



SIMULAÇÃO NUMÉRICA E DIMENSIONAMENTO DE PERFIL U COM DUPLO ENRIJECEDOR DE BORDA FORMADO A FRIO SUBMETIDO À COMPRESSÃO

NUMERICAL ANALYSIS AND DESIGN OF COLD-FORMED STEEL CHANNEL WITH COMPLEX EDGE STIFFENERS UNDER COMPRESSION

Frederico Artoni Leal Diogo¹; Wanderson Fernando Maia²

¹ Engenheiro Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP.

² Professor, Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, MG.

e-mail: fredartoni102@gmail.com; wanderson.maia@ufjf.br

RESUMO – O presente trabalho traz uma análise numérica, não-linear física e geométrica via Método dos Elementos Finitos, de perfis U com duplo enrijecedor de borda formados a frio, utilizando o programa Ansys. As simulações empregaram diferentes magnitudes de imperfeições geométricas iniciais buscando encontrar as forças críticas e os modos de instabilidade; sendo observadas predominantemente instabilidades local, distorcional e a interação entre ambas. Os resultados obtidos foram comparados com ensaios experimentais realizados por Young e Yan (2002) e com valores calculados pela ABNT NBR 14762:2010, utilizando o Método da Resistência Direta. A análise numérica se mostrou bastante eficiente, produzindo resultados muito próximos aos experimentais, evidenciando a confiabilidade do método utilizado. As imperfeições geométricas iniciais adotadas mostraram que, para uma mesma seção, não foi a mesma magnitude que produziu os melhores resultados, ressaltando a importância da sua escolha. O procedimento da ABNT NBR 14762: 2010 se mostrou conservador para seções em que predominou instabilidade local e contra a segurança para seções em que predominou instabilidade distorcional.

Palavras-chave: perfis de aço formados a frio; enrijecedores de borda; análise numérica.

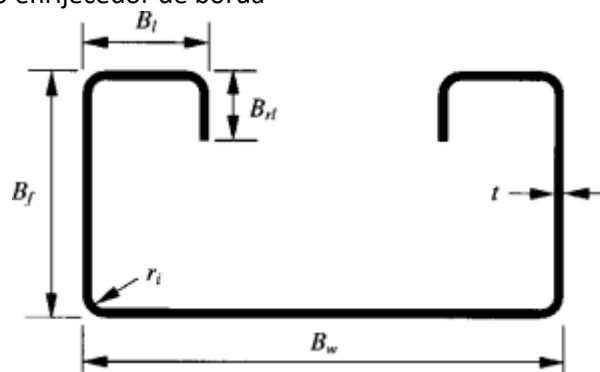
ABSTRACT – The present work brings a numerical, non-linear physical and geometric analysis using the Finite Element Method, of cold-formed steel channel with complex edge stiffeners, using the Ansys software. The simulations employed different magnitudes of initial imperfections and seeking to find the critical buckling loads and failure modes, observing local, distortional buckling and the interaction between both. The results obtained were compared with experimental tests, performed by Young e Yan (2002) and with the values proposed by the brazilian standard ABNT NBR 14762:2010, using the Direct Strength Method. The numerical analysis proved to be quite efficient, producing interesting results compared to the experimental ones, showing the reliability of this adopted method. The initial imperfections adopted showed that, for the same section, it was not the same magnitude that produced the best results, emphasizing the importance of your choice. The procedure of ABNT NBR 14762:2010 proved to be conservative for sections in which local buckling predominated and against security for sections in which the distortional buckling predominated.

Keywords: cold-formed steel; edge stiffeners; numerical analysis.

1. INTRODUÇÃO

A busca por seções cada vez mais eficientes, aliada à facilidade de fabricação dos perfis de aço formados a frio, resulta no desenvolvimento de seções cada vez mais complexas, levando à necessidade de avaliação mais criteriosa das mesmas do ponto de vista do comportamento estrutural e na busca de métodos mais simples e eficientes de dimensionamento. A utilização de enrijecedores de borda é uma técnica muito útil para alcançar maiores resistências, principalmente quanto à flambagem local, aumentando pouco o consumo de aço e resultando em ótimo custo-benefício. As normas de dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio, geralmente utilizam o tradicional Método da Largura Efetiva (MLE) para avaliar a redução da força normal resistente devido à instabilidade local. Uma desvantagem do MLE é que o procedimento se torna mais trabalhoso para seções transversais mais complexas, tais como o perfil U com duplo enrijecedor de borda (Figura 1), que é o objeto de estudo do presente trabalho

Figura 1. Seção U com duplo enrijecedor de borda



Fonte: Young e Yan (2004)

Uma análise experimental utilizando perfis U com duplo enrijecedor de borda foi realizada por Yan e Young (2002), ensaiando tais perfis à compressão centrada, variando as dimensões da seção transversal, principalmente a espessura (t) e largura das mesas (B_t), e o comprimento das barras. O estudo teve o objetivo de obter as forças críticas e os modos de falha, além de comparar com os resultados calculados segundo as normas norte americana (AISI,1996) e australiana/neozelandesa (AS/NZS 4600:1996), utilizando o Método da Largura Efetiva. Com os resultados obtidos, Yan e Young (2002) concluíram que o procedimento da AISI:1996 foi contra a segurança para o dimensionamento de perfil U com duplo enrijecedor de borda. No entanto, o procedimento da AS/NZS 4600:1996 foi conservador, exceto para uma das seções analisadas com maior esbeltez local. Ressalta-se ainda o trabalho de Wang *et al.* (2016), em que foram realizadas análises experimental e numérica de perfil U com duplo enrijecedor de borda e enrijecedor intermediário na alma. Os resultados mostraram que a inserção do duplo enrijecedor de borda aumentou em até 65% a capacidade resistente das barras.

Schafer e Peköz (1998) propuseram um procedimento de cálculo para os perfis de aço formados a frio, o Método da Resistência Direta (MRD), que apresenta muitas vantagens em relação ao tradicional MLE. O MRD considera a interação entre as chapas que compõem o perfil, o que não é feito no MLE, já que neste método cada chapa é analisada isoladamente. No MRD a análise é feita em relação às propriedades geométricas da seção bruta, não necessitando recalculas as propriedades da seção. Apresenta ainda a grande vantagem de permitir considerar explicitamente o modo distorcional, que pode ser crítico em seções com enrijecedor de borda.

A análise numérica é uma ferramenta extremamente importante que permite avaliar a eficiência de uma determinada seção de maneira rápida e econômica, permitindo a redução de ensaios experimentais, desde que o modelo desenvolvido seja confiável e capaz de representar de forma adequada o seu comportamento.

Logo, este trabalho visa contribuir para um maior domínio sobre o comportamento estrutural da seção U com duplo enrijecedor de borda submetida à compressão. Para tal, foi realizada uma análise numérica não-linear pelo Método dos Elementos Finitos, utilizando o programa Ansys. Nessa análise também foram inseridas imperfeições geométricas iniciais, visando avaliar a influência destas na força normal resistente. Os resultados da análise numérica foram comparados com os obtidos em análise

experimental realizada por Yan e Young (2002) e com resultados dos procedimentos de dimensionamento normativos, baseados no MRD, comparando não só a capacidade resistente, mas também os modos de instabilidade.

2. PREVISÃO NORMATIVA

O cálculo da força normal resistente de compressão seguiu o Método da Resistência Direta (MRD), de acordo com o anexo C da ABNT NBR 14762:2010. Nesse procedimento, calculam-se os valores de força normal resistente para os modos de flambagem global, local e distorcional, sendo o menor deles o valor adotado.

2.1. Modo global

Para o modo global, a força normal resistente de uma barra submetida à compressão centrada é calculada de acordo com a Equação (1).

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

Onde:

λ_0 é índice de esbeltez reduzido associado à flambagem global, calculado pela Equação (2).

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

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 globais aplicáveis para seção monossimétrica, conforme item 9.7.2.2 da ABNT NBR 14762:2010.

2.2. Modo local

Para o modo local, a força normal resistente de uma barra submetida à compressão centrada é calculada pela Equação (3).

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

Onde:

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

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

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

2.3. Modo distorcional

Para o modo distorcional, a força normal resistente de uma barra submetida à compressão centrada é calculada pela Equação (5).

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

Onde:

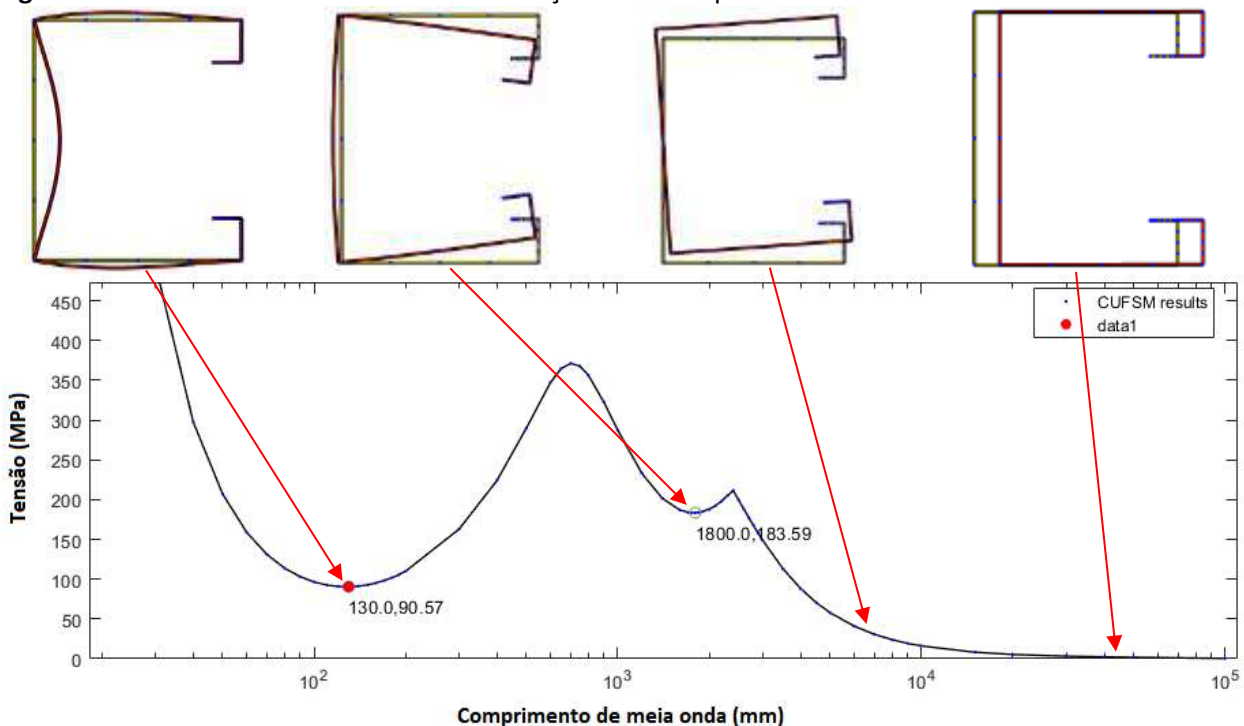
λ_{dist} é o índice de esbeltez reduzido associado à flambagem distorcional, calculado pela Equação (6).

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

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

Para obtenção dos valores de N_i e N_{dist} , foi realizada análise de estabilidade elástica no programa CUFSM, desenvolvido por Schafer (2001), que utiliza o Método das Faixas Finitas em sua formulação. O programa fornece os modos críticos de flambagem e as tensões relativas a cada um deles. A Figura 2 mostra a análise de estabilidade elástica realizada para a seção denominada T1.5F120; sendo o primeiro modo crítico apresentado o local, que ocorreu para um comprimento de 130 mm de meia onda e uma tensão de 90,57 MPa. O segundo modo crítico foi o distorcional com tensão de 183,59 MPa e comprimento de meia onda de 1800 mm. A análise identificou ainda os modos críticos globais de flexo-torção e flexão para maiores comprimentos de meia onda.

Figura 2. Análise de estabilidade elástica da seção T1.5F120 pelo CUFSM



Fonte: Os autores.

3. ANÁLISE EXPERIMENTAL

Yan e Young (2002) realizaram um conjunto de 30 (trinta) ensaios à compressão centrada de perfis U com duplo enrijecedor de borda. As seções foram fabricadas com chapas de aço de alta resistência, revestidas com zinco, sendo sua resistência ao escoamento nominal de 450 MPa. As barras foram ensaiadas com comprimento variando de 500 a 3500 mm. Nas extremidades foram soldadas chapas com 25 mm de espessura para garantir o pleno contato entre as barras e o dispositivo de aplicação da carga. Todos os ensaios foram realizados com as extremidades engastadas.

O programa experimental consistiu em quatro diferentes séries de seções transversais. As quatro séries foram nomeadas como se segue: T1.5F80, T1.5F120, T1.9F80 e T1.9F120 de acordo com a sua espessura nominal e largura da mesa, onde "T" se refere à espessura e "F" refere-se à mesa. Os números seguintes às letras "T" e "F" são espessura nominal e largura nominal da mesa, respectivamente. O raio interno de dobra medido (r_i) foi de 2,0 mm para todas as seções ensaiadas. A Tabela 1 mostra os valores médios das dimensões das seções ensaiadas. Para caracterização das chapas utilizadas na fabricação das barras foram realizados ensaios de tração de acordo com a norma Australiana (AS 1391:1991). Os resultados médios obtidos para cada uma das séries estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 1. Média das dimensões obtidas nas séries ensaiadas

Série	B _w (mm)	B _f (mm)	B _l (mm)	B _{rl} (mm)	t (mm)
T1.5F80	153,6	83,5	28,0	17,6	1,482
T1.5F120	153,4	123,8	28,1	17,4	1,478
T1.9F80	154,7	83,4	28,4	18,8	1,884
T1.9F120	155,1	123,3	28,2	18,9	1,871

Dimensões conforme Figura 1.

B_w é a altura da alma. B_f é a largura da mesa. B_l é a dimensão do primeiro enrijecedor de borda. B_{rl} é a dimensão do segundo enrijecedor de borda. t é a espessura do perfil. r_i é o raio interno de dobra, cujo valor medido foi de 2 mm para todas as seções.

Fonte: Adaptado de Yan e Young (2002)

Tabela 2. Propriedades mecânicas médias dos aços utilizados

Série	Nominal	Medido			
	f _y (MPa)	f _y (MPa)	E (GPa)	f _u (MPa)	ε _u (%)
T1.5F80	450	522	204	554	10
T1.5F120	450	507	208	550	10
T1.9F80	450	482	206	528	11
T1.9F120	450	496	199	539	10

f_y é a resistência ao escoamento do aço. E é o módulo de elasticidade do aço. f_u é a resistência à ruptura do aço. ε_u é o alongamento na ruptura.

Fonte: Adaptado de Yan e Young (2002)

Nas Tabelas 3 a 6 são apresentados os resultados dos ensaios experimentais obtidos por Yan e Young (2002) comparados com os calculados de acordo com as normas AISI:1996 e AS/NZS 4600:1996. Vale ressaltar que os procedimentos das duas normas são idênticos, exceto pelo fato que a AS/NZS 4600:1996 apresenta uma verificação adicional para instabilidade por distorção. A nomenclatura das barras seguiu àquela já apresentada para cada uma das séries, sendo acrescentado a letra "L" e o comprimento nominal da barra. Em alguns casos, ainda aparecem os números 1, 2 ou 3 que indicam a repetição de ensaios para um mesmo comprimento. Por exemplo, a nomenclatura "T1.5F120L0500-3" define a barra pertencente à série T1.5F120 com um comprimento nominal de 500 mm sendo o terceiro ensaio realizado para o comprimento.

Tabela 3. Comparação dos resultados experimentais com os obtidos pelas normas AISI:1996 e AS/NZS 4600: 1996 – Série T1.5F80

Barra	N _{EXP} (kN)	Modo de falha	Normas		Comparação	
			N _{AISI} (kN)	N _{AS/NZS} (kN)	N _{EXP} /N _{AISI}	N _{EXP} /N _{AS/NZS}
T1.5F80L500	172,0	L	183,2	155,4	0,94	1,11
T1.5F80L1000	166,9	L+D	179,0	155,4	0,93	1,07
T1.5F80L1500	163,4	L+D	172,2	155,4	0,95	1,05
T1.5F80L2000	161,7	L+D	163,1	155,4	0,99	1,04
T1.5F80L2500	158,8	L+FT	152,1	152,1	1,04	1,04
T1.5F80L3000	154,8	L+FT	139,3	139,3	1,11	1,11
T1.5F80L3500	124,4	L+FT	125,6	125,6	0,99	0,99

N_{EXP} é a força normal obtida no ensaio experimental. N_{AISI} é a força normal obtida pela norma AISI:1996. N_{AS/NZS} é a força normal obtida pela norma AS/NZS 4600:1996. L é o modo de instabilidade local. D é o modo de instabilidade por distorção. FT é o modo de instabilidade por flexo-torção.

Fonte: Adaptado de Yan e Young (2002)

Tabela 4. Comparação dos resultados experimentais com os obtidos pelas normas AISI:1996 e AS/NZS 4600:1996 – Série T1.5F120

Barra	N _{EXP} (kN)	Modo de falha	Normas		Comparação	
			N _{AISI} (kN)	N _{AS/NZS} (kN)	N _{EXP} /N _{AISI}	N _{EXP} /N _{AS/NZS}
T1.5F120L500-1	168,9	L	184,6	158,9	0,91	1,06
T1.5F120L500-2	166,9	L	184,6	158,9	0,90	1,05
T1.5F120L500-3	164,9	L	184,6	158,9	0,89	1,04
T1.5F120L1000	159,3	L+D	181,0	158,9	0,88	1,00
T1.5F120L1500	145,7	L+D	175,1	158,9	0,83	0,92
T1.5F120L2000	139,5	L+D	167,2	158,9	0,83	0,88
T1.5F120L3000	131,3	L+D+FT	146,1	146,1	0,90	0,90
T1.5F120L3500	127,4	L+FT	133,7	133,7	0,95	0,95

N_{EXP} é a força normal obtida no ensaio experimental. N_{AISI} é a força normal obtida pela norma AISI:1996. N_{AS/NZS} é a força normal obtida pela norma AS/NZS 4600:1996. L é o modo de instabilidade local. D é o modo de instabilidade por distorção. FT é o modo de instabilidade por flexo-torção.

Fonte: Adaptado de Yan e Young (2002)

Tabela 5. Comparação dos resultados experimentais com os obtidos pelas normas AISI:1996 e AS/NZS 4600:1996 – Série T1.9F80

Barra	N _{EXP} (kN)	Modo de falha	Normas		Comparação	
			N _{AISI} (kN)	N _{AS/NZS} (kN)	N _{EXP} /N _{AISI}	N _{EXP} /N _{AS/NZS}
T1.9F80L500	238,5	L	253,1	234,8	0,94	1,02
T1.9F80L1000	236,3	L+D	247,5	234,8	0,95	1,01
T1.9F80L1500	233,3	L+D	238,5	234,8	0,98	0,99
T1.9F80L2000	232,4	L+D+FT	226,5	226,5	1,03	1,03
T1.9F80L2500	224,4	L+FT	212,0	212,0	1,06	1,06
T1.9F80L3000	198,7	L+FT	195,6	195,6	1,02	1,02
T1.9F80L3500	183,9	L+FT	177,8	177,8	1,03	1,03

N_{EXP} é a força normal obtida no ensaio experimental. N_{AISI} é a força normal obtida pela norma AISI:1996. N_{AS/NZS} é a força normal obtida pela norma AS/NZS 4600:1996. L é o modo de instabilidade local. D é o modo de instabilidade por distorção. FT é o modo de instabilidade por flexo-torção.

Fonte: Adaptado de Yan e Young (2002)

Tabela 6. Comparação dos resultados experimentais com os obtidos pelas normas AISI:1996 e AS/NZS 4600:1996 – Série T1.9F120

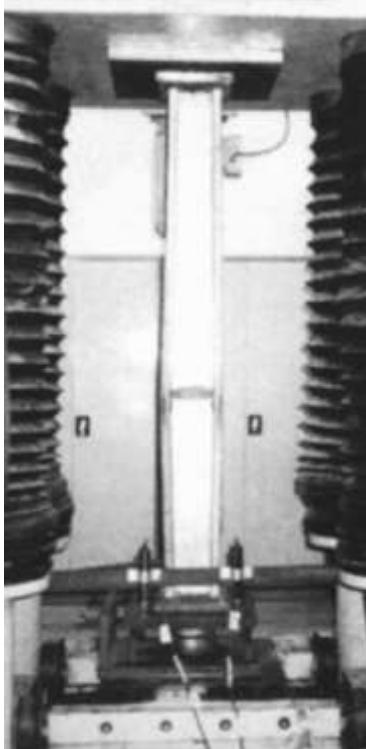
Barra	N _{EXP} (kN)	Modo de falha	Normas		Comparação	
			N _{AISI} (kN)	N _{AS/NZS} (kN)	N _{EXP} /N _{AISI}	N _{EXP} /N _{AS/NZS}
T1.9F120L500-1	233,7	L+D	262,7	215,7	0,89	1,08
T1.9F120L500-2	239,7	L+D	262,7	215,7	0,91	1,11
T1.9F120L1000	231,2	L+D	257,3	215,7	0,90	1,07
T1.9F120L1500	227,3	L+D	248,5	215,7	0,91	1,05
T1.9F120L2000	225,2	L+D	236,8	215,7	0,95	1,04
T1.9F120L2500	220,2	L+D+FT	222,6	215,7	0,99	1,02
T1.9F120L3000	209,4	L+FT	206,5	206,5	1,01	1,01
T1.9F120L3500	194,6	L+FT	189,0	189,0	1,03	1,03

N_{EXP} é a força normal obtida no ensaio experimental. N_{AISI} é a força normal obtida pela norma AISI:1996. N_{AS/NZS} é a força normal obtida pela norma AS/NZS 4600:1996. L é o modo de instabilidade local. D é o modo de instabilidade por distorção. FT é o modo de instabilidade por flexo-torção.

Fonte: Adaptado de Yan e Young (2002)

Como exemplo, a Figura 3 ilustra a configuração de duas barras ensaiadas, bem como os modos de instabilidade observados. Em geral, a combinação de instabilidade local e por distorção foi observada em barras curtas e intermediárias (500 mm a 2000 mm), enquanto em barras mais longas (acima de 2000 mm) observou-se a combinação de instabilidade local e por flexo-torção. No entanto, modos isolados e outras combinações também foram observados. A instabilidade por distorção não foi observada em barras mais curtas (500 mm) para as séries T1.5F80, T1.5F120 e T1.9F80. A instabilidade por flexo-torção foi observada na barra T1.9F80L2000, ou seja, uma barra intermediária. A instabilidade por distorção também foi observada em barras mais longas (T1.5F120L3000 e T1.9F120L2500).

Figura 3. Configuração das barras ensaiadas e modos de instabilidade observados



(a) Instabilidade local e por distorção da barra T1.9F80L1500



(b) Instabilidade local e por flexo-torção da barra T1.9F80L3000

Fonte: Yan e Young (2002)

Para a série T1.5F80, o procedimento do AISI:1996 superestimou as forças resistentes obtidas pelos ensaios experimentais para as barras curtas e intermediárias (500 mm a 2000 mm), como mostra a Tabela 3. Por outro lado, subestimou as forças dos ensaios das barras longas, exceto para a barra de comprimento de 3500 mm, que foi ligeiramente superestimada. As forças obtidas pela AS/NZS 4600:1996 foram conservadoras para todas as barras, exceto para a barra mais longa que foi ligeiramente superestimada.

Para a Série T1.5F120, o procedimento da AISI:1996 superestimou as forças resistentes de todas as barras, como mostra a Tabela 4. O procedimento da AS/NZS 4600:1996 superestimou as forças resistentes de barras intermediárias e longas, mas subestimou ligeiramente os resultados para barras curtas.

Para a série T1.9F80, a AISI:1996 superestimou as forças resistentes dos ensaios de barras curtas e intermediárias, exceto para a barra de comprimento de 2000 mm que foi ligeiramente subestimado, como mostra a Tabela 5. No entanto, o procedimento subestimou ligeiramente as forças resistentes das barras longas. O procedimento da AS/NZS 4600:1996 foi ligeiramente conservador, exceto para a barra de 1500 mm.

Para a série T1.9F120, o procedimento da AISI:1996 superestimou as forças dos ensaios das barras curtas e intermediárias, como mostra a Tabela 6, no entanto, o procedimento subestimou os resultados de barras longas, exceto para o comprimento de 2500 mm, que foi ligeiramente superestimado. O procedimento da AS/NZS 4600:1996 subestimou ligeiramente as forças dos ensaios de todas as barras.

Com os resultados obtidos, Yan e Young (2002) concluíram que o procedimento do AISI (1996) foi contra a segurança no dimensionamento de perfil U com duplo enrijecedor de borda. No entanto, o procedimento da AS/NZS 4600:1996 foi conservador no geral, exceto para a série T1.5F120, em que as seções apresentam maior esbeltez local.

Com relação aos modos de falha observados nos ensaios, estes foram coerentes com a AISI:1996 para barras longas, no entanto, não foram para barras curtas e intermediárias. Em contrapartida, todos os modos de instabilidade observados nos ensaios foram coerentes com aqueles previstos pela AS/NZS 4600:1996. Diante disso, os autores concluíram que seções U com duplo enrijecedor de borda submetidos à compressão centrada deveriam ser dimensionados utilizando o procedimento da AS/NZS 4600:1996.

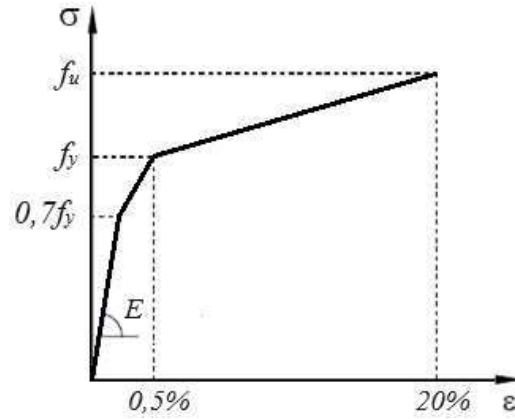
4. ANÁLISE NUMÉRICA

Foi aplicado o Método dos Elementos Finitos para as simulações numéricas, utilizando o programa Ansys. O estudo consistiu em analisar numericamente as mesmas seções ensaiadas experimentalmente por Yan e Young (2002). Foi escolhido para a análise um elemento de casca, por simular bem perfis de aço formados a frio, sendo o SHELL 181 o elemento utilizado. A malha foi composta por elementos aproximados quadrados com 1,0 cm de lado, exceto os cantos arredondados, que foram divididos em dois elementos ao longo da largura. A malha foi aplicada ao perfil e às chapas de extremidade, chapas estas que também estavam presentes no ensaio experimental.

Na simulação aplicou-se a ferramenta “Automatic Load Stepping” do Ansys, para reproduzir o incremento automático de força/deslocamento do ensaio, introduzindo limites superior e inferior de incrementos. Na análise foi aplicado deslocamento, obtendo como resposta a força normal resistente. O método numérico de cálculo utilizado foi o “Newton-Raphson Completo”, sendo um método iterativo e incremental, que a cada iteração atualiza a matriz de rigidez tangente. A precisão da solução dos cálculos das simulações foi verificada conforme critério de convergência de deslocamentos, adotando 0,1% de tolerância, valor padrão do Ansys.

A não-linearidade do material foi representada pelo modelo trilinear, como indicado na Figura 4, que já se mostrou muito eficiente nos trabalhos de Rocha e Maia (2019), Macedo e Maia (2020) e Nunes e Maia (2022).

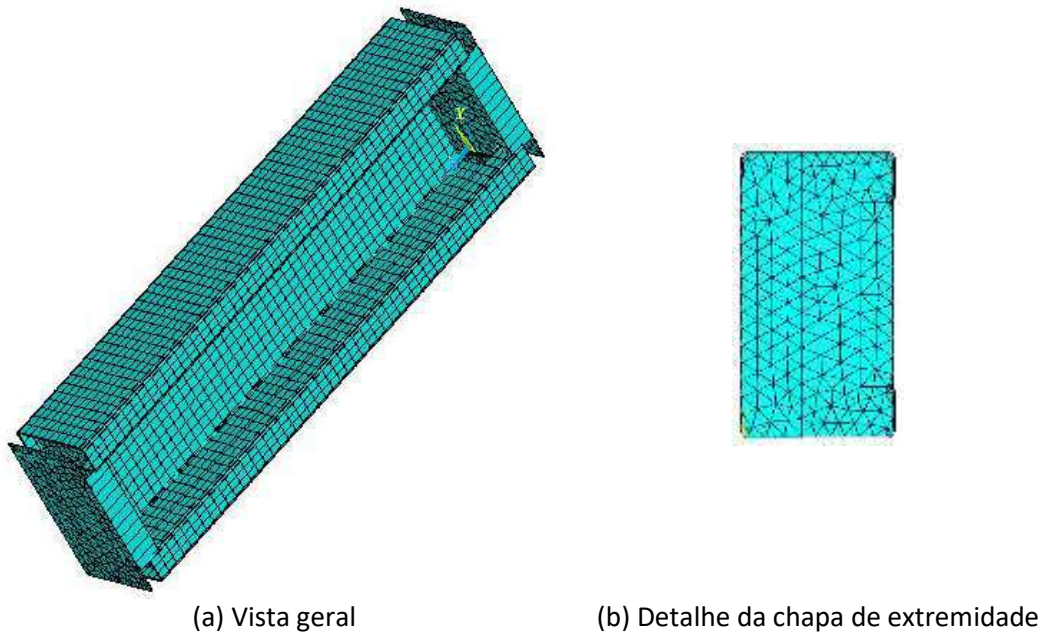
Figura 4. Curva tensão x deformação: modelo aproximado trilinear



Fonte: Adaptado de Maia (2008)

Na modelagem numérica engastou-se o perfil nas chapas de extremidade, restringindo-se deslocamentos e rotações de todos os nós nesta região nas três direções (x, y e z), permitindo apenas o deslocamento longitudinal em uma das extremidades, sendo a extremidade de aplicação dos deslocamentos. Nesse caso, foi utilizado o conceito de nó mestre, tomando um nó de referência na seção de extremidade, assim aplicando o deslocamento ao nó mestre e garantindo o igual comportamento aos demais. A Figura 5 ilustra umas das barras modeladas no programa Ansys.

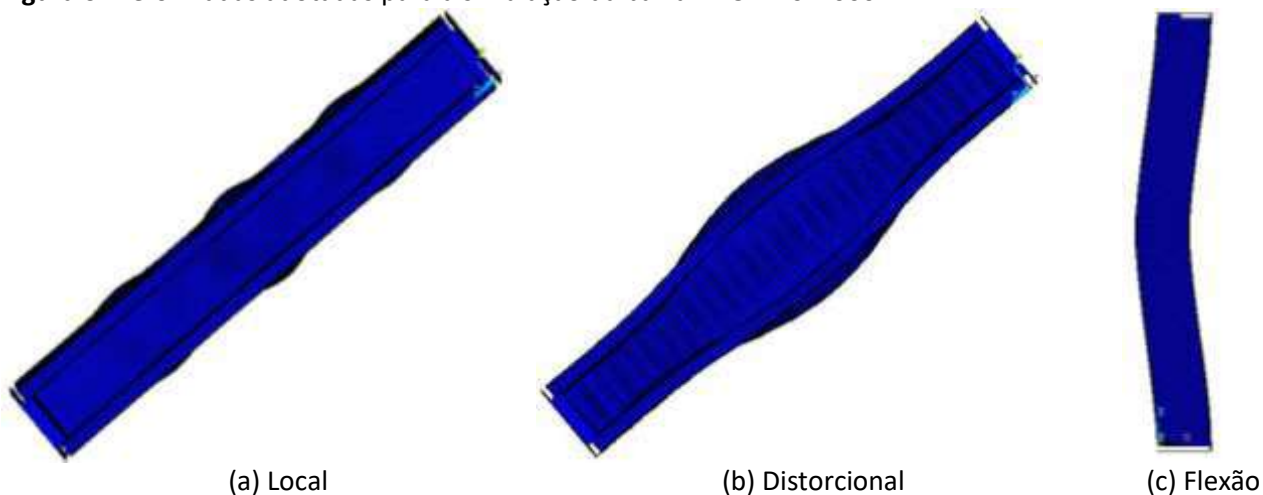
Figura 5. Modelagem de uma barra no Ansys



Fonte: Os autores.

O procedimento adotado para gerar as imperfeições geométricas iniciais foi o mesmo já utilizado por Chodraui (2006), Maia *et al.* (2016), Rocha e Maia (2019) e Nunes e Maia (2022), que consistiu em realizar uma análise linear do modelo, na qual o Ansys fornece um autovalor (força crítica) e um autovetor (deformada). Foram identificadas e adotadas deformadas referentes aos modos local, distorcional e global de flexão, conforme apresentadas na Figura 6.

Figura 6. Deformadas adotadas para a simulação da barra T1.5F120L1000



Fonte: Os autores.

Três magnitudes de imperfeições foram adotadas nas simulações, sendo a primeira sem imperfeições; a segunda de Magnitude 1, com valores $0,14t$ (local) e $0,64t$ (distorcional) e a terceira de Magnitude 2, com $0,66t$ (local) e $1,55t$ (distorcional), sendo “ t ” a espessura da seção. Para imperfeição global de flexão foi adotado o valor de $L_{\text{barra}}/1500$, sendo “ L_{barra} ” o comprimento da barra. Os valores de imperfeições iniciais referentes aos modos local e distorcional foram adotados com base no estudo de Schafer e Peköz (1998), conforme Tabela 7.

Tabela 7. Análise probabilística para imperfeições tipos 1 e 2

$P (\Delta > d)$	Tipo 1 d_1/t	Tipo 2 d_2/t
0,75	0,14	0,64
0,50	0,34	0,94
0,25	0,66	1,55
0,05	1,35	3,44
0,01	3,87	4,47

Fonte: Adaptado de Schafer e Peköz (1998)

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Tabelas 8 a 15 são apresentados os resultados da análise numérica comparados com os obtidos nos ensaios experimentais de Yan e Young (2002) e os calculados de acordo com a ABNT NBR 14762:2010 pelo MRD.

Tabela 8. Comparação dos resultados da análise numérica com os obtidos experimentalmente por Yan e Young (2002) e da ABNT NBR 14762:2010: série T1.5F80

L_{barra} (mm)	N_{Exp} (kN)	$N_{\text{C,Rk}}$ (kN)	$N_{\text{Exp}}/N_{\text{C,Rk}}$	N_{EF}^0 (kN)	$N_{\text{Exp}}/N_{\text{EF}}^0$	N_{EF}^1 (kN)	$N_{\text{Exp}}/N_{\text{EF}}^1$	N_{EF}^2 (kN)	$N_{\text{Exp}}/N_{\text{EF}}^2$
T1.5F80L500	172,0	142,5	1,21	205,0	0,84	156,6	1,10	153,4	1,12
T1.5F80L1000	166,9	139,5	1,20	155,6	1,07	155,1	1,08	152,3	1,10
T1.5F80L1500	163,4	134,6	1,21	157,7	1,04	154,6	1,06	154,6	1,06
T1.5F80L2000	161,7	128,2	1,26	154,4	1,05	151,5	1,07	148,1	1,09
T1.5F80L2500	158,8	120,2	1,32	153,3	1,04	147,8	1,07	147,2	1,08
T1.5F80L3000	154,8	111,1	1,39	151,8	1,02	146,5	1,06	145,2	1,07
T1.5F80L3500	124,4	101,3	1,23	147,0	0,85	140,9	0,88	141,9	0,88
Média			1,26		0,99		1,05		1,06

N_{Exp} é a força normal crítica experimental obtida por Yan e Young (2002). $N_{\text{C,Rk}}$ é a força normal resistente característica segundo a ABNT NBR 14762:2010 pelo MRD. N_{EF}^0 é a força normal resistente da análise numérica sem imperfeições. N_{EF}^1 é a força normal resistente da análise numérica com imperfeições de Magnitude 1: 0,14t (L); 0,64t (D) e $L_{\text{barra}}/1500$ (F). N_{EF}^2 é a força normal resistente da análise numérica com imperfeições de Magnitude 2: 0,66t (L); 1,55t (D) e $L_{\text{barra}}/1500$ (F).

Fonte: Os autores

Tabela 9. Comparação dos modos de instabilidade da análise numérica com os obtidos experimentalmente por Yan e Young (2002) e da ABNT NBR 14762:2010: série T1.5F80

L_{barra} (mm)	Experimental	ABNT NBR 14762:2010	Sem imperfeições	Imperfeições Magnitude 1	Imperfeições Magnitude 2
T1.5F80L500	L	L+FT	L	L	L
T1.5F80L1000	L+D	L+FT	L	L	L+D
T1.5F80L1500	L+D	L+FT	L	L	L+D
T1.5F80L2000	L+D	L+FT	L	L+D	L+D
T1.5F80L2500	L+FT	L+FT	L	L+D	L+D
T1.5F80L3000	L+FT	L+FT	L	L+D	L+D
T1.5F80L3500	L+FT	L+FT	L	L+D	L+D

L é o modo de instabilidade local. D é o modo de instabilidade por distorção. FT é o modo de instabilidade por flexo-torção.

Fonte: Os autores.

Tabela 10. Comparação dos resultados da análise numérica com os obtidos experimentalmente por Yan e Young (2002) e da ABNT NBR 14762:2010: série T1.5F120

L_{barra} (mm)	N_{Exp} (kN)	$N_{\text{C,Rk}}$ (kN)	$N_{\text{Exp}}/N_{\text{C,Rk}}$	N_{EF}^0 (kN)	$N_{\text{Exp}}/N_{\text{EF}}^0$	N_{EF}^1 (kN)	$N_{\text{Exp}}/N_{\text{EF}}^1$	N_{EF}^2 (kN)	$N_{\text{Exp}}/N_{\text{EF}}^2$
T1.5F80L500-1	168,9		1,01		0,96		1,09		1,12
T1.5F80L500-2	166,9	167,1	1,00	176,6	0,95	154,3	1,08	151,2	1,10
T1.5F80L500-3	164,9		0,99		0,93		1,07		1,09
T1.5F80L1000	159,3	164,1	0,97	169,0	0,94	145,2	1,10	138,3	1,15
T1.5F80L1500	145,7	159,3	0,91	163,2	0,89	141,2	1,03	135,5	1,08
T1.5F80L2000	139,5	152,8	0,91	163,8	0,85	137,9	1,01	132,5	1,05
T1.5F80L3000	131,3	135,6	0,97	140,0	0,94	131,7	1,00	124,0	1,06
T1.5F80L3500	127,4	125,4	1,02	137,5	0,93	130,1	0,98	123,7	1,03
Média			0,97		0,92		1,05		1,09

N_{Exp} é a força normal crítica experimental obtida por Yan e Young (2002). $N_{\text{C,Rk}}$ é a força normal resistente característica segundo a ABNT NBR 14762:2010 pelo MRD. N_{EF}^0 é a força normal resistente da análise numérica sem imperfeições. N_{EF}^1 é a força normal resistente da análise numérica com imperfeições de Magnitude 1: 0,14t (L); 0,64t (D) e $L_{\text{barra}}/1500$ (F). N_{EF}^2 é a força normal resistente da análise numérica com imperfeições com Magnitude 2: 0,66t (L); 1,55t (D) e $L_{\text{barra}}/1500$ (F).

Fonte: Os autores.

Tabela 11. Comparação dos modos de instabilidade da análise numérica com os obtidos experimentalmente por Yan e Young (2002) e da ABNT NBR 14762:2010: série T1.5F120

L_{barra} (mm)	Experimental	ABNT NBR 14762:2010	Sem imperfeições	Imperfeições Magnitude 1	Imperfeições Magnitude 2
T1.5F120L500-1	L	L+FT	L	L	L
T1.5F120L500-2	L	L+FT	L	L	L
T1.5F120L500-3	L	L+FT	L	L	L
T1.5F120L1000	L+D	L+FT	L	L+D	L+D
T1.5F120L1500	L+D	L+FT	L+D	L+D	L+D
T1.5F120L2000	L+D	L+FT	L+D	L+D	L+D
T1.5F120L3000	L+D+FT	L+FT	L	L+D	L+D
T1.5F120L3500	L+FT	L+FT	L	L+D	L+D+F

L é o modo de instabilidade local. D é o modo de instabilidade por distorção. FT é o modo de instabilidade por flexo-torção. F é o modo de instabilidade por flexão.

Fonte: Os autores.

Tabela 12. Comparação dos resultados da análise numérica com os obtidos experimentalmente por Yan e Young (2002) e da ABNT NBR 14762:2010: série T1.9F80

L_{barra} (mm)	N_{Exp} (kN)	$N_{\text{C,Rk}}$ (kN)	$N_{\text{Exp}}/N_{\text{C,Rk}}$	N_{EF}^0 (kN)	$N_{\text{Exp}}/N_{\text{EF}}^0$	N_{EF}^1 (kN)	$N_{\text{Exp}}/N_{\text{EF}}^1$	N_{EF}^2 (kN)	$N_{\text{Exp}}/N_{\text{EF}}^2$
T1.9F80L500	238,5	200,8	1,19	280,9	0,85	218,6	1,09	216,2	1,10
T1.9F80L1000	236,3	196,8	1,20	221,4	1,07	216,3	1,09	208,0	1,14
T1.9F80L1500	233,3	190,3	1,23	220,2	1,06	212,5	1,10	205,8	1,13
T1.9F80L2000	232,4	181,5	1,28	210,4	1,10	205,6	1,13	198,3	1,17
T1.9F80L2500	224,4	170,8	1,31	206,5	1,09	198,1	1,13	189,6	1,18
T1.9F80L3000	198,7	158,7	1,25	204,7	0,97	199,4	1,00	197,3	1,01
T1.9F80L3500	183,9	145,6	1,26	196,8	0,93	184,7	1,00	183,7	1,00
Média			1,25		1,01		1,08		1,10

N_{Exp} é a força normal crítica experimental obtida por Yan e Young (2002). $N_{\text{C,Rk}}$ é a força normal resistente característica segundo a ABNT NBR 14762:2010 pelo MRD. N_{EF}^0 é a força normal resistente da análise numérica sem imperfeições. N_{EF}^1 é a força normal resistente da análise numérica com imperfeições de Magnitude 1: 0,14t (L); 0,64t (D) e $L_{\text{barra}}/1500$ (F). N_{EF}^2 é a força normal resistente da análise numérica com imperfeições de Magnitude 2: 0,66t (L); 1,55t (D) e $L_{\text{barra}}/1500$ (F).

Fonte: Os autores

Tabela 13. Comparação dos modos de instabilidade da análise numérica com os obtidos experimentalmente por Yan e Young (2002) e da ABNT NBR 14762:2010: série T1.9F80

L_{barra} (mm)	Experimental	ABNT NBR 14762:2010	Sem imperfeições	Imperfeições Magnitude 1	Imperfeições Magnitude 2
T1.9F80L500	L	L+FT	L	L	L
T1.9F80L1000	L+D	L+FT	L	L+D	L+D
T1.9F80L1500	L+D	L+FT	L	L+D	L+D
T1.9F80L2000	L+D+FT	L+FT	L+D	L+D	L+D
T1.9F80L2500	L+FT	L+FT	L	L+D	L+D
T1.9F80L3000	L+FT	L+FT	L	L+D+F	L+D
T1.9F80L3500	L+FT	L+FT	L	L+D+F	L+D+F

L é o modo de instabilidade local. D é o modo de instabilidade por distorção. FT é o modo de instabilidade por flexo-torção. F é o modo de instabilidade por flexão.

Fonte: Os autores.

Tabela 14. Comparação dos resultados da análise numérica com os obtidos experimentalmente por Yan e Young (2002) e da ABNT NBR 14762:2010: série T1.9F120

L_{barra} (mm)	N_{Exp} (kN)	$N_{C,Rk}$ (kN)	$N_{\text{Exp}}/$ $N_{C,Rk}$	N_{EF}^0 (kN)	$N_{\text{Exp}}/$ N_{EF}^0	N_{EF}^1 (kN)	$N_{\text{Exp}}/$ N_{EF}^1	N_{EF}^2 (kN)	N_{Exp}/N_{EF}^2
T1.9F120L500-1	233,7		1,02		0,83		1,08		1,12
T1.9F120L500-2	239,7	229,0	1,05	280,4	0,85	215,6	1,11	209,4	1,14
T1.9F120L1000	231,2	229,0	1,01	221,3	1,04	207,8	1,11	198,8	1,16
T1.9F120L1500	227,3	223,1	1,02	217,9	1,04	200,0	1,14	187,7	1,21
T1.9F120L2000	225,2	211,0	1,07	223,4	1,01	200,3	1,12	190,3	1,18
T1.9F120L2500	220,2	196,3	1,12	210,0	1,05	200,7	1,10	190,8	1,15
T1.9F120L3000	209,4	179,8	1,16	214,3	0,98	198,0	1,06	185,8	1,13
T1.9F120L3500	194,6	162,0	1,20	204,0	0,95	193,3	1,01	180,9	1,08
Média			1,08		0,97		1,09		1,15

N_{Exp} é a força normal crítica experimental obtida por Yan e Young (2002). $N_{C,Rk}$ é a força normal resistente característica segundo a ABNT NBR 14762:2010 pelo MRD. N_{EF}^0 é a força normal resistente da análise numérica sem imperfeições. N_{EF}^1 é a força normal resistente da análise numérica com imperfeições de Magnitude 1: 0,14t (L); 0,64t (D) e $L_{\text{barra}}/1500$ (F). N_{EF}^2 é a força normal resistente da análise numérica com imperfeições de Magnitude 2: 0,66t (L); 1,55t (D) e $L_{\text{barra}}/1500$ (F).

Fonte: Os autores.

Tabela 15. Comparação dos modos de instabilidade da análise numérica com os obtidos experimentalmente por Yan e Young (2002) e da ABNT NBR 14762:2010: série T1.9F120

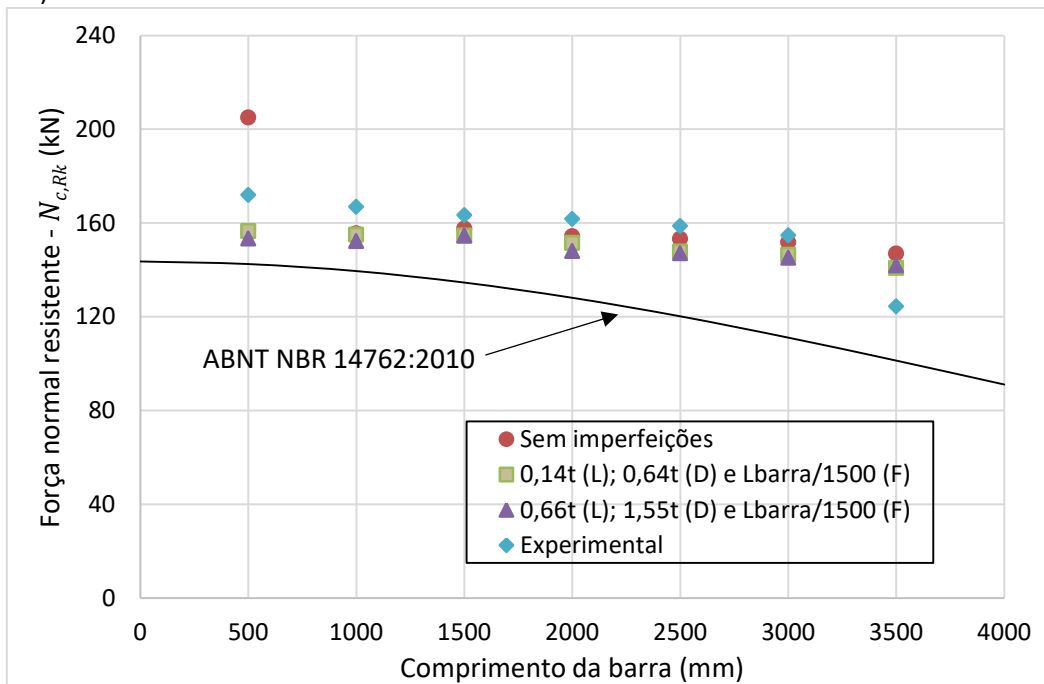
L_{barra} (mm)	Experimental	ABNT NBR 14762:2010	Sem imperfeições	Imperfeições Magnitude 1	Imperfeições Magnitude 2
T1.9F120L500-1	L+D	D	L	L+D	L+D
T1.9F120L500-2	L+D	D	L	L+D	L+D
T1.9F120L1000	L+D	D	L+D	L+D	L+D
T1.9F120L1500	L+D	L+FT	L+D	L+D	L+D
T1.9F120L2000	L+D	L+FT	L	L+D	L+D
T1.9F120L2500	L+D+FT	L+FT	L	L+D	L+D+F
T1.9F120L3000	L+FT	L+FT	L	L+D+F	L+D+F
T1.9F120L3500	L+FT	L+FT	L	L+D	L+D+F

L é o modo de instabilidade local. D é o modo de instabilidade por distorção. FT é o modo de instabilidade por flexo-torção. F é o modo de instabilidade por flexão.

Fonte: Os autores.

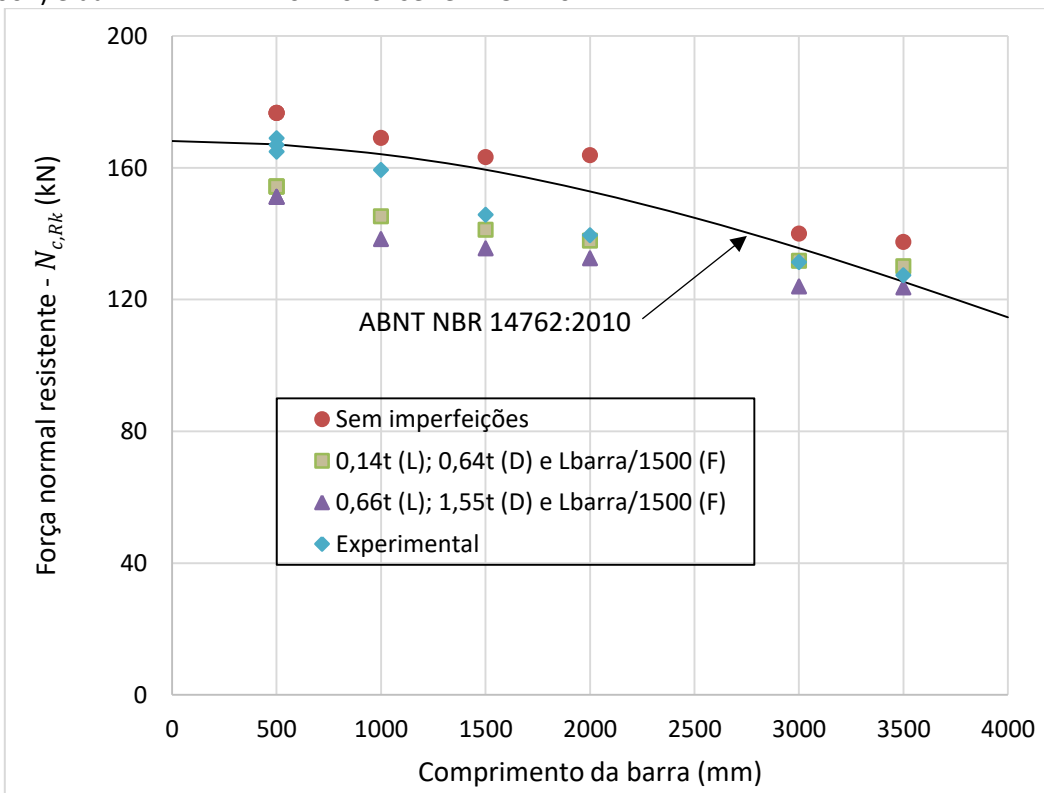
As Figuras 7 a 10 ilustram os resultados comparativos entre os modelos analisados numericamente, os valores experimentais de Yan e Young (2002) e os obtidos pela ABNT NBR 14762:2010 utilizando o Método da Resistência Direta.

Figura 7. Comparação dos resultados da análise numérica com os obtidos experimentalmente por Yan e Young (2002) e da ABNT NBR 14762:2010: série T1.5F80



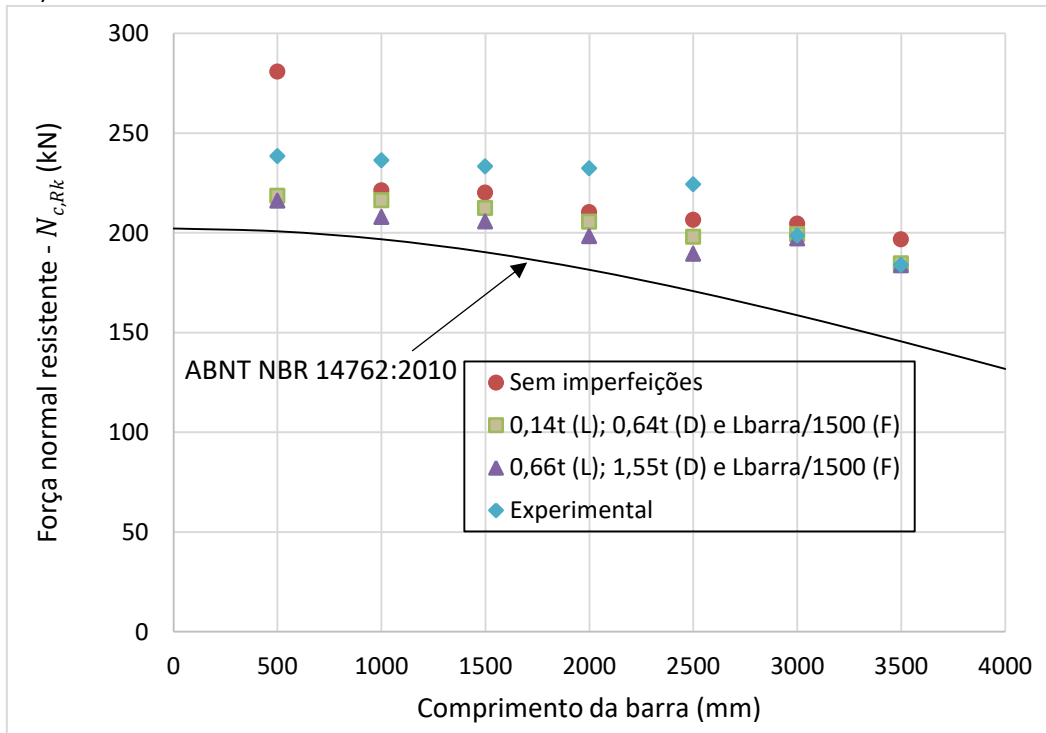
Fonte: Os autores.

Figura 8. Comparação dos resultados da análise numérica com os obtidos experimentalmente por Yan e Young (2002) e da ABNT NBR 14762:2010: série T1.5F120



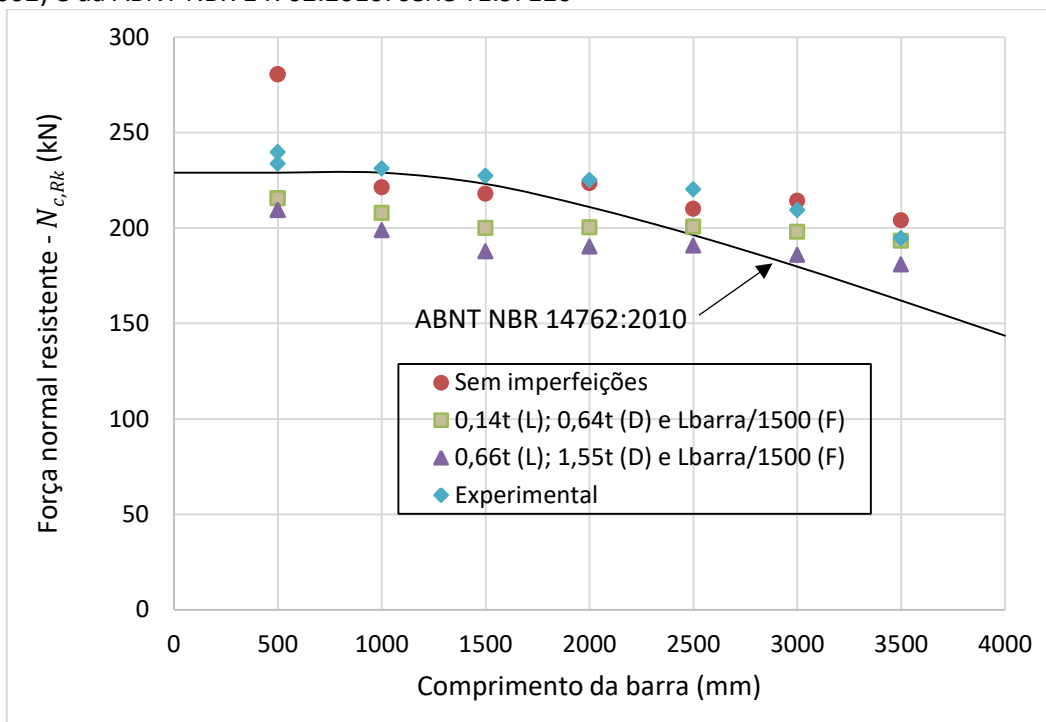
Fonte: Os autores.

Figura 9. Comparação dos resultados da análise numérica com os obtidos experimentalmente por Yan e Young (2002) e da ABNT NBR 14762:2010: série T1.9F80



Fonte: Os autores.

Figura 10. Comparação dos resultados da análise numérica com os obtidos experimentalmente por Yan e Young (2002) e da ABNT NBR 14762:2010: série T1.9F120



Fonte: Os autores.

Para a seção T1.5F80, a ABNT NBR 14762:2010 se mostrou ligeiramente conservadora em comparação aos resultados das análises experimental e numérica (Figura 7). A relação " $N_{EXP}/N_{c,RK}$ " variou de 1,20 a 1,39 com média de 1,26 (Tabela 8). Com relação à análise numérica, a inserção de imperfeições geométricas iniciais pouco influenciou os resultados. As relações " N_{EXP}/N_{EF} " foram de 0,99, 1,05 e 1,06 para os modelos sem imperfeições, com imperfeições Magnitude 1 e com imperfeições Magnitude 2,

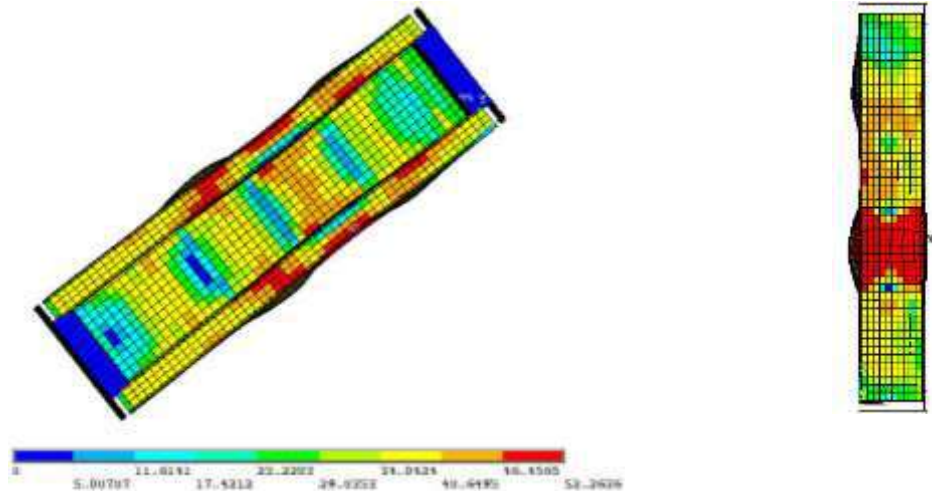
respectivamente. Com relação aos modos de instabilidade observados, as imperfeições Magnitude 2 foram as que mais apresentaram coerência com os modos obtidos na análise experimental. Os modos de instabilidade observados nas análises experimental e numérica foram local, distorcional e a combinação dos dois, conforme apresentado na Tabela 9.

Para a seção T1.5F120, a ABNT NBR 14762:2010 se mostrou ligeiramente contra a segurança em comparação aos resultados das análises experimental e numérica para a maioria dos casos (Figura 8). A relação " $N_{EXP}/N_{C,RK}$ " variou de 0,91 a 1,02 com média de 0,97 (Tabela 10). Com relação à análise numérica, a inserção de imperfeições geométricas iniciais promoveu uma ligeira variação nos resultados obtidos. As relações " N_{EXP}/N_{EF} " foram de 0,92, 1,05 e 1,09 para os modelos sem imperfeições, com imperfeições Magnitude 1 e com imperfeições Magnitude 2, respectivamente. Neste caso, os resultados da análise numérica com imperfeições Magnitude 1 foram as que mais se aproximaram dos resultados da análise experimental com relação " N_{EXP}/N_{EF} " variando de 0,98 a 1,10. Com relação aos modos de instabilidade observados, as imperfeições Magnitudes 1 e 2 foram coerentes com os modos obtidos na análise experimental (Tabela 11). Os modos de instabilidade predominantemente observados foram local, distorcional e a combinação dos dois.

Para a seção T1.9F80, a ABNT NBR 14762:2010 se mostrou conservadora em comparação aos resultados das análises experimental e numérica para todos os casos (Figura 9). A relação " $N_{EXP}/N_{C,RK}$ " variou de 1,19 a 1,31 com média de 1,25 (Tabela 12). Com relação à análise numérica, a inserção de imperfeições geométricas iniciais pouco influenciou nos resultados obtidos. As relações " N_{EXP}/N_{EF} " foram de 1,01, 1,08 e 1,10 para os modelos sem imperfeições, com imperfeições Magnitude 1 e com imperfeições Magnitude 2, respectivamente. Apesar da pouca variação entre os resultados da análise numérica, os resultados com imperfeições Magnitude 1 foram os que mais se aproximaram dos resultados da análise experimental com relação " N_{EXP}/N_{EF} " variando de 1,00 a 1,13, sendo todos os resultados a favor da segurança. Com relação aos modos de instabilidade observados, as imperfeições Magnitudes 1 e 2 foram coerentes com os modos obtidos na análise experimental (Tabela 13). Um fato importante a ser mencionado é que na análise experimental de Yan e Young (2002) foi observado o modo de instabilidade por flexo-torção, no entanto, esse modo não foi observado na análise numérica. Os modos de instabilidade predominantemente observados foram local, distorcional e a combinação dos dois.

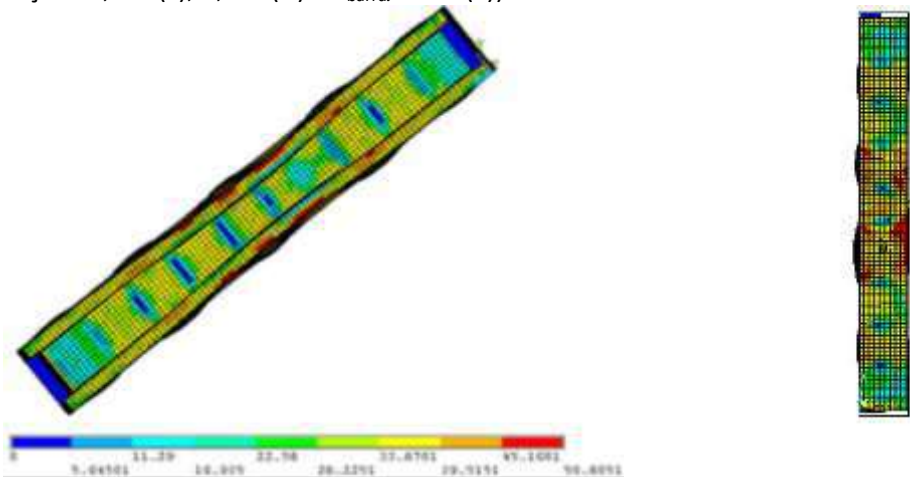
Para a seção T1.9F120, a ABNT NBR 14762:2010 foi coerente com os resultados da análise experimental, apresentando relação " $N_{EXP}/N_{C,RK}$ " de 1,01 a 1,20, com média de 1,08. No entanto, foi contra a segurança para comprimentos de até 2000 mm, considerando análises numéricas com imperfeições (Figura 10). A inserção de imperfeições geométricas iniciais nos modelos numéricos promoveu uma ligeira variação nos resultados. As relações " N_{EXP}/N_{EF} " foram de 0,97, 1,09 e 1,15 para os modelos sem imperfeições, com imperfeições Magnitude 1 e com imperfeições Magnitude 2, respectivamente. Os resultados da análise numérica com imperfeições Magnitude 1 foram as mais coerentes com a análise experimental, com relação " N_{EXP}/N_{EF} " variando de 1,01 a 1,14, sendo todos os resultados a favor da segurança. Com relação aos modos de instabilidade observados, as análises com imperfeições foram coerentes com os modos obtidos na análise experimental (Tabela 15). Para essa seção, também foi observado o modo de instabilidade por flexo-torção na análise experimental de Yan e Young (2002) em alguns casos, no entanto, esse modo não foi observado na análise numérica. Os modos de instabilidade predominantemente observados foram local, distorcional e a combinação dos dois, além de flexão em comprimentos maiores. As Figuras 11 a 13 ilustram os modos de instabilidade observados na análise numérica.

Figura 11. Instabilidade local e distribuição de tensões de von Mises (Barra T1.5F80L500 – Com imperfeições 0,14t (L); 0,64t (D) e $L_{\text{barra}}/1500$ (F))



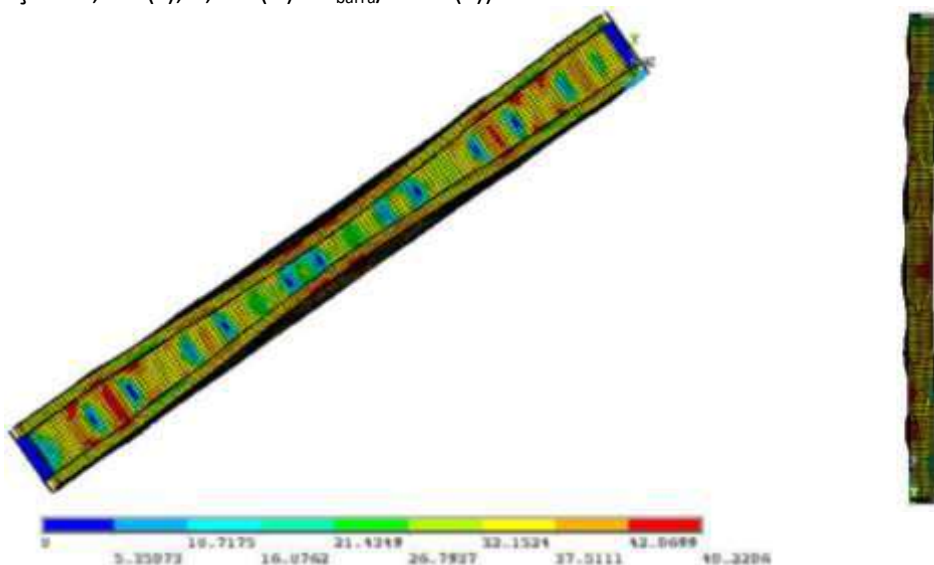
Fonte: Os autores.

Figura 12. Instabilidade local e por distorção e distribuição de tensões de von Mises (Barra T1.5F120L1000 – Com imperfeições 0,14t (L); 0,64t (D) e $L_{\text{barra}}/1500$ (F))



Fonte: Os autores.

Figura 13. Instabilidade local e por distorção e distribuição de tensões de von Mises (Barra T1.9F80L1500 – Com imperfeições 0,14t (L); 0,64t (D) e $L_{\text{barra}}/1500$ (F))



Fonte: Os autores.

6. CONCLUSÕES

O procedimento adotado para a simulação numérica se mostrou bastante eficiente, produzindo resultados coerentes quando comparados aos experimentais, evidenciando a confiabilidade deste método para análise de perfis de aço formados a frio em seção U com duplo enrijecedor de borda.

A utilização de diferentes valores de imperfeições geométricas iniciais, Magnitudes 1 e 2 de acordo com Schafer e Peköz (1998), evidenciou uma modificação na resistência e nos modos de instabilidade observados, sendo mais significativo em alguns casos e menos em outros. Também demonstrou que, para uma mesma seção, nem sempre foi a mesma magnitude que produziu os melhores resultados, ressaltando a importância da sua escolha. Observou-se também que a consideração das imperfeições foi de extrema importância para a compatibilidade dos modos de instabilidade observados nas análises experimental e numérica. Os modos de instabilidade observados foram praticamente os mesmos para todas as seções, sendo o local, o distorcional ou a combinação de ambos. Em alguns casos, na análise experimental de Yan e Young (2002) foi observado o modo de instabilidade por flexo-torção, no entanto, na análise numérica esse modo não foi observado.

O procedimento de cálculo da ABNT NBR 14762:2010, utilizando o Método da Resistência Direta, se mostrou conservador para as seções T1.5F80 e T1.9F80 e contra a segurança para as seções T1.5F120 e T1.9F120, ou seja, foi contra a segurança para situações em que as mesas foram mais esbeltas e a instabilidade por distorção foi mais pronunciada.

Com os resultados obtidos, verifica-se a necessidade de mais estudos que complementem o conhecimento do comportamento dessas seções, explorando todas as variáveis do problema buscando reafirmar os resultados obtidos, permitindo assim recomendações quanto ao seu dimensionamento.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14762:2010**. Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

AISI.

AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE. **Specification for the design of cold-formed steel structural members**. Washington, D.C.: AISI, 1996.

ANSYS. **Structural nonlinearities**. v.13.0, Houston, USA, 2011.

AS - AUSTRALIAN STANDARD **Methods for tensile testing of metals**. AS 1391, Standards Association of Australia, Sydney, Australia, 1991.

AS/NZS- AUSTRALIAN/NEW ZEALAND STANDARD. **Cold-formed steel structures**. **AS/NZS 4600:1996**, Standards Australia, Sydney, Australia, 1996.

CHODRAUI, G. M. B. **Análise teórica e experimental de perfis de aço formados a frio submetidos à compressão**. 2006. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2006. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-31082006-152727/publico/Chodraui2006.pdf>. Acesso em: 29 set. 2023.

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, n. 1, p. 95-110, 2020. DOI <https://doi.org/10.5747/ce.2020.v12.n1.e312>

MAIA, W. F. **Sobre a estabilidade de cantoneiras de aço formadas a frio submetidas à compressão**. 2008. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2008. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-16052008-084426/publico/2008ME_WandersonFMaia.pdf. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.03.003>. Acesso em: 29 set. 2023.

- 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. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.03.003>
- 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. DOI <https://doi.org/10.5747/ce.2021.v13.n4.e376>
- ROCHA, M. S.; MAIA, W. F. Análise numérica de cantoneiras enrijecidas de aço formadas a frio submetidas à compressão. **Revista da Estrutura de Aço**, v. 8, n. 3, p. 360-379, 2019. DOI: <https://doi.org/10.17648/aco-2238-9377-8-3-2>
- SCHAFER, B. W. **Finite strip analysis of thin-walled members**. In: CUFSM: Cornell University – Finite Strip Method, 2001. Disponível em: <https://www.ce.jhu.edu/cufsm/>. Acesso em: 29 set. 2023.
- SCHAFER, B. W.; PEKÖZ, T. Computational modeling of cold-formed steel: characterizing geometric imperfections and residual stresses. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 47, p. 193-210, 1998. DOI [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(98\)00007-8](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(98)00007-8)
- WANG, C.; ZHANG, Z.; ZHAO, D.; LIU, Q. Compression tests and numerical analysis of web-stiffened channels with complex edge stiffeners. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 116, p. 29-39, 2016. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.08.013>
- YAN, J.; YOUNG, B. Column Tests of Cold-Formed Steel Channels with Complex Stiffeners. **Journal of the Structural Engineering**, ASCE, v. 128, n. 6, p. 737-745, 2002. DOI [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2002\)128:6\(737\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2002)128:6(737))
- YOUNG, B.; YAN, J. Design of Cold-Formed Steel Channel Columns with Complex Edge Stiffeners by Direct Strength Method. **Journal of the Structural Engineering**, ASCE, v. 130, n. 11, p. 1756-1763, 2004. DOI [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2004\)130:11\(1756\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:11(1756))