wanderson.maia@ufjf.br

Numerical analysis and design of cold-formed steel columns subjected to compression: “lipped channel” section with longitudinal intermediate stiffeners

Resumo

No presente estudo foram avaliados perfis de aço formados a frio em seção do tipo “U enrijecido” com enrijecedores intermediários longitudinais submetidos à compressão. Na análise do comportamento das barras, foram realizadas simulações numéricas por meio do Método dos Elementos Finitos, utilizando o programa Ansys, adicionando imperfeições geométricas iniciais de diferentes magnitudes, considerando não linearidade física e geométrica. Os resultados foram comparados com valores obtidos experimentalmente por outros autores e com resultados do procedimento de cálculo da ABNT NBR 14672:2010, utilizando o Método da Resistência Direta (MRD). A adição de imperfeições geométricas iniciais reduziu consideravelmente a força normal resistente dos perfis, conduzindo valores próximos aos experimentais. O procedimento da ABNT NBR 14672:2010 foi coerente para perfis com enrijecedores intermediários longitudinais na alma apenas, porém, foi conservador em perfis com enrijecedores na alma e na mesa simultaneamente.

Palavras-chave: *Perfis de aço formados a frio. Análise numérica. Instabilidade. Enrijecedores.*

Abstract

In the present study, cold-formed steel columns were evaluated in a lipped channel section with intermediate longitudinal stiffeners subjected to compression. In analyzing the behavior of the columns, numerical simulations were carried out using the Finite Element Method, employing the Ansys software, adding initial geometric imperfections of different magnitudes, considering physical and geometric nonlinearity. The results were compared with values obtained experimentally by other authors and with results from the ABNT NBR 14672:2010 calculation procedure, using the Direct Strength Method (DSM). The addition of initial geometric imperfections considerably reduced the resistant normal force of the columns, leading to values close to the experimental ones. The ABNT NBR 14672:2010 procedure was coherent for profiles with intermediate longitudinal stiffeners in the web only, however, it was conservative for profiles with stiffeners in the web and flange simultaneously.

Keywords: *Cold formed steel columns. Numerical analysis. Instability. Stiffeners.*

1 Introdução

Os perfis de aço formados a frio têm desempenhado um papel fundamental na indústria da construção, principalmente devido à sua alta resistência mecânica, eficiência, sustentabilidade, economia e rapidez de fabricação. Essas características influenciam para que esse tipo de perfil seja cada vez mais empregado em estruturas - como em treliçadas, galpões e residências - com as mais diversas variações em sua forma e dimensões. Diferentemente dos perfis tradicionais laminados ou soldados, os perfis formados a frio são obtidos por dobramento, em prensa dobradeira, de tiras cortadas de chapas ou bobinas, ou por conformação contínua em conjunto de matrizes rotativas, a partir de bobinas laminadas a frio ou a quente, revestidas ou não, sendo ambas as operações realizadas com o aço em temperatura ambiente (ABNT NBR 14762:2010). Entretanto, por serem utilizadas chapas de espessuras reduzidas, os elementos possuem um elevado índice de esbeltez, resultando em modos de instabilidades distintos de outros tipos de perfis, fazendo-se necessário uma análise mais específica dos diferentes modos de instabilidade e, em alguns casos, a interação entre eles.

A presença de enrijecedores, sejam eles de bordas ou intermediários (Figura 1), buscam reduzir os efeitos das instabilidades sofridas pelo perfil e podem assumir diferentes formas e configurações. Entretanto, a norma brasileira de dimensionamento de perfis de aço formados a frio, ABNT NBR 14762:2010, não traz um procedimento específico para o dimensionamento de perfis com enrijecedores longitudinais intermediários. Por esse motivo, é necessário recorrer a normas internacionais como a norma Norte Americana (ANSI/AISI S100:2020) e a norma Australiana/Neozelandesa (AS/NZS 4600:2018).

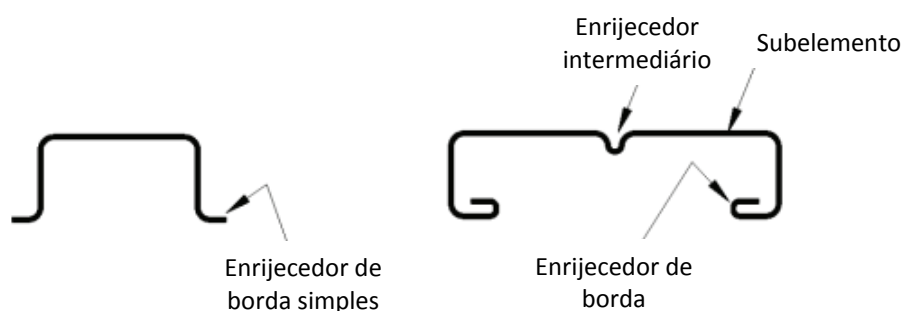


Figura 1 – Ilustração dos tipos de elementos componentes de perfis formados a frio (Adaptado da ABNT NBR 14762:2010).

Como alternativa para dimensionar esses perfis, tem-se o Método da Resistência Direta (MRD), previsto pela ABNT NBR 14762:2010, que permite analisar diferentes seções, além de considerar a interação entre as chapas que compõem o perfil; apresentando ainda a possibilidade de avaliar explicitamente o modo distorcional, que pode ser crítico em seções com enrijecedores de borda e intermediários. Para dimensionamento pelo MRD, é necessário realizar uma análise de estabilidade elástica, identificando os modos de flambagem e suas respectivas tensões críticas.

Em pesquisa desenvolvida por Chen et al. (2020) foi realizada uma investigação experimental sobre o comportamento e determinação da força normal resistente de perfis de aço em seção “U enrijecido” com enrijecedores intermediários longitudinais na alma e/ou na mesa, submetidos à compressão. Em todos os ensaios realizados, ocorreu interação entre os modos de instabilidade local e distorcional, denominado LD. Os procedimentos normativos levaram a resultados contra a segurança para o dimensionamento dos perfis, confirmando o estudo apresentado por Schafer (2002), no qual afirma que, em casos onde ocorre a interação entre instabilidades local e distorcional, os procedimentos podem não considerar essa interação de forma adequada. Ainda no contexto de estudos realizados sobre o comportamento de perfis em seção “U enrijecido” com enrijecedores intermediários longitudinais, ressaltam-se os trabalhos teóricos e experimentais realizados por He et al. (2020), He et al. (2014), Yap e Hancock (2011), Kwon et al. (2009) e Lecce e Rasmussen (2006). Todos os estudos mostraram que ocorreu a interação entre os modos de instabilidade local e distorcional. O estudo de Yap e Hancock (2011) concluiu ainda que os procedimentos da ANSI/AISI S100:2007 e da AS/NZS 4600:2005 se mostraram contra a segurança para o dimensionamento dos perfis.

Diante do exposto, com a necessidade de uma investigação mais detalhada, esse trabalho visa contribuir para um maior entendimento e domínio sobre o comportamento estrutural de perfis formados a frio em seção “U enrijecido” com enrijecedores intermediários longitudinais quando submetidos à compressão, dando enfoque à análise numérica por meio do Método dos Elementos Finitos, com a inserção das não-linearidades física e geométrica, bem como a inserção e variação de imperfeições geométricas iniciais. Para isso, foram adotadas diferentes seções,

variando a esbelteza local e global. As barras foram engastadas nas extremidades, com o intuito de influenciar a maior notoriedade das instabilidades local e distorcional. Além disso, foi realizada a comparação dos resultados obtidos na análise numérica com valores experimentais de outros autores e avaliação dos resultados provenientes da ABNT NBR 14762:2010, utilizando o MRD.

2 Análise de estabilidade elástica

Inicialmente, foi realizada análise de estabilidade elástica no programa CUFSM, desenvolvido por Schafer (2001), para todas as seções utilizadas no trabalho. A análise identifica os modos críticos de flambagem e as tensões relativas a cada um deles, sendo esta etapa necessária para utilização do Método da Resistência Direta para o dimensionamento das barras. As seções são as mesmas ensaiadas experimentalmente por Chen et al. (2020), conforme apresentado na Figura 2 e Tabela 1.

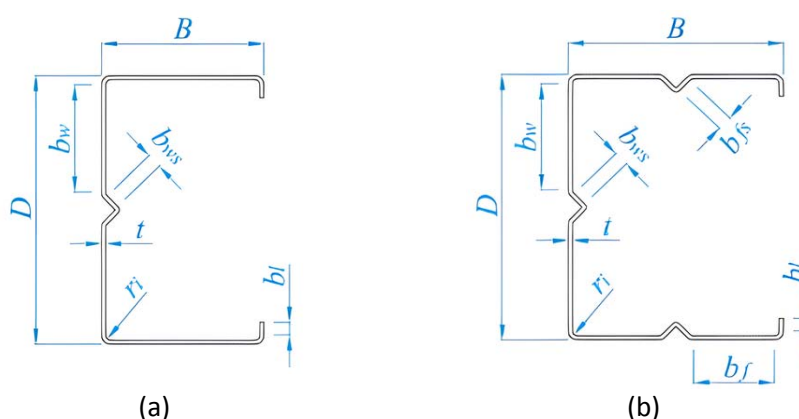


Figura 2 – Seção transversal dos perfis (a) com enrijecedores na alma (WS) e (b) com enrijecedores na alma e na mesa (WFS) (Chen et al. (2020)).

As dimensões adotadas para as seções no CUFSM estão detalhadas na Tabela 1, assim como as forças críticas elásticas associadas aos modos de flambagem local e distorcional obtidas para cada uma delas. Foram adotadas dimensões médias para as seções que apresentaram proximidade das medidas nos estudos de Chen et al. (2020).

A análise ilustrada na Figura 3 foi realizada para a seção denominada WFS-1; sendo o primeiro modo crítico apresentado o local, que ocorreu para um comprimento de barra igual a 86 mm e uma tensão de 89,45 MPa. O segundo modo crítico foi o distorcional com tensão de 28,12 MPa e comprimento de barra igual a 2100 mm. A análise identificou ainda os modos críticos globais de flexo-torção e flexão no eixo de menor inércia para barras mais longas.

Tabela 1 – Dimensões médias das seções, propriedades dos materiais utilizados na fabricação dos perfis WS e WFS e forças críticas de flambagem elástica local e distorcional.

SEÇÃO	DIMENSÕES E PROPRIEDADES DA SEÇÃO										FORÇAS CRÍTICAS	
	D (mm)	B (mm)	b _l (mm)	b _f (mm)	b _w (mm)	b _{fs} (mm)	b _{ws} (mm)	t* (mm)	E (GPa)	f _y (MPa)	N _l (KN)	N _{dist} (KN)
WS-1	279,15	150,80	15,90	-	121,85	-	18,90	1,51	212,6	488,2	87,89	53,91
WS-2												
WS-3	221,45	129,70	15,75	-	93,00	-	18,30	1,52			102,64	64,72
WS-4												
WS-5	261,90	150,30	16,30	-	113,20	-	18,70	1,51			86,80	55,16
WS-5R												
WS-6												
WS-6R												
WS-7	269,05	160,35	15,85	-	117,05	-	18,25	1,51			78,45	49,52
WS-8												
WS-9	273,60	171,00	16,55	-	120,30	-	18,45	1,22	214,1	612,2	38,61	30,27
WS-10												
WS-11	253,30	151,20	16,30	-	109,30	-	19,20	1,01	216,7	602,7	26,15	24,01
WS-12												
WS-13												
WFS-1	252,40	201,60	15,90	83,80	108,50	19,30	19,00	1,00	215,6	601,7	67,35	22,19
WFS-2												
WFS-3	250,10	220,50	15,80	93,70	107,70	18,80	18,40	1,21	215,2	617,2	122,32	28,97
WFS-4												
WFS-5	272,60	240,70	15,00	103,25	118,10	18,60	18,35	1,21			109,83	25,53
WFS-5R												
WFS-6	271,95	182,00	16,00	73,55	118,25	19,10	19,10	1,01			57,64	25,55
WFS-6R												
WFS-7	283,80	193,20	17,20	78,00	123,70	18,60	18,50	0,99	215,6	601,7	52,88	24,09
WFS-8	252,50	222,00	15,50	94,20	109,40	19,10	16,30	1,00			67,69	19,38
WFS-9	271,50	182,60	16,40	73,60	118,80	19,50	19,80	1,00			55,64	25,15
WFS-9R												
WFS-10												
WFS-11	282,60	191,60	17,50	78,40	122,80	19,00	20,40	1,00			54,48	24,58
WFS-12	301,55	201,80	16,80	82,95	131,20	18,95	19,90	1,00			50,79	23,12
WFS-13												

A representação das dimensões D, B, b_l, b_f, b_w, b_{fs} e b_{ws} estão ilustradas na Figura 2.

t* é a espessura do metal removendo o revestimento de zinco.

E é o módulo de elasticidade obtido por Chen et al. (2020) nos ensaios de tração.

f_y é a resistência ao escoamento obtido por Chen et al. (2020) nos ensaios de tração.

N_l é a força normal crítica elástica associada ao modo de flambagem local obtida no CUFSM.

N_{dist} é a força normal crítica elástica associada ao modo de flambagem distorcional obtida no CUFSM.

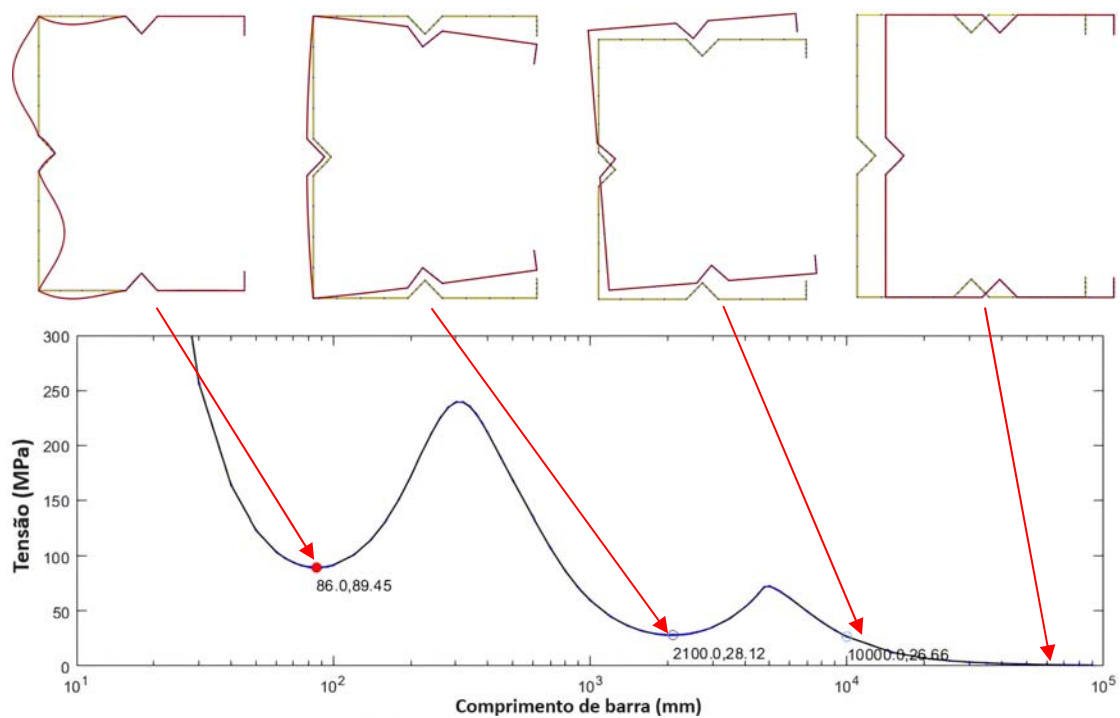


Figura 3 – Análise de estabilidade elástica da seção WFS-1 pelo CUFSM.

3 Procedimento normativo

No Método da Resistência Direta (MRD), apresentado no anexo C da ABNT NBR 14762:2010, o valor característico da força normal resistente, denominado $N_{c,Rk}$, é o menor valor calculado para os modos de flambagem global, local e distorcional.

Modo global

A força normal resistente de uma barra submetida à compressão centrada, para o modo de flambagem global, é dada pela Equação (1).

$$N_{c,Re} = \begin{cases} (0,658^{\lambda_0^2}) Af_y & \text{Para } \lambda_0 \leq 1,5 \\ \left(\frac{0,877}{\lambda_0^2} \right) Af_y & \text{Para } \lambda_0 > 1,5 \end{cases} \quad (1)$$

Onde:

λ_0 é o índice de esbeltez reduzido associado à flambagem global, calculado de acordo com a Equação (2).

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Af_y}{N_e}} \quad (2)$$

A é a área bruta da seção transversal.

f_y é a resistência ao escoamento do aço.

N_e é a força normal crítica elástica, considerando os modos de flambagem globais aplicáveis à seção monossimétrica, conforme item 9.7.2.2 da ABNT NBR 14762:2010.

Modo local

A força normal resistente de uma barra submetida à compressão centrada, para o modo de flambagem local, é dada pela Equação (3).

$$N_{c,RI} = \begin{cases} N_{c,Re} & \text{Para } \lambda_l \leq 0,776 \\ \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_l^{0,8}}\right) \left(\frac{N_{c,Re}}{\lambda_l^{0,8}}\right) & \text{Para } \lambda_l > 0,776 \end{cases} \quad (3)$$

Onde:

λ_l é o índice de esbeltez reduzido associado à flambagem local, calculado de acordo com a Equação (4).

$$\lambda_l = \sqrt{\frac{N_{c,Re}}{N_l}} \quad (4)$$

N_l é a força normal crítica elástica associada ao modo de flambagem local.

Modo distorcional

A força normal resistente de uma barra submetida à compressão centrada, para o modo de flambagem distorcional, é dada pela Equação (5).

$$N_{c,Rdist} = \begin{cases} Af_y & \text{Para } \lambda_{dist} \leq 0,561 \\ \left(1 - \frac{0,25}{\lambda_{dist}^{1,2}}\right) \cdot \frac{A f_y}{\lambda_{dist}^{1,2}} & \text{Para } \lambda_{dist} > 0,561 \end{cases} \quad (5)$$

Onde:

λ_{dist} é o índice de esbeltez reduzido associado à flambagem distorcional, calculado de acordo com a Equação (6).

$$\lambda_{dist} = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{dist}}} \quad (6)$$

N_{dist} é a força normal crítica elástica associada ao modo de flambagem distorcional.

Os resultados obtidos pela ABNT NBR 14762:2010, utilizando o MRD, estão apresentados na seção 6.

4 Análise Experimental

Chen et al. (2020) analisaram, de forma experimental, 31 barras com diferentes geometrias, sendo 15 em seção do tipo “U enrijecido” com enrijecedores longitudinais na alma (WS) e 16 do tipo “U enrijecido” com enrijecedores longitudinais na alma e na mesa (WFS), conforme ilustrado na Figura 2. Para definir as propriedades dos

materiais, Chen et al. (2020) realizaram ensaios de tração para cada lote de aço utilizado na fabricação dos perfis. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 1, sendo estes utilizados na análise numérica do presente estudo.

Para a realização dos ensaios, as extremidades das barras foram soldadas a chapas de aço com 16mm de espessura. As barras foram ensaiadas com extremidades engastadas, colocadas em uma estrutural vertical concedida para realizar ensaios controlados por deslocamento, permitindo avaliação do comportamento após o pico da força normal ter sido atingido. Foram medidos deslocamentos de interesse por meio de transdutores instalados pontualmente no topo, na base e no meio das barras. A configuração do equipamento empregado nos ensaios e a configuração deformada de umas das barras ensaiadas estão ilustrados na Figura 4.

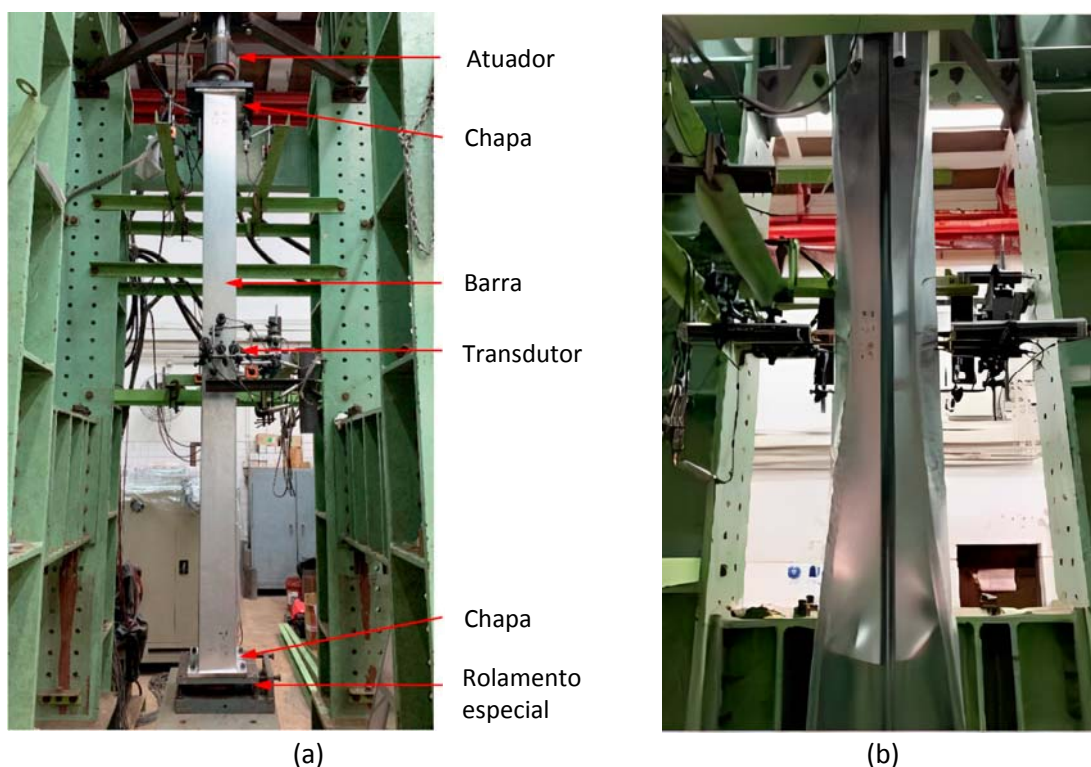


Figura 4 – (a) Configuração do equipamento empregado nos ensaios e (b) configuração deformada do perfil WS-5 após o colapso (Adaptado de Chen et al. (2020)).

Os valores experimentais da força normal resistente e os modos de instabilidade obtidos por Chen et al. (2020) são apresentados e discutidos na seção 6, sendo ainda comparados aos resultados da análise numérica e com os valores da ABNT NBR 14762:2010 pelo MRD.

5 Análise Numérica

Na análise numérica, foram realizadas simulações baseadas nos ensaios experimentais de Chen et al. (2020) para perfis em seção “U enrijecido” com enrijecedores intermediários longitudinais. O programa Ansys foi usado para auxiliar na análise através do Método dos Elementos Finitos. Foi utilizado o elemento do tipo SHELL 181, ideal para a análise não-linear de cascas de pequenas espessuras sujeitas a grandes deformações ou rotações, ou seja, situação que se enquadra os perfis formados a frio. Foi feita a adoção da malha quadrada com os elementos da seção transversal com lados de cerca de 10mm, exceto os cantos e enrijecedores, que foram discretizados em dois elementos cada. Para perfis com dimensões usuais, essa malha tem demonstrado resultados satisfatórios. Ao reduzi-la, existe um aumento na demanda computacional, mas não influencia significativamente nos resultados, conforme apresentado nos estudos de Maia et al. (2016). Em todos os modelos, as dimensões usadas foram referentes a linha média das seções com os cantos arredondados. As chapas de extremidade presentes na análise experimental foram modeladas com 16mm de espessura. As extremidades das barras foram engastadas, restringindo todos os graus de liberdade dos nós (rotação e translação), exceto o deslocamento longitudinal em uma das extremidades.

Para a não-linearidade do material, inicialmente, foram realizadas simulações adotando os diagramas “Tensão x Deformação” bilinear e trilinear. Com relação aos valores de força normal resistente obtidos, o modelo bilinear levou a resultados elevados em relação aos resultados experimentais, enquanto o modelo trilinear apresentou valores mais coerentes. Dessa forma, o modelo trilinear foi utilizado em toda a análise numérica. O modelo trilinear adotado nas simulações do presente trabalho, assim como utilizado por Nunes e Maia (2021), com resultados coerentes para situações em que o modelo reológico não era conhecido, está apresentado na Figura 5. Os valores de resistência ao escoamento (f_y), resistência à ruptura (f_u) e Módulo de Elasticidade (E) para cada perfil foram usados de acordo com a Tabela 1.

Além da não-linearidade do material, a não-linearidade geométrica também foi adotada na análise numérica, ou seja, procurou-se obter o equilíbrio das barras em seu estado deformado. Para resolver o sistema não-linear, foi utilizado o “Método de

Newton-Raphson”, na qual a matriz de rigidez tangente é atualizada a cada interação. Nas simulações, foi aplicado deslocamento, obtendo como resposta a força normal resistente. Para isso, utilizou-se da ferramenta “Automatic Load Stepping” do Ansys, adotando um mínimo e máximo de deslocamento a ser aplicado. Para convergência dos modelos da análise numérica, foi usado um erro de 0,1%, cujo valor é recomendado pelo programa Ansys.

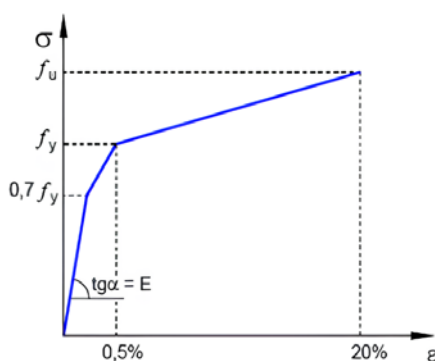


Figura 5 – Diagrama “Tensão x Deformação”: modelo trilinear (Nunes e Maia (2021)).

Foram modeladas barras com o comprimento variando de 1250mm a 2500mm, com a presença de enrijecedores intermediários longitudinais na alma apenas ou na alma e nas mesas simultaneamente, conforme os modelos experimentais. A configuração durante a construção da malha de um dos perfis analisados está ilustrada na Figura 6.

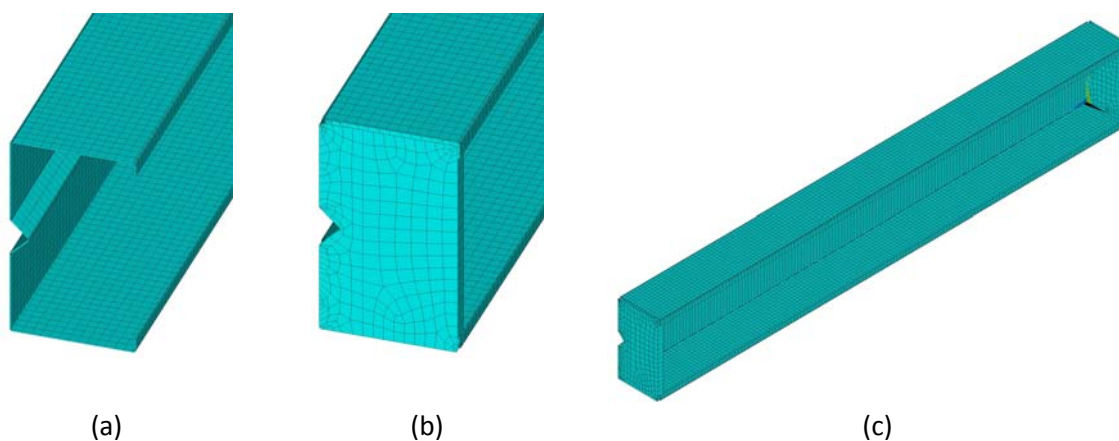


Figura 6 – Modelagem do perfil WS-4 (a) Seção transversal sem a chapa de extremidade (b) Detalhe com a presença da chapa de extremidade (c) Vista geral do perfil.

Para inserção das imperfeições geométricas iniciais, inicialmente foi realizada uma análise de estabilidade elástica de cada barra, buscando os modos críticos de flambagem de interesse de forma isolada. Os modos adotados para uma das barras analisadas estão ilustrados na Figura 7.

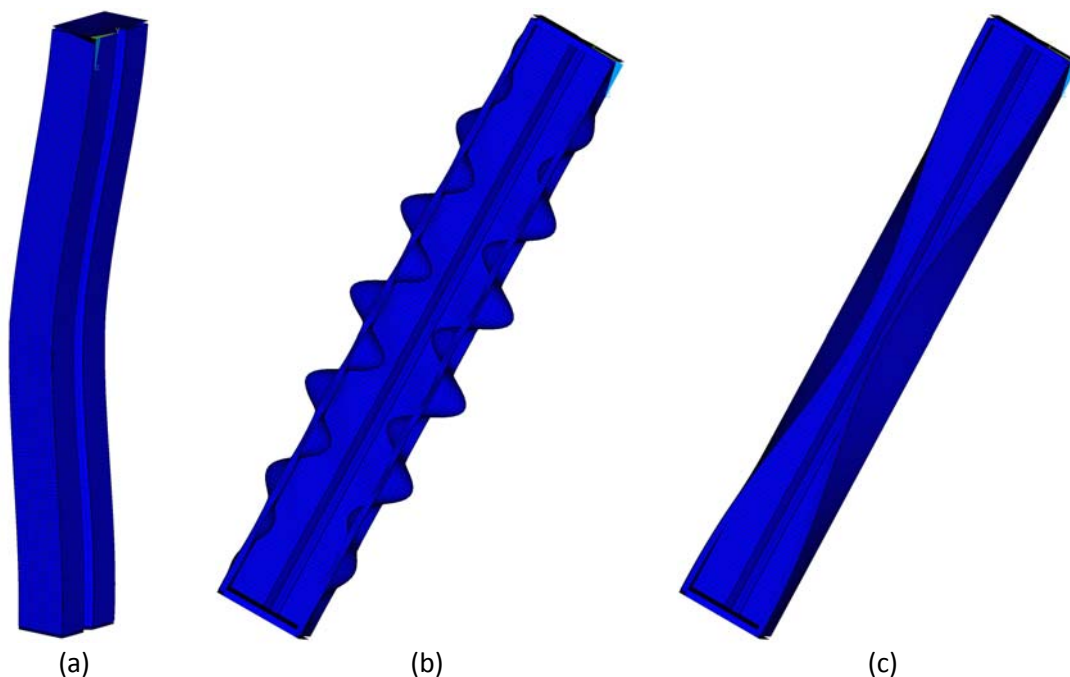


Figura 7 – Modos de flambagem para o perfil WS-4 (a) Flexão (b) Local (c) Distorcional.

Posteriormente, com base nos modos de flambagem e no estudo realizado por Schafer e Peköz (1998), para os modos local e distorcional, foram aplicados dois níveis de imperfeições geométricas. O primeiro nível com $0,14t$; $0,64t$ e $L_{\text{barra}}/1500$ referentes aos modos local, distorcional e de flexão, respectivamente, na qual “ t ” é a espessura da seção e “ L_{barra} ” é o comprimento da barra. Já o segundo nível de imperfeições foi de $0,66t$ para o modo local e $1,55t$ para o modo distorcional, permanecendo $L_{\text{barra}}/1500$ para o modo de flexão. A imperfeição geométrica de flexão igual a $L_{\text{barra}}/1500$ foi adotada em detrimento da imperfeição $L_{\text{barra}}/1000$, comumente utilizada pelas normas de dimensionamento, visto que estudos mostram que as imperfeições medidas em perfis formados a frio, em geral, são menores que $L_{\text{barra}}/1000$. No trabalho de Chen et al. (2020), por exemplo, foram medidas as imperfeições de flexão em todos os perfis, resultando em um valor médio de $L_{\text{barra}}/7871$. Destaca-se ainda que foi realizada análise numérica dos perfis sem a inserção de imperfeições geométricas iniciais.

6 Resultados

Os valores obtidos na análise numérica foram comparados aos experimentais de Chen et al. (2020), assim como aos resultados teóricos calculados pela ABNT NBR 14762:2010, utilizando o MRD. As comparações entre resultados de força normal resistente, bem como os modos de instabilidade estão apresentadas nas Tabelas 2 a 5 e Figuras 8 a 13.

Tabela 2 – Comparação entre os resultados de força normal resistente da análise numérica, da ABNT NBR 14762:2010 e experimental de Chen et al. (2020) para os perfis de aço do tipo WS.

Perfil	L_{barra} (mm)	EXP.	ABNT NBR 14762:2010		NUMÉRICO					
		N_{EXP} (KN)	$N_{\text{C,k}}$ (KN)	$N_{\text{C,k}}/N_{\text{EXP}}$	N_{EF}^0 (KN)	$N_{\text{EF}}^0/N_{\text{EXP}}$	N_{EF}^1 (KN)	$N_{\text{EF}}^1/N_{\text{EXP}}$	N_{EF}^2 (KN)	$N_{\text{EF}}^2/N_{\text{EXP}}$
WS-1	2501	112,7	119,0	1,06	118,3	1,05	116,30	1,03	114,30	1,01
WS-2	2201	117,9	119,0	1,01	138,3	1,17	118,30	1,00	116,00	0,98
WS-3	1701	120,7	121,9	1,01	147,0	1,22	127,50	1,06	124,00	1,03
WS-4	1502	122,4	121,9	1,00	145,3	1,19	126,80	1,04	123,10	1,01
WS-5	1803	119,6	119,0	0,99	136,6	1,14	122,90	1,03	120,50	1,01
WS-5R	1801	119,8	119,0	0,99	136,6	1,14	122,90	1,03	120,50	1,01
WS-6	1552	120,5	119,0	0,99	137,2	1,14	124,90	1,04	122,50	1,02
WS-6R	1554	118,4	119,0	1,01	137,2	1,16	124,90	1,05	122,50	1,03
WS-7	1500	120,3	114,0	0,95	135,4	1,13	125,20	1,04	123,30	1,02
WS-8	1651	118,1	114,0	0,96	135,0	1,14	124,00	1,05	122,10	1,03
WS-9	1653	86,7	88,4	1,02	105,5	1,22	94,30	1,09	95,60	1,10
WS-10	1955	86,0	88,4	1,03	93,7	1,09	93,07	1,08	96,17	1,12
WS-11	1755	68,9	68,2	0,99	69,1	1,00	66,70	0,97	61,20	0,89
WS-12	1652	65,6	68,2	1,04	84,2	1,28	68,09	1,04	67,60	1,03
WS-13	1350	66,7	68,2	1,02	79,7	1,19	71,20	1,07	70,80	1,06
Média				1,00		1,15		1,04		1,02

L_{barra} é o comprimento do perfil analisado.

N_{EXP} é a força normal resistente experimental obtida por Chen et al. (2020).

$N_{\text{C,k}}$ é a força normal resistente segundo a ABNT NBR 14762:2010 pelo MRD.

N_{EF}^0 é a força normal resistente obtida na análise numérica pelo programa ANSYS sem imperfeições geométricas iniciais.

N_{EF}^1 é a força normal resistente obtida na análise numérica pelo programa ANSYS com imperfeições geométricas iniciais de 0,14t local, 0,64t distorcional e $L_{\text{barra}}/1500$ de flexão.

N_{EF}^2 é a força normal resistente obtida na análise numérica pelo programa ANSYS com imperfeições geométricas iniciais de 0,66t local, 1,55t distorcional e $L_{\text{barra}}/1500$ de flexão.

Tabela 3 – Comparação entre os resultados de força normal resistente da análise numérica, da ABNT NBR 14762:2010 e experimental de Chen et al. (2020) para os perfis de aço do tipo WFS.

Perfil	L_{barra} (mm)	EXP.	ABNT NBR 14762:2010		NUMÉRICO					
		N_{EXP} (KN)	$N_{\text{C,k}}$ (KN)	$N_{\text{C,k}}/N_{\text{EXP}}$	N_{EF}^0 (KN)	$N_{\text{EF}}^0/N_{\text{EXP}}$	N_{EF}^1 (KN)	$N_{\text{EF}}^1/N_{\text{EXP}}$	N_{EF}^2 (KN)	$N_{\text{EF}}^2/N_{\text{EXP}}$
WFS-1	1752	86,1	70,8	0,82	113,2	1,31	82,30	0,96	80,98	0,94
WFS-2	1652	86,5	70,8	0,82	105,0	1,21	84,00	0,97	82,60	0,95
WFS-3	1503	85,9	70,8	0,82	130,2	1,52	86,40	1,01	87,10	1,01
WFS-4	1254	115,8	92,2	0,80	198,7	1,72	124,70	1,08	121,20	1,05
WFS-5	1299	110,9	88,4	0,80	122,5	1,10	121,10	1,09	118,70	1,07
WFS 5-R	1299	112,6	88,4	0,79	122,5	1,09	121,10	1,08	118,70	1,05
WFS-6	1702	86,5	76,0	0,88	93,1	1,08	84,20	0,97	83,40	0,96
WFS 6-R	1703	85,6	76,0	0,89	93,1	1,09	84,20	0,98	83,40	0,97
WFS-7	2005	71,2	74,5	1,05	79,4	1,12	79,00	1,11	78,70	1,11
WFS-8	1355	86,5	66,8	0,77	97,4	1,13	88,00	1,02	86,50	1,00

Continua...

...continuação da Tabela 3

Perfil	L _{barra} (mm)	EXP.	ABNT NBR 14762:2010		NUMÉRICO					
		N _{EXP} (KN)	N _{C,k} (KN)	N _{C,k} /N _{EXP}	N _{EF} ⁰ (KN)	N _{EF} ⁰ /N _{EXP}	N _{EF} ¹ (KN)	N _{EF} ¹ /N _{EXP}	N _{EF} ² (KN)	N _{EF} ² /N _{EXP}
WFS-9	1398	88,7	75,1	0,85	100,3	1,13	88,00	0,99	101,70	1,15
WFS-9R	1401	89,9	75,1	0,84	100,3	1,12	88,00	0,98	101,70	1,13
WFS-10	1504	86,4	75,1	0,87	98,2	1,14	87,16	1,01	86,07	1,00
WFS-11	1501	87,7	75,5	0,86	97,8	1,12	87,30	1,00	86,20	0,98
WFS-12	1654	80,9	74,5	0,92	93,5	1,16	84,20	1,04	83,30	1,03
WFS-13	1502	84,3	74,5	0,88	102,8	1,22	86,40	1,02	85,50	1,01
Média				0,85		1,20		1,02		1,03

L_{barra} é o comprimento do perfil analisado.

N_{EXP} é a força normal resistente experimental obtida por Chen et al. (2020).

N_{C,k} é a força normal resistente segundo a ABNT NBR 14762:2010 pelo MRD.

N_{EF}⁰ é a força normal resistente obtida na análise numérica pelo programa ANSYS sem imperfeições geométricas iniciais.

N_{EF}¹ é a força normal resistente obtida na análise numérica pelo programa ANSYS com imperfeições geométricas iniciais de 0,14t local, 0,64t distorcional e L_{barra}/1500 de flexão.

N_{EF}² é a força normal resistente obtida na análise numérica pelo programa ANSYS com imperfeições geométricas de 0,66t local, 1,55t distorcional e L_{barra}/1500 de flexão.

Tabela 4 – Comparação entre os modos de instabilidade observados na análise numérica, previstos pela ABNT NBR 14762:2010 e obtidos na análise experimental de Chen et al. (2020) para os perfis WS.

Perfil	EXPERIMENTAL	ABNT NBR 14762:2010	NUMÉRICO		
			EF ⁰	EF ¹	EF ²
WS-1	L+D***	D	D*	D**	D**
WS-2	L+D**	D	D*	D**	D**
WS-3	L+D**	D	D*	D**	D**
WS-4	L+D**	D	D*	D**	D**
WS-5	L+D**	D	D*	D**	D**
WS-5R	L+D**	D	D*	D**	D**
WS-6	L+D**	D	D*	D**	D**
WS-6R	L+D**	D	D*	D**	D**
WS-7	L+D**	D	D*	D**	D**
WS-8	L+D**	D	D*	D**	D**
WS-9	L+D**	D	D*	D**	D**
WS-10	L+D**	D	D*	D**	D**
WS-11	L+D**	D	D*	D**	D**
WS-12	L+D**	D	D*	D**	D**
WS-13	L+D**	D	D*	D**	D**

EF⁰ é o modo de instabilidade referente à análise numérica sem imperfeições geométricas.

EF¹ é o modo de instabilidade referente à análise numérica com imperfeições geométricas de 0,14t local, 0,64t distorcional e L_{barra}/1500 de flexão.

EF² é o modo de instabilidade referente à análise numérica com imperfeições geométricas de 0,66t local, 1,55t distorcional e L_{barra}/1500 de flexão.

L é o modo de instabilidade local.

D é modo de instabilidade distorcional.

D+L é a interação entre os modos distorcional e local.

* Modo de instabilidade distorcional com as mesas "para fora".

** Modo de instabilidade distorcional com as mesas "para dentro".

*** Modo de instabilidade distorcional com duas meias-ondas distorcionais.

Tabela 5 – Comparação entre os modos de instabilidade observados na análise numérica, previstos pela ABNT NBR 14762:2010 e obtidos na análise experimental de Chen et al. (2020) para os perfis WFS.

Perfil	EXPERIMENTAL	ABNT NBR 14762:2010	NUMÉRICO		
			EF ⁰	EF ¹	EF ²
WFS-1	L+D*	D	D*	D**	D**
WFS-2	L+D**	D	D***	D**	D**
WFS-3	L+D*	D	L	D**	D**
WFS-4	L+D*	D	D+L	D**	D**
WFS-5	L+D*	D	D**	D**	D**
WFS 5-R	L+D*	D	D**	D**	D**
WFS-6	L+D*	D	D*	D**	D**
WFS 6-R	L+D*	D	D*	D**	D**
WFS-7	L+D*	D	D**	D**	D**
WFS-8	L+D*	D	D*	D**	D**
WFS-9	L+D*	D	D*	D**	D*
WFS-9R	L+D*	D	D*	D**	D*
WFS-10	L+D*	D	D*	D**	D**
WFS-11	L+D*	D	D*	D**	D**
WFS-12	L+D**	D	D*	D**	D**
WFS-13	L+D*	D	D*	D**	D**

EF⁰ é o modo de instabilidade referente à análise numérica sem imperfeições geométricas.

EF¹ é o modo de instabilidade referente à análise numérica com imperfeições geométricas de 0,14t local, 0,64t distorcional e $L_{barra}/1500$ de flexão.

EF² é o modo de instabilidade referente à análise numérica com imperfeições geométricas de 0,66t local, 1,55t distorcional e $L_{barra}/1500$ de flexão.

L é o modo de instabilidade local.

D é modo de instabilidade distorcional.

D+L é a interação entre os modos distorcional e local.

* Modo de instabilidade distorcional com as mesas "para fora".

** Modo de instabilidade distorcional com as mesas "para dentro".

*** Modo de instabilidade distorcional com duas meias-ondas distorcionais.

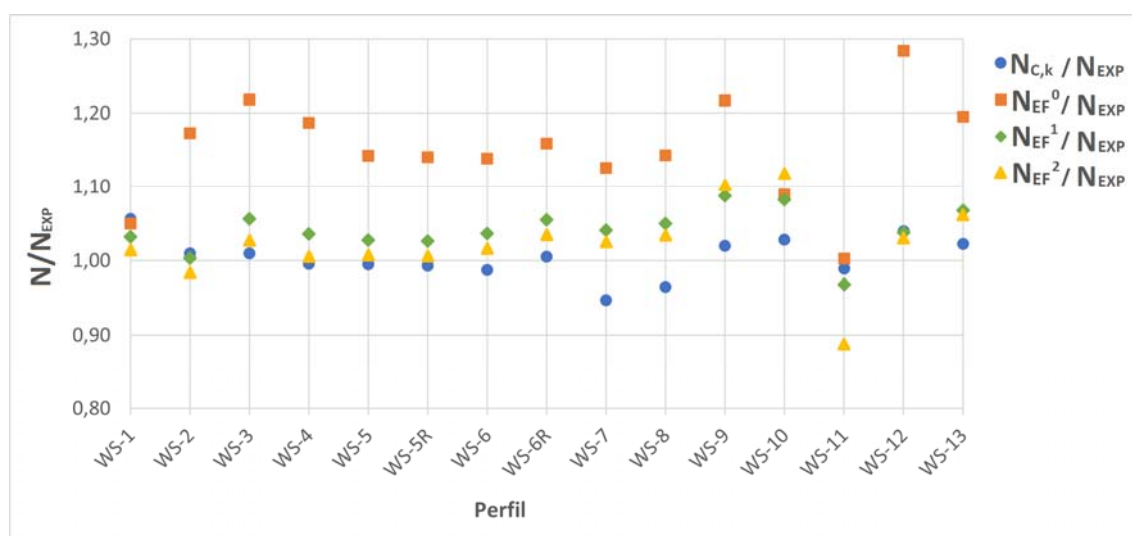


Figura 8 – Comparação entre os resultados de força normal resistente da análise numérica, da ABNT NBR 14762:2010 e experimental de Chen et al. (2020) para os perfis de aço do tipo WS.

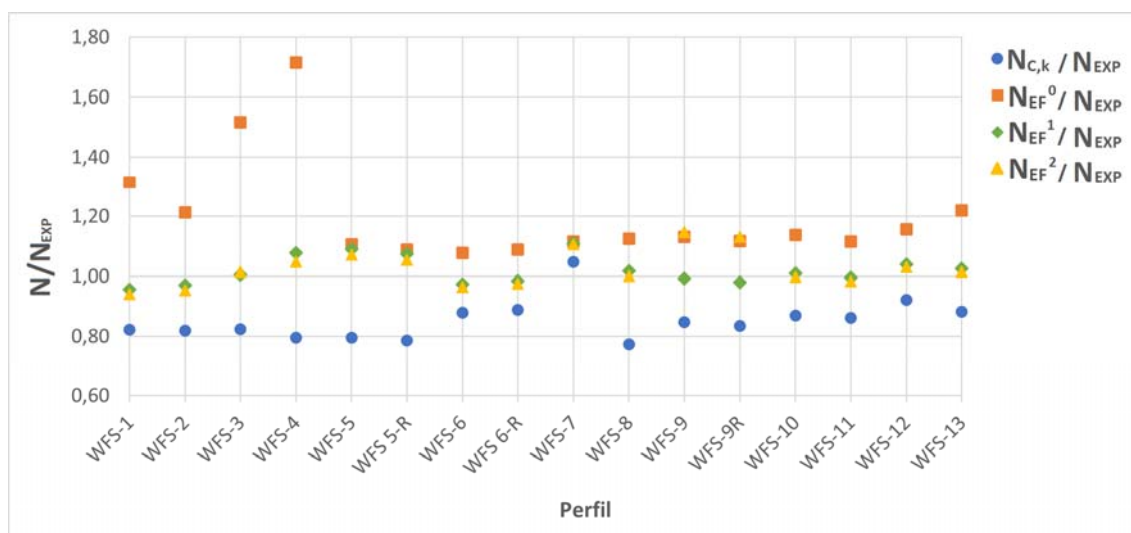


Figura 9 – Comparação entre os resultados de força normal resistente da análise numérica, da ABNT NBR 14762:2010 e experimental de Chen et al. (2020) para os perfis de aço do tipo WFS.

Referente aos perfis “U enrijecido” com enrijecedores intermediários longitudinais na alma (WS), os valores de força normal resistente calculados pela ABNT NBR 14762:2010 se mostraram bastante coerentes. A relação “ $N_{C,k}/N_{EXP}$ ” variou entre 0,95 (WS-7) e 1,06 (WS-1), com uma média de 1,00.

Para os resultados da análise numérica, os perfis modelados sem a inserção de imperfeições geométricas iniciais apresentaram resultados contra a segurança para a maioria dos casos. A relação “ N_{EF}^0/N_{EXP} ” variou de 1,00 a 1,28, com uma média de 1,15. Porém, ao adicionar imperfeições geométricas nos perfis, esses valores diminuíram. A Relação “ N_{EF}^1/N_{EXP} ” apresentou uma média igual a 1,04, variando de 0,97 a 1,09, enquanto a relação “ N_{EF}^2/N_{EXP} ” teve uma média de 1,02 variando de 0,89 a 1,10, o que torna os valores da análise numérica mais próximos aos resultados experimentais.

Analisando os modos de instabilidade para cada situação, os resultados experimentais constataram a instabilidade do tipo distorcional como dominante para todos os perfis WS. Esse modo de instabilidade apresentou uma meia-onda distorcional envolvendo o movimento das mesas “para dentro” em todos os perfis, com exceção do perfil WS-1 que apresentou duas meias-ondas distorcionais. O modo de instabilidade previsto pela ABNT NBR 14762:2010, utilizando o MRD, se mostrou coerente, visto que o valor crítico para a força normal resistente foi no modo distorcional para todos os casos, assim como na análise numérica. Porém, para os perfis sem imperfeições geométricas, o modo de instabilidade distorcional resultou em um movimento das mesas “para

fora” (Figura 10) e para os perfis com inserção de imperfeições o movimento das mesas foi “para dentro” (Figura 11), como obtido nos ensaios experimentais de Chen et al. (2020).

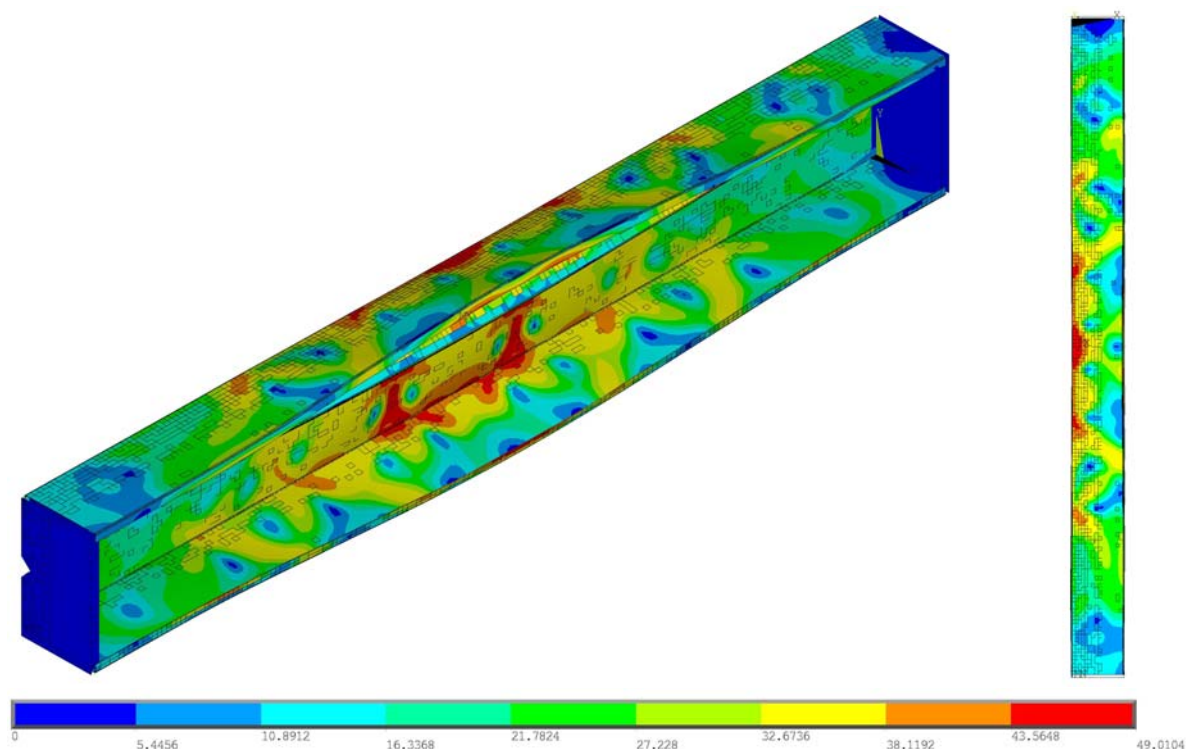


Figura 10 – Modo de instabilidade e distribuição de tensões de von Mises (WS5 – Sem imperfeições).

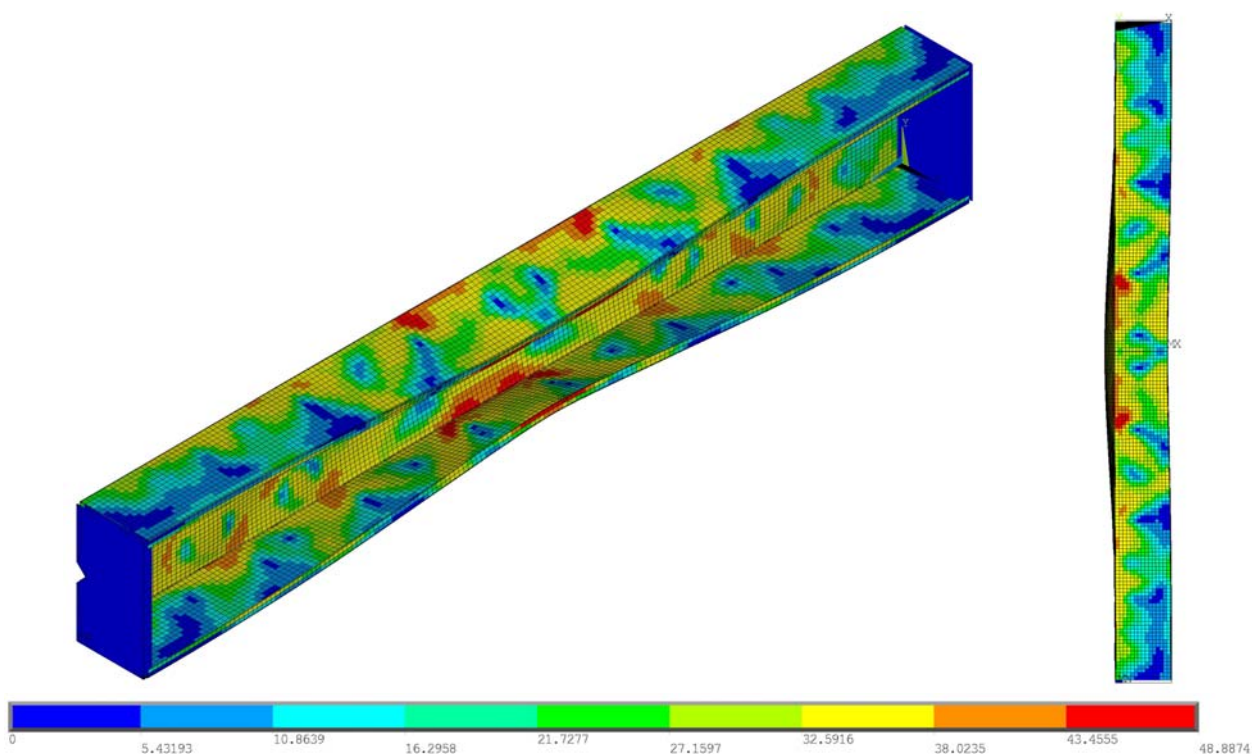


Figura 11 – Modo de instabilidade e distribuição de tensões de von Mises (WS5 – Com imperfeições 0,14t local, 0,64t distorcional e $L_{\text{barra}}/1500$ de flexão).

Para os perfis “U enrijecido” com enrijecedores intermediários longitudinais na alma e na mesa (WFS), os resultados de força normal resistente obtidos pela ABNT NBR 14762:2010 foram conservadores. A relação “ $N_{C,k}/N_{EXP}$ ” teve o menor valor em 0,77 e o maior em 1,05, com uma média de 0,85. Isso indica que os resultados para a força normal resistente foram bem menores comparados aos obtidos nos ensaios experimentais.

Analisando os valores obtidos na análise numérica, para todos os perfis sem imperfeições geométricas os resultados se mostraram contra a segurança, com a relação “ N_{EF}^0/N_{EXP} ” variando entre 1,08 e 1,72, com uma média de 1,20. Ao inserir as imperfeições geométricas, os valores se apresentaram mais coerentes e a favor da segurança. Para o primeiro nível de imperfeições (0,14t local, 0,64t distorcional e $L_{barra}/1500$ de flexão), a relação “ N_{EF}^1/N_{EXP} ” resultou em uma média de 1,02, com uma variação de 0,96 a 1,11. Já para o segundo nível de imperfeições (0,66t local, 1,55t distorcional e $L_{barra}/1500$ de flexão) a relação “ N_{EF}^2/N_{EXP} ” teve uma média de 1,03, e valores variando de 0,94 a 1,15.

Ao analisar os modos de instabilidade, nos ensaios experimentais de Chen et al. (2020), todos os perfis mostraram interação entre os modos local e distorcional, com o movimento das mesas “para fora”, com exceção dos perfis WFS-7 e WFS-12 que apresentaram o movimento das mesas “para dentro”. Na análise por meio da ABNT NBR 14765:2010, utilizando o MRD, todos os perfis apresentaram modo de instabilidade distorcional, assim como na análise numérica, porém, a adição de imperfeições geométricas mudou o comportamento dos perfis.

Para a situação das barras sem imperfeições geométricas, o perfil WFS-3 apresentou o modo de instabilidade local como dominante, mas ao inserir os dois níveis de imperfeições geométricas, o modo de falha se resumiu na instabilidade distorcional com o movimento das mesas “para dentro”. O perfil WFS-2 mudou o modo de instabilidade distorcional de duas para uma meia onda distorcional ao longo do comprimento ao inserir imperfeições. Os principais modos de instabilidade observados na análise numérica estão ilustrados nas Figuras 12 e 13.

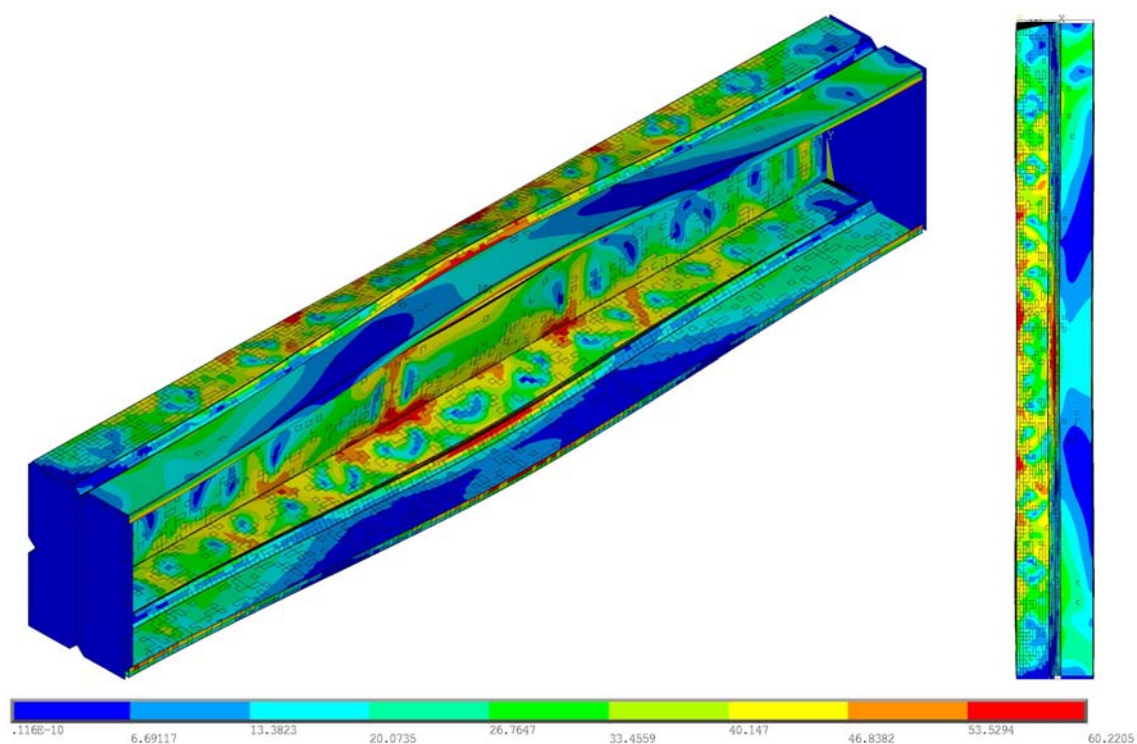


Figura 12 – Modo de instabilidade e distribuição de tensões de von Mises (WFS12 – Sem imperfeições).

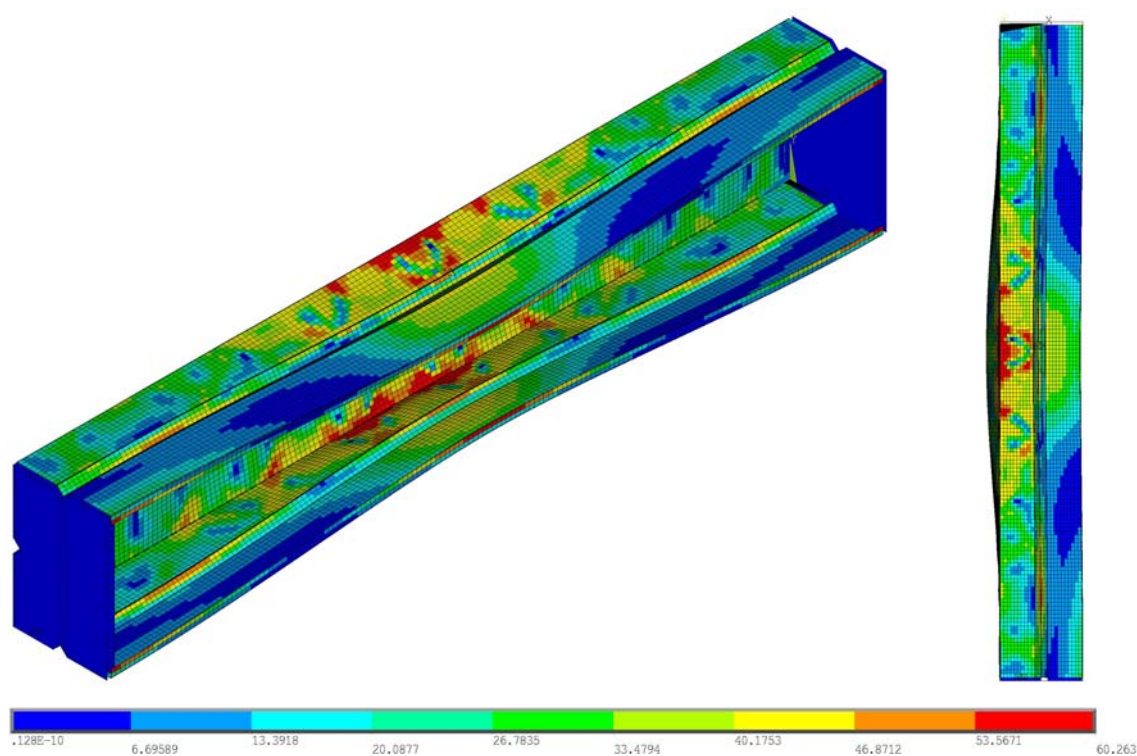


Figura 13 – Modo de instabilidade e distribuição de tensões de von Mises (WFS12 – Com imperfeições 0,66t local, 1,55t distorcional e $L_{barra}/1500$ de flexão).

7 Conclusão

A análise numérica dos perfis de aço formados a frio em seção do tipo “U enrijecido” com enrijecedores intermediários longitudinais, por meio do Método dos Elementos Finitos, se mostrou coerente para a maioria dos casos analisados, evidenciando confiabilidade e eficiência da metodologia utilizada. Os perfis com imperfeições geométricas iniciais apresentaram redução considerável na força normal resistente comparados aos perfis sem imperfeições geométricas, o que era esperado, mas se mantiveram próximos aos valores experimentais.

O procedimento de dimensionamento pelo MRD, previsto na ABNT NBR 1472:2010, obteve valores próximos aos experimentais para os perfis “WS”, mas foi conservador para os perfis “WFS”, principalmente para barras de menor comprimento. Com esses resultados, entende-se que se faz necessário uma adequação do procedimento para os casos em que ocorre interação entre os modos local e distorcional, visto que os valores de força normal resistente se apresentaram mais conservadores para os casos citados, o que limita a utilização das barras de forma eficiente.

O modo de instabilidade distorcional foi dominante nas duas abordagens, numérica e normativa, comparado aos modos local e global, indicando maior influência no comportamento das barras submetidas à compressão. Foi observado também a presença de instabilidades devido a interação local-distorcional na análise numérica, como foi verificado no estudo experimental de Chen et al. (2020).

Com isso, foi possível concluir que o programa Ansys possibilitou realizar uma análise numérica eficaz dos perfis ensaiados por Chen et al. (2020). Assim como o procedimento normativo, que apesar de não ter previsto de forma adequada a força normal resistente, se mostrou conservador.

Diante do exposto, fica evidente a importância da continuidade do estudo, através de uma análise paramétrica com a extrapolação dos resultados, de forma a complementar o conhecimento existente relacionado ao comportamento de perfis de aço formados a frio com enrijecedores intermediários longitudinais.

8 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, 2007.
- 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: user's guide for revision 13.0**. Houston. v.1, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14762: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- AUSTRALIAN/NEW ZEALAND STANDARD (AS/NZS). **AS/NZS 4600: Cold-formed steel structures**. Standards Australia, Sydney, Australia, 2005.
- AUSTRALIAN/NEW ZEALAND STANDARD (AS/NZS). **AS/NZS 4600: Cold-formed steel structures**. Standards Australia, Sydney, Australia, 2018.
- CHEN, M.; YOUNG, B.; MARTINS, A.; CAMOTIM, D.; DINIS, P. Experimental investigation on cold-formed steel stiffened lipped channel columns undergoing local-distortional interaction. **Thin-Walled Structures**, v. 150, p. 1-20, 2020.
- HE, Z.; ZHOU, X.; LIU, Z.; CHEN, M. Post-buckling behavior and DSM design of web stiffened lipped channel columns with distortional and local mode interaction. **Thin-Walled Structures**, v. 84, p. 189-203, 2014.
- HE, Z.; ZOU, B.; ZHOU, X.; LIU, Z.; LI, Z. A design criterion for identifying and designing compressive cold-formed steel members with local and distortional interactive behaviors. **Thin-Walled Structures**, v. 148, p. 1-10, 2020.
- KWON, Y.; KIM, B.; HANCOCK, G. Compression tests of high strength cold-formed steel channels with buckling interaction. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 65, p. 278-289, 2009.
- LECCE, M.; RASMUSSEN, K. J. R. Distortional buckling of cold-formed stainless-steel sections: experimental investigation. **Journal of Structural Engineering**, v. 132, n. 4, p. 497-504, 2006.
- MAIA, W. F.; VIEIRA JR, L. C. M.; SCHAFER, B. W.; 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.
- NUNES, R.; MAIA, W. Análise numérica de cantoneiras enrijecidas assimétricas de aço formadas a frio submetidas à compressão centrada. **Colloquium Exactarum**, v. 13, n. 4, p. 54-68, 2021.
- SCHAFER, B. W. **Finite strip analysis of thin-walled members**. In: CUFSM: Cornell University Finite Strip Method, 2001.
- SCHAFER, B. W. Local, distortional and euler buckling of thin-walled columns. **Journal of Structural Engineering**, v. 128, n. 3, p. 289-299, 2002.
- SCHAFER, B. W.; PEKÖZ T. **Direct strength prediction of cold-formed steel members using numerical elastic buckling solutions**. In: LaBoube R, Yu W-W, (Eds.). Proceedings of 14th international specialty conference on cold-formed steel structures, St. Louis, USA, p. 69-76, 1998.
- YAP, D. C. Y.; HANCOCK, G. J. Experimental Study of High-Strength Cold-Formed Stiffened-Web C-Sections in Compression. **Journal of the Structural Engineering**, v. 137, n. 2, p. 162-172, 2011.