

**ANÁLISE TEÓRICO-NUMÉRICA DA INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE
PARAFUSOS NO COMPORTAMENTO DE CANTONEIRAS
LAMINADAS DE AÇO COMPRIMIDAS CONCÊNTRICA E
EXCÊNTRICAMENTE**

José Onésimo Gomes Junyor

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

**"ANÁLISE TEÓRICO-NUMÉRICA DA INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE
PARAFUSOS NO COMPORTAMENTO DE CANTONEIRAS
LAMINADAS DE AÇO COMPRIMIDAS CONCÊNTRICA E
EXCÊNTRICAMENTE"**

José Onésimo Gomes Junyor

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre em Engenharia de Estruturas".

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Hermes Carvalho
DEES - UFMG (Orientador)

Prof. Dr. Armando Cesar Campos Lavall
DEES – UFMG (Coorientador)

Profa. Dra. Ana Lydia Reis de Castro e Silva
DEES – UFMG

Prof. Dr. Maximiliano Malite
EESC – USP

Belo Horizonte, 27 de fevereiro de 2019

G633a

Gomes Junyor, José Onésimo.

Análise teórico-numérica da influência do número de parafusos no comportamento de cantoneiras laminadas de aço comprimidas concêntrica e excentricamente [manuscrito] / José Onésimo Gomes Junyor. - 2019.

147 f., enc.: il.

Orientador: Hermes Carvalho.

Coorientador: Armando Cesar Campos Lavall.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f. 116-147.

Bibliografia: f. 112-115.

1. Engenharia de estruturas - Teses. 2. Flambagem (Mecânica) - Teses. I. Carvalho, Hermes. II. Lavall, Armando César Campos. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 624(043)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, que sempre me deu forças para percorrer essa jornada, e assim concluir mais uma etapa da minha vida.

Aos meus pais, José e Geralda, e às minhas irmãs Jakeliny e Joyce, que tudo fizeram pelo seu caçula.

Aos professores Hermes Carvalho e Armando Cesar Campos Lavall, pela paciência, pela confiança, pelos ensinamentos, e por estarem sempre dispostos a ajudar.

Ao João Victor, pela constante ajuda no ANSYS e pelos conselhos para realização da pesquisa deste trabalho.

A todos os colegas da pós-graduação, pela amizade, convivência e companheirismo.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia de Estruturas da UFMG.

A CAPES pelo apoio financeiro.

RESUMO

As cantoneiras laminadas de aço de abas iguais axialmente comprimidas são utilizadas em sistemas estruturais diversos. Na maioria das vezes onde se utiliza este tipo de perfil, as solicitações ocorrem através de uma aba, sendo a ligação parafusada bastante frequente. Esse detalhe de ligação implica na compressão excêntrica das cantoneiras que, somada às suas particularidades como a baixa rigidez à torção e a rotação dos eixos principais de inércia em relação às abas, torna a sua análise e seu dimensionamento tarefas complexas. As principais normas de projeto de estruturas metálicas contemplam um procedimento simplificado para o dimensionamento de cantoneiras comprimidas, onde os efeitos da excentricidade de aplicação da força normal são considerados na adoção de um comprimento de flambagem equivalente. Em seguida, o dimensionamento é então realizado como uma compressão concêntrica, sendo as forças elásticas de flambagem determinadas a partir das propriedades geométricas em relação aos eixos médios ou ao eixo de menor inércia. Porém, esse procedimento pode levar a resultados discrepantes para a capacidade resistente à compressão das cantoneiras. O presente trabalho tem por objetivo estudar o comportamento de cantoneiras de abas iguais comprimidas concêntrica e excentricamente. Para isso, uma avaliação da influência do número de parafusos na resistência utilizando formulações analíticas e análises numéricas foi realizada, sendo os resultados obtidos comparados com prescrições normativas brasileiras, americanas e europeias. Essa comparação mostrou boa concordância dos procedimentos normativos com os resultados numéricos para compressão concêntrica, mas consideráveis divergências presentes em todas as normas analisadas para compressão excêntrica. Sendo assim, uma adaptação na metodologia de dimensionamento da norma ABNT NBR 8800:2008 para cantoneiras comprimidas excentricamente foi proposta e teve sua validade avaliada, mostrando, em um primeiro momento, boa adequação para os principais perfis utilizados na construção civil.

Palavras-chave: Cantoneiras comprimidas concentricamente; Cantoneiras comprimidas excentricamente; Flambagem; Capacidade resistente à compressão.

ABSTRACT

Hot-rolled steel single angle sections in compression are used in various structural systems. In most of the practical cases, these members are attached to others only by one leg, usually by bolts. This type of connection results in an eccentric compression of the angles, which, allied to their peculiarities such as low torsional stiffness and rotation of the principal axis in relation to the legs, makes their analysis and their design complex tasks. Currents codes provide a simplified procedure for angles in compression, in which eccentricity effects are accounted for by using an equivalent buckling length. Then, calculations are performed as if the members were subjected to concentric compression, with the buckling elastic loads determined from the geometric properties with respect to the axis parallel to the connected leg or minor principal axes. However, this procedure can lead to discrepant results for ultimate compressive strength of steel angles. The objective of the present work is to study the behavior of hot-rolled steel single angles in concentric and eccentric compression. To achieve this objective, an evaluation of the influence of the number of bolts on the compressive capacity was performed using analytical formulations and numerical analyses. The results of these analyses were compared with American, European and Brazilian codes. This comparison showed great agreement of the codes procedures with the numerical results for concentric compression, but considerable divergences were noted in the evaluations for eccentric compression. Thus, an adaptation in the design methodology of the ABNT NBR 8800:2008 code for angles in eccentric compression was proposed and had its validity assessed, presenting great suitability for the main commercially sold angles.

Keywords: Angles in concentric compression; Angles in eccentric compression; Buckling; Ultimate compressive load capacity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – a) Torre de transmissão (Rodrigues, 2015); b) Torre de telecomunicação com cantoneiras de abas iguais como elementos estruturais (Preto, 2016);.....	18
Figura 1.2 - Cantoneiras de abas iguais conectadas através de uma aba via ligação parafusada (a) – Leal (2011); b) – Bashar (2012).....	18
Figura 2.1 - Cantoneira de abas iguais soldada através de uma aba em uma placa <i>gusset</i> (Temple e Sakla, 1996).....	26
Figura 2.2 - a) Excentricidade ocasionando momento em torno do eixo de maior inércia; b) Excentricidade ocasionando momento em torno do eixo de menor inércia (Liu e Hui, 2010).	27
Figura 2.3 – Modelo numérico e condições de vinculação utilizados (Kettler <i>et al.</i> , 2017 - Adaptado).	29
Figura 2.4 – Desenho esquemático da análise experimental utilizada para validação do modelo numérico de Kettler <i>et al.</i> (2017) (Kettler <i>et al.</i> , 2017 - Adaptado).....	30
Figura 2.5 - Distribuição de tensões residuais segundo ECCS (1976) (Shi <i>et al.</i> , 2011).....	35
Figura 2.6 - Modelo de três e quatro pontos de distribuição de tensões residuais (Može <i>et al.</i> , 2014).....	35
Figura 2.7 - Estratégia de medição das imperfeições geométricas iniciais de cantoneira utilizada por Ban <i>et al.</i> (2013) e Chodraui (2006). (Ban <i>et al.</i> , 2013).	37
Figura 2.8 - Efeito da imperfeição geométrica de flexão em torno do eixo de menor inércia (Liu e Hui, 2010 - Adaptado).	38
Figura 3.1 – Seção transversal genérica aberta de paredes finas submetida a força axial e momentos fletores em torno dos eixos principais de inércia.....	40
Figura 3.2 – Cantoneira de abas iguais parafusada por uma aba.....	46
Figura 4.1 - Elemento <i>SHELL181</i> . Fonte: ANSYS INC, 2014.	50
Figura 4.2 - Elemento <i>MPC184</i> . Fonte: ANSYS INC, 2014.	51
Figura 4.3 – Malha adotada no Modelo Proposto.	51
Figura 4.4 – Condições de contorno e carregamentos aplicados na: a) compressão concêntrica; b) compressão excêntrica e c) seção transversal de simetria.....	53
Figura 4.5 – Modelos constitutivos a) elástico linear e b) elastoplástico perfeito.....	54
Figura 4.6 – Teste de convergência para definição da malha de elementos a ser adotada nos modelos numéricos.....	55

Figura 4.7 – Diagrama de tensões normais típica de uma cantoneira comprimida excentricamente com esbeltez inferior ou igual a 105.	56
Figura 4.8 – Diagrama de tensões normais típica de uma cantoneira comprimida excentricamente com esbeltez superior a 105, no <i>Substep</i> onde ocorre a falha do perfil.	57
Figura 4.9 - Distribuição de tensões residuais utilizada pelo ECCS e adotada no Modelo Proposto.	57
Figura 4.10 - Distribuição de tensões residuais adotada no Modelo Proposto. Perfil: L 50,8 x 6,4 mm – $\lambda r = 45$	58
Figura 4.11 – Primeiros modos de flambagem típicas da (a) Compressão Concêntrica e da (b) Compressão Excêntrica.	59
Figura 4.12 – Curvas “ $\sigma \times \lambda r$ ” considerando a influência das tensões residuais e da imperfeição geométrica inicial (cantoneira L 50,8 x 6,4 mm comprimida concentricamente).	61
Figura 4.13 – Curvas “ $\sigma \times \lambda r$ ” considerando a influência das tensões residuais e da imperfeição geométrica inicial (cantoneira L 203,2 x 19,0 mm comprimida concentricamente).	61
Figura 4.14 – Curvas “ $\sigma \times \lambda r$ ” considerando a influência das tensões residuais e da imperfeição geométrica inicial (cantoneira L 50,8 x 6,4 mm comprimida excentricamente). ..	62
Figura 4.15 – Curvas “ $\sigma \times \lambda r$ ” considerando a influência das tensões residuais e da imperfeição geométrica inicial (cantoneira L 203,2 x 19,0 mm comprimida excentricamente).	62
Figura 4.16 – Geometria das ligações parafusadas adotadas.	63
Figura 4.17 – Resultados da análise linearizada de estabilidade e da análise não linear geométrica e de material para compressão concêntrica do perfil L 63,5 x 6,4 mm.	65
Figura 4.18 – Resultados da análise linearizada de estabilidade e da análise não linear geométrica e de material para compressão concêntrica do perfil L 76,2 x 7,9 mm.	66
Figura 4.19 – Resultados da análise linearizada de estabilidade e da análise não linear geométrica e de material para compressão concêntrica do perfil L 127 x 12,7 mm.	66
Figura 4.20 – Resultados da análise linearizada de estabilidade e da análise não linear geométrica e de material para compressão excêntrica do perfil L 63,5 x 6,4 mm.	68
Figura 4.21 – Resultados da análise linearizada de estabilidade e da análise não linear geométrica e de material para compressão excêntrica do perfil L 76,2 x 7,9 mm.	68
Figura 4.22 – Resultados da análise linearizada de estabilidade e da análise não linear geométrica e de material para compressão excêntrica do perfil L 127 x 12,7 mm.	69

Figura 4.23 – Distribuição de tensões de von Mises para a compressão excêntrica – L 63,5 x 6,4 mm – $\lambda r = 245$	69
Figura 4.24 – Distribuição de tensões de von Mises para a compressão excêntrica – L 63,5 x 6,4 mm – $\lambda r = 65$	69
Figura 4.25 – Comparação entre os resultados do Modelo Proposto e do ensaio apresentado por Kettler <i>et al.</i> (2017) para o perfil L 80,0 x 8,0 mm.....	70
Figura 5.1- Curva de dimensionamento adotada pelas normas ABNT NBR 8800:2008 e ANSI/AISC 360-16. (Fonte: ABNT NBR 8800:2008).	74
Figura 5.2 – Comparação entre os resultados obtidos com as normas ABNT NBR 8800:2008 e ANSI/AISC 360-16 e os obtidos através das análises numéricas para o perfil L 63,5 x 6,4 mm, comprimido concentricamente via um, dois e três parafusos em cada aba.	76
Figura 5.3 – Comparação entre os resultados obtidos com as normas ABNT NBR 8800:2008 e ANSI/AISC 360-16 e os obtidos através das análises numéricas para o perfil L 76,2 x 7,9 mm, comprimido concentricamente via um, dois e três parafusos em cada aba.	76
Figura 5.4 – Comparação entre os resultados obtidos com as normas ABNT NBR 8800:2008 e ANSI/AISC 360-16 e os obtidos através das análises numéricas para o perfil L 127 x 12,7 mm, comprimido concentricamente via um, dois e três parafusos em cada aba.	77
Figura 5.5 – Comparação entre os resultados obtidos com as normas ANSI/AISC 360-16 e ABNT NBR 8800:2008 e os obtidos através das análises numéricas para o perfil L 63,5 x 6,4 mm, comprimido excênicamente via dois e três parafusos.....	79
Figura 5.6 - Comparação entre os resultados obtidos com as normas ANSI/AISC 360-16 e ABNT NBR 8800:2008 e os obtidos através das análises numéricas para o perfil L 76,2 x 7,9 mm, comprimido excênicamente via dois e três parafusos.....	79
Figura 5.7 - Comparação entre os resultados obtidos com as normas ANSI/AISC 360-16 e ABNT NBR 8800:2008 e os obtidos através das análises numéricas para o perfil L 127 x 12,7 mm, comprimido excênicamente via dois e três parafusos.....	80
Figura 5.8 – Comparação entre os resultados obtidos com a norma ASCE/SEI-10-2015 e os obtidos através das análises numéricas para o perfil L 63,5 x 6,4 mm, comprimido concentricamente via um, dois e três parafusos em cada aba.....	83
Figura 5.9 – Comparação entre os resultados obtidos com a norma ASCE/SEI-10-2015 e os obtidos através das análises numéricas para o perfil L 76,2 x 7,9 mm, comprimido concentricamente via um, dois e três parafusos em cada aba.....	83
Figura 5.10 – Comparação entre os resultados obtidos com a norma ASCE/SEI-10-2015 e os obtidos através das análises numéricas para o perfil L 127 x 12,7 mm, comprimido concentricamente via um, dois e três parafusos em cada aba.....	84

Figura 5.11 – Comparação entre os resultados obtidos com a norma ASCE/SEI-10-2015 e os obtidos através das análises numéricas para o perfil L 63,5 x 6,4 mm, comprimido excentricamente via um, dois e três parafusos.	85
Figura 5.12 – Comparação entre os resultados obtidos com a norma ASCE/SEI-10-2015 e os obtidos através das análises numéricas para o perfil L 76,2 x 7,9 mm, comprimido excentricamente via um, dois e três parafusos.	85
Figura 5.13 – Comparação entre os resultados obtidos com a norma ASCE/SEI-10-2015 e os obtidos através das análises numéricas para o perfil L 127 x 12,7 mm, comprimido excentricamente via um, dois e três parafusos.	86
Figura 5.14 – Curvas de flambagem. (Fonte: EN 1993-1-1:2005).....	87
Figura 5.15 – Comparação entre os resultados obtidos com a norma EN 1993-1-1:2005 e os obtidos através das análises numéricas para o perfil L 63,5 x 6,4 mm, comprimido concentricamente via um, dois e três parafusos em cada aba.....	88
Figura 5.16 – Comparação entre os resultados obtidos com a norma EN 1993-1-1:2005 e os obtidos através das análises numéricas para o perfil L 76,2 x 7,9 mm, comprimido concentricamente via um, dois e três parafusos em cada aba.....	89
Figura 5.17 – Comparação entre os resultados obtidos com a norma EN 1993-1-1:2005 e os obtidos através das análises numéricas para o perfil L 127 x 12,7 mm, comprimido concentricamente via um, dois e três parafusos em cada aba.....	89
Figura 5.18 – Comparação entre os resultados obtidos com a norma EN 1993-1-1:2005 e os obtidos através das análises numéricas para o perfil L 63,5 x 6,4 mm, comprimido excentricamente via dois e três parafusos.....	91
Figura 5.19 – Comparação entre os resultados obtidos com a norma EN 1993-1-1:2005 e os obtidos através das análises numéricas para o perfil L 76,2 x 7,9 mm, comprimido excentricamente via dois e três parafusos.....	91
Figura 5.20 – Comparação entre os resultados obtidos com a norma EN 1993-1-1:2005 e os obtidos através das análises numéricas para o perfil L 127 x 12,7 mm, comprimido excentricamente via dois e três parafusos.....	92
Figura 5.21– Comparação entre os resultados obtidos com a norma EN 1993-3-1:2006 e os obtidos através das análises numéricas para o perfil L 63,5 x 6,4 mm, comprimido concentricamente via um, dois e três parafusos em cada aba.....	94
Figura 5.22 – Comparação entre os resultados obtidos com a norma EN 1993-3-1:2006 e os obtidos através das análises numéricas para o perfil L 76,2 x 7,9 mm, comprimido concentricamente via um, dois e três parafusos em cada aba.....	94

Figura 5.23 – Comparação entre os resultados obtidos com a norma EN 1993-3-1:2006 e os obtidos através das análises numéricas para o perfil L 127 x 12,7 mm, comprimido concentricamente via um, dois e três parafusos em cada aba.....	95
Figura 5.24 – Comparação entre os resultados obtidos com a norma EN 1993-3-1:2006 e os obtidos através das análises numéricas para o perfil L 63,5 x 6,4 mm, comprimido excentricamente via um, dois e três parafusos.	95
Figura 5.25 - Comparação entre os resultados obtidos com a norma EN 1993-3-1:2006 e os obtidos através das análises numéricas para o perfil L 76,2 x 7,9 mm, comprimido excentricamente via um, dois e três parafusos.	96
Figura 5.26 - Comparação entre os resultados obtidos com a norma EN 1993-3-1:2006 e os obtidos através das análises numéricas para o perfil L 127 x 12,7 mm, comprimido excentricamente via um, dois e três parafusos.	96
Figura 5.27 - Comparação entre os resultados obtidos através das prescrições normativas e das análises numéricas para o perfil L 63,5 x 6,4 mm, comprimido concentricamente via um, dois e três parafusos em cada aba.....	98
Figura 5.28 - Comparação entre os resultados obtidos através das prescrições normativas e das análises numéricas para o perfil L 76,2 x 7,9 mm, comprimido concentricamente via um, dois e três parafusos em cada aba.....	98
Figura 5.29 - Comparação entre os resultados obtidos através das prescrições normativas e das análises numéricas para o perfil L 127 x 12,7 mm, comprimido concentricamente via um, dois e três parafusos em cada aba.....	99
Figura 5.30 - Comparação entre os resultados obtidos através das prescrições normativas e das análises numéricas para o perfil L 63,5 x 6,4 mm, comprimido excentricamente via um, dois e três parafusos.	100
Figura 5.31- Comparação entre os resultados obtidos através das prescrições normativas e das análises numéricas para o perfil L 76,2 x 7,9 mm, comprimido excentricamente via um, dois e três parafusos.	101
Figura 5.32 - Comparação entre os resultados obtidos através das prescrições normativas e das análises numéricas para o perfil L 127 x 12,7 mm, comprimido excentricamente via um, dois e três parafusos.	101
Figura 6.1 – Comparação dos resultados obtidos através da Proposta de Dimensionamento e das simulações numéricas para o perfil L 50,8 x 6,4 mm.	104
Figura 6.2 – Comparação dos resultados obtidos através da Proposta de Dimensionamento e das simulações numéricas para o perfil L 63,5 x 6,4 mm.	104

Figura 6.3 – Comparação dos resultados obtidos através da Proposta de Dimensionamento e das simulações numéricas para o perfil L 76,2 x 7,9 mm.	105
Figura 6.4 – Comparação dos resultados obtidos através da Proposta de Dimensionamento e das simulações numéricas para o perfil L 101,6 x 9,5 mm.	105
Figura 6.5 – Comparação dos resultados obtidos através da Proposta de Dimensionamento e das simulações numéricas para o perfil L 127 x 12,7 mm.	106
Figura 6.6 – Diferença absoluta entre os resultados obtidos através da Proposta de Dimensionamento e os numéricos para cantoneiras conectadas por um parafuso.	107
Figura 6.7 - Diferença absoluta entre os resultados obtidos através da Proposta de Dimensionamento e os numéricos para cantoneiras conectadas por dois parafusos.	107
Figura 6.8 - Diferença absoluta entre os resultados obtidos através da Proposta de Dimensionamento e os numéricos para cantoneiras conectadas por três parafusos.	107
Figura 6.9 - Diferença relativa entre os resultados obtidos através da Proposta de Dimensionamento e os numéricos para cantoneiras conectadas por um parafuso.	108
Figura 6.10 - Diferença relativa entre os resultados obtidos através da Proposta de Dimensionamento e os numéricos para cantoneiras conectadas por dois parafusos.	108
Figura 6.11 - Diferença relativa entre os resultados obtidos através da Proposta de Dimensionamento e os numéricos para cantoneiras conectadas por três parafusos.	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Valores utilizados no estudo paramétrico de Liu e Hui (2010).....	27
Tabela 2.2 – Principais trabalhos sobre cantoneiras laminadas comprimidas nos últimos 100 anos.....	28
Tabela 2.3 - Resultados numéricos da compressão de cantoneiras conectadas por um parafuso em uma aba (Kettler <i>et al.</i> , 2017 - Adaptado).	31
Tabela 2.4 - Resultados numéricos da compressão de cantoneiras conectadas por dois parafusos em uma aba (Kettler <i>et al.</i> , 2017 - Adaptado).	31
Tabela 2.5 - Valores de imperfeições geométricas iniciais de cantoneiras medidas ou adotadas por alguns autores em seus trabalhos.	38
Tabela 3.1 – Condições de contorno de vínculo de garfo.	44
Tabela 4.1 – Restrições adotadas nos nós centrais dos furos.	52
Tabela 4.2 – Cantoneiras adotadas na modelagem numérica.	63
Tabela 4.3 – Dimensões dos furos adotados nos modelos numéricos.....	64
Tabela 4.4 – Comparação entre os resultados numéricos do modelo proposto e do trabalho de Kettler <i>et al.</i> (2017).	71
Tabela 6.1 – Valores propostos para αPD e βPD em função do número de parafusos.	103

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras romanas minúsculas

b	Largura da aba da cantoneira.
e_y	Excentricidade de aplicação da carga axial em torno do eixo y .
e_z	Excentricidade de aplicação da carga axial em torno do eixo z .
f_a	Tensão resistente à compressão.
f_u	Resistência à ruptura do aço à tração.
f_y	Resistência ao escoamento do aço.
g	Gabarito da furação.
k	Fator de esbeltez efetiva.
k_y	Coordenada y do centro do círculo de estabilidade.
k_z	Coordenada z do centro do círculo de estabilidade.
r	Raio de giração em relação ao eixo de menor inércia.
r_0	Raio de giração polar em relação ao centro de torção.
r_{z1}	Raio de giração em relação ao eixo $z1$.
s	Eixo de coordenadas com início no canto da cantoneira e paralela às abas.
t	Espessura da aba da cantoneira.
v	Deslocamento da seção transversal na direção do eixo y .
v''	Derivada segunda de v .
v_D	Deslocamento na direção y do centro de torção.
v_D''	Derivada segunda de v_D .
v_D^{IV}	Derivada quarta de v_D .
w	Deslocamento da seção transversal na direção do eixo z .
w''	Derivada segunda de w .
w_D	Deslocamento na direção z do centro de torção.
w_D''	Derivada segunda de w_D .
w_D^{IV}	Derivada quarta de w_D .
x	Eixo longitudinal do perfil.
y	Eixo de maior inércia da seção transversal.
y_0	Coordenada y do Centro de Torção.
$y1$	Eixo da seção transversal perpendicular, à aba conectada na compressão excêntrica.
z	Eixo de menor inércia da seção transversal.
z_0	Coordenada z do Centro de Torção.
$z1$	Eixo da seção transversal, paralelo à aba conectada na compressão excêntrica.
z'	Eixo arbitrário.

Letras romanas maiúsculas

A	Área; Constante numérica.
A_{ef}	Área efetiva da seção transversal.
A_g	Área bruta da seção transversal
A_{PD}	Área utilizada na PD.
B	Bimomento; Constante numérica.
C	Constante numérica.

C_c	Índice de esbeltez divisor das fases elástica e inelástica da flambagem.
CD_y	Carga distribuída na direção y .
CD_z	Carga distribuída na direção z .
C_w	Coefficiente de empenamento da seção transversal.
E	Módulo de elasticidade longitudinal do aço.
D	Centro de torção da seção transversal; Constante numérica.
G	Módulo de elasticidade transversal do aço.
I	Momento de inércia.
J	Constante de torção.
K	Coefficiente de flambagem das barras.
$K_x L_x$	Comprimento efetivo de flambagem por torção.
$K_y L_y$	Comprimento efetivo de flambagem em relação ao eixo z .
$K_z L_z$	Comprimento efetivo de flambagem em relação ao eixo y .
$K_{z1} L_{z1}$	Comprimento de flambagem equivalente.
$(K_{z1} L_{z1})$	$K_{z1} L_{z1}$ utilizado na PD.
L	Comprimento.
L_r	Distância entre as duas extremidades da cantoneira, medida a partir do primeiro parafuso.
L_{z1}	Comprimento da cantoneira tomado entre os pontos de trabalho situados nos eixos longitudinais.
M_t	Momento de torção.
MTD	Carga torsora distribuída.
M_y	Momento fletor em torno do eixo y .
M_z	Momento fletor em torno do eixo z .
N	Força normal atuante na barra.
N_{cr}	Força axial de compressão crítica de flambagem elástica.
$N_{c,Rk}$	Força axial de compressão resistente nominal.
N_e	Força axial de flambagem elástica.
N_{ex}	Força axial de flambagem elástica por torção.
N_{ey}	Força axial de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo y .
N_{eyx}	Força axial de flambagem elástica por flexo-torção.
N_{ez}	Força axial de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo z .
N_{ez1}	Força axial de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo $z1$.
$N_{últ}$	Força última de resistência à compressão.
U_x	Deslocamento na direção do eixo x do modelo numérico (ver Figura 4.4).
U_y	Deslocamento na direção do eixo y do modelo numérico (ver Figura 4.4).
U_z	Deslocamento na direção do eixo z do modelo numérico (ver Figura 4.4).
ROT_x	Rotação em torno do eixo x do modelo numérico (ver Figura 4.4).
ROT_y	Rotação em torno do eixo y do modelo numérico (ver Figura 4.4).
ROT_z	Rotação em torno do eixo z do modelo numérico (ver Figura 4.4).

Letras gregas minúsculas

α	Fator de imperfeição relacionado à flambagem de barras.
α_{PD}	Fator de ajuste utilizado na PD.
β	Fator de tensão residual.
β_{PD}	Fator de ajuste utilizado na PD.
ε	Parâmetro adimensional do <i>Eurocode 3</i> .

ε_u	Deformação correspondente à ruptura à tração do aço.
ε_y	Deformação correspondente ao escoamento do aço.
η	Fator de redução da resistência à flambagem para cantoneiras.
λ_{z1}	Índice de esbeltez relativo ao eixo z1.
λ_0	Índice de esbeltez reduzido.
$\lambda_{0,z}$	Índice de esbeltez reduzido em torno do eixo z.
$\lambda_{0,z1}$	Índice de esbeltez reduzido em torno do eixo z1.
$\lambda_{ef,z}$	Índice de esbeltez reduzido efetivo em torno do eixo z.
$\lambda_{ef,z1}$	Índice de esbeltez reduzido efetivo em torno do eixo z1.
λ_r	Índice de esbeltez relativo ao eixo de menor inércia calculado a partir de L_r .
ν	Coefficiente de poisson do aço.
σ	Tensão normal.
σ_0	Tensão normal inicial.
τ	Tensão cisalhante.
φ	Giro da seção transversal em torno do centro de torção.
φ'	Derivada primeira de φ .
φ''	Derivada segunda de φ .
φ'''	Derivada terceira de φ .
φ^{IV}	Derivada quarta de φ .
χ	Fator de redução associado à resistência à compressão.
ω	Área setorial.

Letras gregas maiúsculas

Φ	Fator para determinar o valor do fator de redução χ .
--------	--

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISC	<i>American Institute Steel Construction</i>
ALE	Análise Linearizada de Estabilidade
NLGM	Não Linearidade Geométrica e de Material
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
APDL	<i>ANSYS Parametric Design Language</i>
ASCE	<i>American Society of Civil Engineers</i>
CG	Centro Geométrico
ECCS	<i>European Convention for Constructional Steelwork</i>
EN	<i>Europäische Norm</i>
IGI	Imperfeição geométrica inicial
LN	Linha Neutra
MP	Modelo Proposto
NBR	Norma Brasileira
PD	Proposta de Dimensionamento
SSRC	<i>Structural Stability Reserch Council</i>
TR	Tensões residuais

SUMÁRIO

1	Introdução.....	17
1.1	Considerações Iniciais	17
1.2	Objetivo	19
1.3	Justificativa	20
1.4	Metodologia.....	20
1.5	Organização do Texto.....	21
2	Revisão da Literatura.....	23
2.1	Considerações Iniciais	23
2.2	Cantoneiras Laminadas Comprimidas	23
2.2.1	Kettler <i>et al.</i> (2017)	29
2.3	Condições de Vinculação.....	32
2.4	Tensões Residuais em Cantoneiras Laminadas	33
2.5	Imperfeições Geométricas Iniciais.....	36
3	Formulação analítica para determinação da força crítica de flambagem elástica de cantoneiras comprimidas	39
3.1	Considerações Iniciais	39
3.2	Hipóteses Básicas	39
3.3	Estabilidade de uma Barra de Seção Transversal Aberta de Paredes Finas	41
3.4	Estabilidade de Cantoneiras Comprimidas	45
3.4.1	Caso geral: compressão excêntrica.....	45
3.4.2	Caso particular: força aplicada no centro geométrico	48
3.4.3	Caso particular: força aplicada no centro de torção	48
4	Análise Numérica	49
4.1	Considerações Iniciais	49
4.2	Elementos Finitos e Geometria Utilizada	49
4.3	Condições de Contorno e Carregamento	52
4.4	Lei Constitutiva do Material	53
4.5	Aferição do Modelo Numérico Proposto Conforme Metodologias Teóricas.....	54
4.6	Tensões Residuais.....	57
4.7	Imperfeições Geométricas Iniciais.....	58
4.8	Análise da Influência das Tensões Residuais e da Imperfeição Geométrica Inicial no Comportamento à Compressão de Cantoneiras.....	60
4.9	Geometria dos Modelos Numéricos para Análise da Influência do Número de Parafusos e Avaliação dos Procedimentos Normativos	63
4.10	Comparação do Modelo Numérico Proposto com um, dois e três Parafusos com as Formulações Analíticas	64

4.10.1	Compressão concêntrica	64
4.10.2	Compressão excêntrica	66
4.11	Comparação entre os Resultados obtidos a partir do Modelo Numérico Proposto e os apresentados por Kettler <i>et al.</i> (2017)	70
4.12	Outros Aspectos da Análise Numérica	72
5	Análise das Prescrições Normativas Aplicáveis ao Dimensionamento de Cantoneiras Laminadas Comprimidas	73
5.1	Considerações Iniciais	73
5.2	ABNT NBR 8800:2008 e ANSI/AISC 360-16	74
5.2.1	Compressão concêntrica	75
5.2.2	Compressão excêntrica	77
5.3	ASCE/SEI-10-2015	80
5.3.1	Compressão concêntrica	82
5.3.2	Compressão excêntrica	84
5.4	EN 1993-1-1:2005	86
5.4.1	Compressão concêntrica	88
5.4.2	Compressão excêntrica	90
5.5	EN 1993-3-1:2006	92
5.5.1	Compressão concêntrica	93
5.5.2	Compressão excêntrica	95
5.6	Comentários Gerais	97
5.6.1	Compressão concêntrica	97
5.6.2	Compressão excêntrica	99
6	Proposta de Dimensionamento para Cantoneiras comprimidas excentricamente	102
6.1	Considerações Iniciais	102
6.2	Proposta de Dimensionamento	102
6.3	Verificação da Proposta de Dimensionamento	103
7	Considerações Finais	109
7.1	Conclusões	109
7.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	111
8	Referências	112
	Apêndice A: Código APDL para Declaração dos Parâmetros da Modelagem Numérica	116
	Apêndice B: Código APDL para Compressão Concêntrica de Cantoneiras	118
	Apêndice C: Código APDL para Compressão Excêntrica de Cantoneiras	136

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

A cantoneira de abas iguais é um perfil metálico de seção em L, composta por duas abas de comprimentos iguais formando um ângulo de 90° entre si. O processo de fabricação das cantoneiras laminadas consiste na laminação de metais/ligas acima da temperatura de recristalização do material. Neste processo, uma placa ou chapa é reaquecida em fornos, passando em seguida através de grandes cilindros, que a comprimem e impõem a forma pretendida. Durante o resfriamento do perfil, é criada uma distribuição de tensões iniciais auto-equilibradas, denominadas de tensões residuais.

As cantoneiras laminadas estão entre os perfis mais utilizados na construção metálica devido à menor complexidade de fabricação, à elevada eficiência estrutural (relação resistência/peso) e, principalmente, à versatilidade de conectá-las a outros elementos estruturais. Estes perfis são muito utilizados em estruturas de contraventamentos, sistemas treliçados, e como elementos de ligações entre perfis diversos, sendo muito empregados em sistemas construtivos de edifícios, galpões e, principalmente, em torres de transmissão/telecomunicação (Figura 1.1). Na maioria dos casos práticos, as cantoneiras estão sujeitas principalmente às forças axiais, sendo conectadas aos outros elementos da estrutura através de uma aba apenas, sendo a ligação parafusada bastante utilizada (Figura 1.2).

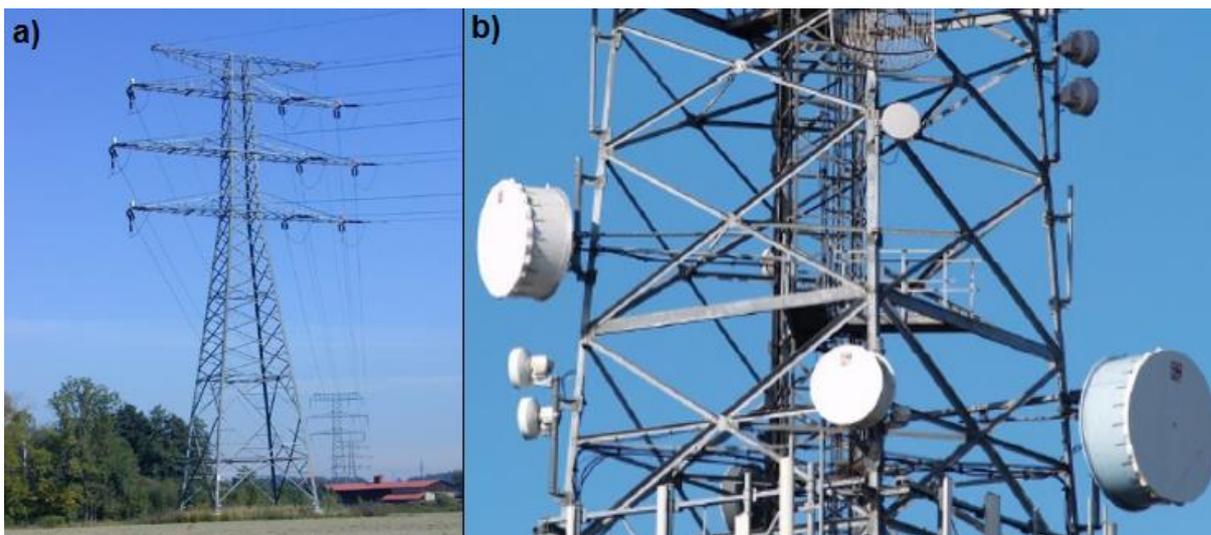


Figura 1.1 – a) Torre de transmissão (Rodrigues, 2015); b) Torre de telecomunicação com cantoneiras de abas iguais como elementos estruturais (Preto, 2016);

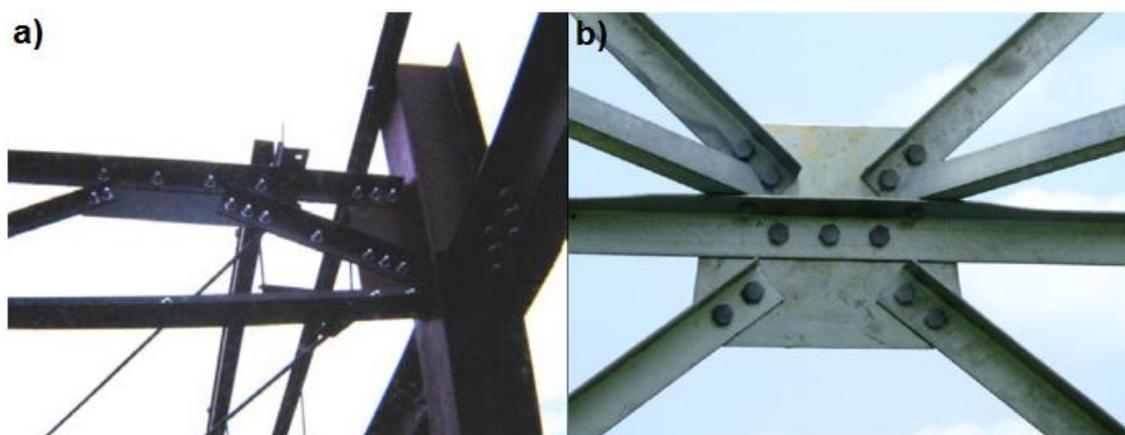


Figura 1.2 - Cantoneiras de abas iguais conectadas através de uma aba via ligação parafusada (a) – Leal (2011); b) – Bashar (2012).

Apesar da aparente simplicidade e facilidade de utilização, a análise e o dimensionamento de cantoneiras conectadas por uma aba não são simples, devido à excentricidade de aplicação da força normal e à não coincidência dos eixos principais de inércia da cantoneira com os eixos paralelos aos planos das abas. Estudos mostram que a capacidade resistente de cantoneiras submetidas à tração excêntrica não é muito menor do que nas situações de tração concêntrica (Woolcock e Kitipornchai, 1986). Na compressão, o efeito da excentricidade na carga última é mais pronunciado, como mostraram Elgaaly *et al.* (1991) e Bathon *et al.* (1993), entre outros autores. Temple e Sakla (1996) citam ainda outro motivo para a complexidade de se analisar e

dimensionar cantoneiras comprimidas: a dificuldade de contabilizar a influência da rigidez da fixação da barra na sua resistência final, já que as restrições das extremidades não são conhecidas na maioria dos casos.

As cantoneiras laminadas geralmente possuem abas compactas ($b/t < 20$, onde b e t correspondem, respectivamente, à largura e espessura da aba), portanto, não estão sujeitas às instabilidades locais. Quando esses perfis estão submetidos à compressão concêntrica apresentam dois modos de falha: instabilidades por flexão e por flexo-torção.

A obtenção analítica da resposta elástica de cantoneiras comprimidas excentricamente é muito complexa. Vlasov (1962) propôs uma formulação analítica para estudo da flexo-torção de barras de seção transversal aberta de paredes finas.

As principais normas de dimensionamento de estruturas metálicas, a citar, ABNT NBR 8800:2008, ANSI/AISC 360-16, ASCE/SEI-10-2015, EN 1993-1-1:2005 e EN 1993-3-1:2006, possuem procedimentos específicos para determinação da força resistente de cantoneiras comprimidas excentricamente. Tais procedimentos consistem no dimensionamento das cantoneiras através de comprimentos de flambagem equivalentes, considerando de forma simplificada a compressão concêntrica e, na maioria das vezes, a flambagem elástica por flexão como o modo de flambagem desses perfis. Dessa forma, a flexo-compressão, bem como o modo de instabilidade por flexo-torção, são desconsiderados nos cálculos. Contudo, diversos estudos na Literatura (cita-se Elgaaly *et al.*, 1991; Temple e Sakla, 1998; Liu e Hui, 2010 e Kettler *et al.*, 2017) mostraram grande divergência desses procedimentos, quando comparados a resultados de análises numéricas e experimentais de compressão excêntrica de cantoneiras.

Sendo assim, torna-se fundamental compreender melhor o comportamento de cantoneiras comprimidas, e com isso buscar novas propostas de dimensionamento que sejam mais consistentes com o comportamento real dos perfis.

1.2 Objetivo

O presente trabalho propõe, através de análises teóricas e numéricas, avaliar o comportamento de cantoneiras laminadas de aço de abas iguais comprimidas, concêntrica e excentricamente, através de ligações parafusadas.

1.3 Justificativa

Atualmente, o foco de estudo dos principais trabalhos sobre cantoneiras comprimidas no Brasil e no exterior segue uma tendência mundial, concentrando-se em perfis formados a frio. Os trabalhos mais relevantes sobre cantoneiras laminadas comprimidas são da década de 1990. Entre os anos 2000 e 2010 foram poucos os trabalhos de qualidade sobre este assunto, embora haja muito a ser explorado, como exemplo a influência das condições de vinculação na resistência da barra.

Ainda, embora o uso de cantoneiras laminadas esteja amplamente consolidado na construção metálica, as normas vigentes adotam simplificações no dimensionamento destes perfis quando comprimidos excêntrica, o que leva a resultados muito divergentes.

Dessa forma, um estudo teórico-numérico sobre a compressão de cantoneiras laminadas, considerando imperfeições geométricas e de materiais do perfil, pode levar a uma maior compreensão do seu comportamento, podendo assim estabelecer uma proposta de dimensionamento mais preciso do que os procedimentos atuais.

1.4 Metodologia

A metodologia para atender os objetivos estabelecidos na Seção 1.2 é dividida entre as seguintes etapas:

- aplicação da análise de estabilidade para perfis de seção transversal aberta de paredes finas em cantoneiras comprimidas a partir da teoria Vlasov (1962);
- desenvolvimento de modelos numéricos através da plataforma computacional *ANSYS v.15.0*, através dos quais seja possível obter informações sobre o comportamento elástico das cantoneiras comprimidas, e que, uma vez inseridas tensões residuais e imperfeições geométricas iniciais, sejam capazes de simular o comportamento real do perfil solicitado;
- comparar as forças críticas de flambagem, obtidas nas análises linearizadas de estabilidade de cantoneiras comprimidas, conectadas com um, dois e três parafusos, com as formulações analíticas propostas por Vlasov (1962);
- validação dos modelos numéricos a partir de resultados experimentais e numéricos dispostos na literatura;

- obter, através de análises numéricas não lineares geométricas e de material, a capacidade resistente de cantoneiras comprimidas (também conectadas por um, dois e três parafusos) considerando a influência de tensões residuais e imperfeições geométricas iniciais;
- comparar a capacidade resistente à compressão das cantoneiras, obtidas numericamente, com prescrições das normas ABNT NBR 8800:2008, ANSI/AISC 360-16, ASCE/SEI-10-2015, EN 1993-1-1:2005 e EN 1993-3-1:2006;
- proposição a partir dos resultados numéricos e conforme necessidade, uma nova proposta de dimensionamento para cantoneiras comprimidas.

1.5 Organização do Texto

O presente trabalho está organizado em Capítulos, da seguinte forma:

- O presente Capítulo, Capítulo 1, introduz o assunto deste trabalho, apresentando a problemática relacionada ao dimensionamento de cantoneiras comprimidas, os objetivos, justificativas e estrutura da dissertação;
- O Capítulo 2 é destinado à revisão da literatura do tema em estudo. No mesmo, encontram-se resumidamente algumas das principais pesquisas sobre cantoneiras comprimidas realizadas no mundo, utilizadas como referências para realização desse trabalho;
- No Capítulo 3 apresenta-se a análise de estabilidade para perfis de seção transversal aberta de paredes finas a partir da teoria de Vlasov (1962), aplicada a cantoneiras comprimidas;
- O Capítulo 4 destina-se ao desenvolvimento dos modelos numéricos: definição da malha de elementos finitos, estabelecimento das condições de contorno e carregamento, definição do material, avaliação da influência das tensões residuais e imperfeições geométricas iniciais no comportamento das cantoneiras comprimidas, validação dos modelos numéricos;
- O Capítulo 5 apresenta os procedimentos das principais normas de dimensionamento, bem como a análise dessas prescrições normativas com base nos resultados obtidos a partir dos modelos numéricos construídos no Capítulo 4;
- O Capítulo 6 destina-se à apresentação e verificação da Proposta de Dimensionamento para cantoneiras comprimidas excentricamente;

- O Capítulo 7 apresenta as principais conclusões extraídas do presente trabalho;

Por fim, encontram-se os apêndices, os quais contêm os códigos APDL utilizados na análise numérica, e são organizados da seguinte forma:

- O Apêndice A contém o código para informação dos parâmetros necessários para construção dos modelos numéricos e realização da análise numérica;
- O Apêndice B contém o código para construção e análise de cantoneiras comprimidas concetricamente;
- O Apêndice C contém o código para construção e análise de cantoneiras comprimidas excentricamente.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Considerações Iniciais

A presente Revisão de Literatura está organizada da seguinte forma:

- i. Histórico sobre os principais trabalhos realizados nos últimos 100 anos sobre cantoneiras comprimidas (Seção 2.2);
- ii. Estudos sobre a influência das Condições de Vinculação no comportamento de cantoneiras comprimidas (Seção 2.3);
- iii. Trabalhos sobre a determinação de tensões residuais em cantoneiras laminadas e sua influência na resistência à compressão do perfil (Seção 2.4);
- iv. Apresentação dos tipos de imperfeições geométricas iniciais adotadas em alguns estudos numéricos de cantoneiras comprimidas (Seção 2.5);

2.2 Cantoneiras Laminadas Comprimidas

Um dos primeiros trabalhos de relevância sobre o comportamento de cantoneiras laminadas comprimidas foi realizado por Stang e Strickenberg (1922). Tal estudo consistiu em uma investigação de setenta cantoneiras laminadas com diferentes condições de vinculação e esbeltezes. Os resultados mostraram boa concordância com a fórmula de flambagem elástica de Euler para barras esbeltas. Segundo Adluri e Madugula (1996a), a elaboração do procedimento para dimensionamento de torres de transmissão da ASCE baseou-se, em parte, no trabalho de Stang e Strickenberg (1922).

Wakabayashi e Nonaka (1965) realizaram um extenso estudo experimental sobre cantoneiras comprimidas excentricamente utilizadas em torres de transmissão. Foram analisadas cantoneiras L 90 x 7 mm, com várias esbeltezes. A excentricidade foi estabelecida de modo que a flexão gerada ocorresse em torno do eixo de simetria. Os resultados mostraram que a capacidade última das barras decresce à medida que se aumenta o valor da excentricidade.

Usami e Galambos (1971) promoveram um dos estudos mais extensos do último século sobre cantoneiras comprimidas excêntrica. Para isso, realizaram inúmeras análises numéricas, a partir de formulações analíticas existentes na época.

Mueller e Erzurumlu (1983) realizaram análises experimentais em cantoneiras L 75 x 6 mm, onde parâmetros como resistência ao escoamento, excentricidade de introdução do carregamento e condições de vinculação foram avaliadas. Segundo os autores, as barras comprimidas excêntrica falharam predominantemente por flexão em torno do eixo de menor inércia.

Woolcock e Kitipornchai (1986) avaliaram por meio de análises numéricas o comportamento de cantoneiras em estruturas treliçadas. Após as análises, observaram que os deslocamentos predominantes eram perpendiculares ao plano da aba conectada.

Kitipornchai e Lee (1986) realizaram uma investigação numérica em cantoneiras simples e dupla em “T” submetidas à compressão. Seus resultados mostraram que os modos de flambagem dependem das características da seção transversal e da esbeltez da barra. Na fase inelástica da curva de flambagem, a flexo-torção não teve influência na capacidade última.

Al-Sayed e Bjorhovde (1989) reportaram o resultado de uma investigação experimental em doze cantoneiras que falharam por flexão ou por flexo-torção. Seus resultados mostraram a influência da relação b/t na resistência final da cantoneira, entre outras observações.

Elgaaly *et al.* (1991) estudaram o comportamento de cantoneiras laminadas parafusadas pela aba através de ensaios experimentais de larga escala em uma estrutura treliçada. Foram analisadas barras com várias esbeltezes e relações b/t . Os autores identificaram seis modos de falha, os quais dependiam da esbeltez, da relação b/t e do tipo de ligação. Esses modos de falha foram classificados, de modo geral, em dois grupos: modos globais com e sem modos locais acoplados. Os autores observaram, ainda, que as deformações plásticas mais pronunciadas se encontravam próximas à região da ligação, devido a maiores valores de tensão nesse local.

Bathon *et al.* (1993) executaram um extenso estudo experimental em cantoneiras de abas iguais e desiguais comprimidas concêntrica e excêntrica, onde foram avaliados os parâmetros: esbeltez, relação b/t , e o número de parafusos na ligação. Os resultados foram comparados com prescrições de uma versão antiga da norma ASCE/SEI-10-2015 (o

procedimento para dimensionamento de cantoneiras laminadas comprimidas proposto por essa norma não se alterou ao longo dos anos). Segundo esses autores, as recomendações propostas pela norma americana fornecem torres seguras, mas superestima a capacidade individual das barras.

Na década de 1990, além dos dois trabalhos citados anteriormente, destacam-se os estudos sobre cantoneiras laminadas da Universidade de Windsor, no Canadá. Dentre estes se citam: investigação experimental do comportamento de cantoneiras à flexão (Adluri e Madugula, 1996a), desenvolvimento de uma curva de flambagem para cantoneiras (Adluri e Madugula, 1996b), estudo sobre cantoneiras comprimidas soldadas por uma aba à placa *gusset* (Temple e Sakla, 1996 e Sakla, 1997), obtenção da capacidade resistente à compressão de cantoneiras comprimidas conectadas por dois parafusos em uma aba (Haidar, 1997), obtenção da capacidade última de cantoneiras comprimidas excentricamente (Shani, 1998), dentre outros.

Sabe-se que nas cantoneiras de abas iguais conectadas por uma aba (Figura 2.1) ocorre, teoricamente, flexão em torno de z e de y . Porém, o efeito de flexão em torno do eixo de maior inércia, eixo y , é mais pronunciado, uma vez que a excentricidade em torno de y é bem maior que a excentricidade em torno de z , acarretando em valores mais elevados de momento fletor em torno deste eixo. Através de estudos experimentais em cantoneiras comprimidas excentricamente, soldadas por uma aba em uma placa *gusset* (Figura 2.1), Temple e Sakla (1996) mediram as deflexões em relação aos eixos médios às abas, no meio comprimento da barra. As medidas mostraram que o deslocamento na direção do eixo z é 2,5 a 5 vezes superior ao deslocamento na direção y . O ângulo (θ) do eixo de flexão em relação ao eixo z_1 (conforme Figura 2.1) pôde ser determinado a partir dos deslocamentos, que indicaram valores entre 15 a 25°. Os autores concluíram que o eixo de flexão nunca coincide com os eixos principais de inércia.

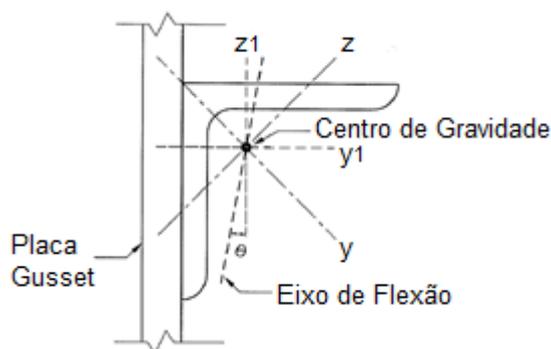


Figura 2.1 - Cantoneira de abas iguais soldada através de uma aba em uma placa *gusset* (Temple e Sakla, 1996).

Nos anos 2000 e 2010, seguindo uma tendência mundial, os estudos sobre cantoneiras foram direcionados para os perfis formados a frio, havendo até mesmo trabalhos de grande relevância no Brasil sobre o assunto. No país, os destaques estão concentrados nos estudos realizados na Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, a saber: Chodraui (2006), Maia e Malite (2009), Mesacasa Jr *et al.* (2014) e Branquinho (2017). No âmbito internacional, destacam-se os trabalhos de Popovic *et al.* (2001), Rasmussem (2003), Dinis *et al.* (2010), Dinis e Camotim (2014), dentre outros.

Nas cantoneiras laminadas comprimidas, são poucos os trabalhos de destaque realizados nos últimos anos, sendo os mais notáveis: Liu e Hui (2008), Liu e Hui (2010), Shi *et al.* (2011), Ban *et al.* (2012), Ban *et al.* (2013), Justiniano (2014), Može *et al.* (2014), Preto (2016) e Kettler *et al.* (2017). Esta última é a principal referência desse trabalho, descrita com detalhes na Subseção 2.2.1.

É válido destacar um curioso resultado obtido por Liu e Hui (2010) em seus extensos estudos numéricos sobre cantoneiras laminadas comprimidas excêntricas. Nesse trabalho, foi realizado um estudo paramétrico para avaliar os efeitos das excêntricas em relação aos eixos de maior e de menor inércia, do índice de esbelteza reduzido (λ_0) e da relação b/t na resistência à compressão das barras. Os valores dos parâmetros utilizados neste estudo encontram-se na Tabela 2.1:

Tabela 2.1 - Valores utilizados no estudo paramétrico de Liu e Hui (2010).

λ_0	0,27; 0,53; 0,80; 1,06; 1,33; 1,60; 1,86; 2,13 e 2,39
Excentricidade*	0, $y_0/4$, $y_0/2$, y_0 , $3y_0/2$, $2y_0$
b/t	5,3; 6,4; 8,0; 10,7 e 16,0

* y_0 é a distância entre o centro de torção e o centro geométrico, na direção do eixo de maior inércia.

Os resultados numéricos mostraram que o modo predominante de falha foi o de instabilidade por flexão. Os autores perceberam que quando a excentricidade provocava flexão em torno do eixo de maior inércia, para um dado valor de λ_0 , há um valor de excentricidade até o qual a resistência da cantoneira é igual a de uma barra comprimida concentricamente. Os autores chamam esse valor de excentricidade crítica, e_{z0} . Para valores acima dessa grandeza, a carga última diminui (conforme Figura 2.2-a). No caso de flexão em relação ao eixo de menor inércia, não foi identificada a existência de uma excentricidade crítica (ver Figura 2.2-b).

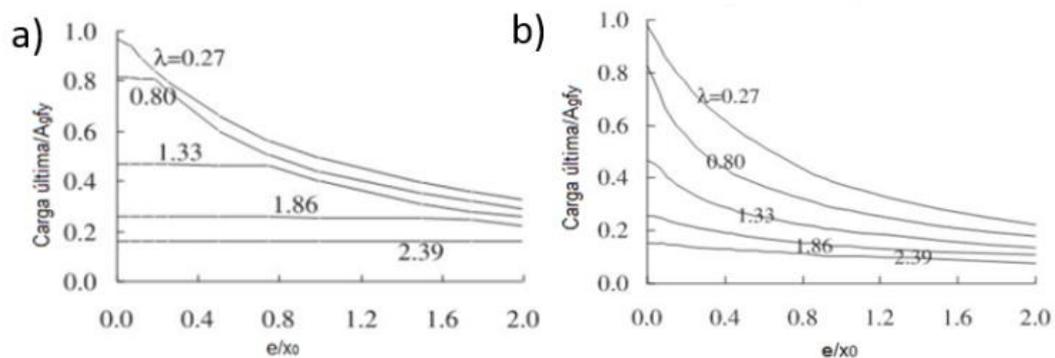


Figura 2.2 - a) Excentricidade ocasionando momento em torno do eixo de maior inércia; b) Excentricidade ocasionando momento em torno do eixo de menor inércia (Liu e Hui, 2010).

Por fim, apresenta-se na Tabela 2.2 uma cronologia de alguns dos principais trabalhos sobre cantoneiras laminadas comprimidas realizados nos últimos 100 anos.

Tabela 2.2 – Principais trabalhos sobre cantoneiras laminadas comprimidas nos últimos 100 anos.

Autoria	Natureza	Dimensões da cantoneira (em mm)
Stang e Strickenberg (1922)	Experimental	L 31,8 a L 152,4; várias espessuras
Wakabayashi e Nonaka (1965)	Experimental	L 90 x 7 mm
Usami e Galambos (1971)	Numérico	L 50,8 x 6,4
Mueller e Erzurumlu (1983)	Experimental	L 75 x 6
Woolcock e Kitipornchai (1986)	Numérico	L 76 x 6,5 e L 102 x 6,5
Kitipornchai e Lee (1986)	Numérico	L 102 x 6,5
Al-Sayed e Bjorhovde (1989)	Numérico	L 76 x 10; L 101 x 16 e L 127 x 16
Elgaaly <i>et al.</i> (1991)	Experimental	L 44; L 51; L 64; várias espessuras
Bathon <i>et al.</i> (1993)	Experimental	L 44 a L 152; várias espessuras
Adluri e Madugula (1996a)	Experimental	L 64 x 9,5; L 76 x 4,8; L 76 x 12,7; L 102 x 7,9 e L 127 x 9,5
Adluri e Madugula (1996b)	Numérico	L 64 x 9,5 a L 152 x 9,5
Temple e Sakla (1996)	Experimental e Numérico	L 51 x 6,4
Sakla (1997)	Experimental e Numérico	L 64 x 7,9
Haidar (1997)	Experimental	L 64 x 4,8; L 64 x 6,4 e L 76 x 6,4
Shani (1998)	Experimental e Numérico	L 64 x 6,4; L 64 x 7,9; L 51 x 4,8; L 51 x 6,4 e L 51 x 7,9
Liu e Hui (2007)	Experimental	L 51, várias espessuras
Liu e Hui (2010)	Numérico	L 51, várias espessuras
Shi <i>et al.</i> (2011)	Experimental e Numérico	L 125 x 8; L 140 x 10; L 160 x 10; L 180 x 12 e L 200 x 14
Ban <i>et al.</i> (2012)	Experimental	L 125 x 8; L 140 x 10; L 160 x 10; L 180 x 12 e L 200 x 14
Ban <i>et al.</i> (2013)	Experimental	L 125 x 8; L 140 x 10; L 140 x 12; L 160 x 10; L 180 x 12 e L 200 x 14
Justiniano (2014)	Numérico	L 15 x 1; L 20 x 1; L 110 x 5; L 160 x 10; L 125 x 8; L 90 x 7; L 200 x 14; L 180 x 10; L 45 x 3,5
Može <i>et al.</i> (2014)	Experimental e Numérico	L 180 x 16; L 180 x 19; L 250 x 21; L 250 x 28; L 300 x 26; L 300 x 35; L 250 x 20 e L 250 x 31
Preto (2016)	Numérico	Diversos perfis com a relação b/t entre 7,5 e 25
Kettler <i>et al.</i> (2017)	Numérico	L 60 x 6, L 80 x 8 e L 120 x 12

2.2.1 Kettler *et al.* (2017)

Kettler *et al.* (2017) realizaram um extenso estudo numérico sobre a compressão de cantoneiras parafusadas através de uma aba. Foram avaliadas a influência das condições de vinculação da placa *gusset* (ver Figura 2.3) e do número de parafusos na resistência à compressão do perfil. Na construção dos modelos numéricos, houve uma preocupação em modelar a região da ligação de forma mais realística possível. Assim, o efeito do atrito entre o perfil e a placa *gusset* e entre o parafuso e a parede do furo, bem como a folga nos furos e a protensão nos parafusos, foram incluídos nos modelos numéricos, conforme a Figura 2.3. As condições de contorno foram aplicadas no encontro da placa *gusset* com o dispositivo de aplicação de carga.

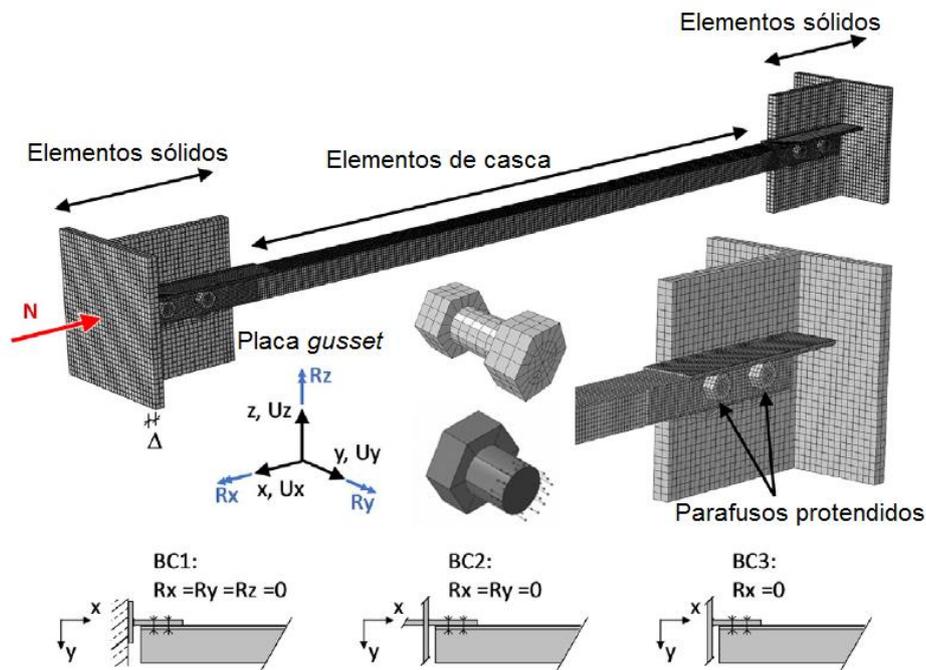


Figura 2.3 – Modelo numérico e condições de vinculação utilizados (Kettler *et al.*, 2017 - Adaptado).

O modelo numérico de Kettler *et al.* (2017) foi validado a partir de ensaios, de sua própria autoria, de uma compressão excêntrica do perfil L 80 x 8 mm conectada por dois parafusos (diâmetros iguais a 22 mm), conforme o desenho esquemático da Figura 2.4. Os autores não inseriram tensões residuais em seus modelos, porém introduziram uma imperfeição

geométrica inicial igual a $L/678$ como a forma do primeiro modo de flambagem de uma análise linearizada de estabilidade realizada previamente. Para as demais análises paramétricas, os autores adotaram uma imperfeição geométrica inicial de magnitude igual a $L/300$.

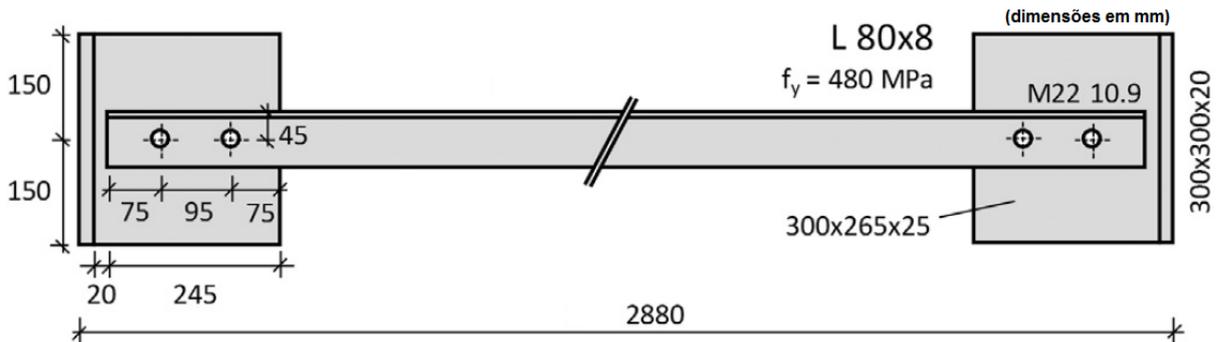


Figura 2.4 – Desenho esquemático da análise experimental utilizada para validação do modelo numérico de Kettler *et al.* (2017) (Kettler *et al.*, 2017 - Adaptado).

A Tabela 2.3 e a

Tabela 2.4 apresentam os resultados encontrados por Kettler *et al.* (2017) relativos às forças críticas de flambagem elástica e resistências últimas das cantoneiras comprimidas. É notável um ganho de resistência nos perfis à medida que se aumentou o número de parafusos e se alteraram as restrições nas condições de vinculação da chapa *gusset*. As condições de contorno BC1, BC2 e BC3 podem ser vistas na Figura 2.3.

Tabela 2.3 - Resultados numéricos da compressão de cantoneiras conectadas por um parafuso em uma aba (Kettler *et al.*, 2017 - Adaptado).

L (mm)	BC1			BC2			BC3		
	N _{cr} (kN)	N _{út} (kN)	χ	N _{cr} (kN)	N _{út} (kN)	χ	N _{cr} (kN)	N _{út} (kN)	χ
L60 × 6									
640	640	149.9	0.505	408	102.7	0.346	276	94.7	0.319
940	508	136.0	0.458	274	84.5	0.284	159	74.3	0.250
1240	386	138.2	0.465	191	66.8	0.225	102	57.1	0.192
1540	280	140.7	0.474	138	53.4	0.180	70.3	44.5	0.150
1840	212	128.5	0.433	103	43.3	0.146	51.1	35.2	0.118
2140	160	103.6	0.349	79.2	35.5	0.119	38.7	28.3	0.095
2440	125	83.2	0.280	62.8	29.5	0.099	30.3	23.2	0.078
L80 × 8									
760	984	295.9	0.502	532	231.3	0.393	436	217.9	0.370
1120	854	280.4	0.476	496	187.6	0.319	320	167.1	0.284
1480	622	270.0	0.458	351	147.8	0.251	210	127.9	0.217
1840	463	273.0	0.464	268	117.8	0.200	149	99.6	0.169
2200	350	256.4	0.435	209	94.7	0.161	110	78.6	0.133
2560	270	212.4	0.361	165	76.1	0.129	84.1	63.0	0.107
2920	287	169.4	0.288	140	63.8	0.108	67.0	51.5	0.087
L120 × 12									
1320	2206	509.0	0.563	1477	380.4	0.421	1097	345.6	0.383
1970	1566	526.0	0.582	1032	306.9	0.340	630	267.0	0.296
2620	1078	461.1	0.510	710	242.0	0.268	392	203.6	0.225
3270	765	385.8	0.427	505	191.1	0.212	263	157.0	0.174
3920	565	320.3	0.355	373	152.9	0.169	188	123.4	0.137
4570	433	267.0	0.296	285	123.4	0.137	141	98.7	0.109
5220	342	225.0	0.249	224	100.8	0.112	109	80.5	0.089

L: Comprimento da barra; N_{cr}: Força crítica de flambagem elástica; N_{út}: Força última; χ = N_{út}/carga de plastificação

Tabela 2.4 - Resultados numéricos da compressão de cantoneiras conectadas por dois parafusos em uma aba (Kettler *et al.*, 2017 - Adaptado).

L (mm)	BC1			BC2			BC3		
	N _{cr} (kN)	N _{út} (kN)	χ	N _{cr} (kN)	N _{út} (kN)	χ	N _{cr} (kN)	N _{út} (kN)	χ
L60 × 6									
640	732	236.2	0.795	531	108.1	0.364	392	100.9	0.340
940	625	232.3	0.782	356	92.3	0.311	192	80.0	0.269
1240	518	210.4	0.708	228	74.6	0.251	114	61.1	0.206
1540	393	181.6	0.611	157	59.4	0.200	75.6	47.0	0.158
1840	282	149.0	0.502	114	47.9	0.161	53.9	36.8	0.124
2140	203	118.9	0.400	85.6	38.3	0.129	39.7	28.4	0.096
2440	155	99.3	0.334	66.0	32.0	0.108	30.4	23.7	0.080
L80 × 8									
760	1233	417.0	0.708	992	237.4	0.403	779	225.5	0.383
1120	1085	420.6	0.714	713	202.4	0.344	404	177.6	0.302
1480	874	380.4	0.646	476	165.3	0.281	247	137.0	0.233
1840	676	336.2	0.571	333	131.5	0.223	165	105.6	0.179
2200	513	288.7	0.490	258	105.8	0.180	119	82.3	0.140
2560	391	242.9	0.412	194	87.0	0.148	93.1	65.6	0.111
2920	304	213.9	0.363	152	72.0	0.122	69.5	53.3	0.090
L120 × 12									
1320	2370	578.9	0.641	1968	399.1	0.442	1162	354.6	0.393
1970	1721	523.7	0.580	1226	333.5	0.369	639	275.9	0.305
2620	1202	465.4	0.515	794	269.1	0.298	397	209.6	0.232
3270	862	401.7	0.445	547	213.0	0.236	267	160.5	0.178
3920	639	342.3	0.379	397	171.6	0.190	191	126.0	0.139
4570	490	290.7	0.322	300	139.6	0.155	150	100.2	0.111
5220	386	247.5	0.274	234	114.9	0.127	111	81.8	0.091

L: Comprimento da barra; N_{cr}: Força crítica de flambagem elástica; N_{út}: Força última; χ = N_{út}/carga de plastificação

2.3 Condições de Vinculação

Na compressão excêntrica, a ligação das cantoneiras a outros elementos (chapa *gusset* e perfis em geral) é realizada por meio de solda ou de parafusos, sendo este último o mais utilizado.

Nas cantoneiras conectadas através de uma aba por meio de um parafuso apenas, a ligação é considerada rotulada. Quando se utilizam dois parafusos ou mais, a ligação é usualmente denominada semi-engastada (situação intermediária entre rótula e engaste). Nas estruturas das torres de transmissão, a ligação é frequentemente realizada através de um parafuso conectado em uma das abas da cantoneira. Isso é possível devido à alta esbelteza das barras utilizadas. Neste caso, o uso de apenas um parafuso não limita significativamente a capacidade resistente, que é determinada pela força de flambagem da barra. Em outros tipos de construção, a utilização de apenas um parafuso é muito rara, pois nestes casos, as esbeltezes das barras são bem inferiores aos utilizados nas torres de transmissão, e, portanto, o uso de um parafuso reduziria a capacidade resistente da cantoneira (Kettler *et al.*, 2017).

A obtenção da restrição imposta por uma ligação parafusada quanto a deslocamentos e rotações das extremidades da cantoneira é complexa e, em se tratando de uma barra real, depende ainda da rigidez dos outros elementos que compõem a ligação. Ainda, é muito difícil quantificar a rigidez dos parafusos e o efeito da geometria da chapa *gusset* nas cantoneiras comprimidas. Bathon *et al.* (1993) realizaram ensaios experimentais com cantoneiras laminadas com 1, 2, 3 e 5 parafusos, e verificaram que o aumento do número de parafusos garante maior rigidez à extremidade, o que confere maior resistência à compressão às barras. Os autores também verificaram que a influência da excentricidade de aplicação da força normal na resistência das cantoneiras aumenta para esbeltezes entre 60 e 120 e diminui para valores de 120 a 210. Sabe-se que a capacidade resistente à compressão de cantoneiras de pequena e média esbelteza é mais influenciada pela excentricidade de aplicação da força, enquanto cantoneiras esbeltas são mais sensíveis às restrições de deslocamento impostas em suas extremidades. A norma ASCE/SEI-10-2015, por exemplo, estabelece valores para as esbeltezes a serem utilizadas no dimensionamento das cantoneiras comprimidas em função das condições de vinculação das barras (ver Capítulo 5, Seção 5.3).

Elgaaly *et al.* (1991) observaram em seus estudos sobre cantoneiras parafusadas por uma aba (com um e dois parafusos) que o comportamento dos elementos é dependente do tipo de ligação. As cantoneiras com ligações de dois parafusos apresentaram resistência à compressão

superior em 28% às cantoneiras conectadas por um parafuso. Os autores destacam como causas desta diferença às restrições de extremidade e à maior concentração de tensões na ligação de um parafuso quando comparada à ligação de dois parafusos.

Temple e Sakla (1998) estudaram, por meio de análises numéricas, o comportamento de cantoneiras soldadas por uma aba em uma chapa *gusset* e submetidas à compressão. Os efeitos da espessura, da largura e do comprimento livre da chapa *gusset* (distância entre a vinculação da chapa *gusset* à estrutura e a ligação da cantoneira nessa chapa) foram avaliados. Os resultados mostraram forte influência da espessura e da largura dessa chapa na resistência à compressão das cantoneiras, mas pouca influência do comprimento livre. À medida que se aumentaram as dimensões da placa *gusset*, a ligação ficou mais rígida, havendo, portanto, um aumento na capacidade resistente da barra.

Os resultados do estudo numérico de Kettler *et al.* (2017) mostraram que a diferença na capacidade resistente entre cantoneiras engastadas (BC1) e rotuladas (BC3) – ver Tabela 2.3 e Tabela 2.4 - é mais pronunciada do que a diferença entre a resistência das barras com um e com dois parafusos, algo que não é levado em consideração nos procedimentos normativos atuais. Ainda, suas análises numéricas revelaram pouca ou nenhuma diferença na capacidade resistente de cantoneiras com dois e com três parafusos.

2.4 Tensões Residuais em Cantoneiras Laminadas

A resistência das barras de aço depende da relação tensão-deformação do material, principalmente da resistência ao escoamento do aço (f_y), mas também da intensidade e da distribuição de tensões residuais que resultam do processo de fabricação dos perfis. Como a tensão residual é uma imperfeição do material do perfil, essa possui relevância significativa no comportamento de flambagem da barra.

Nos perfis laminados, as tensões residuais são de natureza térmica. Após o processo de laminação, as partes mais expostas à atmosfera dos perfis se resfriam mais rapidamente e adquirem resistência, impondo uma restrição ao resfriamento do restante do perfil ainda aquecido. Esse resfriamento não uniforme resulta em partes do perfil com tensões residuais de tração e outras com compressão.

No caso das cantoneiras laminadas, as extremidades das abas e o vértice deste perfil resfriam mais rapidamente que a zona localizada no meio das abas. Logo, a tendência de contração nas

regiões de resfriamento lento (na metade das abas) é restringida pelas partes de resfriamento rápido (extremidade das abas e canto da cantoneira), gerando tensões residuais. O valor e a distribuição das tensões residuais dependem da geometria da seção transversal, tipo do aço e das condições de resfriamento do perfil.

Muitos autores, como Elgaaly *et al.* (1991), Shi *et al.* (2011), Ban *et al.* (2012) e Može *et al.* (2014) consideraram, de forma simplificada, que a distribuição das tensões residuais possui variação linear, sendo de compressão nas extremidades da aba e no canto da cantoneira e de tração a meio comprimento das abas. Elgaaly *et al.* (1991) verificaram que as tensões residuais em cantoneiras laminadas não excediam $0,25-0,30f_y$, e que o impacto na capacidade última era desprezível, sendo menor ou igual a 5%. Usami e Galambos (1971) concluíram em seus estudos sobre compressão excêntrica de cantoneiras que os efeitos das tensões residuais eram insignificantes na capacidade resistente e que a presença das tensões residuais reduzia esses valores em no máximo em 4%. Alsayed e Bjorhovde (1989) mediram as tensões residuais de cantoneiras laminadas por meio do Método do Seccionamento e encontraram um valor máximo de $0,32f_y$ para compressão e $0,40f_y$ de tração. Adluri e Madugula (1996a), também utilizando o Método do Seccionamento, determinaram que todas as tensões residuais apresentaram valor absoluto abaixo de $0,25f_y$, e que suas magnitudes independem da espessura da aba. Foi observada ainda por esses autores uma discrepância significativa entre os valores das tensões de cada aba da cantoneira.

Shi *et al.* (2011) avaliaram, por meio de análises numéricas, o efeito das tensões residuais na capacidade resistente de cantoneiras. Utilizou-se a distribuição de três pontos, a mesma utilizada pelo *European Convention for Constructional Steelwork - ECCS* (1976), mostrada na Figura 2.5. Nesta figura, os valores negativos correspondem a tensões de compressão e os positivos a tensões de tração. β é um fator que relaciona a resistência ao escoamento do aço com a tensão residual máxima. Foram realizadas análises para β igual a 0,20, 0,25 e 0,30. A variação das tensões residuais na seção transversal teve pouca influência na capacidade resistente das barras.

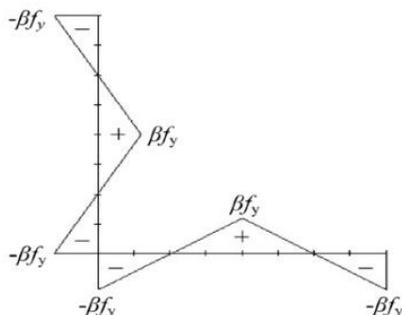


Figura 2.5 - Distribuição de tensões residuais segundo ECCS (1976) (Shi *et al.*, 2011).

Može *et al.* (2014) realizaram um programa experimental, baseado no Método do Seccionamento, para medir a magnitude e a distribuição das tensões residuais em cantoneiras com abas grandes, e em seguida uma análise numérica para avaliar a capacidade resistente das barras. Para tensões residuais, foi obtido um valor máximo absoluto igual a $0,2f_y$, valores esses independentes do grau do aço. Foram estudados dois tipos de distribuição de tensões residuais: o modelo de três pontos e o modelo de quatro pontos, apresentados na Figura 2.6. Os resultados das análises numéricas mostraram grande diferença entre os dois modelos, sendo que em comparação com os dados experimentais existentes, as duas distribuições foram conservadoras, sendo a distribuição de três pontos a mais conservadora.

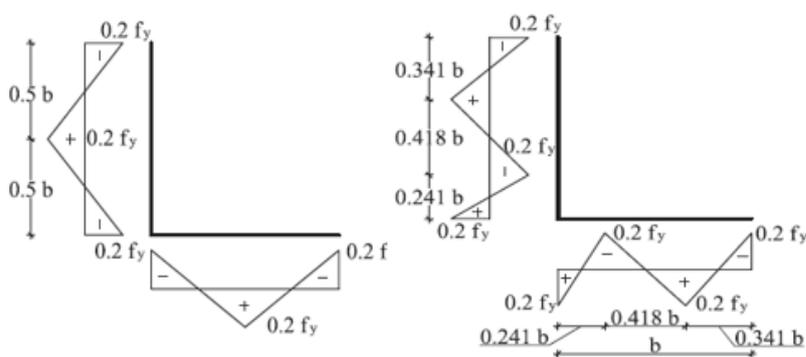


Figura 2.6 - Modelo de três e quatro pontos de distribuição de tensões residuais (Može *et al.*, 2014).

A influência das tensões residuais encontra-se incorporada nas curvas de dimensionamento da maioria das normas existentes. As recomendações do ECCS (1976) adotam uma distribuição linear de três pontos com valor de tensão residual máximo absoluto igual a $0,25f_y$.

2.5 Imperfeições Geométricas Iniciais

Quando se observa o comportamento de barras reais, além dos efeitos das tensões residuais, deve-se levar em consideração também as imperfeições geométricas iniciais.

As imperfeições geométricas iniciais, bem como as tensões residuais, surgem do processo de fabricação dos perfis, e sendo assim, a hipótese de barras perfeitamente retas não é mais adequada. Essas imperfeições iniciais são responsáveis pelo acréscimo gradual no esforço de flexão durante a força de compressão. Devido a essas imperfeições, podem ocorrer deslocamentos laterais durante o início do carregamento nos elementos que compõem o perfil, acarretando no surgimento de esforços adicionais e reduzindo a resistência final da barra.

A maioria dos procedimentos normativos adota, para perfis em geral, uma deformação inicial na forma de uma meia onda senoidal com amplitude igual a $L/1500$. Este é o valor sugerido por Bjorhovde (1972) a partir de um extenso estudo sobre imperfeições iniciais, e que considera outras excentricidades, como por exemplo, as oriundas do carregamento.

Adluri e Madugula (1996a) reportaram um estudo experimental sobre imperfeições geométricas de cantoneiras laminadas, medidas em torno dos eixos principais de inércia. Das 50 barras analisadas, foi encontrado um valor médio igual a $L/1760$ a meio comprimento das barras. Assim, os autores concluíram que o valor encontrado por Bjorhovde (1972) - $L/1500$ – é perfeitamente aplicável a cantoneiras.

A medição de imperfeições geométricas no laboratório possui muitas dificuldades. Autores como Ban *et al.* (2013) e Chodraui (2006) mediram as imperfeições em quatro pontos da seção transversal no meio da cantoneira, conforme Figura 2.7. Segundo Chodraui (2006), a estratégia de medir as imperfeições somente nestes quatro pontos é atribuída ao fato dessas regiões serem mais rígidas e, portanto, sofrerem menos influência nos deslocamentos dos modos locais. Entretanto, os deslocamentos máximos observados nesses pontos consistem em uma superposição de deslocamentos provenientes da deformação original do eixo da barra, da deformação local das abas e torção da seção transversal.

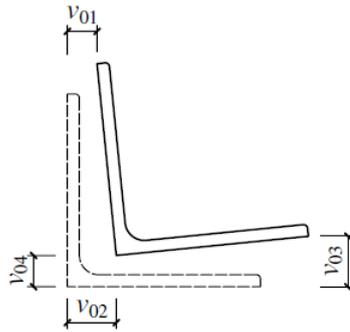


Figura 2.7 - Estratégia de medição das imperfeições geométricas iniciais de cantoneira utilizada por Ban *et al.* (2013) e Chodraui (2006). (Ban *et al.*, 2013).

A imperfeição geométrica inicial local das cantoneiras não é usualmente abordada pelos pesquisadores, que se atentam na maioria das vezes às imperfeições de flexão associadas aos eixos principais de inércia. Porém, devido ao surgimento de cantoneiras com elevada esbeltez das abas, como é o caso das cantoneiras formadas à frio, o modo de imperfeição local tem sido interesse de estudo.

Sun e Butterworth (1998 *apud* Justiniano 2014) verificaram que, para cantoneiras laminadas, as imperfeições geométricas iniciais de rotação não afetam a resistência última, porém o comportamento pós-pico de carregamento é diferente para cada tipo de imperfeição.

É bastante difundido na literatura que a imperfeição geométrica de flexão leva a variações elevadas da capacidade resistente em barras comprimidas concêntricas. Enquanto nas cantoneiras comprimidas excêntricas, o efeito das imperfeições geométricas é muito pequeno se comparado ao efeito da excentricidade de aplicação da força normal. Sakla (1997) em seus estudos sobre compressão de cantoneiras soldadas por uma aba observou que os efeitos das imperfeições geométricas iniciais não foram relevantes. Liu e Hui (2010) avaliaram a influência de vários valores de excentricidade em torno dos eixos de maior e de menor inércia na capacidade resistente de cantoneiras. Concluiu-se que a imperfeição geométrica teve efeito desprezível na compressão excêntrica, enquanto que na compressão concêntrica, o valor da capacidade resistente decresce a medida que a imperfeição aumenta, conforme Figura 2.8.

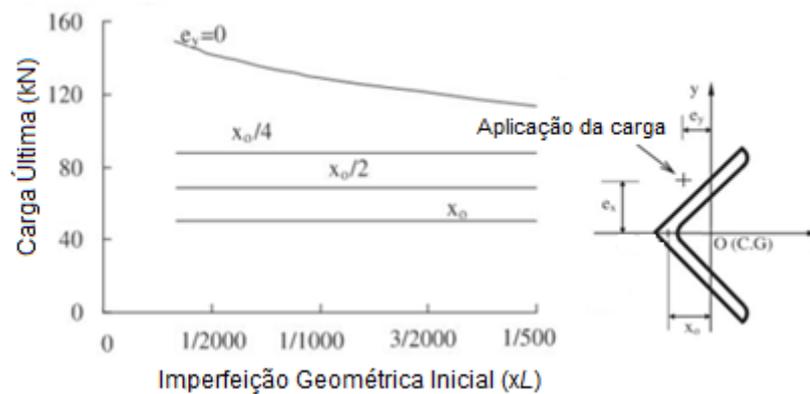


Figura 2.8 - Efeito da imperfeição geométrica de flexão em torno do eixo de menor inércia (Liu e Hui, 2010 - Adaptado).

A Tabela 2.5 apresenta algumas das imperfeições geométricas iniciais adotadas por alguns autores da literatura de referência em seus trabalhos.

Tabela 2.5 - Valores de imperfeições geométricas iniciais de cantoneiras medidas ou adotadas por alguns autores em seus trabalhos.

Autores	Valores das imperfeições de flexão
Adluri e Madugula (1996a)	$L/1760$
Temple e Sakla (1998)	Cantoneiras curtas: $L/1830$ a $L/4125$ Cantoneiras intermediárias: $L/1000$ a $L/4430$; Cantoneiras esbeltas: $L/930$ a $L/9130$
Liu e Hui (2010)	$L/3000, L/2500, L/2000, L/1500, L/1000, L/500,$ $L/250$
Može <i>et al.</i> (2014)	$L/1000$
Kettler <i>et al.</i> (2017)	$L/300$

3 FORMULAÇÃO ANALÍTICA PARA DETERMINAÇÃO DA FORÇA CRÍTICA DE FLAMBAGEM ELÁSTICA DE CANTONEIRAS COMPRIMIDAS

3.1 Considerações Iniciais

Barras submetidas à compressão com seção transversal monossimétrica e assimétrica estão sujeitas à instabilidade por flexo-torção. Portanto, as cantoneiras laminadas de abas iguais – objeto dessa dissertação – estão inseridas neste contexto. O problema da flexo-torção no regime elástico, de barras com seção transversal aberta de paredes finas, embora estudado anteriormente por Timoshenko e Gere (1961), foi sistematizado por Vlasov (1962). Segundo esse autor, há dois tipos de problemas de estabilidade descritos por equações diferenciais homogêneas com condições de contorno também homogêneas. O primeiro deles, também chamado de problema de autovalor, é aplicado à estruturas onde ocorre a bifurcação do equilíbrio quando o carregamento atinge seu valor crítico; o segundo é aplicável nas situações onde o carregamento crítico é definido como aquele que permite variações extremamente grandes dos deslocamentos para uma variação tão pequena quanto se queira do carregamento. As cantoneiras comprimidas concêntricamente enquadram-se no primeiro caso, enquanto as cantoneiras comprimidas excêntricamente, no segundo.

Na presente seção, apresenta-se a formulação de Vlasov (1962) para obtenção da força crítica de flambagem elástica para uma seção transversal genérica aberta de paredes finas, com sua posterior aplicação no caso de cantoneiras comprimidas.

3.2 Hipóteses Básicas

As barras desta seção, bem como os perfis de todo o trabalho, serão referidas a um sistema de eixos x y z , sendo y e z os eixos principais de inércia da seção transversal e x o eixo

longitudinal, que passam pelo centro geométrico das seções. Seja então uma barra de seção transversal genérica aberta de paredes finas sujeita a uma força axial (N) e a momentos fletores (M_y e M_z) aplicados nas extremidades conforme Figura 3.1, onde CG representa o centro geométrico e $D(y_0, z_0)$, o centro de torção da seção.

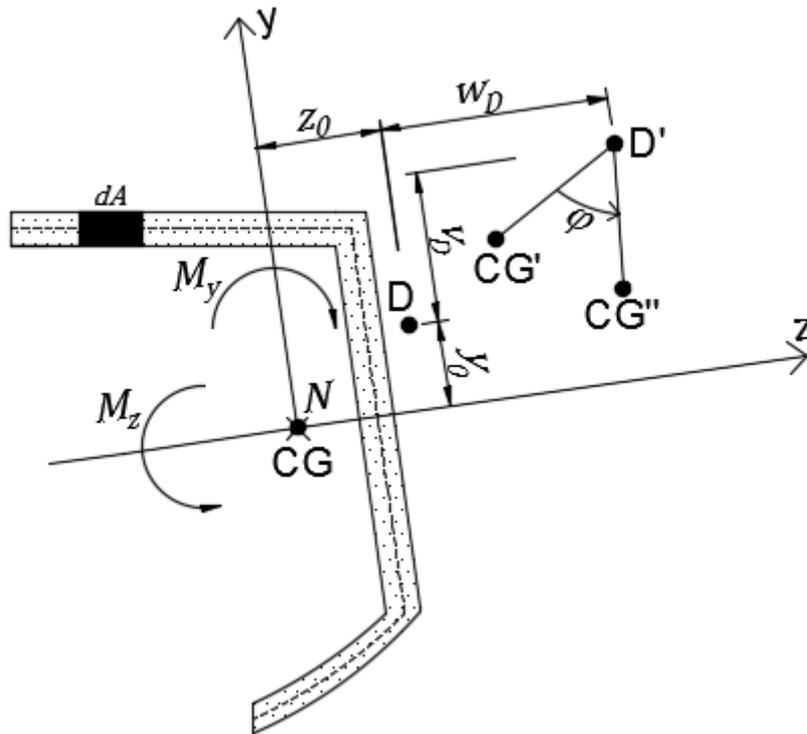


Figura 3.1 – Seção transversal genérica aberta de paredes finas submetida a força axial e momentos fletores em torno dos eixos principais de inércia.

De acordo com Vlasov (1962), quando essa barra for submetida a um carregamento capaz de causar a sua instabilidade (carregamento crítico), ela passará a ocupar uma nova posição de equilíbrio.

No desenvolvimento desta formulação adotam-se, inicialmente, as seguintes hipóteses:

- A espessura do perfil é bem inferior às outras dimensões da seção transversal e essas, por sua vez, são bem menores que o comprimento da barra;
- A seção transversal é indeformável em seu plano, e suas dimensões não variam com x ;

A segunda hipótese permite que se trate o problema como um movimento de corpo rígido no plano yz , e assim, a nova posição de equilíbrio da barra pode ser caracterizada por três funções em x : ângulo de rotação (φ) e deslocamentos (v_D e w_D) do centro de torção nas direções dos eixos principais (y e z , respectivamente) da seção transversal, conforme mostrado na Figura 3.1. A partir dessas funções obtêm-se equações diferenciais, as quais, na maioria das vezes, são de difícil solução direta até mesmo para os casos mais simples de vinculação e carregamento. Na Seção 3.3 serão deduzidas as equações diferenciais para a seção transversal indicada na Figura 3.1, utilizando o Método do Equilíbrio em Teoria de 2ª Ordem com pequenos deslocamentos.

3.3 Estabilidade de uma Barra de Seção Transversal Aberta de Paredes Finas

Conforme a Figura 3.1, o deslocamento da seção transversal no seu plano pode ser considerado como a superposição de deslocamentos relativos à translação e à rotação. Assim, utilizando-se a Teoria de 2ª Ordem com pequenos deslocamentos, obtêm-se as Equações (3.1) e (3.2), as quais expressam os deslocamentos da seção transversal nas direções y e z , respectivamente.

$$v = v_D - (z - z_0)\varphi \quad (3.1)$$

$$w = w_D + (y - y_0)\varphi \quad (3.2)$$

onde:

φ é o ângulo de rotação;

z_0 e y_0 são as coordenadas do centro de torção (D);

w_D e v_D são os deslocamentos do centro de torção em z e y , respectivamente.

Logo, v e w são funções de $v_D(x)$, $w_D(x)$ e $\varphi(x)$, e as condições que devem satisfazer essas funções são expressas por três equações diferenciais dependentes. Para deduzir essas equações, parte-se das equações básicas da flexão (da Resistência dos Materiais) – Equações (3.3) e (3.4) - e da flexo-torção (proposta por Vlasov, 1962) – Equação (3.5).

$$EI_z v_D'' = M_z \quad (3.3)$$

$$EI_y w_D'' = M_y \quad (3.4)$$

$$EC_w \varphi''' - GJ \varphi' = -M_t \quad (3.5)$$

onde:

I_z e I_y são os momentos de inércia relativos aos eixos principais de inércia z e y ;

M_z e M_y são os momentos fletores relativos aos eixos principais de inércia z e y ;

M_t é o momento de torção;

J é a constante de torção;

E e G são os módulos de elasticidade longitudinal e transversal do aço;

C_w é a constante de empenamento da seção, obtido através da Equação (3.6).

$$C_w = \int_A \omega^2 dA \quad (3.6)$$

Na Equação (3.6), ω é a área setorial principal e A a área da seção transversal.

Derivando as Equações (3.3), (3.4) e (3.5) obtém-se:

$$EI_z v_D^{IV} = CD_y \quad (3.7)$$

$$EI_y w_D^{IV} = CD_z \quad (3.8)$$

$$EC_w \varphi^{IV} - GJ \varphi'' = -MTD \quad (3.9)$$

onde:

CD_y é a carga distribuída na direção y ;

CD_z é a carga distribuída na direção z ;

MTD é a carga torsora distribuída.

Estão sendo consideradas apenas forças axiais e momentos fletores aplicados nas extremidades, logo a tensão normal (σ) é constante em x e a tensão de cisalhamento (τ) é nula. Os cálculos de CD_y , CD_z e MTD são realizados no equilíbrio da posição deslocada da barra (Teoria de 2ª ordem com pequenos deslocamentos). Dessa forma são obtidas as Equações (3.10), (3.11) e (3.12).

$$CD_y = - \int_A \sigma v'' dA \quad (3.10)$$

$$CD_z = - \int_A \sigma w'' dA \quad (3.11)$$

$$MTD = \int_A \{ \sigma w'' [(y - y_0) + (z - z_0)\varphi] - \sigma v'' [(z - z_0) - (y - y_0)\varphi] \} dA \quad (3.12)$$

De acordo com Vlasov (1962), as tensões normais atuantes na barra recebem a contribuição do bimomento (B), conforme a Equação (3.13):

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M_y}{I_y} z + \frac{M_z}{I_z} y + \frac{B}{C_w} \omega \quad (3.13)$$

porém, com o intuito de simplificar os cálculos nesse trabalho, despreza-se a contribuição do bimomento nas tensões. Combinando a Equação (3.13) nas Equações (3.10), (3.11) e (3.12), e desenvolvendo essas últimas nas Equações (3.7), (3.8) e (3.9), obtém-se então as equações diferenciais de estabilidade para uma barra de seção transversal genérica aberta de paredes finas:

$$EI_z v_D^{IV} - N v_D'' + (N z_0 - M_y) \varphi'' = 0 \quad (3.14)$$

$$EI_y w_D^{IV} - N w_D'' - (N y_0 - M_z) \varphi'' = 0 \quad (3.15)$$

$$EC_w \varphi^{IV} - [N r_0^2 + 2M_y(k_z - z_0) + 2M_z(k_y - y_0) + GJ] \varphi'' - (M_y - N z_0) v_D'' + (M_z - N y_0) w_D'' = 0 \quad (3.16)$$

onde r_0 é o raio de giração polar em relação ao centro de torção, dado por:

$$r_0^2 = \frac{I_z + I_y}{A} + z_0^2 + y_0^2 \quad (3.17)$$

e k_x e k_y são as coordenadas do centro do círculo de estabilidade (coordenadas do ponto de Kindem), calculados através das Equações (3.18) e (3.19), respectivamente.

$$k_y = \frac{1}{2I_z} \int_A y(z^2 + y^2) dA \quad (3.18)$$

$$k_z = \frac{1}{2I_y} \int_A z(z^2 + y^2) dA \quad (3.19)$$

Ao impor condições de contorno de vínculo de garfo (ver Tabela 3.1) nas extremidades de uma barra comprimida, as soluções das equações diferenciais, quando o carregamento atinge seu valor crítico, são:

$$v_D(x) = A \operatorname{sen} \frac{\pi}{L} x \quad (3.20)$$

$$w_D(x) = B \operatorname{sen} \frac{\pi}{L} x \quad (3.21)$$

$$\varphi(x) = C \operatorname{sen} \frac{\pi}{L} x \quad (3.22)$$

onde A , B , e C são constantes numéricas e L o comprimento da barra.

Tabela 3.1 – Condições de contorno de vínculo de garfo.

Flexão e Rotações	Momentos Fletores e Bimomento
$v_D(0) = v_D(L) = 0$	$v_D''(0) = v_D''(L) = 0$
$w_D(0) = w_D(L) = 0$	$w_D''(0) = w_D''(L) = 0$
$\varphi(0) = \varphi(L) = 0$	$\varphi''(0) = \varphi''(L) = 0$

Combinando as Equações (3.20), (3.21) e (3.22) no sistema de equações diferenciais (Equações (3.14), (3.15) e (3.16)), e generalizando para diversos casos de condições de contorno, chegamos a seguinte equação matricial:

$$\begin{bmatrix} \left(\frac{\pi^2 EI_z}{K_z L_z^2} + N \right) & 0 & -(N z_0 - M_y) \\ 0 & \left(\frac{\pi^2 EI_y}{K_y L_y^2} + N \right) & (N y_0 - M_z) \\ -(N z_0 - M_y) & (N y_0 - M_z) & \left[\frac{\pi^2 EC_w}{K_x L_x^2} + N r_0^2 + 2M_y(k_z - z_0) + 2M_z(k_y - y_0) + GJ \right] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A \\ B \\ C \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3.23)$$

onde:

$K_z L_z$ e $K_y L_y$ são os comprimentos efetivos de flambagem em relação aos eixos z e y ;

$K_x L_x$ é o comprimento efetivo de flambagem por torção devido ao empenamento.

As forças axiais de flambagem elástica por flexão em relação aos eixos z e y , N_{ez} e N_{ey} , e a força de flambagem elástica relativa à torção da barra, N_{ex} , podem ser definidas como:

$$N_{ez} = \frac{\pi^2 EI_z}{(K_z L_z)^2} \quad (3.24)$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{(K_y L_y)^2} \quad (3.25)$$

$$N_{ex} = \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 EC_w}{(K_x L_x)^2} + GJ \right] \quad (3.26)$$

Na busca por uma solução não trivial para a Equação (3.23), considerando N uma força de compressão, obtém-se:

$$\begin{vmatrix} (N_{ez} - N) & 0 & (Nz_0 + M_y) \\ 0 & (N_{ey} - N) & -(Ny_0 + M_z) \\ (Nz_0 + M_y) & -(Ny_0 + M_z) & \left[r_0^2 (N_{ex} - N) + 2M_y(k_z - z_0) \right] \\ & & + 2M_z(k_y - y_0) \end{vmatrix} = 0 \quad (3.27)$$

Essa equação pode ser então reescrita na seguinte forma:

$$(N_{ez} - N)(N_{ey} - N) \{ N_{ex} r_0^2 + [-N r_0^2 + 2M_y(k_z - z_0) + 2M_z(k_y - y_0)] \} - (Nz_0 + M_y)^2 (N_{ey} - N) - (Ny_0 + M_z)^2 (N_{ez} - N) = 0 \quad (3.28)$$

A Equação (3.28) é uma equação geral, a partir da qual é possível determinar os valores críticos das forças axiais e momentos fletores aplicados às extremidades de uma barra.

3.4 Estabilidade de Cantoneiras Comprimidas

3.4.1 Caso geral: compressão excêntrica

As cantoneiras laminadas de abas iguais são amplamente utilizadas na construção metálica devido às suas facilidades de conexão. Nesse trabalho, a excentricidade a ser avaliada está

relacionada ao uso de cantoneiras conectadas por parafusos em uma das abas, conforme Figura 3.2. Nessa figura, os eixos z e y são os eixos de menor e maior inércia da seção, respectivamente, b é a largura da aba e t a espessura. A orientação dos eixos mostradas na Figura 3.2 é utilizada como referência em todo o trabalho.

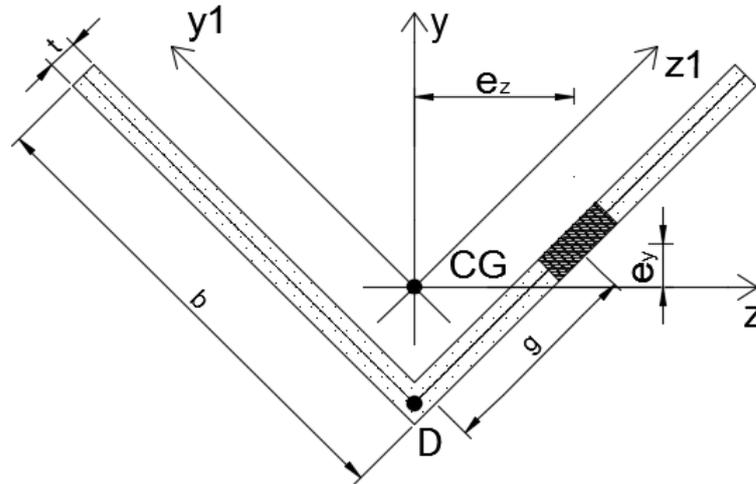


Figura 3.2 – Cantoneira de abas iguais parafusada por uma aba.

De acordo com Vlasov (1962), se uma barra com seção transversal monossimétrica for submetida a uma força de compressão excêntrica – caso da Figura 3.2 – os autovetores são relativos à movimentos característicos de flexo-torção.

A obtenção da solução elástica exata para cantoneiras comprimidas excêntricamente pode ser realizada substituindo os momentos fletores da Equação (3.28) por:

$$M_y = Ne_z \quad (3.29)$$

$$M_z = Ne_y \quad (3.30)$$

onde e_z e e_y são coordenadas do ponto de aplicação de N , calculados em função do gabarito da furação (g):

$$e_y = \frac{\sqrt{2}}{2} \left(g - \frac{b}{2} \right) \quad (3.31)$$

$$e_z = \frac{\sqrt{2}}{2} g \quad (3.32)$$

A cantoneira pertence a um grupo de perfis em que seus elementos são coincidentes em um ponto, bem como a seção cruciforme e a seção T, o que lhe confere certas peculiaridades. O centro de torção (D) da cantoneira está localizado no encontro das abas, sendo o coeficiente de empenamento, C_w , nulo (ver Equação (3.6)). Assim, a primeira parcela da Equação (3.26) desaparece, e a força axial de flambagem à torção da cantoneira é dada por:

$$N_{ex} = \frac{GJ}{r_0^2} \quad (3.33)$$

Além disso, devido a simetria em torno do eixo de maior inércia (y), $z_0 = k_z = 0$. A constante k_y é obtida através da expressão:

$$k_y = \frac{\sqrt{2}t}{I_z} \left(0,125b^4 - \frac{\sqrt{2}}{3} y_0 b^3 + 0,75y_0^2 b^2 - \frac{\sqrt{2}}{2} y_0^3 b \right) \quad (3.34)$$

Diante dessas definições, a Equação (3.28) pode ser reescrita para cantoneiras comprimidas excentricamente, conforme a Equação (3.35):

$$(N_{ez} - N)(N_{ey} - N)\{N_{ex}r_0^2 - N[r_0^2 + 2e_y(k_y - y_0)]\} - N^2 e_z^2 (N_{ey} - N) - N^2 (e_y - y_0)^2 (N_{ez} - N) = 0 \quad (3.35)$$

onde N_{ez} , N_{ey} e N_{ex} são calculados através das Equações (3.24), (3.25) e (3.33), respectivamente.

A Equação (3.35) pode ser expressa na forma de um polinômio de 3º grau, conforme a Equação (3.36):

$$AN^3 + BN^2 + CN + D = 0 \quad (3.36)$$

onde A , B , C e D são constantes numéricas calculadas através das expressões:

$$A = -r_0^2 - 2e_y k_y + e_z^2 + e_y^2 + y_0^2 \quad (3.37)$$

$$B = N_{ez}r_0^2 + 2e_y k_y N_{ez} + N_{ey}r_0^2 + 2e_y k_y N_{ey} - 2e_y y_0 N_{ey} + N_{ex}r_0^2 - e_z^2 N_{ey} - e_y^2 N_{ez} - N_{ez}y_0^2 \quad (3.38)$$

$$C = -N_{ez}N_{ey}r_0^2 - 2e_yk_yN_{ez}N_{ey} + 2e_y\gamma_0N_{ez}N_{ey} - N_{ez}N_{ex}r_0^2 - N_{ey}N_{ex}r_0^2 \quad (3.39)$$

$$D = N_{ez}N_{ey}N_{ex}r_0^2 \quad (3.40)$$

A Equação (3.36) fornece três raízes possíveis, sendo a força crítica de flambagem à compressão, N_{cr} , a menor das raízes positivas.

3.4.2 Caso particular: força aplicada no centro geométrico

Caso N seja aplicada no centro geométrico (CG), temos compressão concêntrica, e a Equação (3.14) torna-se desacoplada. Nesse caso, a cantoneira pode apresentar flambagem por flexão em torno do eixo de menor inércia (N_{ez}) ou por flexo-torção (N_{eyx}). O valor de N_{cr} será o menor valor entre N_{ez} e N_{eyx} , sendo N_{ez} dado pela Equação (3.24) e N_{eyx} obtido através da Equação (3.41):

$$N_{eyx} = \frac{N_{ey} + N_{ex}}{2 \left[1 - \left(\frac{\gamma_0}{r_0} \right)^2 \right]} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4N_{ey}N_{ex} \left[1 - \left(\frac{\gamma_0}{r_0} \right)^2 \right]}{(N_{ey} + N_{ex})^2}} \right] \quad (3.41)$$

onde N_{ey} e N_{ex} são dados pelas Equações (3.25) e (3.33). Essa é a formulação considerada nos procedimentos normativos atuais de estruturas metálicas para seções monossimétricas submetidas à compressão concêntrica.

3.4.3 Caso particular: força aplicada no centro de torção

Se a força de compressão for aplicada no centro de torção (D) as Equações (3.14), (3.15) e (3.16) tornam-se desacopladas, obtendo-se como solução, respectivamente, a força de flambagem em relação ao eixo z (ver Equação (3.24)), a força de flambagem em relação ao eixo y (ver Equação (3.25)) e uma força de flambagem relativa à torção, calculada através da Equação (3.42), onde a força crítica flambagem é a menor desses três valores.

$$N_{ex} = \frac{GJ}{r_0^2 + 2\gamma_0(k_y - \gamma_0)} \quad (3.42)$$

4 ANÁLISE NUMÉRICA

4.1 Considerações Iniciais

As análises numéricas desse trabalho foram realizadas com base no Método dos Elementos Finitos, através da plataforma computacional *ANSYS v.15.0* (ANSYS INC, 2014). Para a obtenção da capacidade resistente das barras, primeiramente, foi realizada uma análise de flambagem elástica (Análise de Linearizada de Estabilidade – ALE), cujos resultados são autovalores (forças de flambagem elástica) e autovetores (configuração deformada das barras). O menor autovalor determinado corresponde à força crítica de flambagem. Na sequência da análise linearizada de estabilidade, imperfeições geométricas iniciais foram introduzidas com a forma modal correspondente à força crítica de flambagem. A partir de então, realizaram-se análises considerando não linearidades geométricas e de material (NLGM), onde, através de métodos iterativos, o carregamento é acrescentado à estrutura, passando pela carga última, até a parada da solução, caracterizada pela não convergência da análise.

As análises iniciais foram desenvolvidas para modelos sob compressão concêntrica, a partir dos quais foram calibrados, através de comparação com resultados analíticos, todos os parâmetros da modelagem. Posteriormente, foram desenvolvidas as análises dos mesmos perfis sob compressão excêntrica, e em seguida foi realizada a validação dos modelos numéricos com resultados experimentais e numéricos de Kettler *et al.* (2017).

Assim, apresentam-se nessa seção os recursos utilizados para a criação, calibração e validação do Modelo Proposto (MP).

4.2 Elementos Finitos e Geometria Utilizada

Para simular as cantoneiras foi utilizado o elemento *SHELL181* (Figura 4.1), elemento disponível na biblioteca do *ANSYS* e adequado para análises não lineares de elementos

bidimensionais com espessura pequena, sujeitos a grandes deformações e rotações. Esse elemento possui quatro nós, com seis graus de liberdade por nó, referentes às translações nas direções dos eixos cartesianos (x , y e z) e às rotações em torno desses mesmos eixos. Os trabalhos de Liu e Hui (2010) e Kettler *et al.* (2017) mostraram bons resultados utilizando esse elemento.

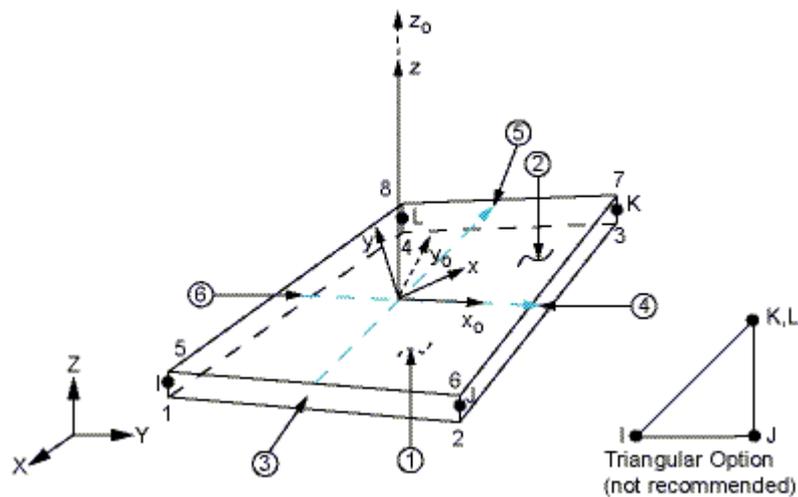


Figura 4.1 - Elemento *SHELL181*. Fonte: ANSYS INC, 2014.

No modelo, a cantoneira foi modelada com a espessura nominal das abas e os parafusos não foram modelados. As ligações foram consideradas através de elementos *MPC184* (Figura 4.2), também disponíveis na biblioteca do ANSYS, que interligam os nós da circunferência do furo a um nó central (Figura 4.3b e c). O *MPC184* consiste em uma classe geral de elementos compostos por dois nós extremos onde são impostas restrições cinemáticas (Figura 4.2). Em sua forma geral, também apresenta seis graus de liberdade por nó. Como aplicação prática de engenharia, o *MPC184* pode ser utilizado como um componente rígido usado para transmitir forças e momentos, sendo útil para simular situações de condições cinemáticas simples tais como imposições de deslocamentos iguais entre duas partes, ou até mesmo mais complicadas, como a compatibilização de deslocamento entre dois corpos flexíveis.

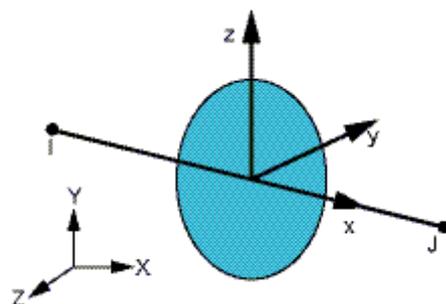


Figura 4.2 - Elemento *MPC184*. Fonte: ANSYS INC, 2014.

Utilizou-se uma malha quadriculada em quase todo o perfil (Figura 4.3a), exceto na região da ligação, onde foi utilizada uma malha circular em torno dos furos (Figura 4.3d). Inicialmente, foram realizadas análises em barras com seu comprimento real e, em seguida, novas análises foram realizadas considerando apenas a metade do comprimento, cujos resultados foram coincidentes. Para otimização do tempo gasto no processamento computacional, foi então utilizada a simetria, onde apenas metade do comprimento original da cantoneira foi modelada (Figura 4.3a). No modelo, a região do raio de curvatura da cantoneira foi modelada com canto reto (sem curvatura), uma vez que essa curvatura apresenta pouca influência na capacidade resistente dos perfis (Liu e Hui, 2010).

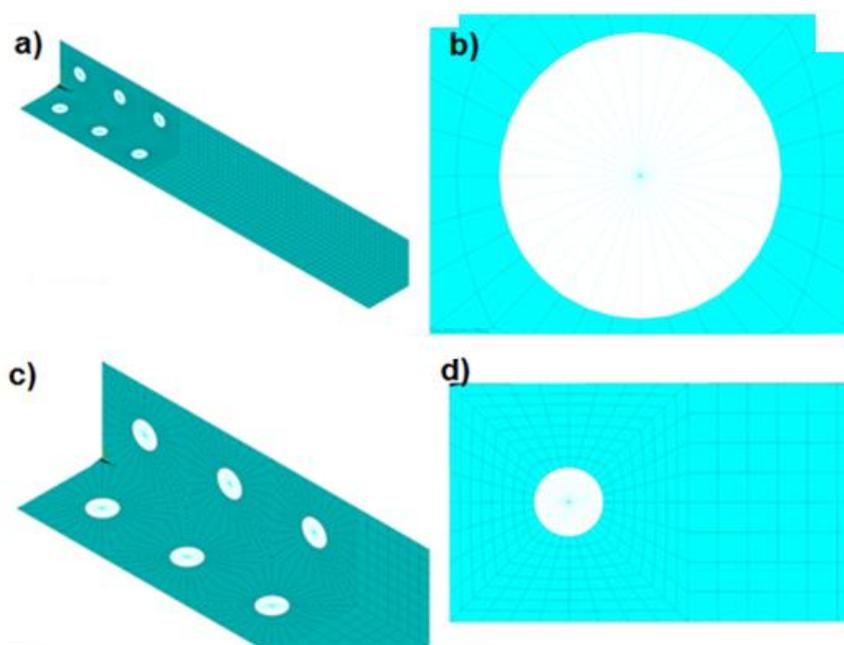


Figura 4.3 – Malha adotada no Modelo Proposto.

A esbeltez dos modelos desse trabalho é expressa por λ_r , índice de esbeltez relativo ao eixo de menor inércia, calculado através da Equação (4.1):

$$\lambda_r = \frac{L_r}{r} \quad (4.1)$$

onde L_r é a distância entre as duas extremidades da cantoneira, medida a partir dos parafusos mais próximos às bordas transversais (ver Figura 4.16, pág. 63), e r , o raio de giração em relação ao eixo de menor inércia.

4.3 Condições de Contorno e Carregamento

Para as condições de contorno, foram aplicados vínculos de garfo nas extremidades das barras. Para isso, foram restritos os nós centrais dos furos, mostradas na Tabela 4.1 e nas Figura 4.4a e b. A força externa também foi aplicada nestes nós do modelo computacional. Para introduzir o efeito de simetria, adotaram-se as restrições nos graus de liberdade de translação em x e rotação em y e z (U_x , ROT_y e ROT_z) em todos os nós da seção transversal correspondente à simetria (Figura 4.4c).

Tabela 4.1 – Restrições adotadas nos nós centrais dos furos.

Solicitação	Graus de liberdade restringidos
Concêntrica	U_y, U_z
Excêntrica	U_y, U_z, ROT_x

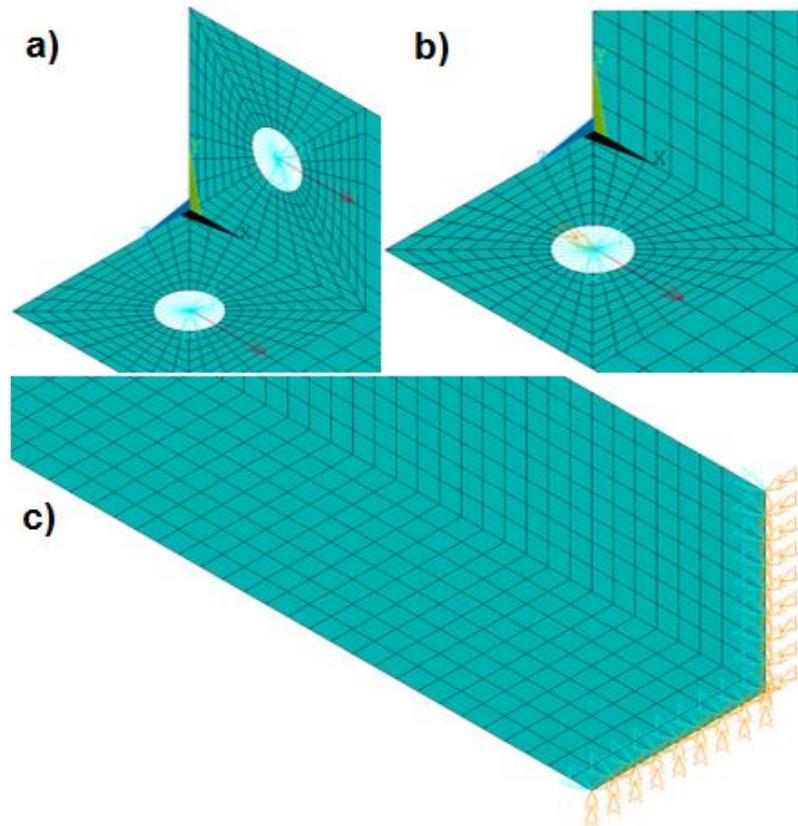


Figura 4.4 – Condições de contorno e carregamentos aplicados na: a) compressão concêntrica; b) compressão excêntrica e c) seção transversal de simetria.

4.4 Lei Constitutiva do Material

Nas modelagens numéricas desse trabalho, fez-se inicialmente uma análise de flambagem elástica. Nessa análise, adotou-se o modelo elástico linear (Figura 4.5a) como modelo constitutivo do material, com Módulo de Elasticidade Longitudinal (E) e Coeficiente de Poisson (ν) iguais a 20000 kN/cm² e 0,3 respectivamente.

Na sequência dessa análise, imperfeições geométricas iniciais foram introduzidas com a forma modal correspondente ao primeiro autovalor obtido para a força crítica de flambagem (primeiro modo de flambagem). A análise não linear geométrica e de material foi então realizada, onde, através do método iterativo “Controle por comprimento de arco” a falha da cantoneira foi alcançada. Utilizou-se o critério de falha de von Mises.

Para o modelo constitutivo das cantoneiras nas análises não lineares geométricas e de material adotou-se o diagrama bilinear elastoplástico perfeito (Figura 4.5b) na representação do comportamento tensão-deformação do aço, com material de referência o aço carbono ASTM

A36, cuja resistência ao escoamento (f_y) é igual a 25 kN/cm². Neste diagrama, a região elástica é definida pelo módulo de elasticidade longitudinal (E), com tensão limite igual à resistência ao escoamento do aço, e a deformação elástica correspondente (ϵ_y). A região elastoplástica do referido diagrama é limitada pela deformação de ruptura do aço, ϵ_u , tomada igual a 30% nesse trabalho.

O diagrama bilinear elastoplástico perfeito foi utilizado em diversos trabalhos numéricos da literatura de referência como Liu e Hui (2010), Može *et al.* (2014), Preto (2016) e Kettler *et al.* (2017), e mostrou excelente simulação do comportamento real da cantoneira.

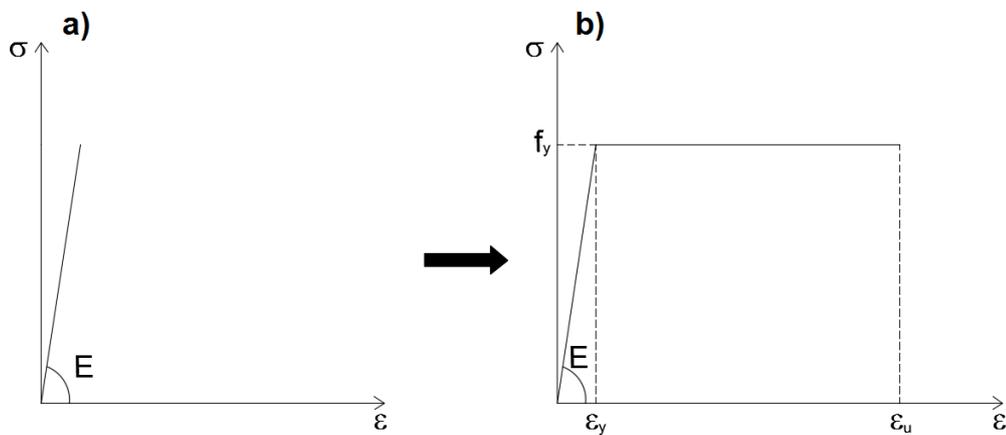


Figura 4.5 – Modelos constitutivos a) elástico linear e b) elastoplástico perfeito.

4.5 Aferição do Modelo Numérico Proposto Conforme Metodologias Teóricas

As primeiras análises com o Modelo Proposto foram realizadas com geometrias semelhantes aos perfis L 50,8 x 6,4 mm (L 2” x 1/4”) e L 50,8 x 9,5 mm (L 2” x 3/8”). Adotou-se nesses perfis um único parafuso, cujo furo possui diâmetro igual a 12,7 mm (1/2”) mais uma folga de 1,5 mm (tamanho de folga prescrita pela ABNT NBR 8800:2008 para furos padrões).

Primeiramente, para definição da malha a ser adotada nas modelagens, realizou-se uma série de análises linearizadas de estabilidade em uma cantoneira (L 50,8 x 9,5 mm – L = 1151,6 mm, Figura 4.6) sob compressão concêntrica, variando-se a dimensão do elemento quadrangular (ver Figura 4.3) de $0,5b$ a $0,04b$, sendo b a largura da cantoneira. Como o perfil

analisado possui esbelteza relativamente alta ($\lambda_r = 115$), os valores de força de flambagem obtidas nessas análises foram comparados com a força axial de flambagem elástica em torno do eixo de menor inércia obtida através da fórmula de Euler (Equação (3.24)) para uma barra birotulada (120,16 kN). Na busca de um resultado que fosse próximo ao analítico e que não exigisse grande tempo de processamento dos modelos, optou-se por $0,125b$ como dimensão do elemento para as análises numéricas desse trabalho. O resultado numérico relativo ao modelo com esta dimensão de elemento ficou abaixo 2,1% em relação ao seu valor analítico.

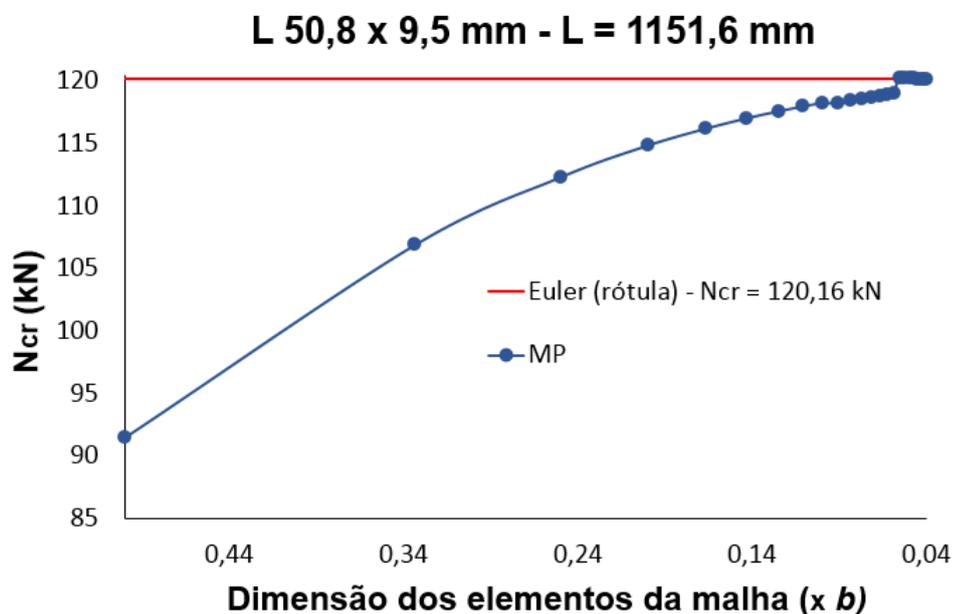


Figura 4.6 – Teste de convergência para definição da malha de elementos a ser adotada nos modelos numéricos.

Após a definição da malha, estudou-se a distribuição de tensões normais na seção transversal localizada a meio comprimento da cantoneira L 50,8 x 6,4 mm comprimida excêntrica. O centro do furo foi posicionado na altura do eixo de menor inércia (eixo z), de modo que a excentricidade em torno do mesmo fosse nula, conforme mostra a Figura 4.7. Assim, realizaram-se análises não lineares geométricas e de material (sem tensões residuais e sem imperfeições geométricas iniciais) para valores de λ_r variando de 25 a 195. Realizado essas análises, as tensões normais foram extraídas dos modelos numéricos, para cada incremento de força (*Substep*), até o instante da falha. As tensões obtidas nos *Substeps* onde não ocorreram

plastificações no perfil foram comparadas com as tensões calculadas através da - Equação (3.13), desprezando-se o bimomento.

Os perfis com esbeltezes menores ou iguais a 105 sofreram flexão normal composta, conforme mostra a Figura 4.7, e não se observaram efeitos de segunda ordem nesses perfis. Nessa figura, as tensões numéricas relativas aos *Substeps* 1 a 3 (“Sub. 1”, “Sub. 2” e “Sub. 3”), onde a resistência ao escoamento do aço ainda não foi atingida, estão em correspondência com as tensões calculadas através da Equação (3.13) (“Eq. 3.13 - Sub. 1”, “Eq. 3.13 - Sub. 2” e “Eq. 3.13 - Sub. 3”). Outra observação a ser feita a respeito da distribuição de tensões mostradas na Figura 4.7 é que a Linha Neutra (LN) permanece imóvel nos primeiros *Substeps* da análise, como esperado. Após o instante em que se inicia a plastificação (*Substep* 4), a Linha Neutra desloca-se na direção da extremidade livre da aba não parafusada. Na falha do perfil (*Substep* 8), toda a seção transversal da cantoneira estava comprimida e 87,5% da aba parafusada plastificada.

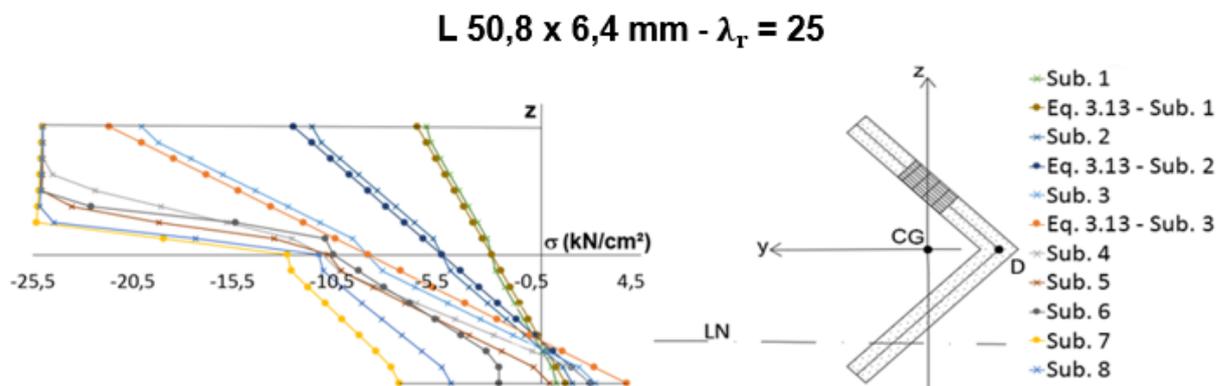


Figura 4.7 – Diagrama de tensões normais típica de uma cantoneira comprimida excêntrica com esbelteza inferior ou igual a 105.

Em cantoneiras com esbeltezes superiores a 105, a plastificação do perfil não ocorre ou é insignificante. Nesses perfis, devido aos maiores gradientes de deslocamentos, os efeitos de segunda ordem são mais expressivos do que nas barras com $\lambda_r \leq 105$. Nos cálculos das tensões analíticas (através da Equação (3.13)), esses efeitos tiveram que ser considerados, tornando a análise mais complexa. Devido a essa dificuldade, as tensões normais para estes perfis foram calculadas somente para o *Substep* onde ocorre a falha. A Figura 4.8 mostra a distribuição de tensões normais em uma cantoneira com esbelteza igual a 185. O deslocamento

da Linha Neutra evidencia a flexão normal oblíqua ocorrida na barra. Como se pode ver nessa figura, a tensões numéricas estão próximas às tensões analíticas.

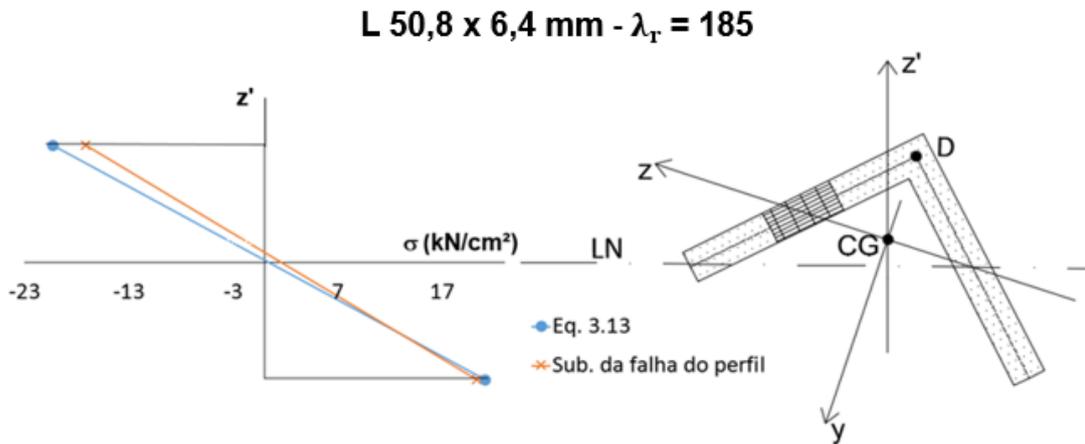


Figura 4.8 – Diagrama de tensões normais típica de uma cantoneira comprimida excentricamente com esbeltez superior a 105, no *Substep* onde ocorre a falha do perfil.

4.6 Tensões Residuais

Foi avaliada a influência das tensões residuais no comportamento de cantoneiras comprimidas. Para tanto, foi aplicado ao Modelo Proposto o modelo linear de tensões residuais de três pontos, o mesmo utilizado como referência pelo ECCS (Figura 4.9). Este modelo foi utilizado como referência em diversos trabalhos numéricos (Shi *et al.*, 2011; Ban *et al.*, 2012; Može *et al.*, 2014; e Preto, 2016), e é mais conservador que os outros tipos de modelos existentes (como o modelo de quatro pontos), conforme verificado por Može *et al.* (2014) e Preto (2016).

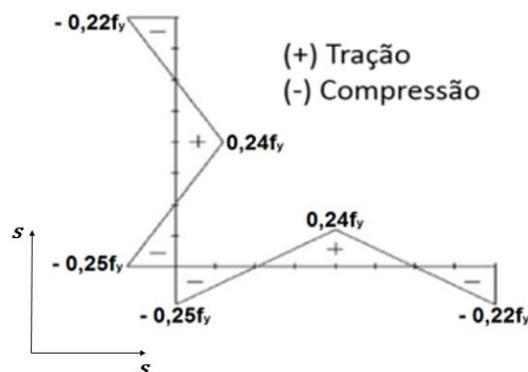


Figura 4.9 - Distribuição de tensões residuais utilizada pelo ECCS e adotada no Modelo Proposto.

As tensões residuais do diagrama da Figura 4.9 foram introduzidas aos perfis como um estado de tensões normais iniciais (σ_0), sendo então transformadas em valores discretos através da Equação (4.2) e aplicados em cada nó do modelo numérico:

$$\sigma_0 = \begin{cases} \left(\frac{0,98s}{b} - 0,25 \right) f_y, & \text{para } 0 \leq s \leq \frac{b}{2} \\ \left(-\frac{0,92s}{b} + 0,70 \right) f_y, & \text{para } \frac{b}{2} < s \leq b \end{cases} \quad (4.2)$$

onde s é a coordenada dos nós com ponto de referência o vértice da cantoneira (ver Figura 4.9).

Assim, as tensões residuais do Modelo Proposto são inseridas como uma condição inicial da análise não linear geométrica e de material, conforme mostra a distribuição de tensões da cantoneira da Figura 4.10.

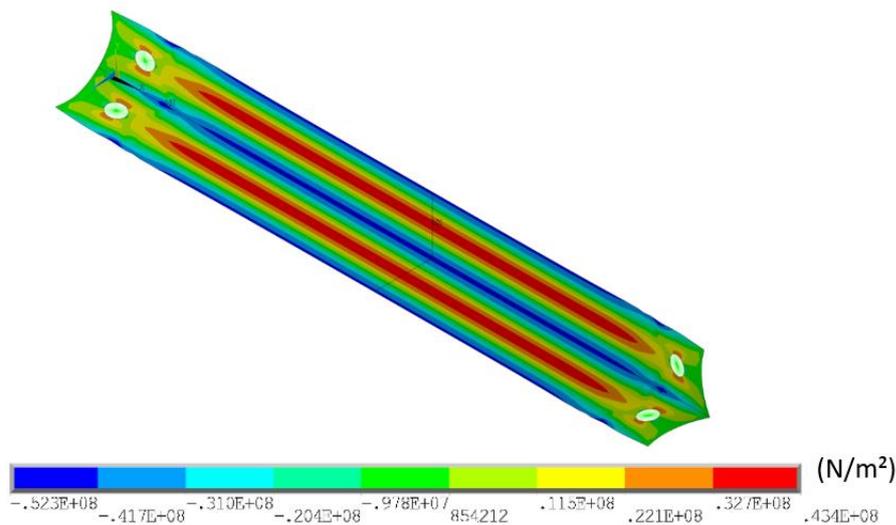


Figura 4.10 - Distribuição de tensões residuais adotada no Modelo Proposto. Perfil: L 50,8 x 6,4 mm – $\lambda_r = 45$.

4.7 Imperfeições Geométricas Iniciais

Sabe-se que a situação mais crítica para as imperfeições geométricas iniciais na resistência à flambagem é observada quando a imperfeição tem a forma do modo crítico de flambagem. Sendo assim, as imperfeições geométricas iniciais desse trabalho foram consideradas nos modelos numéricos com a forma do primeiro modo de flambagem, determinado a partir de

uma análise linearizada de estabilidade. Muitos autores da literatura de referência, como Liu e Hui (2010), Može *et al.* (2014) e Kettler *et al.* (2017) adotaram essa mesma estratégia para introdução das imperfeições geométricas iniciais em seus modelos numéricos. É válido destacar a pequena influência das imperfeições geométricas iniciais, na magnitude em que são encontradas nesses perfis, na resistência final do perfil frente ao efeito da excentricidade de aplicação da força normal na compressão excêntrica (Liu e Hui, 2010).

Na compressão concêntrica, na grande maioria dos casos, a configuração deformada relativa ao primeiro modo de flambagem é uma flexão em torno do eixo de menor inércia (Figura 4.11a), enquanto na compressão excêntrica, uma flexo-torção (Figura 4.11b). É válido destacar que o primeiro modo de flambagem da compressão concêntrica de cantoneiras pode ser uma flexo-torção. Porém, isso só ocorre em perfis com $\lambda_r < 65$, onde a falha ocorre por plastificação total da barra, tornando o efeito das imperfeições geométricas iniciais insignificativo. Para o valor da imperfeição introduzida nos modelos adotou-se $L/1500$, valor esse proposto por Bjorhovde (1972) para perfis em geral e considerado adequado para cantoneiras segundo Adluri e Madugula (1996a). Esse valor de imperfeição também é utilizado nas normas ANSI/AISC 360-16 e ABNT NBR 8800:2008 para imperfeições geométricas de perfis em geral.

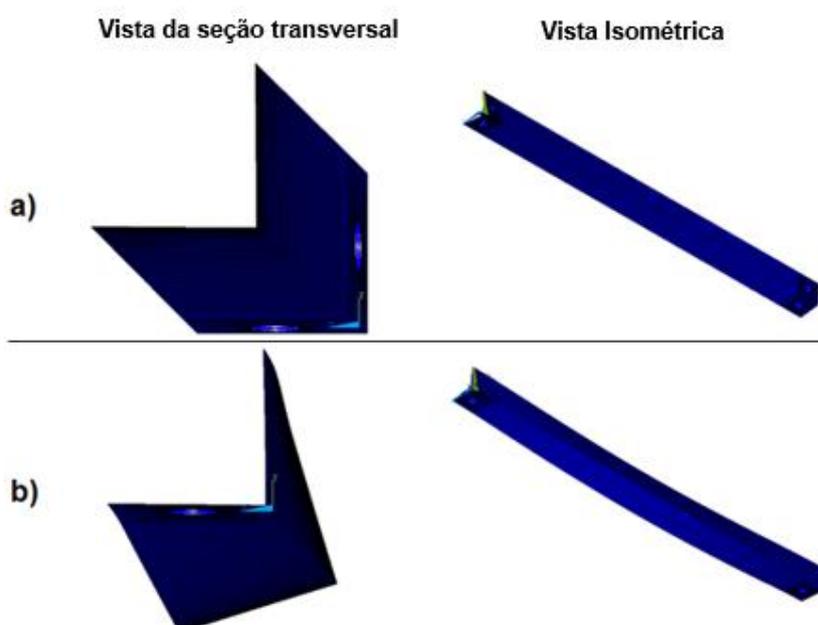


Figura 4.11 – Primeiros modos de flambagem típicas da (a) Compressão Concêntrica e da (b) Compressão Excêntrica.

4.8 Análise da Influência das Tensões Residuais e da Imperfeição Geométrica Inicial no Comportamento à Compressão de Cantoneiras

Para avaliação da influência das tensões residuais (TR) e imperfeições geométricas iniciais (IGI), propostas anteriormente, foram realizadas análises não lineares geométricas e de material nos perfis L 50,8 x 6,4 mm e L 203,2 x 19,0 mm (L 8" x 3/4"). Essas cantoneiras foram escolhidas por serem, respectivamente, uma das menores e uma das maiores cantoneiras comercializadas, permitindo que as conclusões dessas análises pudessem ser atribuídas a todas as cantoneiras intermediárias a esses perfis. Sendo assim, realizaram-se análises numéricas com modelos com um parafuso, submetidos à compressão concêntrica e excêntrica. Avaliou-se o Modelo Proposto sem imperfeição geométrica inicial e sem tensões residuais (s/ IGI e s/TR), com imperfeição geométrica inicial e sem tensões residuais (c/IGI e s/TR), sem imperfeição geométrica inicial e com tensões residuais (s/ IGI e c/TR) e com imperfeição geométrica inicial e com tensões residuais (c/ IGI e c/ TR).

Os resultados estão apresentados na Figura 4.12, Figura 4.13, Figura 4.14 e Figura 4.15, em curvas $\sigma \times \lambda_r$, ou seja, tensões resistentes x índice de esbeltez em torno do eixo de menor inércia. Juntamente com os resultados, introduziram-se nesses gráficos as tensões de flambagem elástica, calculadas a partir da fórmula de Euler para flambagem em torno do eixo de menor inércia (Equação (3.24)) para compressão concêntrica, e da formulação de Vlasov (Equação (3.36)) para compressão excêntrica. Nesses cálculos, adotaram-se condições de contorno consistentes com as restrições adotadas nos modelos numéricos (ver Tabela 4.1): rótula (Euler) e vínculo de garfo (Vlasov).

A Figura 4.12 e a Figura 4.13 indicaram que os perfis L 50,8 x 6,4 mm e L 203,2 x 19,0 mm comportam-se de maneira semelhante, quando submetidos à compressão concêntrica. Observa-se que:

- os modelos s/ IGI e s/ TR falharam por plastificação completa da seção transversal, para esbeltezes menores que 88,86, e por flambagem elástica em torno do eixo de menor inércia para as barras com esbeltezes maiores que este valor;
- a maior redução da tensão resistente da cantoneira devido a imperfeição geométrica inicial isoladamente foi de 21,9%, enquanto a ação isolada da tensão residual diminuiu a capacidade resistente do perfil em no máximo 19,4% (valor este muito superior aos observados na literatura – ver Capítulo 2 - Seção 2.4);

- as tensões residuais e imperfeições geométricas iniciais provocaram a redução na resistência da cantoneira ao longo da curva, tendo pouca influência ou mesmo sendo insignificante para perfis muito esbeltos ($\lambda_r \geq 150$);
- a ação conjunta da imperfeição geométrica inicial com as tensões residuais apresentou a sua maior influência nos modelos de esbeltez igual a 88,86, com uma redução de 29,5% na sua resistência;
- o comportamento desses perfis diante a introdução das tensões residuais e imperfeições geométricas iniciais foi semelhante;

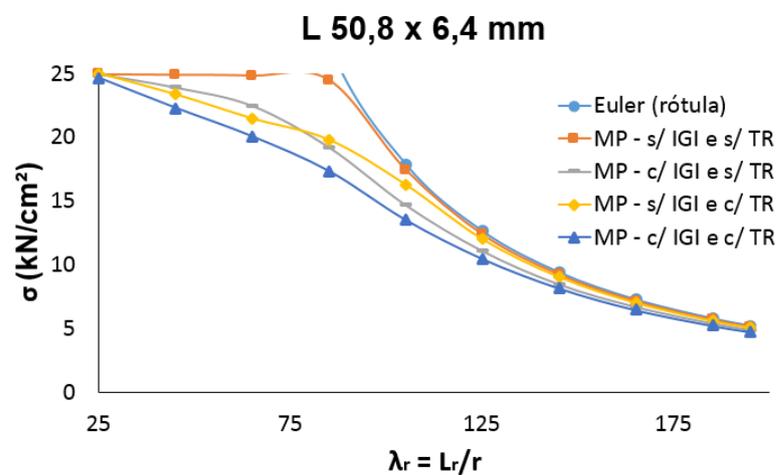


Figura 4.12 – Curvas “ $\sigma \times \lambda_r$ ” considerando a influência das tensões residuais e da imperfeição geométrica inicial (cantoneira L 50,8 x 6,4 mm comprimida concentricamente).

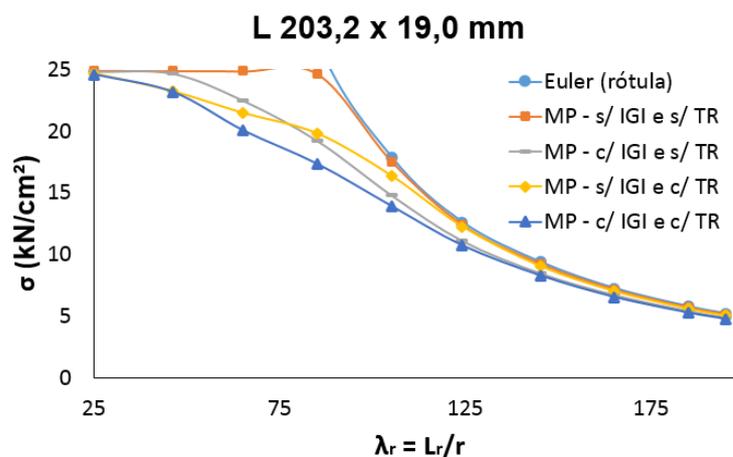


Figura 4.13 – Curvas “ $\sigma \times \lambda_r$ ” considerando a influência das tensões residuais e da imperfeição geométrica inicial (cantoneira L 203,2 x 19,0 mm comprimida concentricamente).

Na compressão excêntrica (Figura 4.14 e Figura 4.15), o comportamento das cantoneiras L 50,8 x 6,4 mm e L 203,2 x 19,0 também foi semelhante. Observa-se que:

- os modelos s/IGI e s/TR com esbeltezes menores que 145 falharam por flambagem elastoplástica por flexo-torção, enquanto os perfis mais esbeltos apresentaram flambagem elástica por flexo-torção;
- as imperfeições geométricas iniciais e as tensões residuais reduziram isoladamente a capacidade resistente das cantoneiras, em torno de 5% e 7%, respectivamente, confirmando os dados já observados na literatura (ver Capítulo 2 - Seção 2.4);
- A atuação destes dois fatores simultaneamente no modelo numérico reduziu as tensões resistentes, em torno de 4,7%.

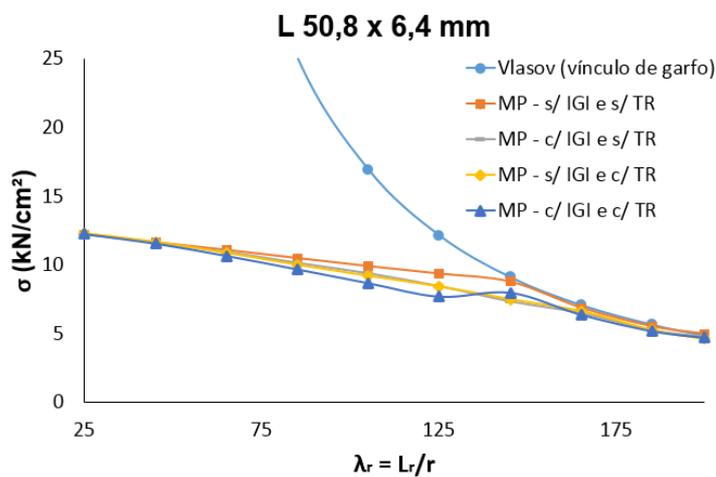


Figura 4.14 – Curvas “ $\sigma \times \lambda_r$ ” considerando a influência das tensões residuais e da imperfeição geométrica inicial (cantoneira L 50,8 x 6,4 mm comprimida excêntrica).

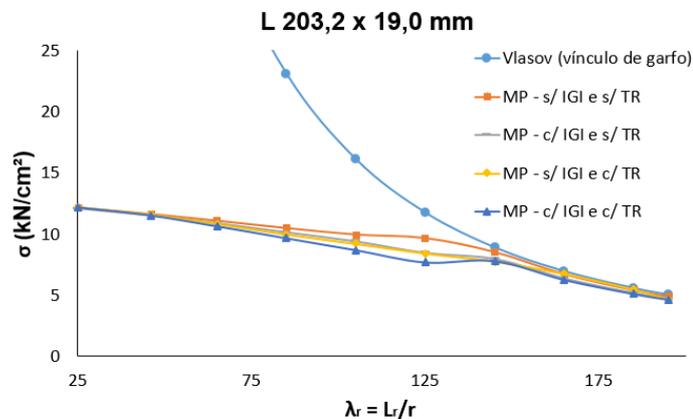


Figura 4.15 – Curvas “ $\sigma \times \lambda_r$ ” considerando a influência das tensões residuais e da imperfeição geométrica inicial (cantoneira L 203,2 x 19,0 mm comprimida excêntrica).

4.9 Geometria dos Modelos Numéricos para Análise da Influência do Número de Parafusos e Avaliação dos Procedimentos Normativos

Para o estudo apresentado daqui em diante, utilizaram-se três cantoneiras laminadas comerciais com abas compactas (ver Tabela 4.2). Tais bitolas foram escolhidas por serem bastante frequentes em estruturas de aço. Os modelos numéricos foram confeccionados com diversos comprimentos, indicando esbeltezes (λ_r) entre 25 a 495. Foram construídos modelos com um, dois e três parafusos para análise de compressão concêntrica e excêntrica.

Tabela 4.2 – Cantoneiras adotadas na modelagem numérica.

Perfil		A_g (cm ²)	I_z (cm ⁴)	I_y (cm ⁴)	r_z (cm)	r_y (cm)
(pol)	(mm)					
L 2½ x 1/4	L 63,5 x 6,4	7,67	11,79	46,21	1,24	2,45
L 3 x 5/16	L 76,2 x 7,9	11,48	25,83	98,17	1,50	2,92
L 5 x 1/2	L 127 x 12,7	30,64	189,97	750,03	2,49	4,95

A Figura 4.16 apresenta as dimensões adotadas na região das ligações parafusadas das cantoneiras. As disposições construtivas mostradas nesta figura estão em conformidade com a norma ABNT NBR 8800:2008. Nas cantoneiras sujeitas à compressão excêntrica, os furos foram posicionados dentro da *normal framing eccentricity*, região estabelecida pela ASCE/SEI-10-2015 para posicionamento da ligação parafusada (ver Capítulo 5 - Seção 5.3).

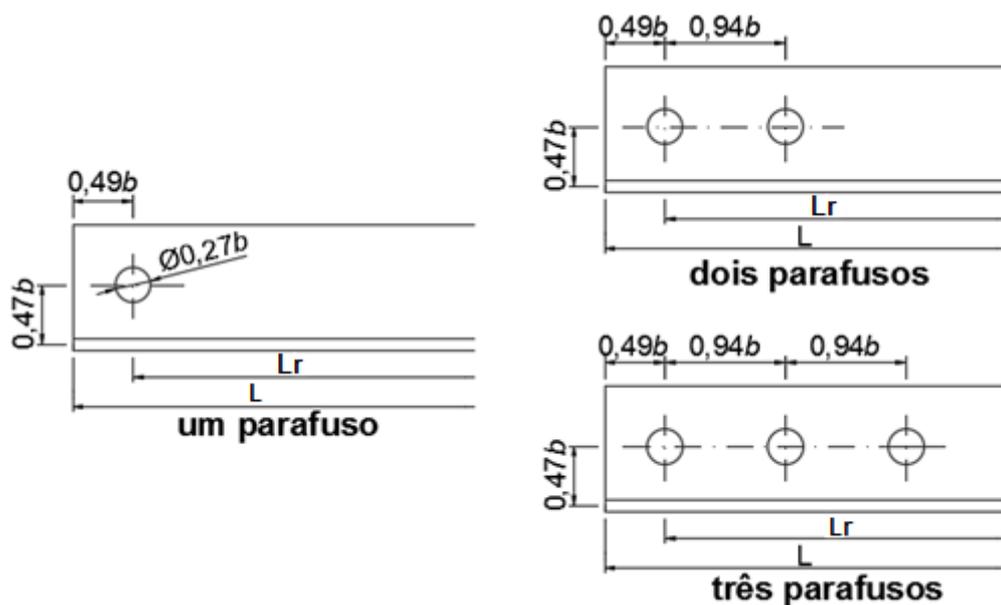


Figura 4.16 – Geometria das ligações parafusadas adotadas.

A Tabela 4.3 apresenta os parafusos comerciais frequentemente utilizados nos perfis analisados. Os furos dos modelos numéricos foram construídos com diâmetro igual ao diâmetro comercial dos parafusos somado a 1,5 mm.

Tabela 4.3 – Dimensões dos furos adotados nos modelos numéricos.

Perfil	Diâmetro do Parafuso		Diâmetro do Furo (mm)
	(pol)	(mm)	
L 63,5 x 6,4 mm	5/8	16	17,5
L 76,2 x 7,9 mm	3/4	19	20,5
L 127 x 12,7 mm	1 ^{1/4}	32	33,5

4.10 Comparação do Modelo Numérico Proposto com um, dois e três Parafusos com as Formulações Analíticas

Inicialmente, para aferição dos modelos numéricos, compararam-se os resultados da análise linearizada de estabilidade (ALE) e da análise considerando não linearidades geométricas e de material (NLGM) sem tensões residuais e sem imperfeição geométrica inicial com os valores obtidos através da fórmula de Euler e da formulação de Vlasov (1962). Os três perfis analisados (ver Tabela 4.3) comportaram-se de maneira semelhante para a compressão concêntrica e excêntrica.

Calcularam-se os valores das tensões relativas à flambagem elástica em torno do eixo de menor inércia (a partir da equação de Euler – Equação (3.24)) para compressão concêntrica e as tensões referentes à flambagem por flexo-torção (a partir das formulações de Vlasov – Equação (3.36)) para compressão excêntrica. Para esses cálculos, consideraram-se duas condições de contorno nas extremidades da cantoneira: rótula ($K = 1,0$) e engaste ($K = 0,5$) na fórmula de Euler, e vínculo de garfo e engaste na formulação de Vlasov. A solução para essa última condição de contorno foi obtida assumindo $K = 0,5$ nas Equações (3.24) e (3.25), e introduzindo os novos valores de N_{ez} e N_{ey} na Equação (3.36).

4.10.1 Compressão concêntrica

O comportamento dos modelos numéricos apresentou excelente concordância com as formulações analíticas para as três cantoneiras analisadas, como pode ser observado na Figura 4.17, Figura 4.18 e Figura 4.19:

- nessas figuras apresentam-se simultaneamente as curvas relativas às duas condições de contorno: rótula e engaste;
- as cantoneiras com apenas um parafuso comportam-se como barras birrotuladas;
- as cantoneiras com dois e três parafusos comportam-se como barras biengastadas, possibilitando uma resistência quatro vezes maior do que as barras com apenas um parafuso;
- observou-se a coincidência entre a formulação de Euler e os resultados da análise linearizada de estabilidade para barras com um, dois e três parafusos, indicando que a flambagem em torno do eixo de menor inércia é o único modo de instabilidade que ocorre em perfis de abas compactas sob essa solicitação;
- não foi observada diferença na capacidade resistente com o aumento de dois para três parafusos;
- para barras de esbeltezes (λ_r) inferiores a 85 com um parafuso e barras de esbeltezes (λ_r) inferiores a 185 com dois ou três parafusos, ocorreu a plastificação total do perfil, enquanto que para as barras mais esbeltas, a flambagem elástica em torno do eixo de menor inércia foi o estado limite preponderante (ver curvas “NLGM”).

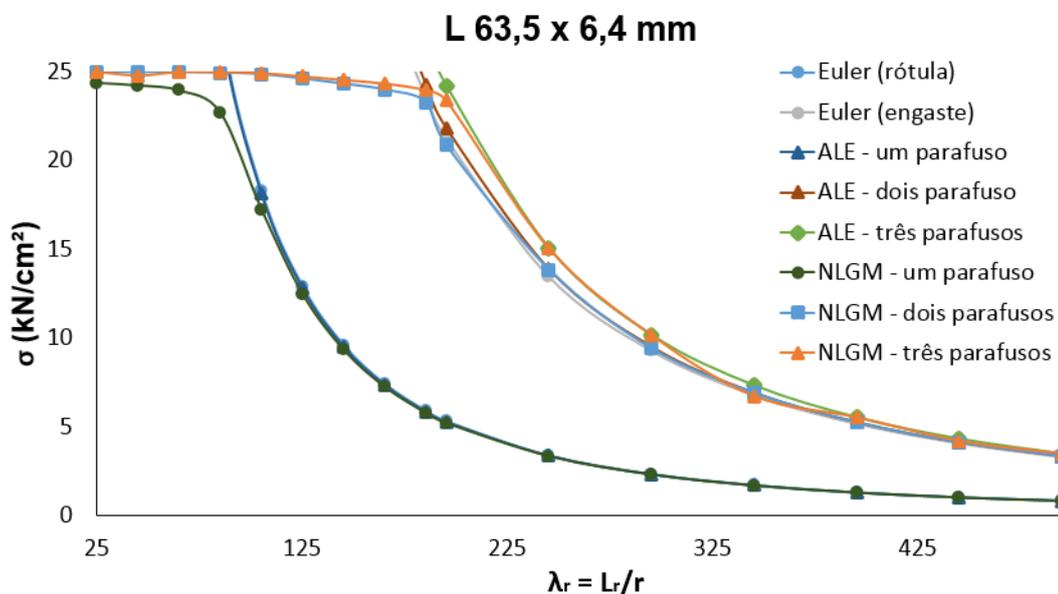


Figura 4.17 – Resultados da análise linearizada de estabilidade e da análise não linear geométrica e de material para compressão concêntrica do perfil L 63,5 x 6,4 mm.

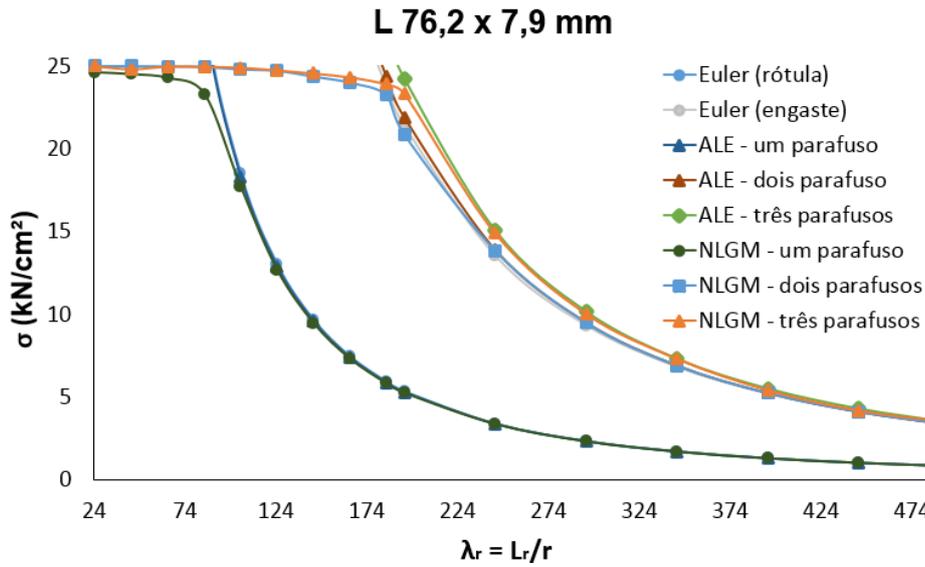


Figura 4.18 – Resultados da análise linearizada de estabilidade e da análise não linear geométrica e de material para compressão concêntrica do perfil L 76,2 x 7,9 mm.

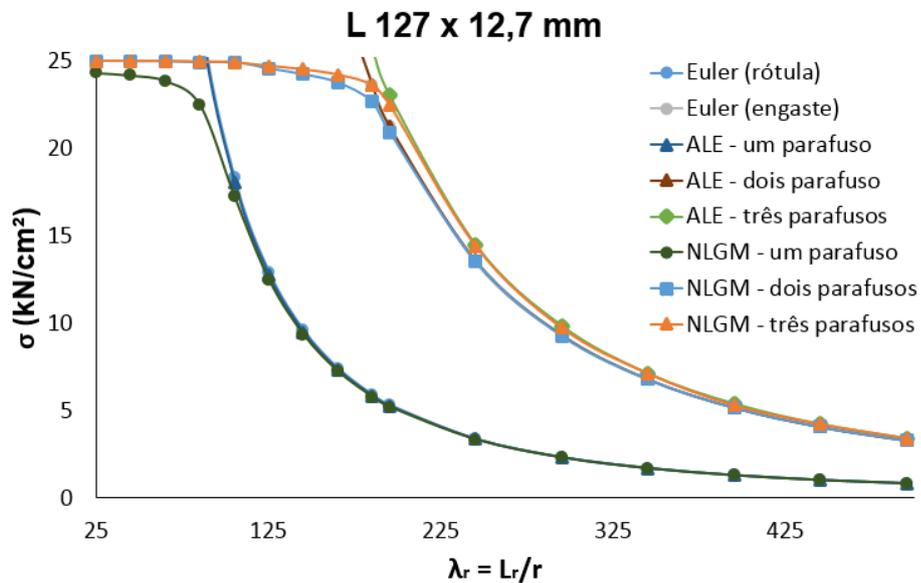


Figura 4.19 – Resultados da análise linearizada de estabilidade e da análise não linear geométrica e de material para compressão concêntrica do perfil L 127 x 12,7 mm.

4.10.2 Compressão excêntrica

A Figura 4.20, Figura 4.21 e Figura 4.22 apresentam os resultados da análise linearizada de estabilidade (ALE) e da análise não linear geométrica e de material (NLGM) para compressão excêntrica, onde se observa que:

- há excelente concordância entre os resultados analíticos obtidos através da formulação de Vlasov e os resultados numéricos das análises linearizadas de estabilidade. Os resultados numéricos relativos às barras com um parafuso praticamente coincidem com valores analíticos para a condição de contorno vínculo de garfo, da mesma forma, os resultados numéricos relativos aos modelos com dois e três parafusos ficaram bastante próximos aos resultados analíticos para a condição de engaste, confirmando a flexo-torção como modo de instabilidade presente nesses modelos numéricos;
- considerando as análises NLGM, a falha é caracterizada por uma instabilidade elastoplástica por flexo-torção para barras com um parafuso e valores de esbeltezes (λ_r) abaixo de 145 e para barras com três parafusos com esbeltezes inferiores a 295. Para esbeltezes maiores que as destacadas anteriormente, a flambagem elástica por flexo-torção governa o modo de falha (ver Figura 4.23);
- nas barras com dois parafusos, a instabilidade elastoplástica por flexo-torção foi preponderante em praticamente todas as esbeltezes;
- para esbeltezes elevadas, a curva “NLGM – um parafuso” tangencia a curva “Vlasov (vínculo de garfo) e as curvas “NLGM – dois parafusos” e “NLGM – três parafusos” apresentam comportamento assintótico com a curva “Vlasov (engaste)”, sugerindo, portanto, que cantoneiras compridas excentricamente através de um parafuso comportam-se como barras rotuladas, e aquelas solicitadas com dois e três parafusos, como barras biengastadas;
- a resistência máxima alcançada nos modelos com um parafuso corresponde à aproximadamente 50% da resistência ao escoamento, indicando que nesses perfis ocorre, predominantemente, a plastificação apenas da aba conectada (ver Figura 4.24);
- a resistência máxima alcançada nos modelos com dois e três parafusos corresponde à aproximadamente 75 e 95%, respectivamente, da resistência ao escoamento;
- quanto à influência do número de parafusos, foi observado um ganho de resistência de, aproximadamente, 50% e 90% nos modelos com dois e três parafusos, respectivamente, quando comparados com o modelo com um parafuso;
- no trecho elastoplástico das curvas, a diferença na capacidade resistente em função do número de parafusos ocorre porque cada parafuso adicional permite que uma maior porção da aba não conectada seja solicitada, fornecendo, dessa forma, um ganho na capacidade resistente.

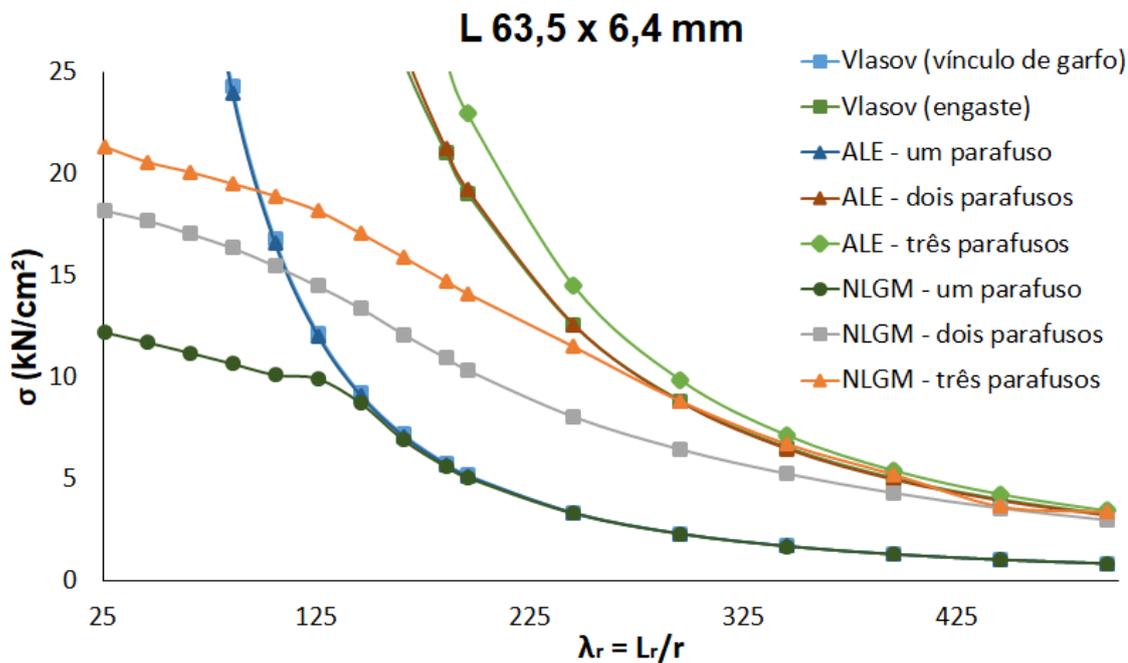


Figura 4.20 – Resultados da análise linearizada de estabilidade e da análise não linear geométrica e de material para compressão excêntrica do perfil L 63,5 x 6,4 mm.

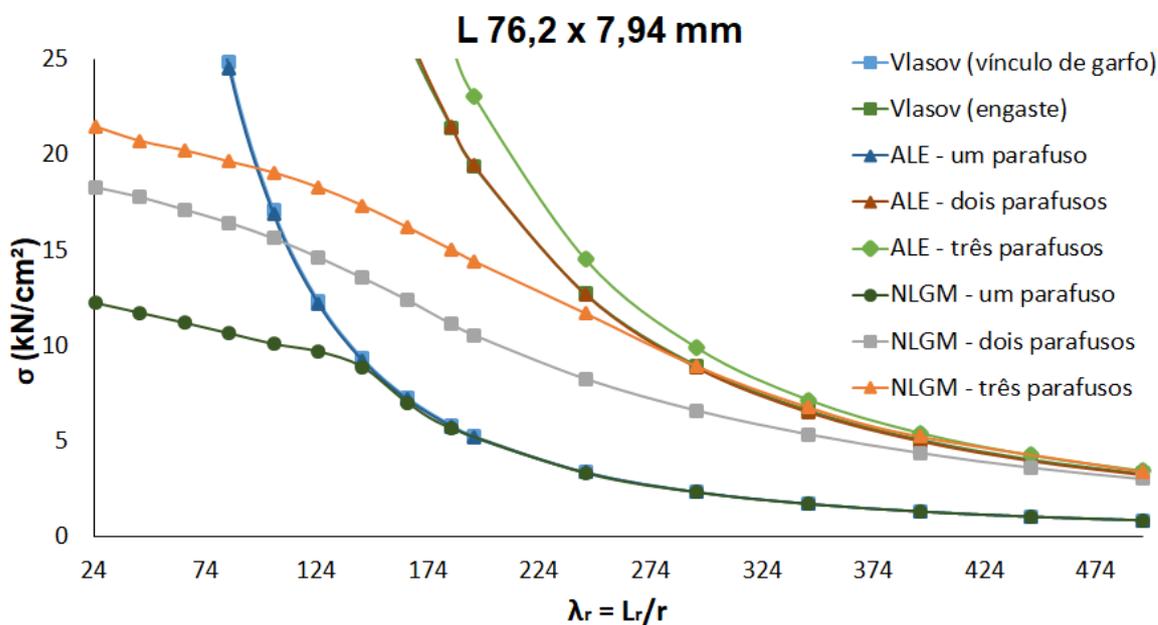


Figura 4.21 – Resultados da análise linearizada de estabilidade e da análise não linear geométrica e de material para compressão excêntrica do perfil L 76,2 x 7,9 mm.

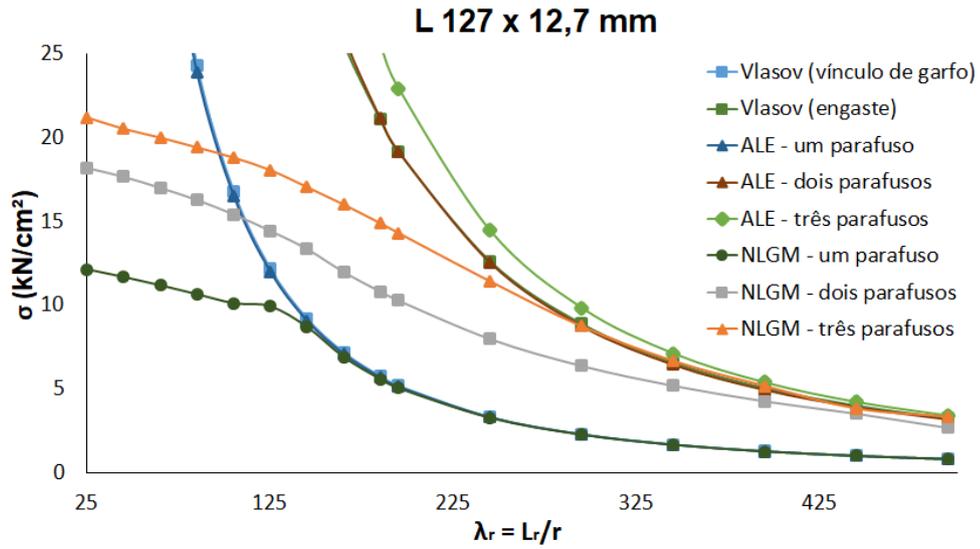


Figura 4.22 – Resultados da análise linearizada de estabilidade e da análise não linear geométrica e de material para compressão excêntrica do perfil L 127 x 12,7 mm.

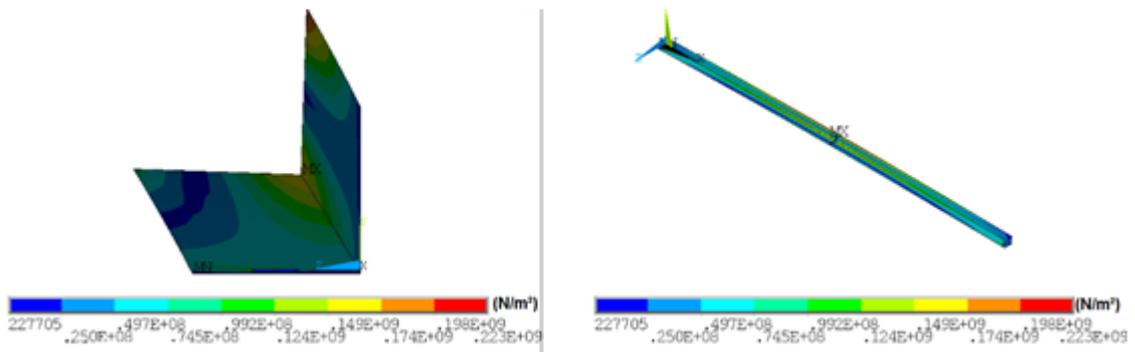


Figura 4.23 – Distribuição de tensões de von Mises para a compressão excêntrica – L 63,5 x 6,4 mm – $\lambda_r = 245$.

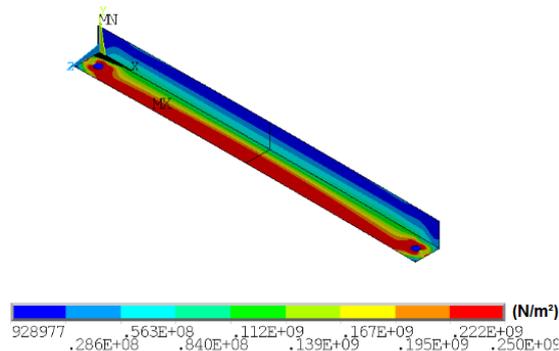


Figura 4.24 – Distribuição de tensões de von Mises para a compressão excêntrica – L 63,5 x 6,4 mm – $\lambda_r = 65$.

4.11 Comparação entre os Resultados obtidos a partir do Modelo Numérico Proposto e os apresentados por Kettler *et al.* (2017)

Para validação do modelo numérico proposto nesse trabalho, utilizou-se o resultado experimental de uma compressão excêntrica de uma cantoneira conectada por dois parafusos apresentado no trabalho de Kettler *et al.* (2017), descrito no Capítulo 2 (Subseção 2.2.1 - ver Figura 2.4, pág. 30). O gráfico mostrado na Figura 4.25 apresenta os seguintes resultados: força de compressão em função dos deslocamentos do vértice da seção transversal, localizado a meio comprimento da barra, nas direções do eixo de maior inércia (eixo y) e do eixo $z1$ (ver Figura 3.2, pág. 46). A partir dos parâmetros do modelo experimental (comprimento, imperfeição geométrica inicial, número de parafusos, etc.) realizou-se uma análise não linear geométrica e de material com o Modelo Proposto, cujos resultados também foram apresentados no gráfico da Figura 4.25.

Nesse gráfico, a maior inclinação da curva relativa aos deslocamentos na direção de y do Modelo Proposto mostra que este é mais rígido que o modelo experimental, o que já era esperado, uma vez que o MP possui ligações mais rígidas, livre da flexibilidade proporcionada pela chapa *gusset* e parafusos presentes no ensaio. A curva relativa aos deslocamentos ao longo de $z1$ dos modelos proposto e experimental apresentaram boa concordância. Contudo, os valores numéricos e experimentais da força última ($N_{\text{últ}}$) apresentaram uma diferença entre si de 8,1%, sendo o resultado do Modelo Proposto inferior.

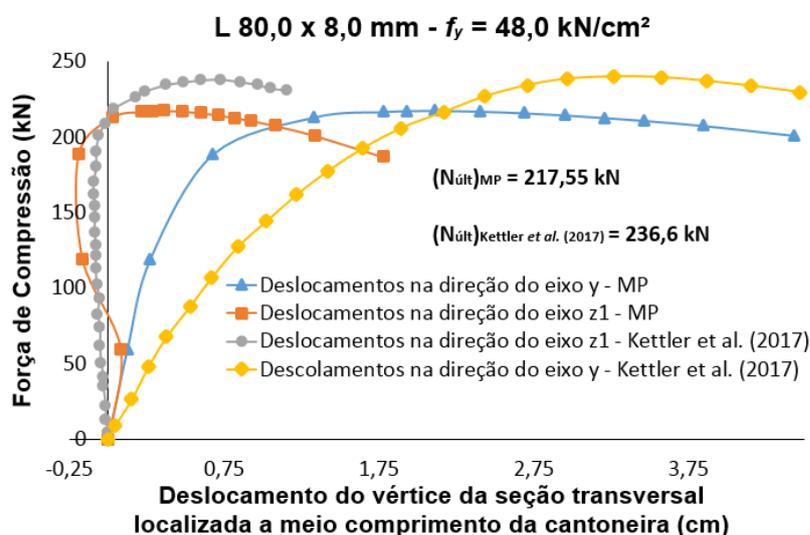


Figura 4.25 – Comparação entre os resultados do Modelo Proposto e do ensaio apresentado por Kettler *et al.* (2017) para o perfil L 80,0 x 8,0 mm.

Outros modelos desenvolvidos por Kettler *et al.* (2017), porém numéricos (ver Tabela 2.3 e Tabela 2.4, pág. 31), foram avaliados através do Modelo Proposto. Os resultados, mostrados na Tabela 4.4, apresentaram boa concordância, sendo que os perfis avaliados com o Modelo Proposto sempre apresentaram resultados maiores. Tal comportamento também já era previsto, uma vez que a região da ligação dos modelos deste trabalho também é mais rígida do que a dos modelos numéricos de Kettler *et al.* (2017).

Tabela 4.4 – Comparação entre os resultados numéricos do modelo proposto e do trabalho de Kettler *et al.* (2017).

Perfil	L_r (cm)	$\chi = \frac{N_{\acute{u}lt}}{A_g f_y}$		$\frac{\chi_{Modelo Proposto}}{\chi_{Kettler et al. (2017)}}$		
		Kettler <i>et al.</i> (2017)	Modelo Proposto			
um parafuso	L 60 x 6 mm	94	0,250	0,257	1,028	
		124	0,192	0,205	1,068	
		154	0,150	0,162	1,078	
		244	0,078	0,083	1,068	
	L 80 x 8 mm	148	0,217	0,226	1,043	
		184	0,169	0,184	1,090	
		220	0,133	0,142	1,071	
		292	0,087	0,093	1,069	
		L 120 x 12 mm	132	0,383	0,393	1,027
		dois parafusos	L 60 x 6 mm	184	0,502	0,530
214	0,400			0,422	1,054	
244	0,334			0,340	1,018	
L 80 x 8 mm	184		0,571	0,573	1,004	
	220		0,490	0,511	1,042	
	292		0,363	0,384	1,057	
L 120 x 12 mm	132		0,641	0,668	1,043	
	197		0,580	0,639	1,102	
	262		0,515	0,603	1,171	

4.12 Outros Aspectos da Análise Numérica

Conforme dito anteriormente, as análises linearizadas de estabilidade (obtenção das cargas críticas de flambagem elástica e dos modos de flambagem das cantoneiras) e as análises não lineares geométricas e de material (obtenção da capacidade resistente dos perfis e seus modos de falha) foram realizadas através do *software ANSYS*. Todo o trabalho computacional foi realizado através de linhas de comando, codificada por meio de uma linguagem de programação própria desse *software*, denominada *ANSYS Parametric Design Language* (APDL). Essa linguagem permite a parametrização de todos os elementos necessários para a realização da análise numérica paramétrica, sendo assim possível automatizar todo o processo.

Nos Apêndices Apêndice A: Código APDL para Declaração dos Parâmetros da Modelagem Numérica, Apêndice B: Código APDL para Compressão Concêntrica de Cantoneiras e Apêndice C: Código APDL para Compressão Excêntrica de Cantoneiras apresentam-se respectivamente: um exemplo de código APDL para declaração dos parâmetros da modelagem (dimensões do perfil, disposições construtivas da ligação, número de parafusos, propriedades do material, carregamento aplicado nos perfis, valor da imperfeição geométrica inicial, dimensão dos elementos etc.), um código APDL para compressão concêntrica de cantoneiras, e por último, outro código para compressão excêntrica. Nos dois últimos apêndices são apresentados os códigos com todos os detalhes da análise numérica discutidos nesse capítulo: construção da geométrica, definição do modelo constitutivo, aplicação das condições de contorno e carregamento, análise linearizada de estabilidade, introdução das tensões residuais e imperfeição geométrica inicial nos modelos, método de análise não linear geométrica e de material, etc.

5 ANÁLISE DAS PRESCRIÇÕES NORMATIVAS APLICÁVEIS AO DIMENSIONAMENTO DE CANTONEIRAS LAMINADAS COMPRIMIDAS

5.1 Considerações Iniciais

Atualmente existem diversas normas no mundo que tratam da compressão de cantoneiras, sendo as de maior referência no país: ABNT NBR 8800:2008, ANSI/AISC 360-16, ASCE/SEI-10-2015, EN 1993-1-1:2005 e EN 1993-3-1:2006.

Na compressão concêntrica, a força crítica de flambagem elástica é obtida facilmente (ver Capítulo 3), tornando o seu dimensionamento uma tarefa simples. No caso da compressão excêntrica, a nova variável (a excentricidade de aplicação de carga) introduz um nível de complexidade ao problema. Como a solução elástica exata desse problema requer um procedimento complexo e não usual, muitos procedimentos normativos utilizam uma estratégia de simplificar o dimensionamento adotando um comprimento de flambagem ou esbeltez equivalente, sendo o efeito da excentricidade e das condições de vinculação da aba incorporados. A partir desse ponto, o dimensionamento prossegue de maneira semelhante ao caso da compressão concêntrica.

Neste Capítulo, serão analisados os procedimentos das normas citadas anteriormente para determinação da força resistente nominal ($N_{c,Rk}$) de cantoneiras comprimidas concêntrica e excêntrica, que posteriormente são comparados com os resultados obtidos nas análises NLGM realizadas com o modelo numérico proposto no Capítulo 4, levando em conta tensões residuais e imperfeição geométrica inicial.

Não serão tratados neste Capítulo os valores dos coeficientes de ponderação das ações, pois variam em cada norma e possuem características regionais. Também não serão expostos

detalhes sobre os procedimentos relativos à flambagem local das abas das cantoneiras uma vez que as cantoneiras abordadas nesse trabalho possuem abas compactas, não estando, portanto, sujeitas a esse tipo de instabilidade.

Nas normas aplicáveis a torres de transmissão, ASCE/SEI-10-2015 e EN 1993-3-1:2006, as forças resistentes nominais foram determinadas considerando as cantoneiras como barras de diagonais de contraventamentos.

5.2 ABNT NBR 8800:2008 e ANSI/AISC 360-16

A norma brasileira ABNT NBR 8800:2008 e a norma americana ANSI/AISC 360-16 possuem formulação para a determinação da força resistente nominal bem semelhante, uma vez que a referência da norma brasileira tem sido edições anteriores da norma americana. Independentemente do tipo de solicitação na cantoneira, concêntrica ou excêntrica, as duas especificações adotam a Equação (5.1) para o cálculo de $N_{c,Rk}$:

$$N_{c,Rk} = \chi A f_y \quad (5.1)$$

onde A é a área da seção transversal (cujo valor é dado de acordo com as prescrições de cada norma) e χ é o fator de redução associado à resistência à compressão, cujo valor é obtido através da curva de resistência $2P$ do *Structural Stability Research Council - SSRC* (ver Figura 5.1). Esta curva é determinada pela Equação (5.2).

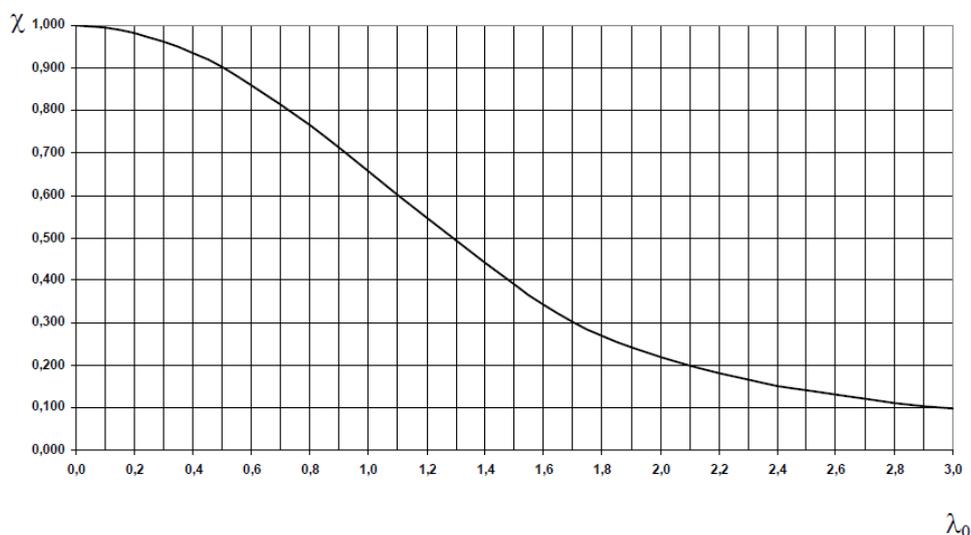


Figura 5.1- Curva de dimensionamento adotada pelas normas ABNT NBR 8800:2008 e ANSI/AISC 360-16. (Fonte: ABNT NBR 8800:2008).

$$\chi = \begin{cases} 0,658\lambda_0^2, & \text{para } \lambda_0 \leq 1,5 \\ \frac{0,877}{\lambda_0^2}, & \text{para } \lambda_0 > 1,5 \end{cases} \quad (5.2)$$

sendo λ_0 o índice de esbeltez reduzido, definido pela Equação (5.3):

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{A_g f_y}{N_e}} \quad (5.3)$$

sendo N_e a força de flambagem elástica e A_g a área bruta da seção transversal.

5.2.1 Compressão concêntrica

Na compressão concêntrica, a norma brasileira atribui para N_e o menor valor entre as forças de flambagem elástica em relação ao eixo de menor inércia (Equação (3.24)) e de flexo-torção (Equação (3.41)), enquanto a norma americana desconsidera a necessidade de verificação da cantoneira à flexo-torção para $b/t \leq 0,71\sqrt{E/f_y}$, ou seja, para todas as cantoneiras laminadas.

Os resultados numéricos para compressão concêntrica e as prescrições das normas ABNT NBR 8800:2008 e ANSI/AISC 360-16 encontram-se na Figura 5.2, Figura 5.3 e Figura 5.4. As curvas relativas aos modelos numéricos sob compressão concêntrica, “NLGM – um parafuso”, “NLGM – dois parafusos” e “NLGM – três parafusos”, iniciam-se em 96,4, 99,9 e 100%, respectivamente, da resistência ao escoamento do aço (25 kN/cm²). As cantoneiras comprimidas concêntrica falharam por flambagem elastoplástica (em perfis com um parafuso para $\lambda_r \leq 245$, e em perfis com dois ou mais para $\lambda_r \leq 345$) e por flambagem elástica em torno do eixo de menor inércia (em perfis com um parafuso para $\lambda_r > 245$, e em perfis com dois ou mais para $\lambda_r > 345$). Mesmo com a influência de tensões residuais e imperfeições geométricas iniciais, as cantoneiras parafusadas com um parafuso comportaram-se como barras birrotuladas e aquelas com dois e três parafusos, como barras biengastadas.

As normas ABNT NBR 8800:2008 e ANSI/AISC 360-16 apresentaram excelente concordância com os modelos numéricos nas configurações de ligação correspondentes. Nos pontos iniciais das curvas das normas, onde os modelos numéricos apontaram plastificação total do perfil, a norma brasileira indica apenas 88% da resistência ao escoamento como tensão resistente, enquanto a norma americana é mais coerente com os resultados numéricos.

Tal diferença entre as normas já era previsto, considerando que a norma brasileira pressupõe que perfis de pequena esbelteza sofrem flambagem elástica por flexo-torção, cujo valor da força crítica é menor do que a força crítica de flambagem elástica por flexão em torno do eixo de menor inércia, adotada pela norma americana.

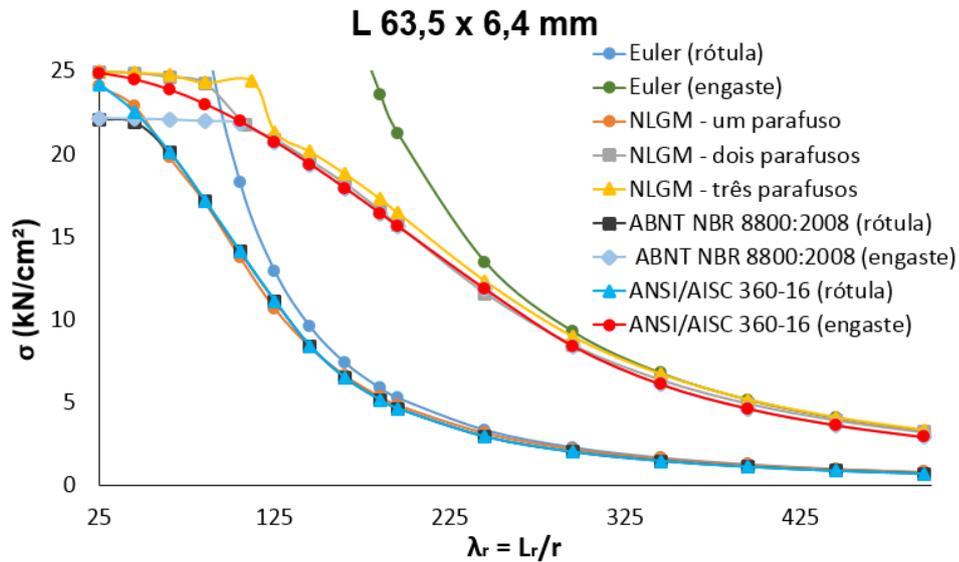


Figura 5.2 – Comparação entre os resultados obtidos com as normas ABNT NBR 8800:2008 e ANSI/AISC 360-16 e os obtidos através das análises numéricas para o perfil L 63,5 x 6,4 mm, comprimido concentricamente via um, dois e três parafusos em cada aba.

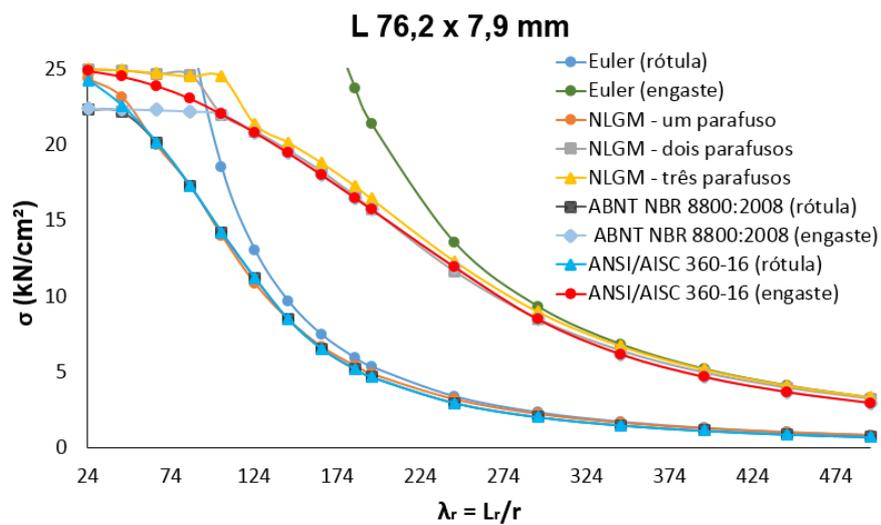


Figura 5.3 – Comparação entre os resultados obtidos com as normas ABNT NBR 8800:2008 e ANSI/AISC 360-16 e os obtidos através das análises numéricas para o perfil L 76,2 x 7,9 mm, comprimido concentricamente via um, dois e três parafusos em cada aba.

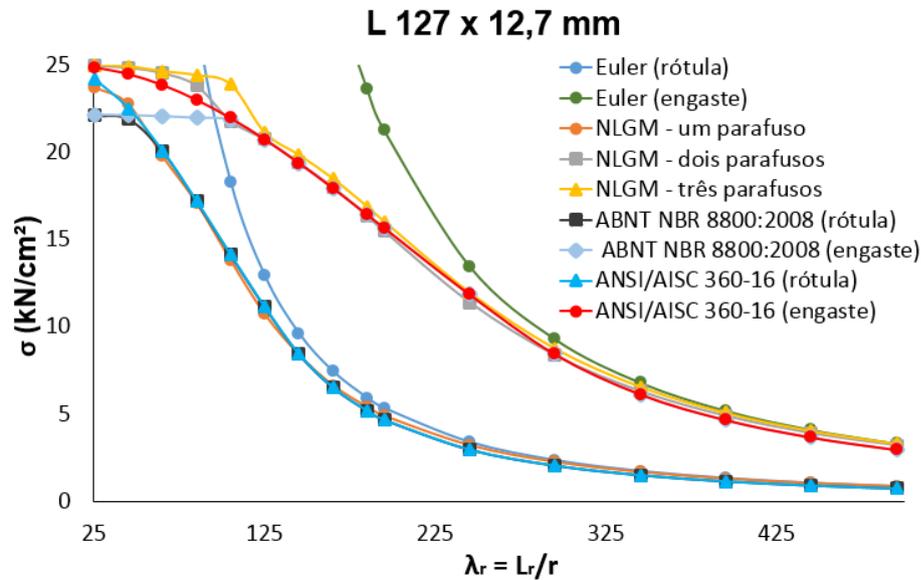


Figura 5.4 – Comparação entre os resultados obtidos com as normas ABNT NBR 8800:2008 e ANSI/AISC 360-16 e os obtidos através das análises numéricas para o perfil L 127 x 12,7 mm, comprimido concentricamente via um, dois e três parafusos em cada aba.

5.2.2 Compressão excêntrica

No dimensionamento à compressão excêntrica de cantoneiras a norma ABNT NBR 8800:2008 adota o comprimento de flambagem equivalente ($K_{z1}L_{z1}$), onde a força axial de flambagem elástica é calculada considerando flambagem por flexão em torno do eixo paralelo à aba conectada ($z1$ – ver Figura 3.2, pág. 46). Nesse dimensionamento, a norma brasileira desconsidera flexo-torção dos perfis. A área (A) utilizada na norma brasileira é sempre a área bruta da seção transversal (A_g).

Para cantoneiras comprimidas excêntrica, a norma ANSI/AISC 360-16 também utiliza o comprimento equivalente. A força axial de flambagem elástica desse procedimento é o menor valor entre as forças referentes às instabilidades por flexão e por flexo-torção para $b/t > 0,71\sqrt{E/f_y}$, sendo que a flambagem por flexão pode ser calculada utilizando a área bruta da seção transversal ou a área efetiva (A_{ef}). Na consideração da área efetiva, são contabilizados os efeitos dos modos de instabilidades locais. A norma ANSI/AISC 360-16 considera os modos de instabilidades locais e torcionais coincidentes, portanto, na flambagem por flexo-torção, só se utiliza a área bruta da seção transversal.

A norma brasileira e a norma americana adotam o mesmo procedimento para determinação do comprimento de flambagem equivalente e exigem que a aba solicitada seja conectada por solda na direção longitudinal ou por pelo menos dois parafusos. Por exemplo, as estruturas planas, com barras adjacentes, caso existam, conectadas do mesmo lado das chapas de nó ou dos banzos, esse comprimento equivalente é calculado pela Equação (5.4):

$$K_{z1}L_{z1} = \begin{cases} 72r_{z1} + 0,75L_{z1}, \text{ para } L_{z1}/r_{z1} \leq 80 \\ 32r_{z1} + 1,25L_{z1}, \text{ para } L_{z1}/r_{z1} > 80 \end{cases} \quad (5.4)$$

onde L_{z1} é o comprimento da cantoneira tomado entre os nós da estrutura, e r_{z1} é raio de giração da seção transversal em relação ao eixo que passa pelo centro geométrico e é paralelo à aba conectada.

Os resultados obtidos com a aplicação dos procedimentos das normas em questão, para compressão excêntrica de cantoneiras, são mostrados na Figura 5.5, Figura 5.6 e Figura 5.7. As curvas relativas aos modelos numéricos com dois e três parafusos sob compressão excêntrica, “NLGM – dois parafusos” e “NLGM – três parafusos”, iniciam-se, respectivamente, em 73 e 83% da resistência ao escoamento. O modo de falha predominante nas cantoneiras comprimidas excentricamente é a flambagem elastoplástica por flexo-torção. Para esbeltezes muito elevadas em perfis com três parafusos ($\lambda_r \geq 345$), ocorre a flambagem elástica por flexo-torção. Nas cantoneiras com dois parafusos ocorre sempre flambagem elastoplástica por flexo-torção. Mesmo com a influência de tensões residuais e imperfeições geométricas iniciais, as cantoneiras parafusadas com dois e três parafusos tendem a se comportar como barras biengastadas.

Na Figura 5.5, Figura 5.6 e Figura 5.7, a curva da ABNT NBR 8800:2008 (“AISC 360; NBR 8800 - \geq dois parafusos”), idêntica à ANSI/AISC 360-16, inicia-se em 70% da tensão de plastificação, e pressupõe a flexão em torno do eixo $z1$ (ver Figura 3.2, pág. 46) como o modo de flambagem das cantoneiras comprimidas excentricamente. Seu trecho inicial, para $\lambda_r \leq 125$, admite flambagem elastoplástica, enquanto para esbeltezes mais elevadas estabelece-se a flambagem elástica. Nesta última faixa de esbeltezes, as referidas normas apresentam comportamento assintótico com a curva “Vlasov (vínculo de garfo)”. Os valores das normas ABNT NBR 8800:2008 e ANSI/AISC 360-16 foram inferiores em torno de 40% em relação aos modelos com dois parafusos e 51% inferiores aos modelos com três parafusos.

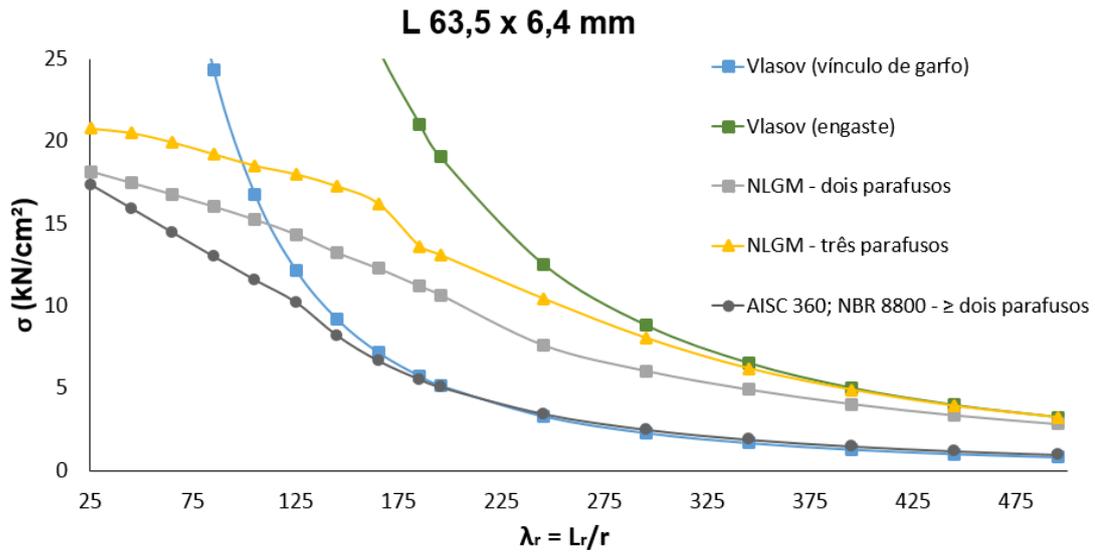


Figura 5.5 – Comparação entre os resultados obtidos com as normas ANSI/AISC 360-16 e ABNT NBR 8800:2008 e os obtidos através das análises numéricas para o perfil L 63,5 x 6,4 mm, comprimido excêntrica via dois e três parafusos.

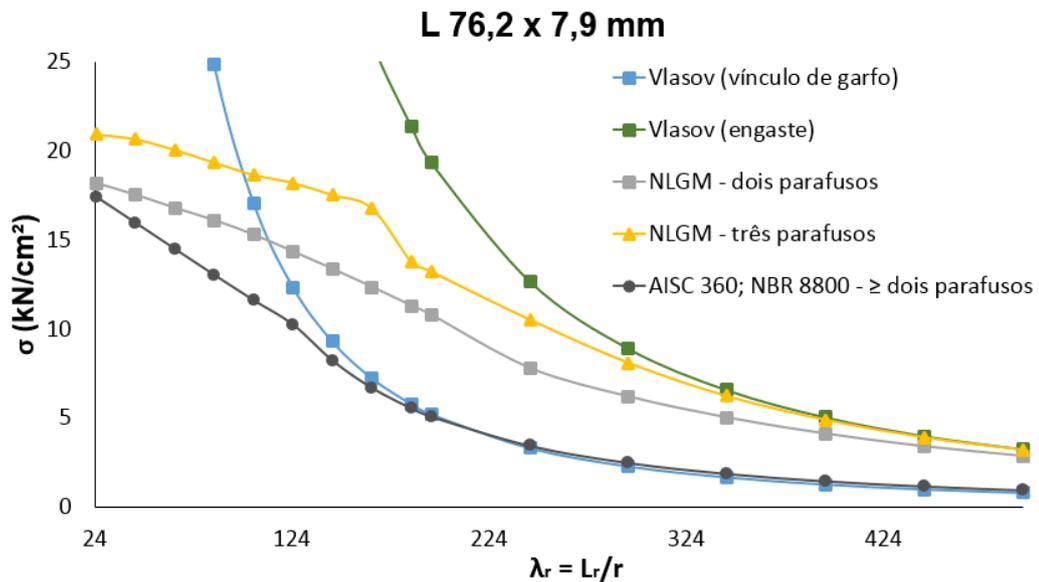


Figura 5.6 - Comparação entre os resultados obtidos com as normas ANSI/AISC 360-16 e ABNT NBR 8800:2008 e os obtidos através das análises numéricas para o perfil L 76,2 x 7,9 mm, comprimido excêntrica via dois e três parafusos.

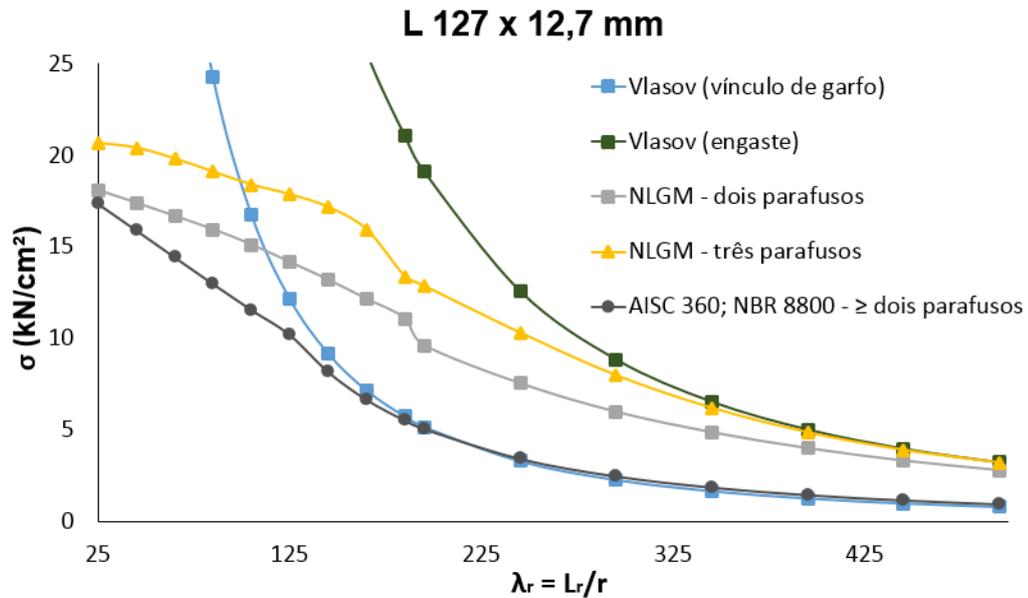


Figura 5.7 - Comparação entre os resultados obtidos com as normas ANSI/AISC 360-16 e ABNT NBR 8800:2008 e os obtidos através das análises numéricas para o perfil L 127 x 12,7 mm, comprimido excentricamente via dois e três parafusos.

5.3 ASCE/SEI-10-2015

A norma *Design of Latticed Steel Transmission Structures* da ASCE é a base para dimensionamento de cantoneiras laminadas em torres de transmissão, bastante utilizada no Brasil. Essa prescrição restringe sua aplicação à cantoneiras com esbeltez local (relação b/t) inferior a 25, sendo portanto aplicável a todas cantoneiras laminadas vendidas comercialmente no país.

A ASCE/SEI-10-2015, diferentemente das outras normas analisadas nesse trabalho, apresenta um procedimento para determinar a resistência das cantoneiras ainda no método das tensões admissíveis (f_a), calculada em função do índice de esbeltez em torno do eixo de menor inércia (KL/r), conforme a Equação (5.5):

$$f_a = \begin{cases} \left[1 - 0,5 \left(\frac{KL/r}{C_c} \right)^2 \right] f_y, & \frac{KL}{r} < C_c \\ \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2}, & \frac{KL}{r} \geq C_c \end{cases}, \text{ com } C_c = \pi \sqrt{\frac{2E}{f_y}} \quad (5.5)$$

onde r é o raio mínimo de giração em torno do eixo de menor inércia e K é o coeficiente de flambagem da barra.

A esbeltez da cantoneira (KL/r) é determinada conforme as condições de vinculação da mesma. Extremidades com um parafuso são classificadas como “sem restrições a rotação” ou rotuladas, enquanto extremidades com dois ou mais parafusos são ditas “com restrições parciais”, ou mesmo, semi-engastadas.

A norma em questão considera em seu dimensionamento que barras de pequena e média esbeltez são mais influenciadas pela excentricidade da aplicação de força, enquanto que perfis mais esbeltos são mais sensíveis às restrições impostas às suas extremidades. Sendo assim, para perfis com esbeltez inferior ou igual a 120, a ASCE/SEI-10-2015 controla a influência da excentricidade estabelecendo uma região na aba da cantoneira onde devem ser posicionados os parafusos. Essa região localiza-se entre a linha do centroide e a metade da aba, denominada “*normal framing eccentricity*”. Nessa faixa de esbeltez, o número de parafusos utilizado é irrelevante para o dimensionamento. Para perfis mais esbeltos, a influência da excentricidade torna-se inexpressiva, havendo a partir de então duas formulações para o dimensionamento: uma para cantoneiras com um parafuso (rótula) e outra para perfis com dois parafusos ou mais (semi-engaste) em ambas as extremidades.

As Equações (5.6), (5.7), (5.8) e (5.9) apresentam as formulações para o dimensionamento.

(1) Para barras submetidas a compressão concêntrica em ambas as extremidades:

$$\frac{KL}{r} = \frac{L}{r}, \text{ para } 0 \leq \frac{L}{r} \leq 120 \quad (5.6)$$

(2) Para barras com todos os parafusos dentro da *normal framing eccentricity* em ambas as extremidades:

$$\frac{KL}{r} = 60 + 0,5 \frac{L}{r}, \text{ para } 0 \leq \frac{L}{r} \leq 120 \quad (5.7)$$

(3) Para barras sem restrições à rotação em ambas as extremidades (um único parafuso):

$$\frac{KL}{r} = \frac{L}{r}, \text{ para } 120 \leq \frac{L}{r} \leq 200 \quad (5.8)$$

(4) Para barras com restrições parciais em ambas as extremidades (pelo menos dois parafusos):

$$\frac{KL}{r} = 42,5 + 0,615 \frac{L}{r}, \text{ para } 120 \leq \frac{L}{r} \leq 250 \quad (5.9)$$

Segundo autores como Chhabra *et al.* (1995) e Bathon *et al.* (1993), os resultados de ensaios experimentais de cantoneiras comprimidas isoladamente divergem muito das prescrições da ASCE/SEI-10-2015. Em outras palavras, essa norma subestima a capacidade individual à compressão das barras. Ainda, segundo esses autores, os procedimentos da ASCE/SEI-10-2015 oferecem resultados bem próximos aos valores encontrados em ensaios de barras inseridas em subestruturas de torres de transmissão. Bathon *et al.* (1993) atribuem essa semelhança às possíveis restrições presentes na estrutura real, não reproduzidas integralmente no ensaio da barra isolada. Outros autores, como Elgaaly *et al.* (1991), reportaram que o dimensionamento da norma americana pode fornecer resultados contra a segurança, em alguns casos.

5.3.1 Compressão concêntrica

Na compressão concêntrica, bem como na compressão excêntrica, a norma ASCE/SEI-10-2015 apresenta uma única curva de dimensionamento para os perfis com $\lambda_r \leq 120$ independentemente do número de parafusos. Nessa faixa de esbeltez, a norma permanece acima (em torno de 10%) dos valores numéricos com um parafuso e muito abaixo (em torno de 39%) dos perfis com dois e três parafusos, conforme mostram a Figura 5.8, Figura 5.9 e Figura 5.10. As curvas dessa norma iniciam-se com valor de tensão igual à plastificação. Para os perfis mais esbeltos ($\lambda_r \geq 120$) com um parafuso, a curva de dimensionamento proposto pela norma americana (“ASCE/SEI-10-2015 (rótula)”) coincide com as tensões de Euler na condição de barra rotulada, ficando assim sempre ligeiramente acima (em torno de 1,5%). Em situações com dois ou três parafusos, a curva “ASCE/SEI-10-2015 (semi-engaste)” fica muito abaixo (em torno de 56%) dos valores da análise não linear geométrica e de material (“NLGM – dois parafusos” e “NLGM – três parafusos”).

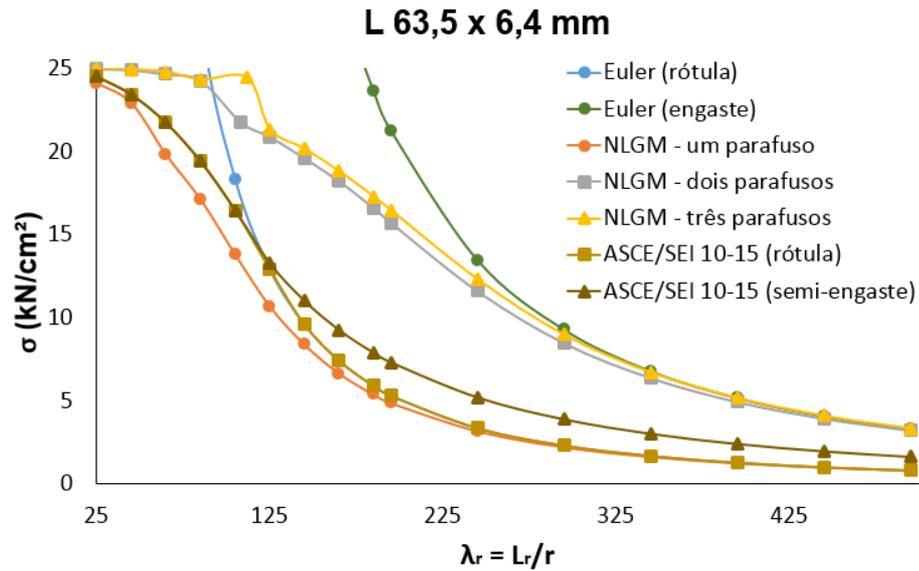


Figura 5.8 – Comparação entre os resultados obtidos com a norma ASCE/SEI-10-2015 e os obtidos através das análises numéricas para o perfil L 63,5 x 6,4 mm, comprimido concentricamente via um, dois e três parafusos em cada aba.

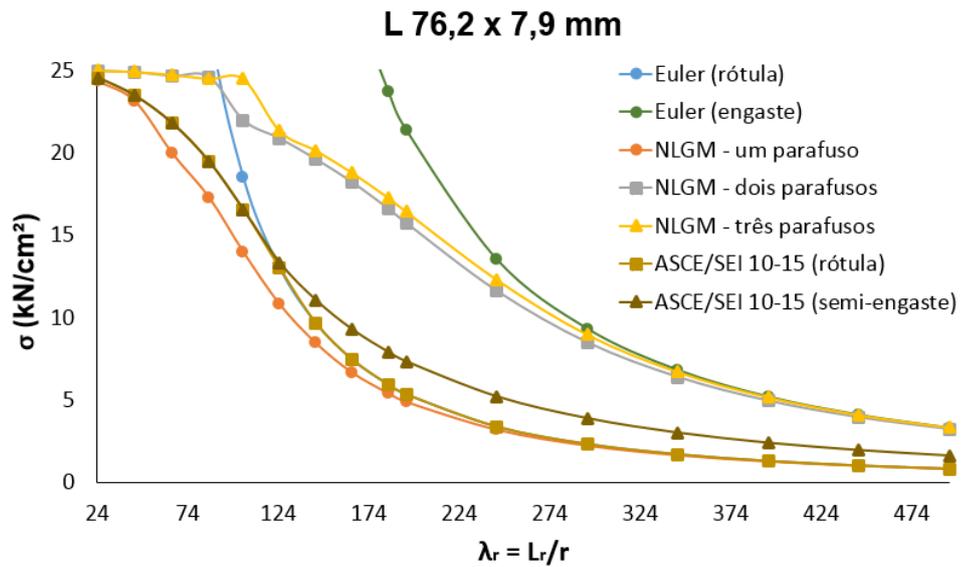


Figura 5.9 – Comparação entre os resultados obtidos com a norma ASCE/SEI-10-2015 e os obtidos através das análises numéricas para o perfil L 76,2 x 7,9 mm, comprimido concentricamente via um, dois e três parafusos em cada aba.

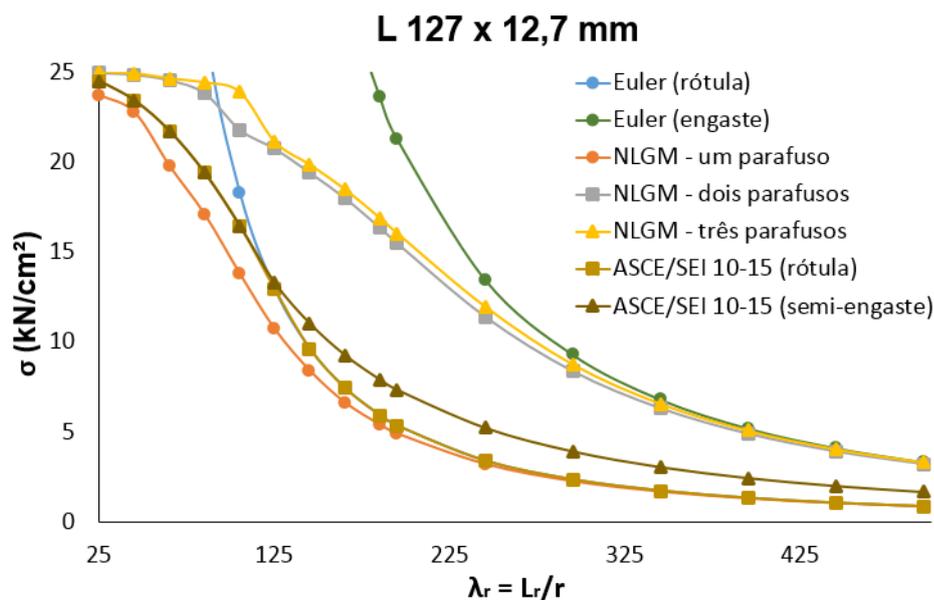


Figura 5.10 – Comparação entre os resultados obtidos com a norma ASCE/SEI-10-2015 e os obtidos através das análises numéricas para o perfil L 127 x 12,7 mm, comprimido concentricamente via um, dois e três parafusos em cada aba.

5.3.2 Compressão excêntrica

As curvas relativas aos modelos numéricos com um parafuso sob compressão excêntrica, (“NLGM – um parafuso”), iniciam-se em 48,9% da resistência ao escoamento, conforme mostram a Figura 5.11, Figura 5.12 e Figura 5.13. Os resultados numéricos para perfis com dois e três parafusos ficaram, respectivamente, 126 e 179% maiores que os valores para os perfis com um parafuso. Independentemente do número de parafusos, as curvas da ASCE/SEI-10-2015 para compressão excêntrica iniciam-se a 83,7% da resistência ao escoamento do aço. Para $\lambda_r \leq 120$, os valores da norma americana ficam em torno de 68% superiores aos resultados numéricos com um parafuso (“NLGM – um parafuso”). Nessa mesma faixa de esbeltez, os valores normativos para cantoneiras com dois ou mais parafusos (semelhante ao procedimento para perfis com um parafuso) são superiores em torno de 11% em relação aos resultados numéricos com dois parafusos e são inferiores em torno de 6% em relação aos modelos com três parafusos. Para $\lambda_r \geq 120$, a curva “ASCE/SEI-10-2015 – um parafuso” acompanha as tensões calculadas através da formulação de Vlasov (vínculo de garfo), ficando os valores normativos em torno de 19,7% superiores aos valores numéricos, enquanto que a curva “ASCE/SEI-10-2015 – \geq dois parafusos” - superior aos valores da curva “ASCE/SEI-10-2015 – um parafuso” (em torno de 54%), porém inferior (em torno de 58%) a

curva “Vlasov (engaste)” - apresenta valores inferiores em 31 e 45% em relação aos resultados numéricos com dois e três parafusos, respectivamente.

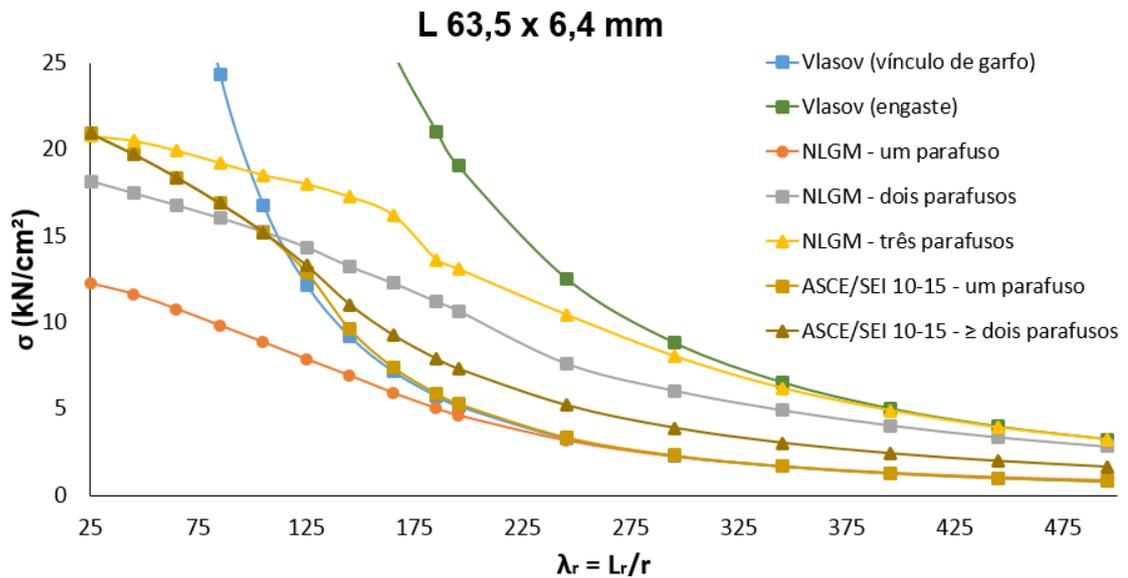


Figura 5.11 – Comparação entre os resultados obtidos com a norma ASCE/SEI-10-2015 e os obtidos através das análises numéricas para o perfil L 63,5 x 6,4 mm, comprimido excentricamente via um, dois e três parafusos.

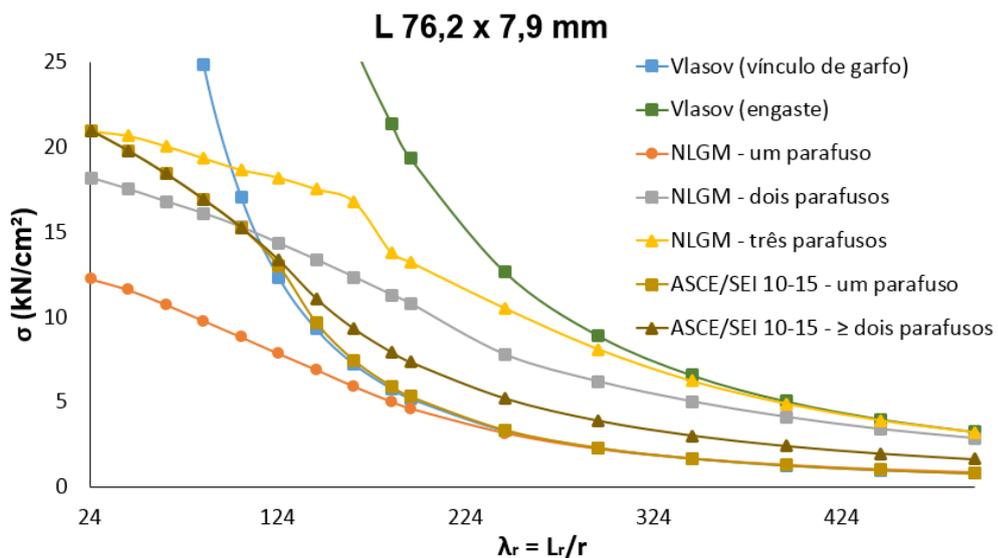


Figura 5.12 – Comparação entre os resultados obtidos com a norma ASCE/SEI-10-2015 e os obtidos através das análises numéricas para o perfil L 76,2 x 7,9 mm, comprimido excentricamente via um, dois e três parafusos.

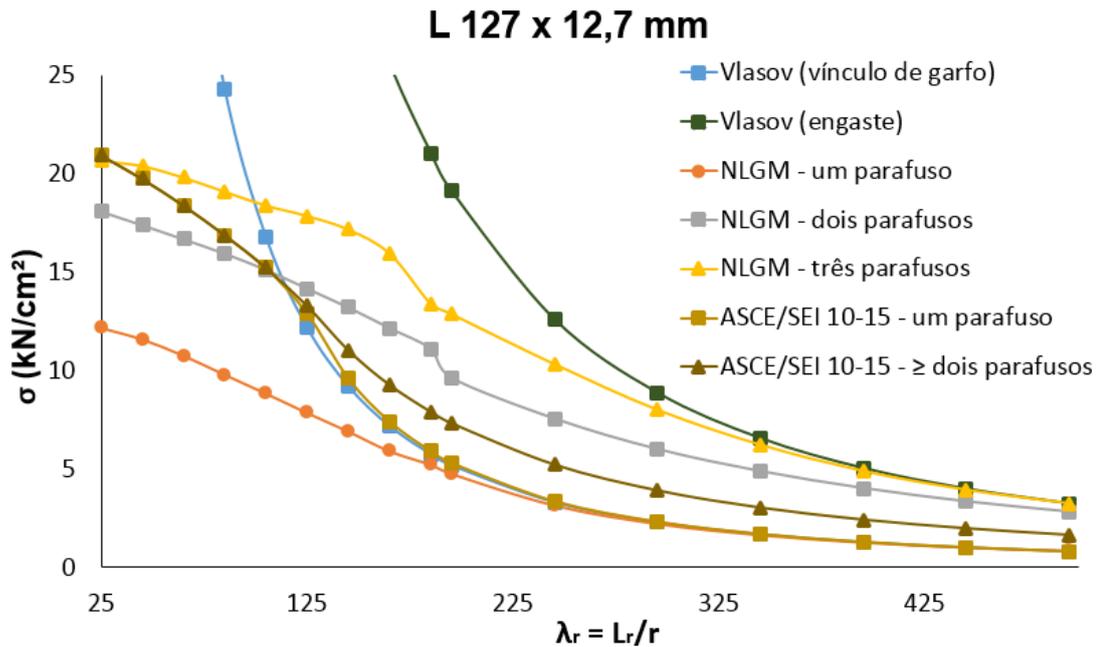


Figura 5.13 – Comparação entre os resultados obtidos com a norma ASCE/SEI-10-2015 e os obtidos através das análises numéricas para o perfil L 127 x 12,7 mm, comprimido excêntrica via um, dois e três parafusos.

5.4 EN 1993-1-1:2005

O *Eurocode 3*, regulamento europeu que estabelece as diretrizes para estruturas em aço, apresenta duas propostas para o dimensionamento de cantoneiras comprimidas. O primeiro, proposto na norma EN 1993-1-1:2005, utiliza a metodologia empregada para compressão de cantoneiras em estruturas em aço de forma geral. A segunda, presente na norma EN 1993-3-1:2006, aplica-se ao dimensionamento específico de estruturas de torres de transmissão. Nessa seção, será apresentado o procedimento da primeira proposta.

A norma EN 1993-1-1:2005 estabelece o uso de cinco curvas de flambagem distintas (ver Figura 5.14), provenientes do ECCS, cada uma apresentada em função do tipo de perfil a ser analisado. Para o dimensionamento de cantoneiras comprimidas (Perfil L), a norma recomenda a utilização da curva b.

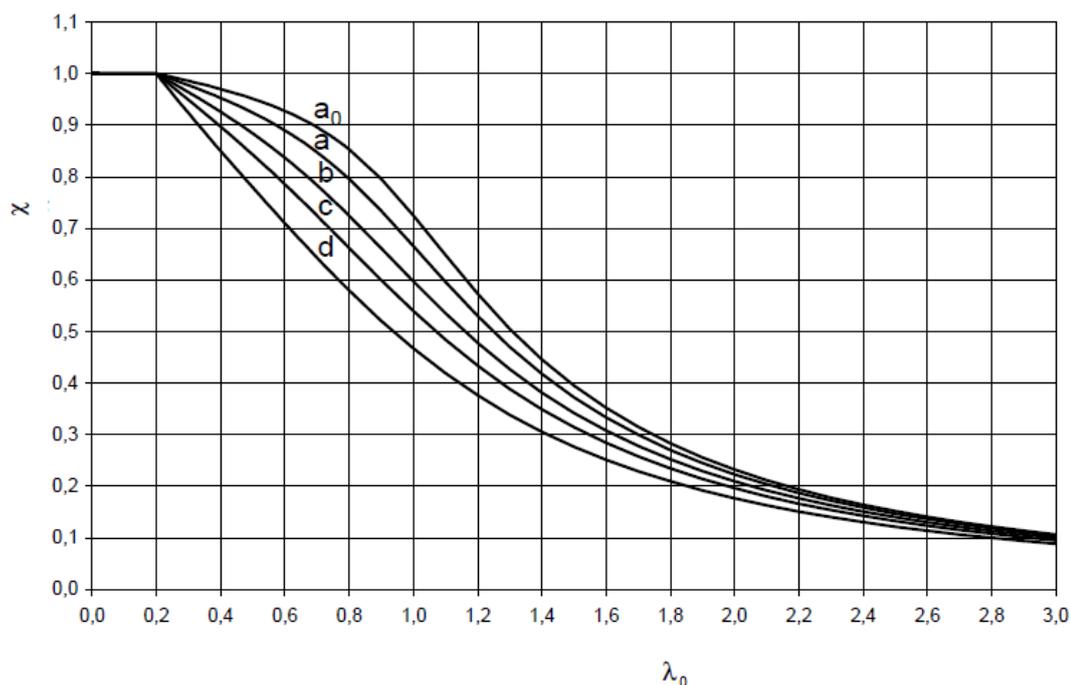


Figura 5.14 – Curvas de flambagem. (Fonte: EN 1993-1-1:2005)

A norma europeia classifica os perfis em quatro tipos de classes (1, 2, 3 e 4), conforme a esbelteza local de seus elementos. As cantoneiras são classificadas conforme a Equação (5.10):

$$\text{classe} = \begin{cases} 1, \text{ se } b/t \leq 9\varepsilon \\ 2, \text{ se } 9\varepsilon < b/t \leq 10\varepsilon \\ 3, \text{ se } 10\varepsilon < b/t \leq 11,5\varepsilon \\ 4, \text{ se } b/t > 11,5\varepsilon \end{cases}, \varepsilon = \frac{235}{\sqrt{f_y}} \quad (5.10)$$

sendo f_y dado em MPa.

A força resistente nominal da cantoneira submetida à compressão é determinada conforme a Equação (5.1). Nessa equação, o valor de A é igual a A_g para perfis de classes 1, 2 e 3, e igual a uma área efetiva, A_{ef} (uma redução da área a fim de contabilizar os efeitos da flambagem local) para os perfis da classe 4. Nenhum perfil avaliado nesse trabalho pertence à classe 4.

É válido chamar a atenção nesse ponto que, embora a norma europeia adote uma imperfeição geométrica inicial igual a $L/1000$, adotou-se nos modelos numéricos uma imperfeição de $L/1500$, o que não afeta futuras comparações.

5.4.1 Compressão concêntrica

Na compressão concêntrica, o valor de χ é calculado a partir do índice de esbelteza reduzido (λ_0) das barras, conforme Equação (5.11):

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda_0^2}} \leq 1 \quad (5.11)$$

onde λ_0 é calculado através da Equação (5.3), com N_e sendo o menor valor entre a força crítica de flambagem em torno do eixo de menor inércia (ver Equação (3.24)) e a flexo-torção (ver Equação (3.41)). O coeficiente adimensional, Φ , é obtido através da Equação (5.12):

$$\Phi = 0,5[1 + \alpha(\lambda_0 - 0,2) + \lambda_0^2] \quad (5.12)$$

onde α é um fator igual a 0,34, conforme a curva de flambagem b.

A Figura 5.15, Figura 5.16 e Figura 5.17 mostram que, na compressão concêntrica, as tensões resistentes calculadas através da EN 1993-1-1:2005 ficam sempre abaixo dos resultados numéricos, independentemente do número de parafusos na ligação. As curvas dessa norma iniciam-se a partir de 88% da tensão de plastificação do perfil e são inferiores, em torno de 8%, aos modelos numéricos com um ou mais parafusos. Tal discrepância é mais significativa nas cantoneiras com λ_r inferiores a 65 (para perfis com um parafuso) e 105 (para perfis com dois ou mais parafusos). Para essas esbeltezes, a EN 1993-1-1:2005, de forma semelhante à ABNT NBR 8800:2008, considera a flambagem por flexo-torção como o modo de instabilidade dos perfis.

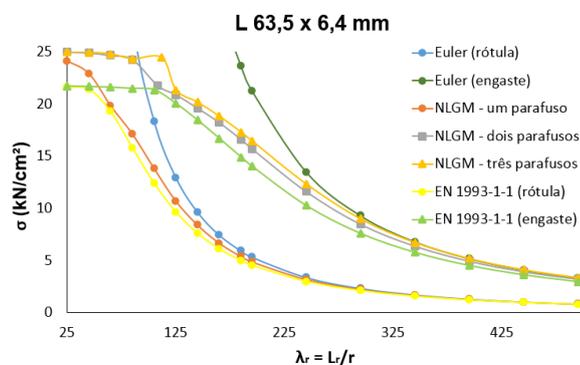


Figura 5.15 – Comparação entre os resultados obtidos com a norma EN 1993-1-1:2005 e os obtidos através das análises numéricas para o perfil L 63,5 x 6,4 mm, comprimido concêntrica via um, dois e três parafusos em cada aba.

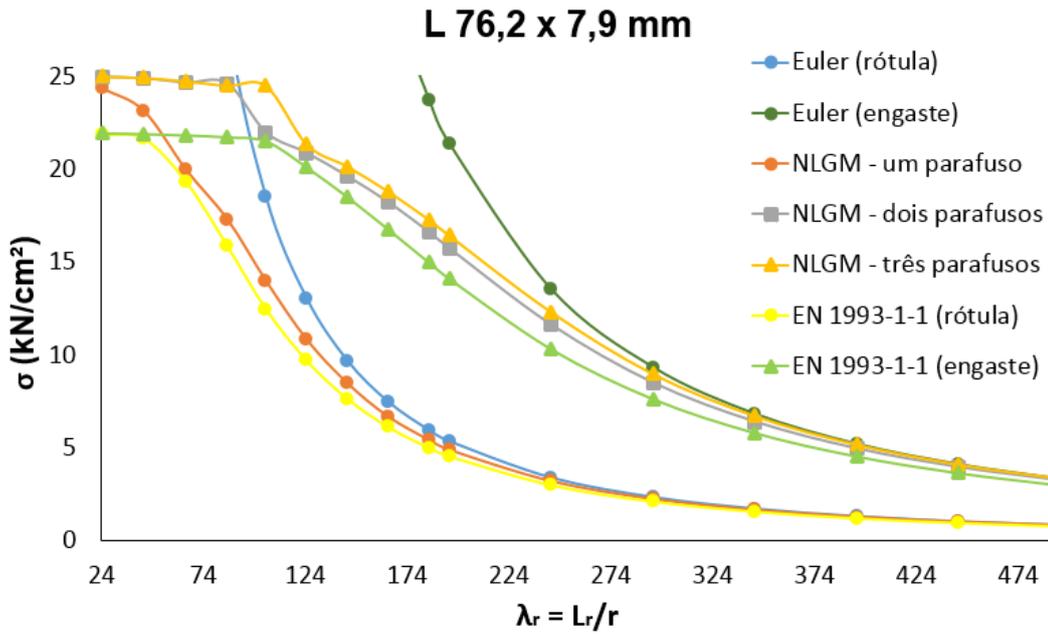


Figura 5.16 – Comparação entre os resultados obtidos com a norma EN 1993-1-1:2005 e os obtidos através das análises numéricas para o perfil L 76,2 x 7,9 mm, comprimido concentricamente via um, dois e três parafusos em cada aba.

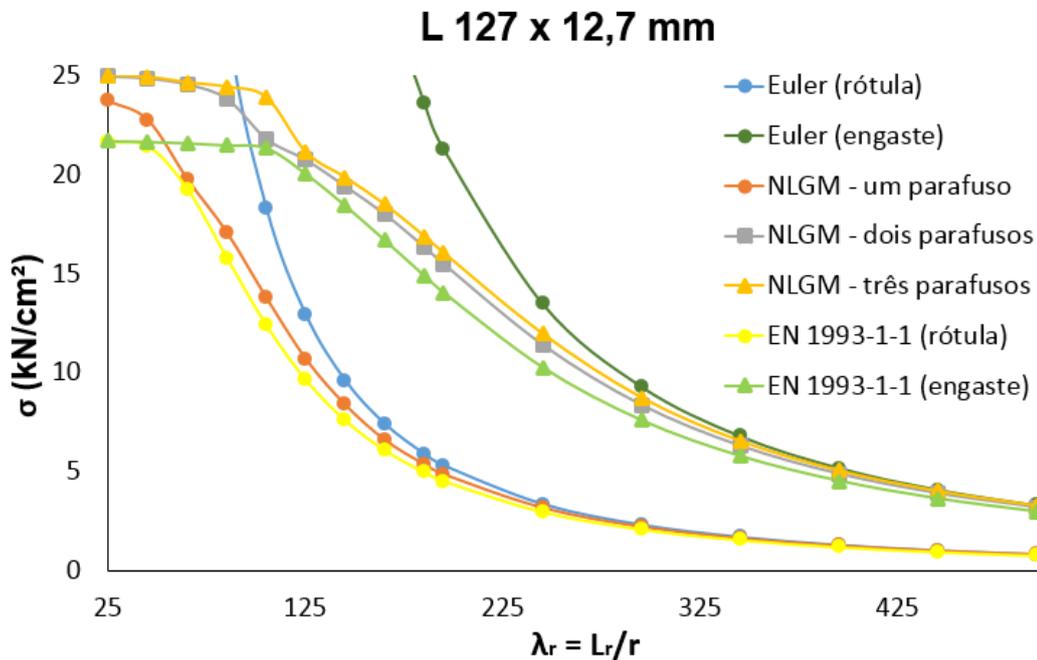


Figura 5.17 – Comparação entre os resultados obtidos com a norma EN 1993-1-1:2005 e os obtidos através das análises numéricas para o perfil L 127 x 12,7 mm, comprimido concentricamente via um, dois e três parafusos em cada aba.

5.4.2 Compressão excêntrica

No caso de cantoneiras comprimidas excêntrica, exige-se a utilização de pelo menos dois parafusos e o dimensionamento é realizado substituindo λ_0 nas Equações (5.11) e (5.12) pelo maior valor entre os índices de esbeltezes reduzidos efetivos: em relação ao eixo z ($\lambda_{ef,z}$) ou em relação ao eixo $z1$ ($\lambda_{ef,z1}$) - ver Figura 3.2, pág. 46. Tais esbeltezes são calculadas através das Equações (5.13) e (5.14), respectivamente:

$$\lambda_{ef,z} = 0,35 + 0,7\lambda_{0,z} \quad (5.13)$$

$$\lambda_{ef,z1} = 0,50 + 0,7\lambda_{0,z1} \quad (5.14)$$

onde $\lambda_{0,z}$ e $\lambda_{0,z1}$ são os índices de esbeltezes reduzidos em torno dos eixos z e $z1$, calculados através da Equação (5.12), tomando para N_e valores iguais a N_{ez} (ver Equação (3.24)) ou N_{ez1} , dado a seguir:

$$N_{ez1} = \frac{\pi^2 EA_g}{\lambda_{z1}^2} \quad (5.15)$$

Na Equação (5.15), N_{ez1} é a força de flambagem e λ_{z1} o índice de esbeltez em torno do eixo $z1$.

Algo que chama a atenção no dimensionamento do EN 1993-1-1:2005 está no fato do mesmo proporcionar valores para capacidade resistente dos perfis inferiores às demais normas avaliadas, sendo muito conservador em alguns casos, conforme evidenciado por Kettler *et al.* (2017) em suas análises numéricas. Alguns trabalhos, como o de Ban *et al.* (2013), atribuem esse conservadorismo ao fato dessa norma considerar dois modos de instabilidades supostamente coincidentes para as cantoneiras: a flambagem local e a flambagem por flexo-torção.

A Figura 5.18, Figura 5.19 e Figura 5.20 mostram a curva da norma EN 1993-1-1:2005 juntamente com os resultados numéricos para a compressão excêntrica. A curva dessa prescrição, igualmente às curvas da ASCE para compressão excêntrica (ver Figura 5.11, Figura 5.12 e Figura 5.13) inicia-se com tensões iguais a 83% de f_y . Os valores normativos são em torno de 40% inferiores aos modelos numéricos com dois parafusos (embora os três pontos iniciais da curva “NLGM – dois parafusos” sejam superiores aos valores da norma) e inferiores em torno de 46% aos resultados numéricos com três parafusos. Para esbeltezes

elevadas ($\lambda_r \geq 120$), a curva da norma europeia tangencia a curva relativa às tensões calculadas através da formulação de Vlasov (vínculo de garfo).

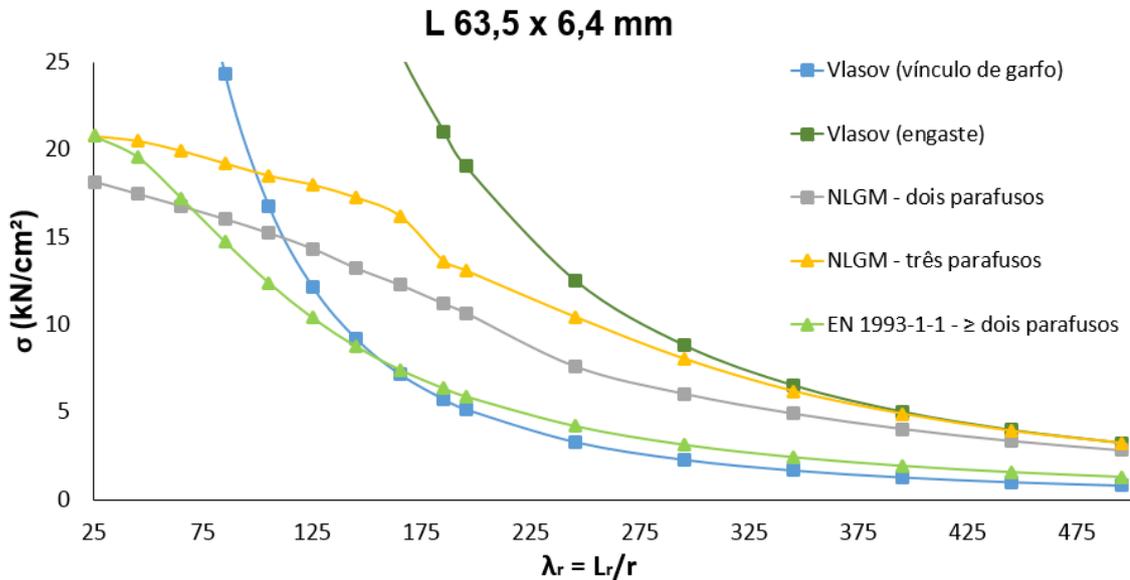


Figura 5.18 – Comparação entre os resultados obtidos com a norma EN 1993-1-1:2005 e os obtidos através das análises numéricas para o perfil L 63,5 x 6,4 mm, comprimido excentricamente via dois e três parafusos.

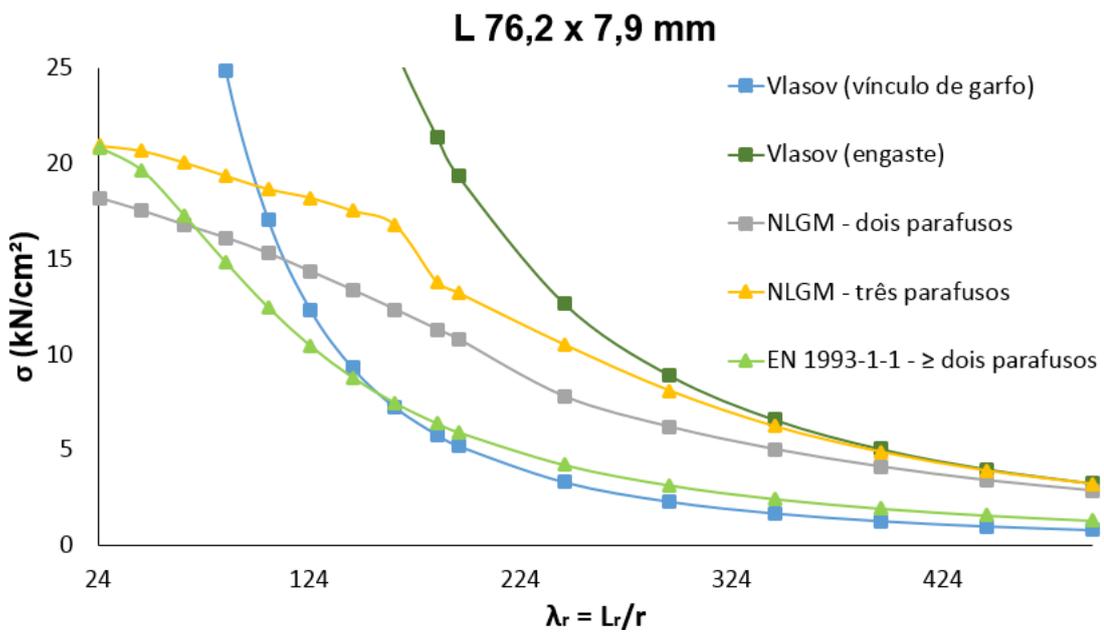


Figura 5.19 – Comparação entre os resultados obtidos com a norma EN 1993-1-1:2005 e os obtidos através das análises numéricas para o perfil L 76,2 x 7,9 mm, comprimido excentricamente via dois e três parafusos.

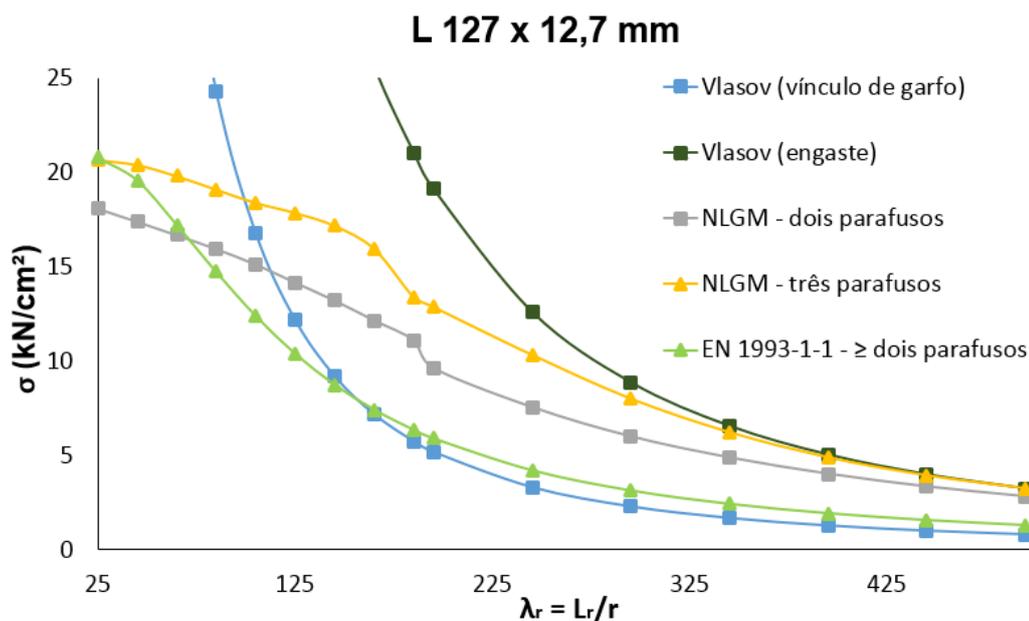


Figura 5.20 – Comparação entre os resultados obtidos com a norma EN 1993-1-1:2005 e os obtidos através das análises numéricas para o perfil L 127 x 12,7 mm, comprimido excêntrica via dois e três parafusos.

5.5 EN 1993-3-1:2006

O dimensionamento de estruturas de torres de transmissão proposto pela norma EN 1993-3-1:2006 obedece aos critérios estabelecidos pela EN 1993-1-1:2005. Porém, esta última estabelece procedimentos gerais para estruturas em aço, podendo levar a resultados conservadores para tipos específicos de estrutura.

O procedimento para análise de barras sujeitas a flambagem se encontra no Anexo G da referida norma. A capacidade resistente à compressão das cantoneiras é calculada através da Equação (5.16):

$$N_{c,Rk} = \chi A f_y \eta \quad (5.16)$$

onde A é igual a área bruta ou efetiva, conforme a classe do perfil (ver Seção 5.4), e η é um fator de redução específico para cantoneiras e possui valor igual a 0,8 para ligações com um parafuso em ambas as extremidades e 0,9 para os casos onde a ligação é mais rígida (dois parafusos ou mais).

Para compressão concêntrica e excêntrica, a norma em questão propõe o mesmo procedimento. O fator de redução da resistência χ é obtido através da Equação (5.11),

substituindo λ_0 também pelo maior valor entre $\lambda_{ef,z}$ e $\lambda_{ef,z1}$, determinados agora em função do número de parafusos em cada extremidade da barra:

Para um parafuso em ambas as extremidades:

$$\lambda_{ef,z} = 0,35 + 0,7\lambda_{0,z} \quad (5.17)$$

$$\lambda_{ef,z1} = 0,58 + 0,7\lambda_{0,z1} \quad (5.18)$$

Para dois ou mais parafusos em ambas as extremidades:

$$\lambda_{ef,z} = 0,35 + 0,7\lambda_{0,z} \quad (5.19)$$

$$\lambda_{ef,z1} = 0,40 + 0,7\lambda_{0,z1} \quad (5.20)$$

A norma EN 1993-3-1:2006 fornece valores maiores para a capacidade resistente das cantoneiras do que a EN 1993-1-1:2005. Ban *et al.* (2013) mostraram que essa norma superestima os efeitos dos modos locais na redução da força resistente à compressão, motivo pelo qual forneceu valores inferiores aos seus resultados experimentais. As análises numéricas de Kettler *et al.* (2017) evidenciaram certo conservadorismo por parte da norma EN 1993-3-1:2006. Ainda, segundo esses últimos autores, no dimensionamento proposto pela norma EN 1993-3-1:2006 para cantoneiras conectadas por um parafuso em cada extremidade, a flambagem em torno do eixo de menor inércia é determinante na resistência do perfil para $\lambda_{0,z} > 0,9$, enquanto que para valores menores de $\lambda_{0,z}$, a flambagem em torno do eixo z1 é mais decisiva.

5.5.1 Compressão concêntrica

A Figura 5.21, Figura 5.22 e Figura 5.23 apresentam os resultados obtidos através da norma e os resultados numéricos para compressão concêntrica. As curvas “EN 1993-3-1 – um parafuso” e “EN 1993-3-1 – \geq dois parafusos” iniciam-se em 62,5 e 86,5%, respectivamente, da resistência ao escoamento do perfil. Para as cantoneiras com $\lambda_r \leq 165$, a curva “EN 1993-3-1 – um parafuso” permanece abaixo dos valores numéricos com um parafuso em torno de 22%, enquanto para esbeltezes mais elevadas, a mesma fica superior em torno de 26% aos modelos numéricos e tangencia a curva “Euler (rótula)”. A diferença entre a curva da referida norma e os resultados numéricos para perfis com dois e três parafusos foi mais expressiva,

sendo que os valores normativos foram em torno de 50% inferiores aos respectivos valores numéricos. Para $\lambda_r \leq 165$, curva “EN 1993-3-1:2006 - \geq dois parafusos” tangencia a curva “Euler (rótula)”, ficando ligeiramente superior a curva “EN 1993-3-1:2006 - \geq um parafuso”.

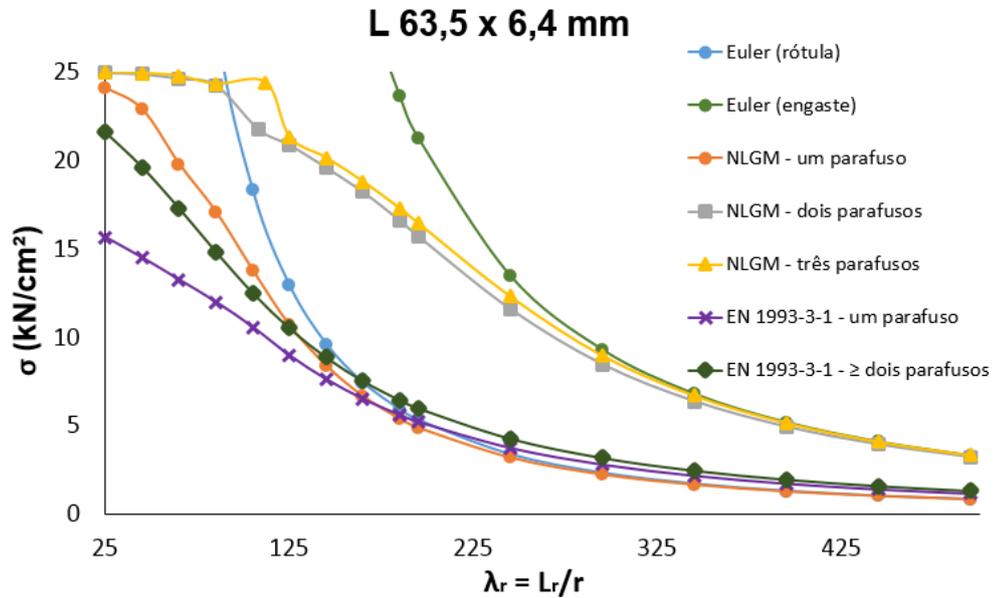


Figura 5.21– Comparação entre os resultados obtidos com a norma EN 1993-3-1:2006 e os obtidos através das análises numéricas para o perfil L 63,5 x 6,4 mm, comprimido concentricamente via um, dois e três parafusos em cada aba.

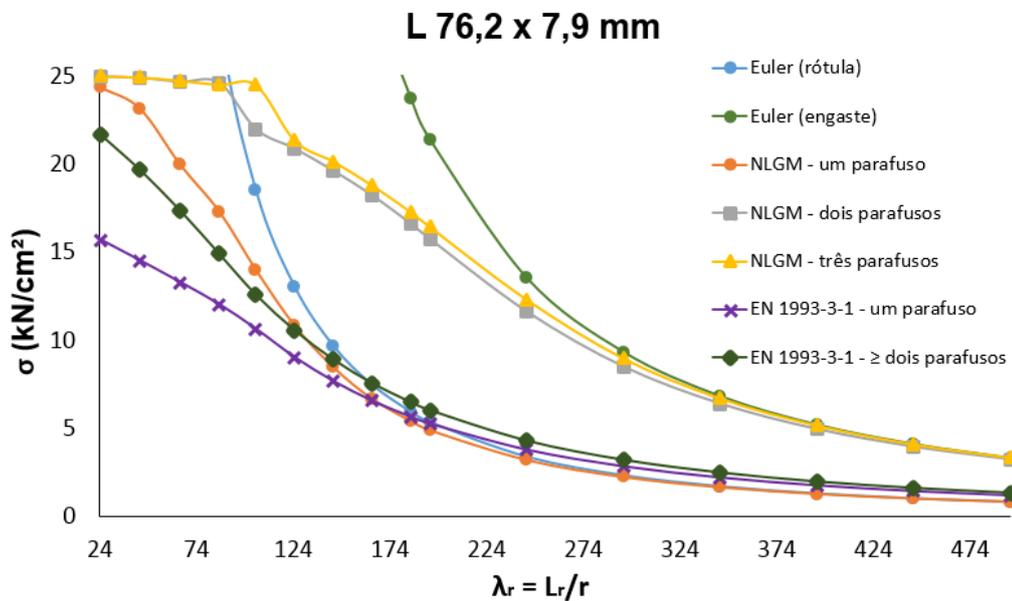


Figura 5.22 – Comparação entre os resultados obtidos com a norma EN 1993-3-1:2006 e os obtidos através das análises numéricas para o perfil L 76,2 x 7,9 mm, comprimido concentricamente via um, dois e três parafusos em cada aba.

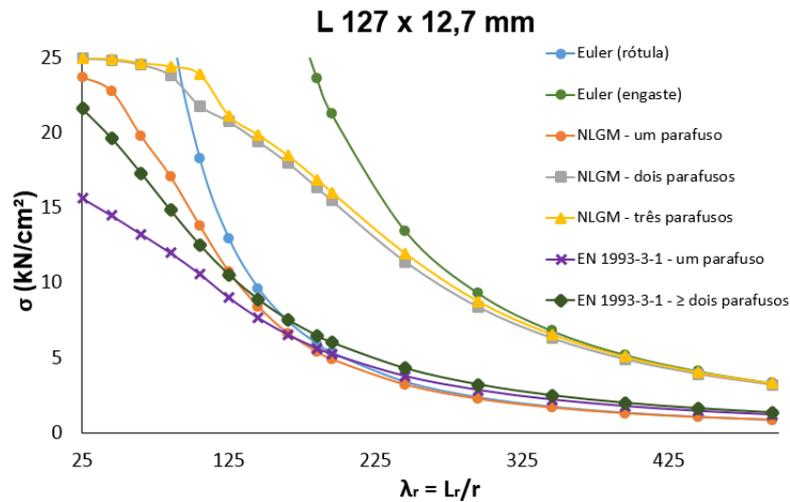


Figura 5.23 – Comparação entre os resultados obtidos com a norma EN 1993-3-1:2006 e os obtidos através das análises numéricas para o perfil L 127 x 12,7 mm, comprimido concentricamente via um, dois e três parafusos em cada aba.

5.5.2 Compressão excêntrica

A Figura 5.24, Figura 5.25 e Figura 5.26 apresentam o dimensionamento proposto pela EN 1993-3-1:2006 juntamente com os resultados numéricos da compressão excêntrica. Os resultados normativos para cantoneiras com um parafuso (curva “EN 1993-3-1 – um parafuso”) foram superiores aos respectivos resultados numéricos, em torno de 24%. A curva “EN 1993-3-1 – dois parafusos” ficou abaixo das curvas numéricas em praticamente toda sua extensão, sendo os valores inferiores em torno de 40%. Para $\lambda_r \geq 165$, os dimensionamentos propostos pela norma EN 1993-3-1:2006 tangenciam a curva “Vlasov (vínculo de garfo)”.

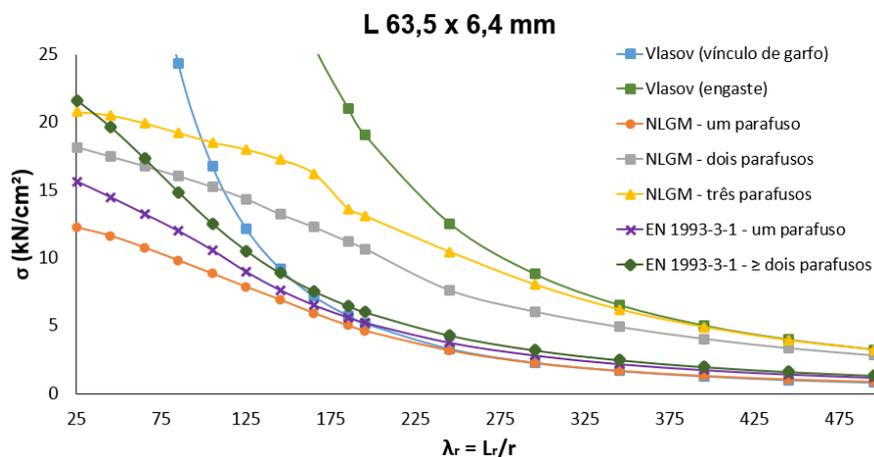


Figura 5.24 – Comparação entre os resultados obtidos com a norma EN 1993-3-1:2006 e os obtidos através das análises numéricas para o perfil L 63,5 x 6,4 mm, comprimido excêntrica via um, dois e três parafusos.

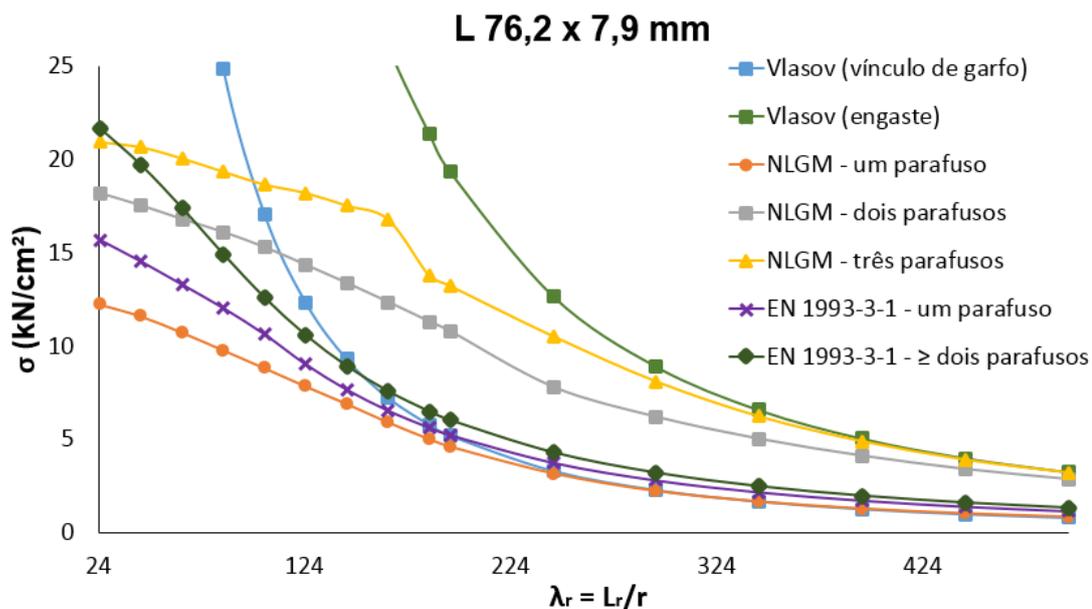


Figura 5.25 - Comparação entre os resultados obtidos com a norma EN 1993-3-1:2006 e os obtidos através das análises numéricas para o perfil L 76,2 x 7,9 mm, comprimido excentricamente via um, dois e três parafusos.

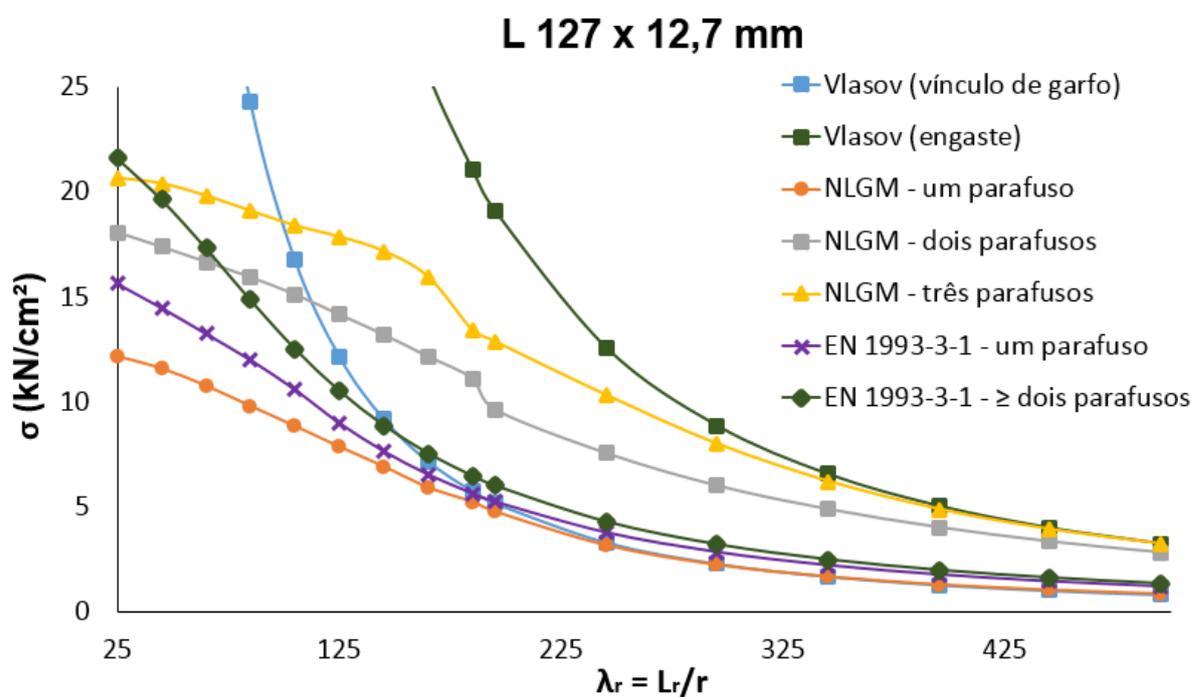


Figura 5.26 - Comparação entre os resultados obtidos com a norma EN 1993-3-1:2006 e os obtidos através das análises numéricas para o perfil L 127 x 12,7 mm, comprimido excentricamente via um, dois e três parafusos.

5.6 Comentários Gerais

Nessa seção, apresentam-se comentários gerais sobre os procedimentos de dimensionamento de cantoneiras comprimidas apresentados anteriormente.

5.6.1 Compressão concêntrica

A Figura 5.27, Figura 5.28 e Figura 5.29 apresentam os resultados obtidos a partir dos procedimentos de todas as normas analisadas anteriormente, juntamente com os resultados das análises numéricas para compressão concêntrica. A partir dessas figuras, pode-se inferir:

- Todas as curvas de dimensionamento tangenciam a curva de Euler (rótula ou engaste) a partir de um determinado valor de esbeltez;
- As curvas das normas americanas, ANSI/AISC 360-16 e ASCE/SEI-10-2015, são as únicas entre as prescrições analisadas que se iniciam em 100% da resistência ao escoamento do perfil;
- Nas cantoneiras com um parafuso, para $\lambda_r \leq 145$, a norma EN 1993-3-1:2006 é a que fornece os menores valores, e a ASCE/SEI-10-2015, os maiores. Para barras mais esbeltas, a ABNT NBR 8800:2008 e ANSI/AISC 360-16 prescreve a menor resistência à compressão, e a EN 1993-3-1:2006, as maiores;
- Nas cantoneiras com dois ou mais parafusos, para $\lambda_r \leq 125$, novamente a norma EN 1993-3-1:2006 é a que fornece os menores valores, e a ANSI/AISC 360-16, os maiores. Para $\lambda_r > 125$, a EN 1993-3-1:2006 ainda prescrevem a menor resistência à compressão, e a ABNT NBR 8800:2008 e ANSI/AISC 360-16, as maiores;
- As normas para dimensionamento de torres de transmissão, ASCE/SEI-10-2015 e EN 1993-3-1:2006, subestimam muito a resistência das cantoneiras comprimidas concêntrica, quando comparadas aos demais resultados;
- As curvas da ABNT NBR 8800:2008 e EN 1993-1-1:2005 possuem grande semelhança, embora os procedimentos sejam muito diferentes e os valores da norma europeia menores;
- As normas para dimensionamento de estruturas metálicas em geral, ABNT NBR 8800:2008, ANSI/AISC 360-16 e EN 1993-1-1:2005, são as que melhor representam o comportamento de cantoneiras comprimidas concêntrica. Dentre essas, o destaque é a norma americana, que obteve excelente correspondência com os resultados numéricos, em toda a faixa de esbeltezes analisadas.

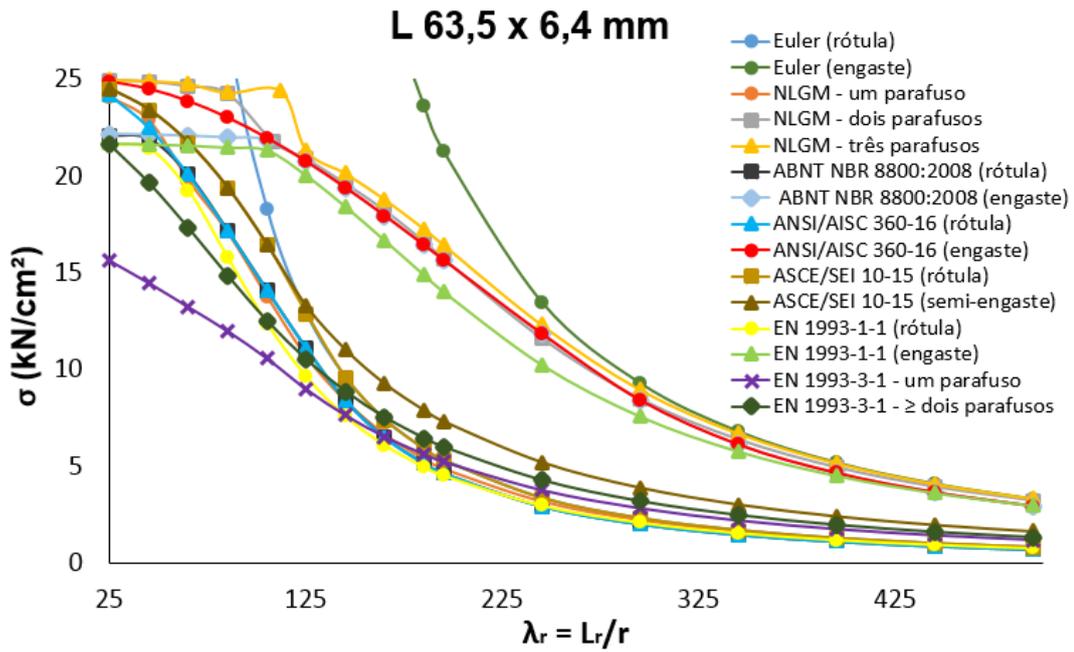


Figura 5.27 - Comparação entre os resultados obtidos através das prescrições normativas e das análises numéricas para o perfil L 63,5 x 6,4 mm, comprimido concentricamente via um, dois e três parafusos em cada aba.

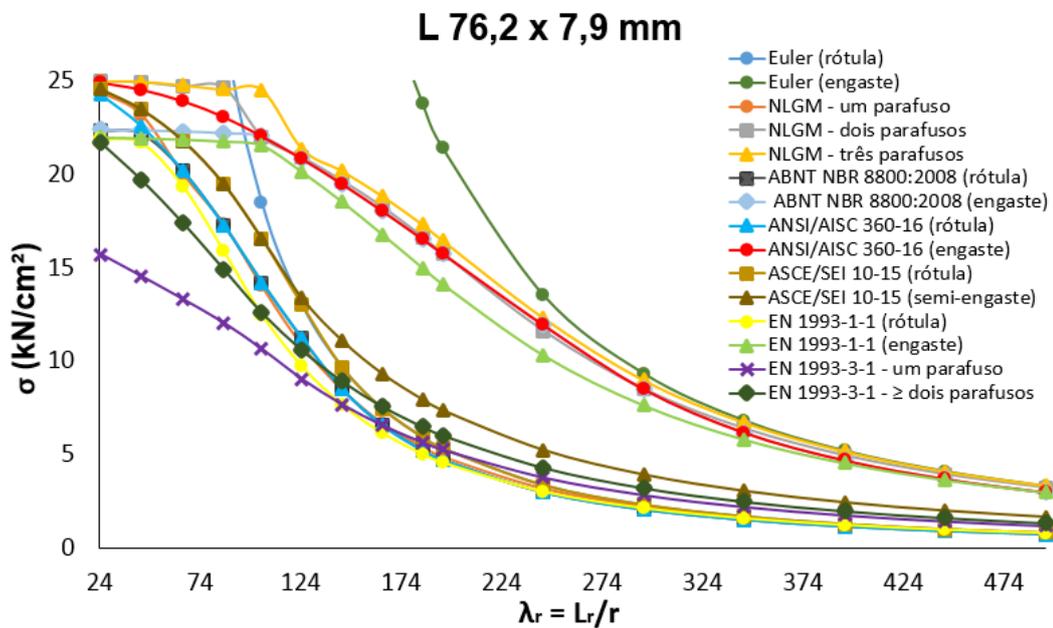


Figura 5.28 - Comparação entre os resultados obtidos através das prescrições normativas e das análises numéricas para o perfil L 76,2 x 7,9 mm, comprimido concentricamente via um, dois e três parafusos em cada aba.

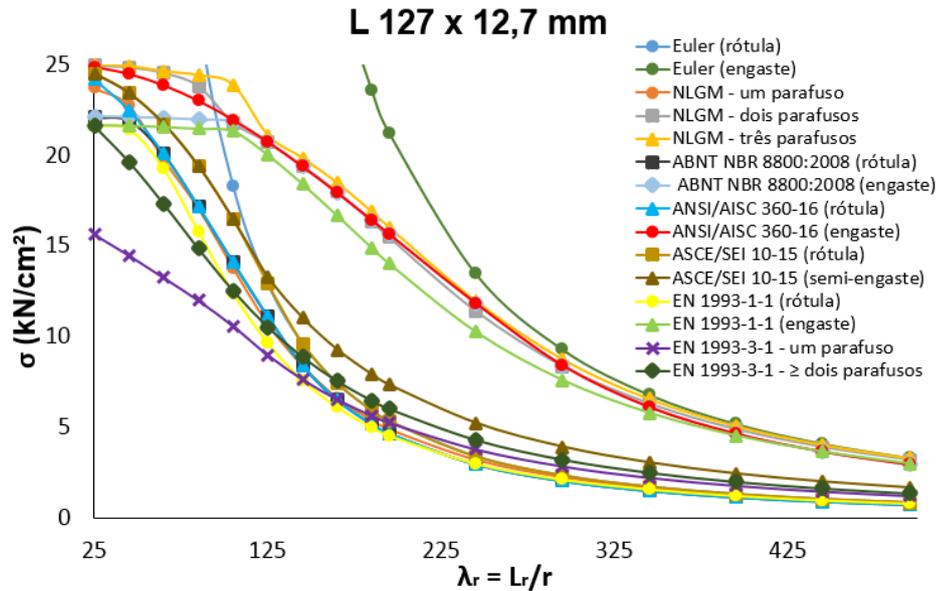


Figura 5.29 - Comparação entre os resultados obtidos através das prescrições normativas e das análises numéricas para o perfil L 127 x 12,7 mm, comprimido concentricamente via um, dois e três parafusos em cada aba.

5.6.2 Compressão excêntrica

A Figura 5.30, Figura 5.31 e Figura 5.32 apresentam os resultados obtidos a partir dos procedimentos de todas as normas descritas neste Capítulo para compressão excêntrica, juntamente com os resultados dos modelos numéricos analisados. A partir dessas figuras, pode-se afirmar:

- Todas as curvas de dimensionamento tangenciam a curva “Vlasov (vínculo de garfo)” a partir de um determinado valor de esbeltez;
- Para pequenas esbeltezes, todas as normas apresentaram tensões resistentes superiores aos valores encontrados no modelo numérico com um parafuso. O fato é que, no modelo numérico com um parafuso, somente uma das abas apresenta plastificação completa. Dessa forma, mesmo que perfis nessa faixa de esbeltez não sejam muito frequentes, é importante estar atento com o uso das normas de dimensionamento;
- Nas cantoneiras com um parafuso, para $\lambda_r \leq 125$, a norma EN 1993-3-1:2006 é a que fornece os menores valores, e a ASCE/SEI-10-2015, os maiores. Para barras mais esbeltas, a ASCE/SEI-10-2015 prescreve a menor resistência à compressão, e a EN 1993-3-1:2006, as maiores;

- Nas cantoneiras com dois ou mais parafusos, para $\lambda_r \leq 125$, as normas ABNT NBR 8800:2008 e ANSI/AISC 360-16 são as que fornecem os menores valores, e a ASCE/SEI-10-2015, mais uma vez, os maiores. Para cantoneiras mais esbeltas, a ABNT NBR 8800:2008 e ANSI/AISC 360-16 ainda prescrevem as menores resistências à compressão, e a ASCE/SEI-10-2015, as maiores;
- Os procedimentos da EN 1993-1-1:2005 e EN 1993-3-1:2006 para cantoneiras com mais de dois parafusos resultam praticamente nos mesmos valores de capacidade resistente à compressão;
- A curva “EN 1993-3-1 - \geq dois parafusos” é a que parte das tensões mais elevadas, dentre os procedimentos estudados para compressão excêntrica, iniciando-se em 86,4% da resistência ao escoamento da cantoneira;
- Nenhuma norma conseguiu uma boa correspondência (em toda a faixa de esbeltezes estudadas neste trabalho) com os resultados numéricos obtidos para a compressão excêntrica;

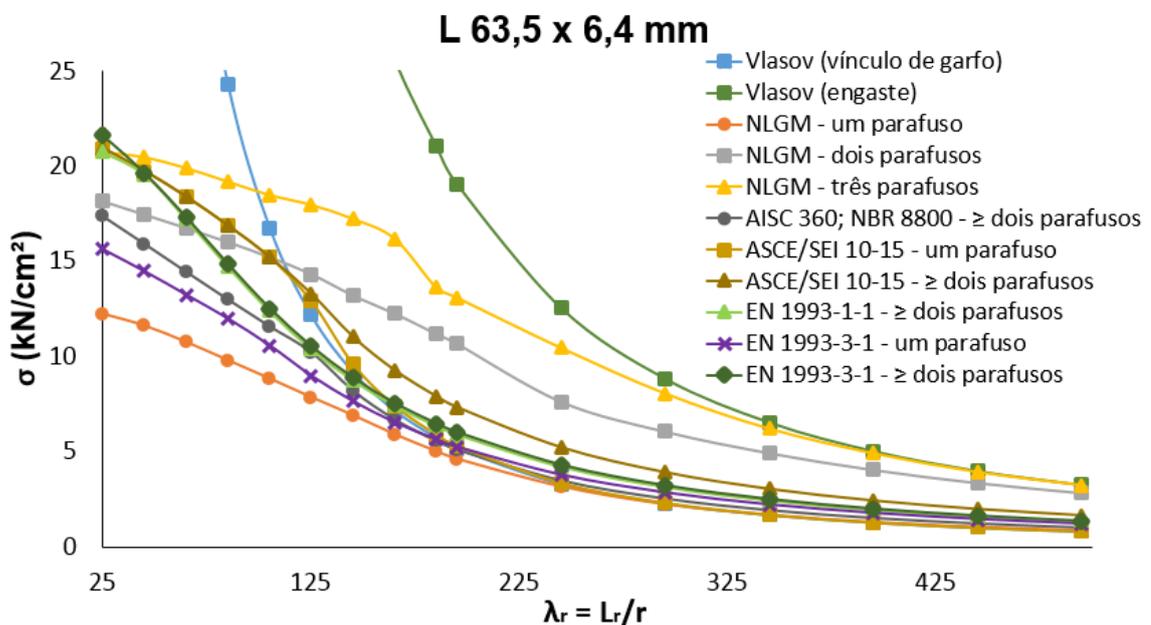


Figura 5.30 - Comparação entre os resultados obtidos através das prescrições normativas e das análises numéricas para o perfil L 63,5 x 6,4 mm, comprimido excêntrica via um, dois e três parafusos.

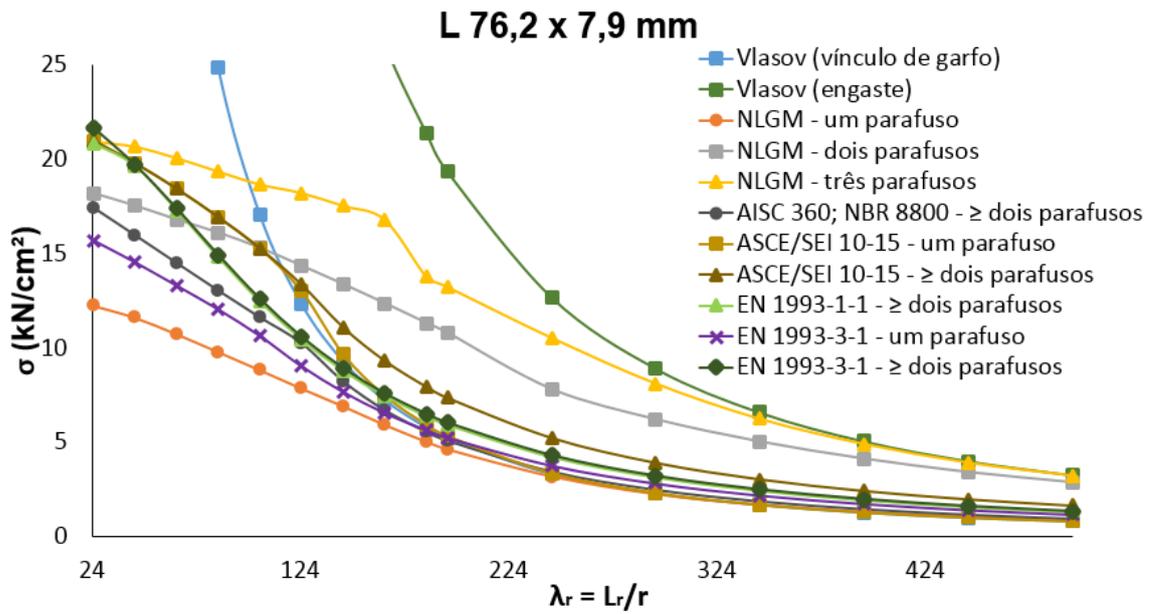


Figura 5.31- Comparação entre os resultados obtidos através das prescrições normativas e das análises numéricas para o perfil L 76,2 x 7,9 mm, comprimido excentricamente via um, dois e três parafusos.

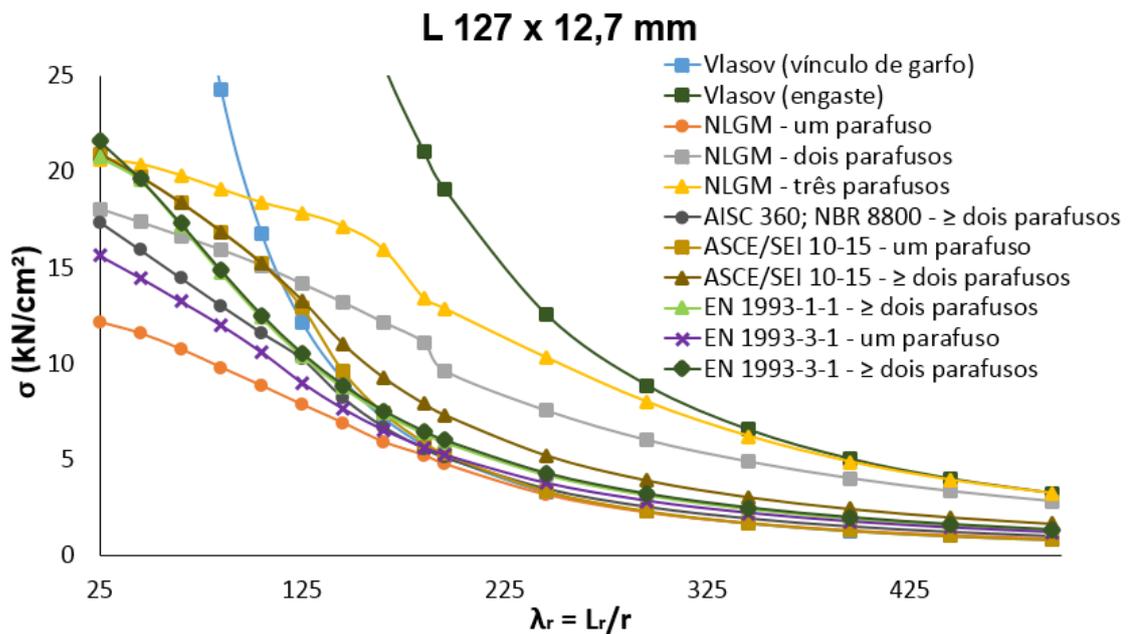


Figura 5.32 - Comparação entre os resultados obtidos através das prescrições normativas e das análises numéricas para o perfil L 127 x 12,7 mm, comprimido excentricamente via um, dois e três parafusos.

6 PROPOSTA DE DIMENSIONAMENTO PARA CANTONEIRAS COMPRIMIDAS EXCÊNTRICAMENTE

6.1 Considerações Iniciais

Conforme visto no Capítulo 5, nenhuma das normas analisadas apresentou, em toda a faixa de esbeltezes avaliadas, concordância com o comportamento dos modelos numéricos submetidos à compressão excêntrica. Assim, propõe-se nesse Capítulo uma nova metodologia de dimensionamento para cantoneiras laminadas comprimidas excêntricamente.

6.2 Proposta de Dimensionamento

Como uma nova Proposta de Dimensionamento (PD) para cantoneiras comprimidas excêntricamente, sugere-se uma adaptação na formulação para compressão excêntrica das normas ABNT NBR 8800:2008 e ANSI/AISC 360-16 (ver Capítulo 5 - Seção 5.2), que adotam um comprimento de flambagem equivalente.

Conforme foi exposto no capítulo anterior, o procedimento dessas normas não leva em conta que barras conectadas por dois ou mais parafusos tendem a se comportar como barras biengastadas (ver Figura 5.5, Figura 5.6 e Figura 5.7, págs. 79 e 80). No trecho elástico das curvas de dimensionamento, as normas fornecem valores de capacidade resistente concernentes às barras birrotuladas, os quais são muito inferiores aos valores numéricos.

Considerando-se os trechos elastoplásticos das curvas relativas aos resultados numéricos mostrados na Figura 5.30, Figura 5.31 e Figura 5.32 (págs. 100 e 101) observa-se que há diferença na capacidade resistente em função do número de parafusos. Tal diferença existe devido ao fato de que cada parafuso adicional permite que uma maior porção da aba não conectada seja solicitada, fornecendo, dessa forma, um ganho na capacidade resistente. Os

procedimentos das normas não levam em consideração essas observações no dimensionamento proposto.

Sendo assim, são sugeridos ajustes no comprimento de flambagem equivalente e na área bruta da seção transversal, conforme as Equações (6.1) e (6.2):

$$(K_{z1}L_{z1})_{PD} = \alpha_{PD} K_{z1}L_{z1} \quad (6.1)$$

$$A_{PD} = \beta_{PD}A_g \quad (6.2)$$

onde $(K_{z1}L_{z1})_{PD}$ e A_{PD} são, respectivamente, o comprimento de flambagem equivalente e a área utilizados na PD. $K_{z1}L_{z1}$ e A_g são o comprimento de flambagem equivalente e a área bruta da seção transversal, respectivamente, utilizados pelas normas em questão. Os coeficientes α_{PD} e β_{PD} são fatores de ajuste na PD, que foram calibrados de acordo com os resultados numéricos relativos à compressão excêntrica. Os valores de α_{PD} e β_{PD} encontram-se na Tabela 6.1, em função do número de parafusos.

Tabela 6.1 – Valores propostos para α_{PD} e β_{PD} em função do número de parafusos.

Número de Parafusos	α_{PD}	β_{PD}
1	1,07	0,60
2	0,65	0,85
3	0,55	0,95

6.3 Verificação da Proposta de Dimensionamento

A Figura 6.1, Figura 6.2, Figura 6.3, Figura 6.4 e Figura 6.5 apresentam os resultados obtidos através da teoria de Vlasov relativos às condições de contorno vínculo de garfo e engaste, juntamente com os resultados numéricos (NLGM) considerando tensões residuais e imperfeições geométricas iniciais e com os resultados da Proposta de Dimensionamento (PD) para cantoneiras com um, dois e três parafusos. Nessas figuras, apresenta-se também o procedimento de dimensionamento proposto pelas normas ABNT NBR 8800:2008 e ANSI/AISC 360-16 para cantoneiras conectadas através de uma aba por pelo menos dois parafusos.

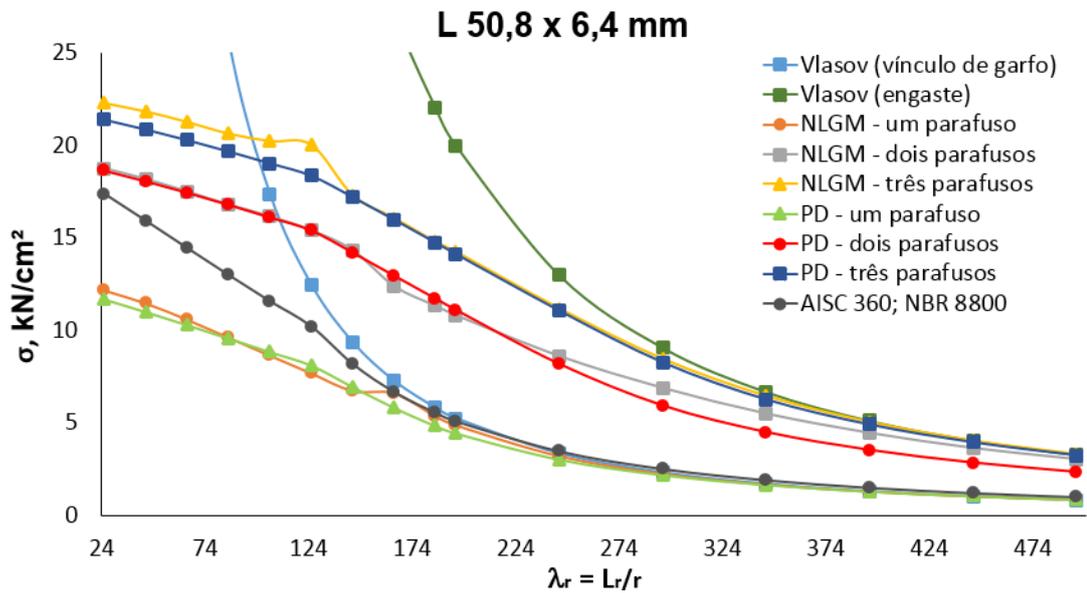


Figura 6.1 – Comparação dos resultados obtidos através da Proposta de Dimensionamento e das simulações numéricas para o perfil L 50,8 x 6,4 mm.

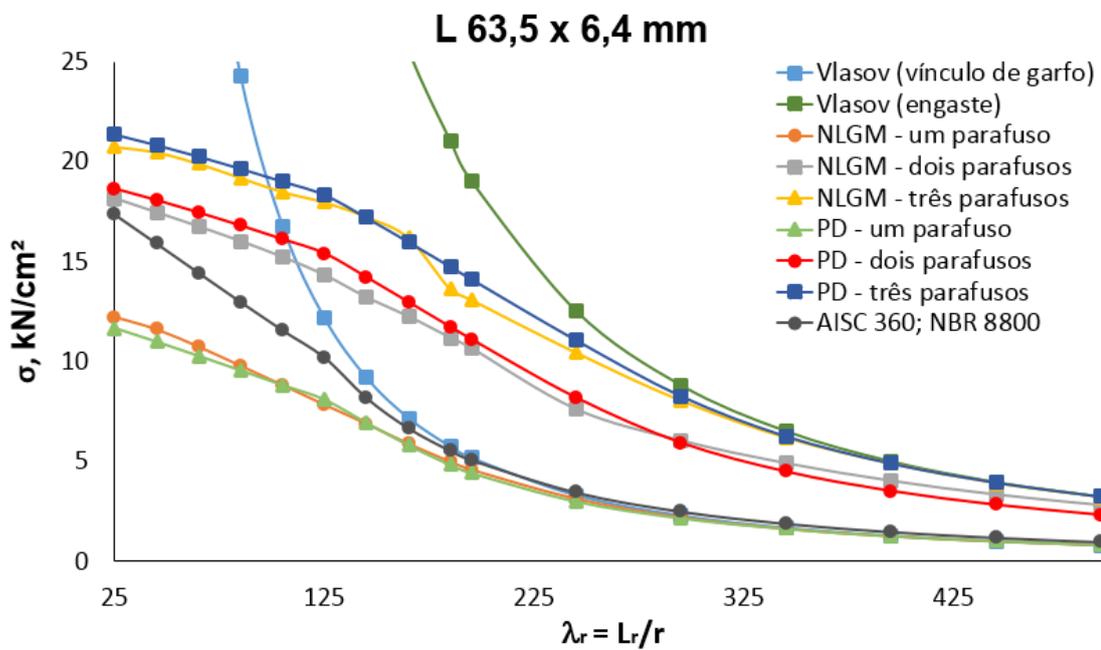


Figura 6.2 – Comparação dos resultados obtidos através da Proposta de Dimensionamento e das simulações numéricas para o perfil L 63,5 x 6,4 mm.

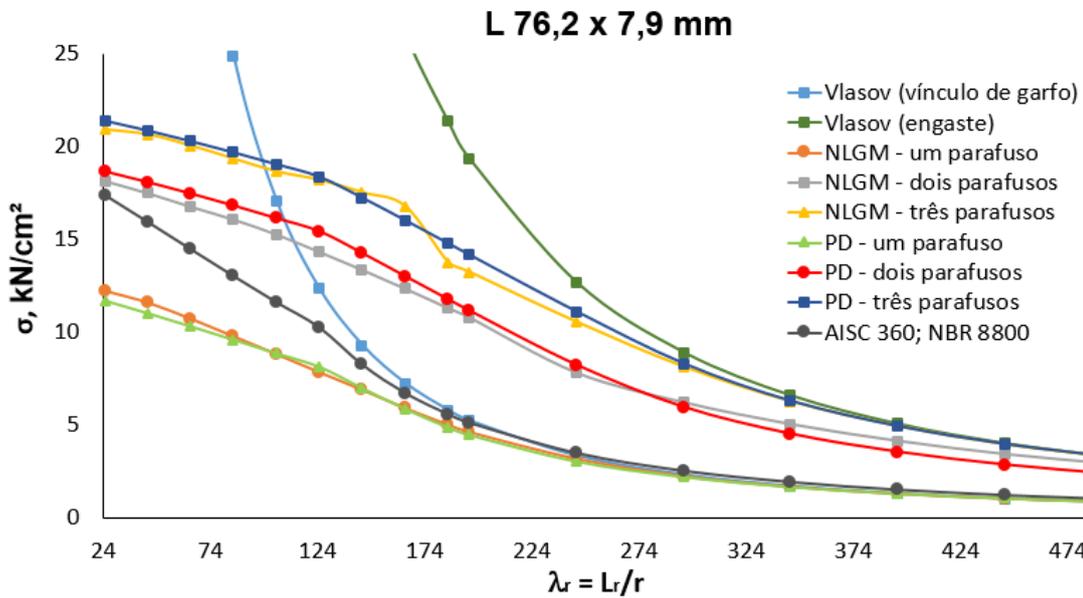


Figura 6.3 – Comparação dos resultados obtidos através da Proposta de Dimensionamento e das simulações numéricas para o perfil L 76,2 x 7,9 mm.

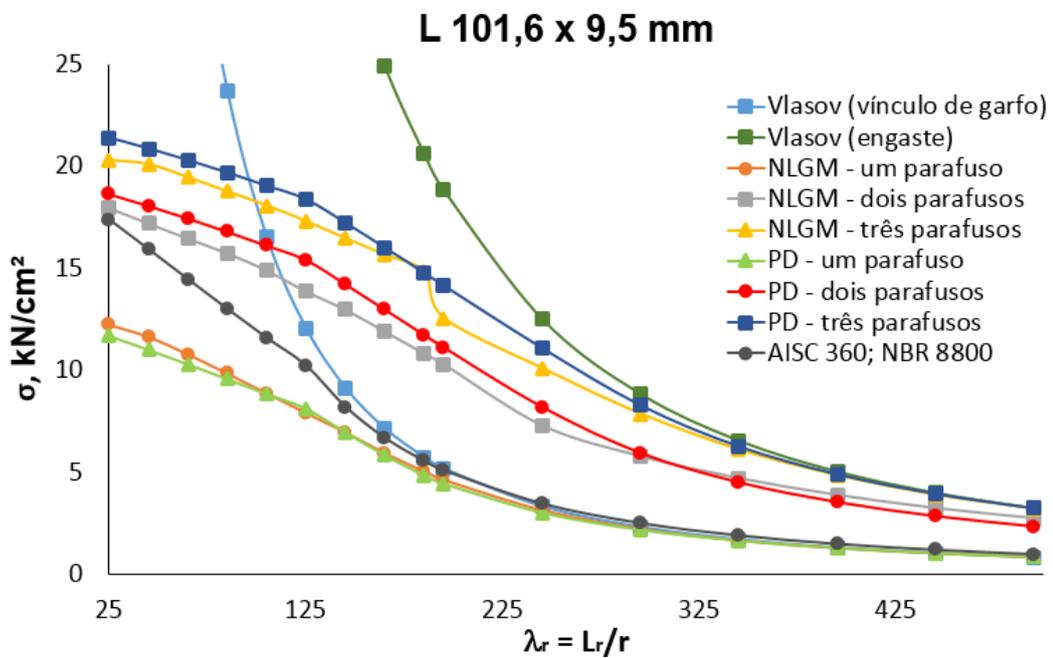


Figura 6.4 – Comparação dos resultados obtidos através da Proposta de Dimensionamento e das simulações numéricas para o perfil L 101,6 x 9,5 mm.

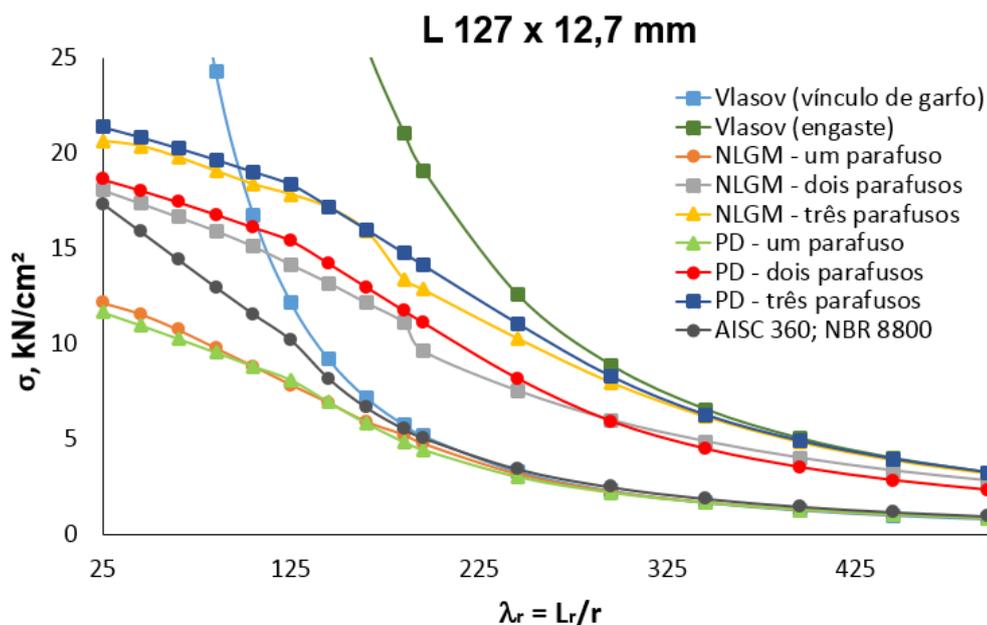


Figura 6.5 – Comparação dos resultados obtidos através da Proposta de Dimensionamento e das simulações numéricas para o perfil L 127 x 12,7 mm.

Diante dos gráficos, nota-se excelente concordância entre as curvas da PD com um, dois e três parafusos e as curvas relativas aos resultados das análises numéricas. Como se pode ver nessas figuras, o procedimento proposto pelas normas brasileira e americana é incapaz de representar o comportamento de cantoneiras conectadas com dois e três parafusos, tanto no trecho elastoplástico quanto no trecho elástico das curvas numéricas.

A Figura 6.6, Figura 6.7 e Figura 6.8 apresentam as diferenças absolutas entre os resultados obtidos através da PD e os numéricos, e a Figura 6.9, Figura 6.10 e Figura 6.11, as diferenças relativas. Observa-se que as diferenças absolutas diminuem à medida que as esbeltezes das cantoneiras aumentam, apresentando máximos iguais a 1,7 kN/cm². Quanto às diferenças relativas, nota-se que os valores para um e três parafusos ficaram abaixo de 10%. Quando se observa as diferenças relativas para as cantoneiras conectadas por dois parafusos, notam-se valores elevados (superiores a 10%), entretanto, estes valores ocorrem para perfis com esbeltezes (λ_r) superiores a 250, situação incomum quando se trata de construção metálica em geral.

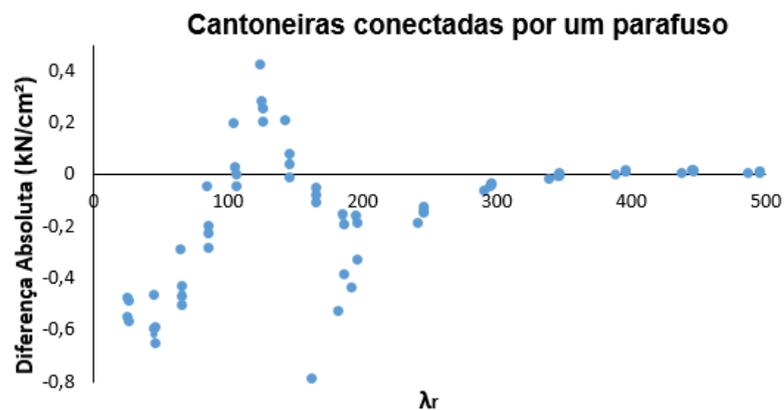


Figura 6.6 – Diferença absoluta entre os resultados obtidos através da Proposta de Dimensionamento e os numéricos para cantoneiras conectadas por um parafuso.

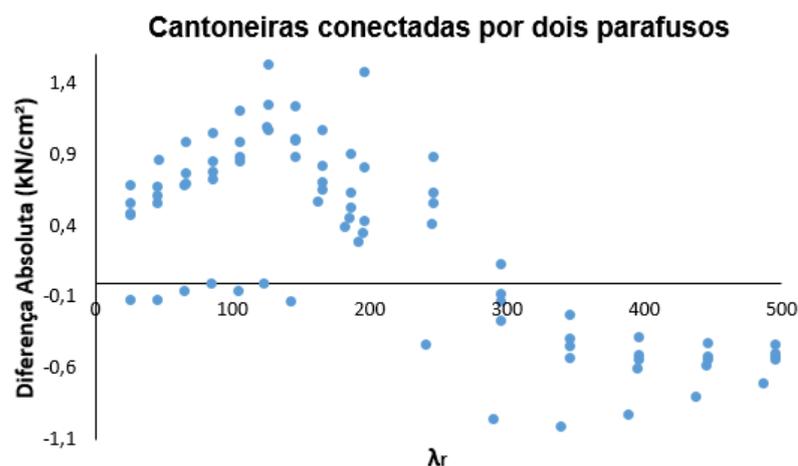


Figura 6.7 - Diferença absoluta entre os resultados obtidos através da Proposta de Dimensionamento e os numéricos para cantoneiras conectadas por dois parafusos.

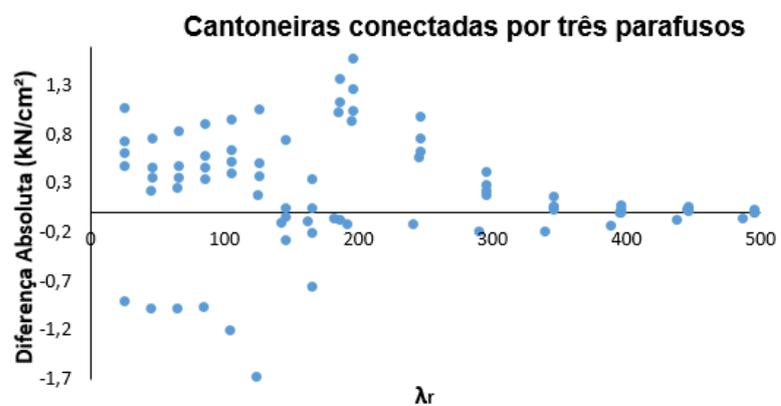


Figura 6.8 - Diferença absoluta entre os resultados obtidos através da Proposta de Dimensionamento e os numéricos para cantoneiras conectadas por três parafusos.

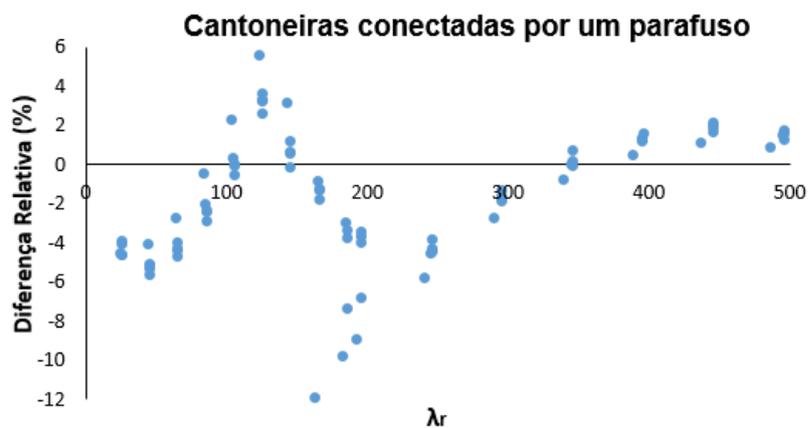


Figura 6.9 - Diferença relativa entre os resultados obtidos através da Proposta de Dimensionamento e os numéricos para cantoneiras conectadas por um parafuso.

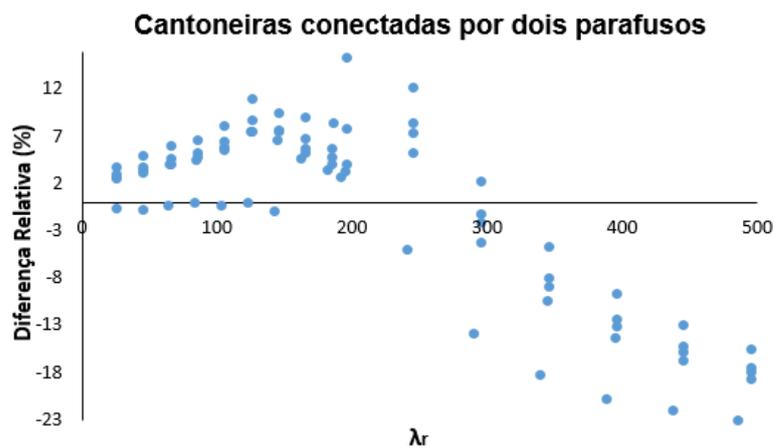


Figura 6.10 - Diferença relativa entre os resultados obtidos através da Proposta de Dimensionamento e os numéricos para cantoneiras conectadas por dois parafusos.

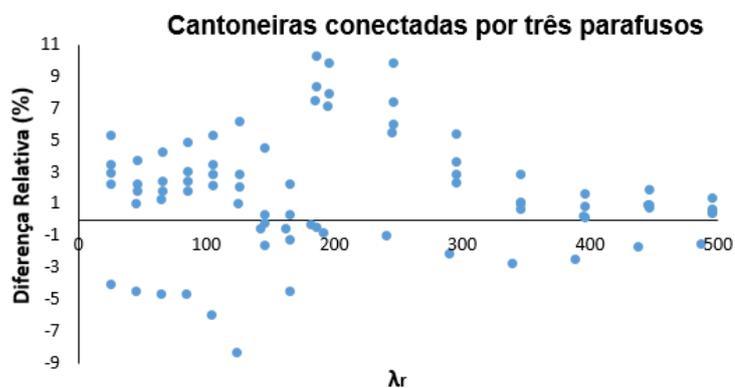


Figura 6.11 - Diferença relativa entre os resultados obtidos através da Proposta de Dimensionamento e os numéricos para cantoneiras conectadas por três parafusos.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 Conclusões

No presente trabalho, propôs-se avaliar, através de formulações analíticas e análises numéricas, a influência do número de parafusos no comportamento de cantoneiras laminadas comprimidas concêntrica e excentricamente. Posteriormente, os resultados obtidos foram comparados às prescrições normativas vigentes aplicáveis às cantoneiras comprimidas.

As formulações analíticas foram desenvolvidas de acordo com a teoria de Vlasov (1962) para perfis de seção transversal aberta de paredes finas, onde, uma vez introduzidas as propriedades geométricas da cantoneira e as condições de contorno de interesse (vínculo de garfo e engaste), foi possível obter uma equação de terceiro grau cuja solução é a resposta elástica deste perfil sob compressão concêntrica ou excêntrica.

As análises numéricas desse trabalho foram desenvolvidas na plataforma computacional *ANSYS v.15.0*. Através desse, propuseram-se modelos numéricos para estudo da compressão concêntrica e excêntrica, a partir dos quais foram realizadas análises linearizadas de estabilidade, e análises não lineares geométricas e de material. Na modelagem numérica, os elementos finitos utilizados foram definidos com base em trabalhos análogos encontrados na literatura e a malha de elementos finitos definida a partir de formulações analíticas. As condições de contorno e a aplicação do carregamento nos modelos numéricos foram estabelecidas a partir das condições de contorno adotadas nas formulações de Vlasov (1962) e do tipo de solicitação desejada (compressão concêntrica ou excêntrica). Demais parâmetros da análise, como modelo constitutivo do material, foram definidos a partir de modelos numéricos da literatura de referência. Para as tensões residuais adotou-se o modelo linear de três pontos, o mesmo utilizado no *Eurocode 3* e em vários outros trabalhos sobre a compressão de cantoneiras. Para a imperfeição geométrica inicial dos modelos numéricos adotou-se um valor

igual a $L/1500$, que é comumente utilizado como imperfeição geométrica inicial de flexão em perfis em geral.

As análises numéricas iniciais mostram influência significativa das tensões residuais e imperfeições geométricas iniciais na capacidade resistente das cantoneiras comprimidas concentricamente, porém, pouca ou nenhuma influência nos perfis sob compressão excêntrica. Em ambos os casos, compressão concêntrica e excêntrica, as tensões residuais e imperfeições geométricas iniciais tiveram maior impacto no trecho da flambagem elastoplástica das curvas “ $\sigma \times \lambda_r$ ”.

Os resultados obtidos com os modelos numéricos (sem tensões residuais e imperfeições geométricas iniciais) foram comparados com formulações analíticas. Essa comparação mostrou que cantoneiras comprimidas (concêntrica ou excêntrica) conectadas com um parafuso têm comportamento semelhante à de barras birotuladas, enquanto que as cantoneiras com dois e três parafusos se assemelham mais a perfis biengastados. Para validação final do modelo numérico proposto, reproduziram-se com a proposta desse trabalho algumas análises numéricas do trabalho de Kettler *et al.* (2017), mostrando bons resultados.

A comparação dos modelos numéricos (agora com tensões residuais e imperfeições geométricas iniciais) com as normas existentes indicou que as normas ABNT NBR 8800:2008, ANSI/AISC 360-16 e EN 1993-1-1:2005 apresentam formulações consistentes para o dimensionamento desses perfis sob compressão concêntrica, face às hipóteses de ligações com um parafuso consideradas como rotuladas e com dois ou mais parafusos consideradas como engastadas.

A avaliação das normas aplicáveis às cantoneiras comprimidas mostrou que nenhum procedimento foi capaz de representar bem o comportamento de cantoneiras comprimidas excêntrica em toda a sua faixa de esbeltezes usual. Embora as normas possuam boa coerência com os resultados numéricos de barras esbeltas, a discrepância entre valores normativos e numéricos aumentam à medida que diminuem as esbeltezes das barras. Sendo assim, uma nova proposta de dimensionamento, baseada na prescrição da ABNT NBR 8800:2008 e ANSI/AISC 360-16, foi sugerida. Os valores obtidos a partir dessa nova proposta apresentaram excelente concordância com os resultados das análises numéricas, com diferenças absolutas máximas iguais a $1,7 \text{ kN/cm}^2$ e diferenças relativas menores que 10%.

7.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Como objeto de trabalhos futuros, propõem-se os seguintes termos:

- Avaliação de novas propostas de dimensionamento que aborde a compressão excêntrica como uma flexão oblíqua composta, e as cantoneiras sujeitas à esta sollicitação como vigas-colunas;
- Avaliação de novas propostas de dimensionamento que consideram o efeito das instabilidades locais, sendo assim aplicáveis também às cantoneiras de abas esbeltas;
- Ensaios experimentais de cantoneiras comprimidas concêntrica e excentricamente;
- Avaliação experimental e comparação do comportamento de barras isoladas e barras inseridas em estruturas.

8 REFERÊNCIAS

- ANSYS INC. *Release 15.0 – Documentation for ANSYS*. Canonsburg, Estados Unidos, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 8800. *Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios*. Rio de Janeiro, 2008.
- ADLURI, S. M. R., MADUGULA, M. K. S. Development of column curve for steel angles. *Journal of Structural Engineering*, v. 127, n. 3, p. 318-325, 1996b.
- _____. Flexural buckling of steel angles: Experimental investigation- *Journal of Structural Engineering*, vol. 122, n. 3, p.309-317, 1996a.
- AL-SAYED, S.H.; BJORHOVDE, R. Experimental study on single angle column, *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 12, n. 2, p. 83–102, 1989.
- American Institute of Steel Construction – *Specification for Structural Steel Buildings – ANSI/AISC 360*, 2016.
- American Society of Civil Engineers (ASCE). ASCE 10-15. *Design of Latticed Steel Transmission Structures*. Virginia: ASCE, 2015.
- BAN, H. *et al.* Residual Stress Tests of High-Strength Steel Equal Angles. *Journal Of Structural Engineering (ASCE)*, v. 138, n. 12, p.1446-1454, dez. 2012.
- BAN, H. *et al.* Column Buckling Tests of 420 MPa High Strength Steel Single Equal Angles. *International Journal Of Structural Stability And Dynamics*, [s.l.], v. 13, n. 02, p.1-23, mar. 2013. World Scientific Pub Co Pte Lt. <http://dx.doi.org/10.1142/s0219455412500691>.
- BASHAR, Iftesham. *Ultimate Capacity of Steel Angles Subjected to Eccentric Compressive Load*. 2012. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia de Estruturas, Bangladesh University Of Engineering And Technology, Dhaka, 2012.
- BATHON, L., MUELLER III, W. H., KEMPNER JR., L. Ultimate Load Capacity of Single Steel Angles. *Journal of Structural Engineering*, v. 119, n. 1, p. 279-300, 1993.
- BJORHOVDE, R. *Deterministic and probabilistic approaches to the strength of steel columns*. PhD Dissertation, Lehigh University, PA, 1972.
- BRANQUINHO, M.A. *Sobre o comportamento estrutural e o dimensionamento de cantoneiras de aço formadas a frio submetidas à compressão e conectadas por uma aba*.

2017. 201 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil (Estruturas)) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

CHHABRA, S. J. *et al.* Discussion: Ultimate Load Capacity of Single Steel Angles. *Journal of Structural Engineering*, p. 140-142, 1995.

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

DINIS, P.B., CAMOTIM, D. Dimensionamento de colunas cruciformes e cantoneiras comprimidas através do Método da Resistência Directa. *Revista da Estrutura de Aço*, v. 3, n. 2, p. 187-206, 2014.

DINIS, P.B., CAMOTIM, D., SILVESTRE, N. On the local and global buckling behaviour of angle, T-section and cruciform thin-walled members. *Thin-Walled Structures*, v. 48, p. 786-797, 2010.

ECCS - European Convention For Constructional Steelwork – Committee 8. *Manual on Stability of Steel Structures*, 2. Ed. 1976.

ELGAALY, M., DAGHER, H., DAVIDS, H. Behavior of single-angle-compression members. *Journal of Structural Engineering*, v. 117, n. 12, p. 3720-3741, 1991.

EN 1993-1-1 : *Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings* – Eurocode 3, 2005.

EN 1993-3-1 : *Design of steel structures - Part 3-1: Towers, masts and chimneys - Towers and masts* – Eurocode 3, 2006.

GALAMBOS, T. V. *Guide to stability design criteria for metal structures*. 5.ed. John Wiley & Sons, Inc., 1998. 911 p.

Haidar, Raymond. *Compressive strength of steel single angles loaded through two-bolts in one leg*. 1997. 266 f. Dissertação (Mestrado) – Ciência Aplicada, Universidade de Windsor, Windsor, 1997.

JUSTINIANO, R. J.. *Comportamento e Dimensionamento de Cantoneiras Comprimidas*. 2014. 166 f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico - Universidade de Lisboa, Lisboa, 2014.

KETTLER, M.; TARAS, A.; UNTERWEGER, H.. Member capacity of bolted steel angles in compression – Influence of realistic end supports. *Journal Of Constructional Steel Research*, [s.l.], v. 130, p.22-35, mar. 2017. ElsevierBV.<http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.11.021>.

KITIPORNCHAI, S., and LEE, H. W., *Inelastic Experiments on Angles and Tee Struts*, Res. Report No. CE54, Departamento de Engenharia Civil., Universidade de Queensland, St. Lucia, Australia, 1984.

LEAL, D. F. (2011). *Sobre perfis de aço formados a frio compostos por dupla cantoneira com seção em “T” submetidos à compressão*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

LIU, Yi; HUI, Linbo. Experimental study of beam–column behaviour of steel single angles. *Journal Of Constructional Steel Research*, [s.l.], v. 64, n. 5, p.505-514, maio 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2007.11.002>.

LIU, Yi; HUI, Linbo. Finite element study of steel single angle beam–columns. *Engineering Structures*, [s.l.], v. 32, n. 8, p.2087-2095, ago. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.03.009>.

MAIA, W.F., MALITE, M. Sobre a estabilidade de cantoneiras de aço formadas a frio submetidas à compressão. *Cadernos de Engenharia de Estruturas*, São Carlos, v. 11, n. 48, p. 23-37, 2009.

MESACASA JR., E.C., DINIS, P.B., CAMOTIM, D., MALITE, M. Mode interaction in thin-walled equal-leg angle columns. *Thin-Walled Structures*, v. 81, p. 138-149, 2014.

MOŽE, P. *et al.* Residual stress distribution of large steel equal leg angles. *Engineering Structures*, [s.l.], v. 71, p.35-47, jul. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.03.040>.

MUELLER WH, ERZURUMLU H. Behaviour and strength of angles in compression: an experimental investigation. Oregon (EUA): *Research Report of Civil-Structural Engineering. Division of Engineering and Applied Science*. Portland State University; 1983.

POPOVIC, D., HANCOCK, G. J., RASMUSSEN, K. J. R. Compression tests on cold-formed angles loaded parallel with a leg. *Journal of Structural Engineering*, v. 127, p. 600–607, 2001.

PRETO, V. F. C.. *Comportamento e Dimensionamento de Cantoneiras de Aço com Abas Compactas Submetidas a Compressão*. 2016. 104 f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico - Universidade de Lisboa, Lisboa, 2016.

RASMUSSEM, K.J.R. Design of angle columns with locally unstable legs. *Research Rep. No. R830*, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Sydney, Sydney, Austrália, 2003.

RODRIGUES, Ana Rita. *Projeto de Torres Metálicas de Suporte de Cabos de Energia Elétrica - Aplicação da parte 3-1 Eurocódigo 3*. 2015. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2015.

SAKLA, S. S. S.. *Single-Angle Compression Members Welded by one Leg to Gusset Plates*. 1997. 340 f. Tese (Doutorado) – Ciência Aplicada, Universidade de Windsor, Windsor, 1997.

SHANI, Mehul A.. *Compressive strength of eccentrically loaded steel angles*. 1998. 315 f. Dissertação (Mestrado) – Ciência Aplicada, Universidade de Windsor, Windsor, 1998.

SHI, G. *et al.* Tests and finite element analysis on the local buckling of 420 MPa steel equal angle columns under axial compression. *Steel And Composite Structures*, v. 12, n. 1, p.31-51, out. 2011.

STANG, A. H., e STRICKENBERG, L. R., *Results of Some Compression Tests of Structural Steel Angles*, Technologic Paper of the United States Bureau of Standards No. 218, Government Printing Office, Washington, D. C., 1922.

SUN, J., e BUTTERWORTH, W. Behaviour of steel single angle compression members, axially loaded through one leg., Proc., *Australasian Struct. Engrg. Conf.*, J.W. Butterworth, ed., Vol. 2, Structural Engineering Society of New Zealand, Auckland, New Zealand, 859-866, 1998.

TEMPLE, M. C.; SAKLA, Sherief S.s.. Considerations for the design of single-angle compression members attached by one leg. *Can. J. Civ. Eng*, Windsor, v. 23, p.287-294, jun. 1996.

_____. Single-angle compression members welded by one leg to a gusset plate. I. Experimental study. *Can. J. Civ. Eng*, Windsor, v. 25, p.569-584, out. 1998.

TIMOSHENKO, S.P., GERE, J.M. *Theory of elastic stability*. 2 ed. McGraw W-Hill Kogakusha, LTD., 1961. 541 p.

USAMI, T.; GALAMBOS, T.V. Eccentrically loaded single angle columns. *International Association for Bridge and Structural Engineering*, Zurich, p. 153 – 183, 1971.

VLASOV, V.Z. *Pieces Longues en Voiles Minces*. 10. ed. Trad. de G. Smirnoff. Paris, Eyrolles, 1962.

WAKABAYASHI, M., NONAKA, T. On the buckling strength of angles in transmission towers. *Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute*, v. 15, part. 2, n. 91, 1965.

WOOLCOCK, S.T., KITIPORNCHAI, S. Design of single angle web struts in trusses. *Journal of Structural Engineering*, v. 112, n. 6, p. 1327-1345, 1986.

APÊNDICE A: CÓDIGO APDL PARA DECLARAÇÃO DOS PARÂMETROS DA MODELAGEM NUMÉRICA

```
!*****  
!           DECLARAÇÃO DOS PARÂMETROS DA MODELAGEM NUMÉRICA  
!  
! Autor: Mestrando José Onésimo Gomes Junyor  
! Apoio Técnico: Doutorando João Victor Fragoso Dias  
! Orientação: Professores Hermes Carvalho e Armando César Campos Lavall  
! Departamento de Engenharia de Estruturas (DEES)  
! Universidade Federal de Minas Gerais (EE/UFMG)  
!*****
```

```
FINISH  
/CLEAR,START
```

```
!PARÂMETROS DA GEOMETRIA DO PERFIL  
b = 0.0762           !Largura da aba em (em m)  
t = 0.00794         !Espessura da aba(em m)  
ag = 2*(b-t/2)*t    !Área bruta da seção transversal(em m2)  
L = 1.5             !Comprimento da cantoneira(em m)
```

```
!PARÂMETROS DA GEOMETRIA DA LIGAÇÃO  
d = 0.0205         !Diâmetro do furo(em m)  
lf = 0.040         !Distância do centro do primeiro furo à borda livre na direção longitudinal(em  
m)  
g = 0.036         !Distância do centro do primeiro furo à aba(em m)  
eff = 0.070        !Distância entre os centros dos furos(em m)  
furos = 3          !Número de Furos
```

```
!PROPRIEDADES DO AÇO ASTM A36  
Mod= 2.05e11       !Módulo de Elasticidade Longitudinal(N/m2)  
poisson = 0.3      !Coeficiente de Poisson  
fy = 2.50e8        !Resistência ao Escoamento(N/m2)  
eu = 0.3           !Deformação à ruptura (mm/mm)
```

```
!PARÂMETROS DA ANÁLISE LINEARIZADA DE ESTABILIDADE  
forceFLAMB = 1000  !Força aplicada nos modelos
```

```
!PARÂMETROS DA ANÁLISE NÃO LINEAR GOMÉTRICA E DE MATERIAL  
forceULT = ag*fy   !Força aplicada nos modelos
```

IGI = 1.0 !Chave para inserir ou não a imperfeição geométrica inicial nos
modelos: 1 - Sim; 0 - Não

Imp = L/1500 !Imperfeição geométrica inicial (m)

TR = 1.0 !Chave para inserir ou não a Tensão residual nos modelos: 1 - Sim; 0 - Não

!PARÂMETROS RELATIVOS À MALHA DE ELEMENTOS FINITOS

NDIV = 8 !Número de Divisões

ESIDE = (b-t/2)/NDIV !Dimensão aproximada dos elementos

APÊNDICE B: CÓDIGO APDL PARA COMPRESSÃO CONCÊNTRICA DE CANTONEIRAS

```
!*****  
!  
!                               COMPRESSÃO CONCÊNTRICA DAS CANTONEIRAS  
!  
! Autor: Mestrando José Onésimo Gomes Junyor  
! Apoio Técnico: Doutorando João Victor Fragoso Dias  
! Orientação: Professores Hermes Carvalho e Armando César Campos Lavall  
! Departamento de Engenharia de Estruturas (DEES)  
! Universidade Federal de Minas Gerais (EE/UFMG)  
!*****
```

/PREP7

!CONSTRUÇÃO DA GEOMETRIA DA CANTONEIRA SEM FUROS

!PONTOS DA SECÃO

K,1,
K,2,,b-t/2
K,3,,b-t/2
K,4,L/2

!LINHAS

L,1,2
L,1,3
L,1,4

!EXTRUSÃO DO PERFIL

ADRAG,1,2,,,,,3
APLOT

!CRIAÇÃO DOS FUROS NAS CANTONEIRAS

```
*IF,furos,EQ,1,THEN      !Um Furo  
  CYL4,lf,g,d/2,45,,40  
  ASEL,S,LOC,Z,0  
  ASBA,1,ALL  
  ASEL,S,LOC,Y,0  
  WPROTA,,90  
  CYL4,lf,g,d/2,45,,405  
  ASEL,S,LOC,Y,0
```

ASBA,2,ALL
 WPCSYS,-1
 ALLSEL
 WPOFFS,lf+eff/2
 WPROTA,,90
 ASBW,ALL
 WPCSYS,-1
 KSEL,S,LOC,Y,0
 KSEL,R,LOC,Z,g,(b-t/2)
 KSEL,R,LOC,X,lf,lf+eff/2
 *GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
 *GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
 L,NMIN,NMAX
 KSEL,S,LOC,Y,0
 KSEL,R,LOC,Z,0,g
 KSEL,R,LOC,X,0,lf
 *GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
 *GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
 L,NMIN,NMAX
 KSEL,S,LOC,Y,0
 KSEL,R,LOC,Z,g,(b-t/2)
 KSEL,R,LOC,X,0,lf
 *GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
 *GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
 L,NMIN,NMAX
 KSEL,S,LOC,Y,0
 KSEL,R,LOC,Z,0,g
 KSEL,R,LOC,X,lf,lf+eff/2
 *GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
 *GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
 L,NMIN,NMAX
 KSEL,S,LOC,Z,0
 KSEL,R,LOC,Y,g,(b-t/2)
 KSEL,R,LOC,X,lf,lf+eff/2
 *GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
 *GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
 L,NMIN,NMAX
 KSEL,S,LOC,Z,0
 KSEL,R,LOC,Y,0,g
 KSEL,R,LOC,X,0,lf
 *GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
 *GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
 L,NMIN,NMAX
 KSEL,S,LOC,Z,0
 KSEL,R,LOC,Y,g,(b-t/2)
 KSEL,R,LOC,X,0,lf
 *GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
 *GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
 L,NMIN,NMAX
 KSEL,S,LOC,Z,0

```

KSEL,R,LOC,Y,0,g
KSEL,R,LOC,X,lf,lf+eff/2
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
comp_lig = lf + eff/2
*ENDIF

*IF,furos,EQ,2,THEN      !Dois Furos
  CYL4,lf,g,d/2,45,,405
  ASEL,S,LOC,Z,0
  ASBA,1,ALL
  ASEL,S,LOC,Y,0
  WPROTA,,90
  CYL4,lf,g,d/2,45,,405
  ASEL,S,LOC,Y,0
  ASBA,2,ALL
  WPCSYS,-1
  ALLSEL
  WPOFFS,lf+eff/2
  WPROTA,,90
  ASBW,ALL
  WPCSYS,-1
  KSEL,S,LOC,Y,0
  KSEL,R,LOC,Z,g,(b-t/2)
  KSEL,R,LOC,X,lf,lf+eff/2
  *GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
  *GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
  L,NMIN,NMAX
  KSEL,S,LOC,Y,0
  KSEL,R,LOC,Z,0,g
  KSEL,R,LOC,X,0,lf
  *GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
  *GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
  L,NMIN,NMAX
  KSEL,S,LOC,Y,0
  KSEL,R,LOC,Z,g,(b-t/2)
  KSEL,R,LOC,X,0,lf
  *GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
  *GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
  L,NMIN,NMAX
  KSEL,S,LOC,Y,0
  KSEL,R,LOC,Z,0,g
  KSEL,R,LOC,X,lf,lf+eff/2
  *GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
  *GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
  L,NMIN,NMAX
  KSEL,S,LOC,Z,0
  KSEL,R,LOC,Y,g,(b-t/2)
  KSEL,R,LOC,X,lf,lf+eff/2

```

```

*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
KSEL,S,LOC,Z,0
KSEL,R,LOC,Y,0,g
KSEL,R,LOC,X,0,lf
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
KSEL,S,LOC,Z,0
KSEL,R,LOC,Y,g,(b-t/2)
KSEL,R,LOC,X,0,lf
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
KSEL,S,LOC,Z,0
KSEL,R,LOC,Y,0,g
KSEL,R,LOC,X,lf,lf+eff/2
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
CYL4,lf + eff,g,d/2,45,,405
ASEL,S,LOC,Z,0
ASEL,R,LOC,X,lf+eff/2,L/2
ASBA,1,ALL
ASEL,S,LOC,Y,0
ASEL,R,LOC,X,lf+eff/2,L/2
WPROTA,,90
CYL4,lf + eff,g,d/2,45,,405
ASBA,2,ALL
ALLSEL
WPOFFS,2*lf+eff
WPROTA,,,90
ASBW,ALL
WPCSYS,-1
KSEL,S,LOC,Y,0
KSEL,R,LOC,Z,g,(b-t/2)
KSEL,R,LOC,X,lf+eff,2*lf+eff
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
KSEL,S,LOC,Y,0
KSEL,R,LOC,Z,0,g
KSEL,R,LOC,X,lf+eff,2*lf+eff
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
KSEL,S,LOC,Y,0
KSEL,R,LOC,Z,g,(b-t/2)
KSEL,R,LOC,X,lf+eff/2,lf+eff

```

```

*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
KSEL,S,LOC,Y,0
KSEL,R,LOC,Z,0,g
KSEL,R,LOC,X,lf+eff/2,lf+eff
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
KSEL,S,LOC,Z,0
KSEL,R,LOC,Y,g,(b-t/2)
KSEL,R,LOC,X,lf+eff,2*lf+eff
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
KSEL,S,LOC,Z,0
KSEL,R,LOC,Y,0,g
KSEL,R,LOC,X,lf+eff,2*lf+eff
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
KSEL,S,LOC,Z,0
KSEL,R,LOC,Y,g,(b-t/2)
KSEL,R,LOC,X,lf+eff/2,lf+eff
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
KSEL,S,LOC,Z,0
KSEL,R,LOC,Y,0,g
KSEL,R,LOC,X,lf+eff/2,lf+eff
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
comp_lig = 2*lf + eff
*ENDIF

```

```

*IF,furos,EQ,3,THEN      !Três Furos
  CYL4,lf,g,d/2,45,,405
  ASEL,S,LOC,Z,0
  ASBA,1,ALL
  ASEL,S,LOC,Y,0
  WPROTA,,90
  CYL4,lf,g,d/2,45,,405
  ASEL,S,LOC,Y,0
  ASBA,2,ALL
  WPCSYS,-1
  ALLSEL
  WPOFFS,lf+eff/2
  WPROTA,,90
  ASBW,ALL

```

WPCSYS,-1
KSEL,S,LOC,Y,0
KSEL,R,LOC,Z,g,(b-t/2)
KSEL,R,LOC,X,lf,lf+eff/2
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
KSEL,S,LOC,Y,0
KSEL,R,LOC,Z,0,g
KSEL,R,LOC,X,0,lf
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
KSEL,S,LOC,Y,0
KSEL,R,LOC,Z,g,(b-t/2)
KSEL,R,LOC,X,0,lf
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
KSEL,S,LOC,Y,0
KSEL,R,LOC,Z,0,g
KSEL,R,LOC,X,lf,lf+eff/2
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
KSEL,S,LOC,Z,0
KSEL,R,LOC,Y,g,(b-t/2)
KSEL,R,LOC,X,lf,lf+eff/2
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
KSEL,S,LOC,Z,0
KSEL,R,LOC,Y,0,g
KSEL,R,LOC,X,0,lf
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
KSEL,S,LOC,Z,0
KSEL,R,LOC,Y,g,(b-t/2)
KSEL,R,LOC,X,0,lf
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
KSEL,S,LOC,Z,0
KSEL,R,LOC,Y,0,g
KSEL,R,LOC,X,lf,lf+eff/2
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
CYL4,lf + eff,g,d/2,45,,405

```

ASEL,S,LOC,Z,0
ASEL,R,LOC,X,lf+eff/2,L/2
ASBA,1,ALL
ASEL,S,LOC,Y,0
ASEL,R,LOC,X,lf+eff/2,L/2
WPROTA,,90
CYL4,lf + eff,g,d/2,45,,405
ASBA,2,ALL
ALLSEL
WPOFFS,lf+3*eff/2
WPROTA,,90
ASBW,ALL
WPCSYS,-1
KSEL,S,LOC,Y,0
KSEL,R,LOC,Z,g,(b-t/2)
KSEL,R,LOC,X,lf+eff,lf+3*eff/2
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
KSEL,S,LOC,Y,0
KSEL,R,LOC,Z,0,g
KSEL,R,LOC,X,lf+eff,lf+3*eff/2
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
KSEL,S,LOC,Y,0
KSEL,R,LOC,Z,g,(b-t/2)
KSEL,R,LOC,X,lf+eff/2,lf+eff
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
KSEL,S,LOC,Y,0
KSEL,R,LOC,Z,0,g
KSEL,R,LOC,X,lf+eff/2,lf+eff
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
KSEL,S,LOC,Z,0
KSEL,R,LOC,Y,g,(b-t/2)
KSEL,R,LOC,X,lf+eff,lf+3*eff/2
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
KSEL,S,LOC,Z,0
KSEL,R,LOC,Y,0,g
KSEL,R,LOC,X,lf+eff,lf+3*eff/2
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
KSEL,S,LOC,Z,0

```

KSEL,R,LOC,Y,g,(b-t/2)
KSEL,R,LOC,X,lf+eff/2,lf+eff
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
KSEL,S,LOC,Z,0
KSEL,R,LOC,Y,0,g
KSEL,R,LOC,X,lf+eff/2,lf+eff
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
CYL4,lf + 2*eff,g,d/2,45,,405
ASEL,S,LOC,Z,0
ASEL,R,LOC,X,lf+3*eff/2,L/2
ASBA,1,ALL
ASEL,S,LOC,Y,0
ASEL,R,LOC,X,lf+3*eff/2,L/2
WPROTA,,90
CYL4,lf + 2*eff,g,d/2,45,,405
ASBA,2,ALL
ALLSEL
WPOFFS,2*lf+2*eff
WPROTA,,,90
ASBW,ALL
WPCSYS,-1
KSEL,S,LOC,Y,0
KSEL,R,LOC,Z,g,(b-t/2)
KSEL,R,LOC,X,lf+2*(eff),2*lf+2*eff
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
KSEL,S,LOC,Y,0
KSEL,R,LOC,Z,0,g
KSEL,R,LOC,X,lf+2*(eff),2*lf+2*eff
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
KSEL,S,LOC,Y,0
KSEL,R,LOC,Z,g,(b-t/2)
KSEL,R,LOC,X,lf+3*eff/2,lf+2*(eff)
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
KSEL,S,LOC,Y,0
KSEL,R,LOC,Z,0,g
KSEL,R,LOC,X,lf+3*eff/2,lf+2*(eff)
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
KSEL,S,LOC,Z,0

```

KSEL,R,LOC,Y,g,(b-t/2)
KSEL,R,LOC,X,lf+2*(eff),2*lf+2*eff
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
KSEL,S,LOC,Z,0
KSEL,R,LOC,Y,0,g
KSEL,R,LOC,X,lf+2*(eff),2*lf+2*eff
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
KSEL,S,LOC,Z,0
KSEL,R,LOC,Y,g,(b-t/2)
KSEL,R,LOC,X,lf+3*eff/2,lf+2*(eff)
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
KSEL,S,LOC,Z,0
KSEL,R,LOC,Y,0,g
KSEL,R,LOC,X,lf+3*eff/2,lf+2*(eff)
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
comp_lig = 2*lf+2*eff
*ENDIF

```

```

!DETALHAMENTO DA LIGAÇÃO
ASEL,S,LOC,X,0,comp_lig
LSEL,S,LOC,X,0,comp_lig
LSLA,U
ASBL,ALL,ALL

```

```

ALLSEL

```

```

!DEFINIÇÃO DO ELEMENTO: SHELL181
ET,1,181

```

```

!PROPRIEDADES ELÁSTICAS DO AÇO ASTM A36
MP,EX,1,Mod
MP,PRXY,1,poisson

```

```

!DEFINIÇÃO DA SEÇÃO TRANSVERSAL
SECTYPE,1,SHELL,,CANTONEIRA
SECDATA,t,1,,5

```

```

!CRIAÇÃO DA MALHA

```

```

!CRIAÇÃO DA MALHA DA LIGAÇÃO
ASEL,S,LOC,X,0,comp_lig
LSLA,S

```

```
LESIZE,ALL,,NDIV
AMESH,ALL
```

```
!CRIAÇÃO DA MALHA DO PERFIL
ASEL,S,LOC,X,0,comp_lig
ASEL,INVE
AATT,1,,1,,1
AESIZE,ALL,ESIDE
AMESH,ALL
```

```
ALLSEL
```

```
!CRIAÇÃO DA MALHA NO INTERIOR DO FURO
```

```
!DEFINIÇÃO DO ELEMENTO: MPC184
ET,2,184,1
TYPE,2
```

```
!CRIAÇÃO DO NÓ CENTRAL E DE ELEMENTOS NO INTERIOR DO FURO
```

```
*IF,furos,GE,1,THEN           !Um Furo
  *GET,MAXNODE,NODE,0,NUM,MAXD
  LSEL,S,LOC,X,lf-d/2,lf+d/2
  NSEL,S,LOC,Y,0
  NSEL,R,LOC,X,lf-d/2,lf+d/2
  NSEL,R,LOC,Z,g-d/2,g+d/2
  NSLL,R,1
  N,MAXNODE+1,lf,0,g
  *GET,NEWMAX,NODE,0,NUM,MAXD
  *GET,NUMNODES,NODE,,COUNT
  *DO,I,1,NUMNODES-1,1
    *GET,FIRSTNODE,NODE,0,NUM,MIN
      E,FIRSTNODE,NEWMAX
      NSEL,U,NODE,,FIRSTNODE
    *ENDDO
  ALLSEL
  *GET,MAXNODE,NODE,0,NUM,MAXD
  LSEL,S,LOC,X,lf-d/2,lf+d/2
  NSEL,S,LOC,Z,0
  NSEL,R,LOC,X,lf-d/2,lf+d/2
  NSEL,R,LOC,Y,g-d/2,g+d/2
  NSLL,R,1
  N,MAXNODE+1,lf,g,0
  *GET,NEWMAX,NODE,0,NUM,MAXD
  *GET,NUMNODES,NODE,,COUNT
  *DO,I,1,NUMNODES-1,1
    *GET,FIRSTNODE,NODE,0,NUM,MIN
      E,FIRSTNODE,NEWMAX
      NSEL,U,NODE,,FIRSTNODE
    *ENDDO
```

```

*IF,furos,GE,2,THEN          !Dois Furos
  *GET,MAXNODE,NODE,0,NUM,MAXD
  LSEL,S,LOC,X,(lf+eff)-d/2,(lf+eff)+d/2
  NSEL,S,LOC,Y,0
  NSEL,R,LOC,X,(lf+eff)-d/2,(lf+eff)+d/2
  NSEL,R,LOC,Z,g-d/2,g+d/2
  NSLL,R,1
  N,MAXNODE+1,(lf+eff),0,g
  *GET,NEWMAX,NODE,0,NUM,MAXD
  *GET,NUMNODES,NODE,,COUNT
  *DO,I,1,NUMNODES-1,1
    *GET,FIRSTNODE,NODE,0,NUM,MIN
      E,FIRSTNODE,NEWMAX
      NSEL,U,NODE,,FIRSTNODE
  *ENDDO
  ALLSEL
  *GET,MAXNODE,NODE,0,NUM,MAXD
  LSEL,S,LOC,X,(lf+eff)-d/2,(lf+eff)+d/2
  NSEL,S,LOC,Z,0
  NSEL,R,LOC,X,(lf+eff)-d/2,(lf+eff)+d/2
  NSEL,R,LOC,Y,g-d/2,g+d/2
  NSLL,R,1
  N,MAXNODE+1,(lf+eff),g,0
  *GET,NEWMAX,NODE,0,NUM,MAXD
  *GET,NUMNODES,NODE,,COUNT
  *DO,I,1,NUMNODES-1,1
    *GET,FIRSTNODE,NODE,0,NUM,MIN
      E,FIRSTNODE,NEWMAX
      NSEL,U,NODE,,FIRSTNODE
  *ENDDO

*IF,furos,GE,3,THEN          !Três Furos
  *GET,MAXNODE,NODE,0,NUM,MAXD
  LSEL,S,LOC,X,(lf+2*eff)-d/2,(lf+2*eff)+d/2
  NSEL,S,LOC,Y,0
  NSEL,R,LOC,X,(lf+2*eff)-d/2,(lf+2*eff)+d/2
  NSEL,R,LOC,Z,g-d/2,g+d/2
  NSLL,R,1
  N,MAXNODE+1,(lf+2*eff),0,g
  *GET,NEWMAX,NODE,0,NUM,MAXD
  *GET,NUMNODES,NODE,,COUNT
  *DO,I,1,NUMNODES-1,1
    *GET,FIRSTNODE,NODE,0,NUM,MIN
      E,FIRSTNODE,NEWMAX
      NSEL,U,NODE,,FIRSTNODE
  *ENDDO
  ALLSEL
  *GET,MAXNODE,NODE,0,NUM,MAXD
  LSEL,S,LOC,X,(lf+2*eff)-d/2,(lf+2*eff)+d/2
  NSEL,S,LOC,Z,0

```

```

NSEL,R,LOC,X,(lf+2*eff)-d/2,(lf+2*eff)+d/2
NSEL,R,LOC,Y,g-d/2,g+d/2
NSLL,R,1
N,MAXNODE+1,(lf+2*eff),g,0
*GET,NEWMAX,NODE,0,NUM,MAXD
*GET,NUMNODES,NODE,,COUNT
*DO,I,1,NUMNODES-1,1
  *GET,FIRSTNODE,NODE,0,NUM,MIN
  E,FIRSTNODE,NEWMAX
  NSEL,U,NODE,,FIRSTNODE
*ENDDO
*ENDIF
*ENDIF
*ENDIF

```

!CONDIÇÕES DE CONTORNO

!NOS FUIROS

```

*IF,furos,GE,1,THEN      !Um Furo
  NSEL,S,LOC,Y,0
  NSEL,R,LOC,X,lf
  NSEL,R,LOC,Z,g
  D,ALL,UY,0
  D,ALL,UZ,0
  NSEL,S,LOC,Z,0
  NSEL,R,LOC,X,lf
  NSEL,R,LOC,Y,g
  D,ALL,UY,0
  D,ALL,UZ,0

```

```

*IF,furos,GE,2,THEN      !Dois Furos
  NSEL,S,LOC,Y,0
  NSEL,R,LOC,X,lf+eff
  NSEL,R,LOC,Z,g
  D,ALL,UY,0
  D,ALL,UZ,0
  NSEL,S,LOC,Z,0
  NSEL,R,LOC,X,lf+eff
  NSEL,R,LOC,Y,g
  D,ALL,UY,0
  D,ALL,UZ,0

```

```

*IF,furos,GE,3,THEN      !Três Furos
  NSEL,S,LOC,Y,0
  NSEL,R,LOC,X,lf+2*eff
  NSEL,R,LOC,Z,g
  D,ALL,UY,0
  D,ALL,UZ,0
  NSEL,S,LOC,Z,0
  NSEL,R,LOC,X,lf+2*eff

```

```

    NSEL,R,LOC,Y,g
    D,ALL,UY,0
    D,ALL,UZ,0
  *ENDIF
*ENDIF
*ENDIF

```

!NA SEÇÃO TRANSVERSAL DE SIMETRIA

```

NSEL,S,LOC,X,L/2
D,ALL,UX,0
D,ALL,ROTY,0
D,ALL,ROTZ,0

```

!APLICAÇÃO DA CARGA DE COMPRESSÃO PARA ANÁLISE LINEARIZADA DE ESTABILIDADE

!UM FURO

```

*IF,furos,GE,1,THEN
  NSEL,S,LOC,Y,0
  NSEL,R,LOC,X,lf
  NSEL,R,LOC,Z,g
  F,ALL,FX,forceFLAMB/2
  NSEL,S,LOC,Z,0
  NSEL,R,LOC,X,lf
  NSEL,R,LOC,Y,g
  F,ALL,FX,forceFLAMB/2
*ENDIF

```

!DOIS FUROS

```

*IF,furos,GE,2,THEN
  NSEL,S,LOC,Y,0
  NSEL,R,LOC,X,lf
  NSEL,R,LOC,Z,g
  F,ALL,FX,forceFLAMB/4
  NSEL,S,LOC,Y,0
  NSEL,R,LOC,X,lf+eff
  NSEL,R,LOC,Z,g
  F,ALL,FX,forceFLAMB/4
  NSEL,S,LOC,Z,0
  NSEL,R,LOC,X,lf
  NSEL,R,LOC,Y,g
  F,ALL,FX,forceFLAMB/4
  NSEL,S,LOC,Z,0
  NSEL,R,LOC,X,lf+eff
  NSEL,R,LOC,Y,g
  F,ALL,FX,forceFLAMB/4
*ENDIF

```

!TRÊS FUROS

```

*IF,furos,GE,3,THEN

```

```

NSEL,S,LOC,Y,0
NSEL,R,LOC,X,lf
NSEL,R,LOC,Z,g
F,ALL,FX,forceFLAMB/6
NSEL,S,LOC,Y,0
NSEL,R,LOC,X,lf+eff
NSEL,R,LOC,Z,g
F,ALL,FX,forceFLAMB/6
NSEL,S,LOC,Y,0
NSEL,R,LOC,X,lf+2*eff
NSEL,R,LOC,Z,g
F,ALL,FX,forceFLAMB/6
NSEL,S,LOC,Z,0
NSEL,R,LOC,X,lf
NSEL,R,LOC,Y,g
F,ALL,FX,forceFLAMB/6
NSEL,S,LOC,Z,0
NSEL,R,LOC,X,lf+eff
NSEL,R,LOC,Y,g
F,ALL,FX,forceFLAMB/6
NSEL,S,LOC,Z,0
NSEL,R,LOC,X,lf+2*eff
NSEL,R,LOC,Y,g
F,ALL,FX,forceFLAMB/6
*ENDIF

```

```
ALLSEL
```

```
!ANÁLISE ESTÁTICA
```

```

/SOLU
ANTYPE,0
PSTRES,ON
SOLVE

```

```
!PÓS-PROCESSAMENTO DA ANÁLISE ESTÁTICA
```

```

/POST1
SET,FIRST

```

```
!ANÁLISE LINEARIZADA DE ESTABILIDADE
```

```

/SOLU
ANTYPE,BUCKLE
BUCOPT,LANB,30,0,0,RANGE
SOLVE

```

```
!PÓS-PROCESSAMENTO DA ANÁLISE LINEARIZADA DE ESTABILIDADE
```

```

/POST1
SET,FIRST
PLDISP

```

!DETERMINAÇÃO DO DESLOCAMENTO MÁXIMO DO PRIMEIRO MODO DE FLAMBAGEM

*GET,NUMNOS,NODE,0,COUNT

MAXDISP=0

*DO,I,1,NUMNOS,1

 *GET,NOATUAL,NODE,0,NUM,MIN

 *GET,DESLOC,NODE,NOATUAL,U,SUM

 *IF,DESLOC,GE,MAXDISP,THEN

 MAXDISP = DESLOC

 *ENDIF

 NSEL,U,NODE,,NOATUAL

*ENDDO

ALLSEL

/PREP7

!PROPRIEDADES ELASTOPLÁSTICAS DO AÇO ASTM A36

TB,MISO,1,1,,

TBPT,,fy/(Mod),fy

TBPT,,eu,fy

!APLICAÇÃO DA CARGA DE COMPRESSÃO PARA ANÁLISE NÃO LINEAR GEOMÉTRICA E DE MATERIAL

FDELE,ALL,ALL

!Um Furo

*IF,furos,EQ,1,THEN

 NSEL,S,LOC,Y,0

 NSEL,R,LOC,X,lf

 NSEL,R,LOC,Z,g

 F,ALL,FX,forceULT/2

 NSEL,S,LOC,Z,0

 NSEL,R,LOC,X,lf

 NSEL,R,LOC,Y,g

 F,ALL,FX,forceULT/2

*ENDIF

!Dois Furos

*IF,furos,EQ,2,THEN

 NSEL,S,LOC,Y,0

 NSEL,R,LOC,X,lf

 NSEL,R,LOC,Z,g

 F,ALL,FX,forceULT/4

 NSEL,S,LOC,Z,0

 NSEL,R,LOC,X,lf

 NSEL,R,LOC,Y,g

 F,ALL,FX,forceULT/4

 NSEL,S,LOC,Y,0

```

NSEL,R,LOC,X,lf+eff
NSEL,R,LOC,Z,g
F,ALL,FX,forceULT/4
NSEL,S,LOC,Z,0
NSEL,R,LOC,X,lf+eff
NSEL,R,LOC,Y,g
F,ALL,FX,forceULT/4
*ENDIF

```

!Três Furos

```

*IF,furos,EQ,3,THEN
  NSEL,S,LOC,Y,0
  NSEL,R,LOC,X,lf
  NSEL,R,LOC,Z,g
  F,ALL,FX,forceULT/6
  NSEL,S,LOC,Z,0
  NSEL,R,LOC,X,lf
  NSEL,R,LOC,Y,g
  F,ALL,FX,forceULT/6
  NSEL,S,LOC,Y,0
  NSEL,R,LOC,X,lf+eff
  NSEL,R,LOC,Z,g
  F,ALL,FX,forceULT/6
  NSEL,S,LOC,Z,0
  NSEL,R,LOC,X,lf+eff
  NSEL,R,LOC,Y,g
  F,ALL,FX,forceULT/6
  NSEL,S,LOC,Y,0
  NSEL,R,LOC,X,lf+2*eff
  NSEL,R,LOC,Z,g
  F,ALL,FX,forceULT/6
  NSEL,S,LOC,Z,0
  NSEL,R,LOC,X,lf+2*eff
  NSEL,R,LOC,Y,g
  F,ALL,FX,forceULT/6
*ENDIF

```

ALLSEL

/SOLU

!APLICAÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS

```

*IF,TR,EQ,1,THEN
  NSEL,S,LOC,Y,0
  *GET,NUMNOS,NODE,0,COUNT
  INISTATE,SET,DTYP,STRE
  INISTATE,SET,NODE,1
  *DO,I,1,NUMNOS,1
    *GET,NOATUAL,NODE,0,NUM,MIN
    LOCZ = NZ(NOATUAL)

```

```

*IF,LOCZ,LE,(b-t/2)/2,THEN
  INISTATE,DEFINE,NOATUAL,,,(0.98*LOCZ/(b-t/2)-0.25)*fy
*ELSE
  INISTATE,DEFINE,NOATUAL,,,(0.92*LOCZ/(b-t/2)+0.7)*fy
*ENDIF
NSEL,U,NODE,,NOATUAL
*ENDDO
ALLSEL
NSEL,S,LOC,Z,0
*GET,NUMNOS,NODE,0,COUNT
INISTATE,SET,DTYP,STRE
INISTATE,SET,NODE,1
*DO,I,1,NUMNOS,1
  *GET,NOATUAL,NODE,0,NUM,MIN
  LOCY = NY(NOATUAL)
  *IF,LOCY,LE,(b-t/2)/2,THEN
    INISTATE,DEFINE,NOATUAL,,,(0.98*LOCY/(b-t/2)-0.25)*fy
  *ELSE
    INISTATE,DEFINE,NOATUAL,,,(0.92*LOCY/(b-t/2)+0.7)*fy
  *ENDIF
  NSEL,U,NODE,,NOATUAL
*ENDDO
*ENDIF

ALLSEL

!APLICAÇÃO DA IMPERFEIÇÃO GEOMÉTRICA INICIAL
/PREP7
*IF,IGI,EQ,1,THEN
  FACTOR = Imp/MAXDISP
  UPGEOM,FACTOR,1,1,'testeBatch',RST !Atualização da geometria do modelo
*ENDIF

!ANÁLISE NÃO LINEAR GEOMÉTRICA E DE MATERIAL
/SOLU
ANTYPE,0
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,ALL
NLGEOM,ON
NSUBST,10
ARCLN,ON,0.001,0.0001
/DEVDISP,Font,1,TIMES*NEW*ROMAN,400,0,-15
/REPLOT
SOLVE

!PÓS-PROCESSAMENTO DA ANÁLISE NÃO LINEAR GEOMÉTRICA E DE MATERIAL

/POST1

```

```

SET,FIRST
MAXTIME = 0
*GET,NUMSET,ACTIV,0,SET,NSET
*DO,I,1,NUMSET,1
  *GET,CURRTIME,ACTIV,0,SET,TIME
  *GET,SBSTPNUM,ACTIV,0,SET,SBST
  *IF,CURRTIME,GE,MAXTIME,AND,SBSTPNUM,NE,999999,THEN
    MAXTIME = CURRTIME
    SETNUMBER = I
    SET,NEXT
  *ELSE
    *EXIT
  *ENDIF
*ENDDO
SET,,,,,,,,,SETNUMBER

```

!OBTENÇÃO DAS TENSÕES DE VON MISES RELATIVA A CAPACIDADE
RESISTENTE DA CANTONEIRA
PLNSOL,S,EQV

APÊNDICE C: CÓDIGO APDL PARA COMPRESSÃO EXCÊNTRICA DE CANTONEIRAS

```
!*****  
!  
!                               COMPRESSÃO EXCÊNTRICA DAS CANTONEIRAS  
!  
!Autor: Mestrando José Onésimo Gomes Junyor  
!Apoio Técnico: Doutorando João Victor Fragoso Dias  
!Orientação: Professores Hermes Carvalho e Armando César Campos Lavall  
!Departamento de Engenharia de Estruturas (DEES)  
!Universidade Federal de Minas Gerais (EE/UFMG)  
!*****
```

/PREP7

!CONSTRUÇÃO DA GEOMETRIA DA CANTONEIRA SEM FUROS

!PONTOS DA SECÃO

K,1,
K,2,,b-t/2
K,3,,b-t/2
K,4,L/2

!LINHAS

L,1,2
L,1,3
L,1,4

!EXTRUSÃO DO PERFIL

ADRAG,1,2,,,,,3
APLOT

!CRIAÇÃO DOS FUROS NAS CANTONEIRAS

```
*IF,furos,EQ,1,THEN      !Um Furo  
  WPROTA,,90  
  CYL4,lf,g,d/2,45,,405  
  ASEL,S,LOC,Y,0  
  ASBA,2,ALL  
  WPCSYS,-1  
  WPOFFS,lf+eff/2  
  WPROTA,,90
```

```

ALLSEL
ASBW,ALL
WPCSYS,-1
KSEL,S,LOC,Y,0
KSEL,R,LOC,Z,g,(b-t/2)
KSEL,R,LOC,X,lf,lf+eff/2
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
KSEL,S,LOC,Y,0
KSEL,R,LOC,Z,0,g
KSEL,R,LOC,X,0,lf
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
KSEL,S,LOC,Y,0
KSEL,R,LOC,Z,g,(b-t/2)
KSEL,R,LOC,X,0,lf
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
KSEL,S,LOC,Y,0
KSEL,R,LOC,Z,0,g
KSEL,R,LOC,X,lf,lf+eff/2
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
comp_lig = lf + eff/2
*ENDIF

*IF,furos,EQ,2,THEN      !Dois Furos
WPROTA,,90
CYL4,lf,g,d/2,45,,405
ASEL,S,LOC,Y,0
ASBA,2,ALL
WPCSYS,-1
WPOFFS,lf+eff/2
WPROTA,,,90
ALLSEL
ASBW,ALL
WPCSYS,-1
KSEL,S,LOC,Y,0
KSEL,R,LOC,Z,g,(b-t/2)
KSEL,R,LOC,X,lf,lf+eff/2
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
KSEL,S,LOC,Y,0
KSEL,R,LOC,Z,0,g
KSEL,R,LOC,X,0,lf

```

```

*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
KSEL,S,LOC,Y,0
KSEL,R,LOC,Z,g,(b-t/2)
KSEL,R,LOC,X,0,lf
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
KSEL,S,LOC,Y,0
KSEL,R,LOC,Z,0,g
KSEL,R,LOC,X,lf,lf+eff/2
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
WPROTA,,90
CYL4,lf + eff,g,d/2,45,,405
ASEL,S,LOC,Y,0
ASEL,R,LOC,X,lf+eff/2,L/2
ASBA,5,ALL
WPCSYS,-1
WPOFFS,2*lf+eff
WPROTA,,90
ALLSEL
ASBW,ALL
WPCSYS,-1
KSEL,S,LOC,Y,0
KSEL,R,LOC,Z,g,(b-t/2)
KSEL,R,LOC,X,lf+eff,2*lf+eff
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
KSEL,S,LOC,Y,0
KSEL,R,LOC,Z,0,g
KSEL,R,LOC,X,lf+eff,2*lf+eff
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
KSEL,S,LOC,Y,0
KSEL,R,LOC,Z,g,(b-t/2)
KSEL,R,LOC,X,lf+eff/2,lf+eff
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
KSEL,S,LOC,Y,0
KSEL,R,LOC,Z,0,g
KSEL,R,LOC,X,lf+eff/2,lf+eff
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX

```

```

    comp_lig = 2*lf + eff
*ENDIF

*IF,furos,EQ,3,THEN      !Três Furos
  WPROTA,,90
  CYL4,lf,g,d/2,45,,405
  ASEL,S,LOC,Y,0
  ASBA,2,ALL
  WPCSYS,-1
  WPOFFS,lf+eff/2
  WPROTA,,,90
  ALLSEL
  ASBW,ALL
  WPCSYS,-1
  KSEL,S,LOC,Y,0
  KSEL,R,LOC,Z,g,(b-t/2)
  KSEL,R,LOC,X,lf,lf+eff/2
  *GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
  *GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
  L,NMIN,NMAX
  KSEL,S,LOC,Y,0
  KSEL,R,LOC,Z,0,g
  KSEL,R,LOC,X,0,lf
  *GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
  *GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
  L,NMIN,NMAX
  KSEL,S,LOC,Y,0
  KSEL,R,LOC,Z,g,(b-t/2)
  KSEL,R,LOC,X,0,lf
  *GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
  *GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
  L,NMIN,NMAX
  KSEL,S,LOC,Y,0
  KSEL,R,LOC,Z,0,g
  KSEL,R,LOC,X,lf,lf+eff/2
  *GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
  *GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
  L,NMIN,NMAX
  WPROTA,,90
  CYL4,lf + eff,g,d/2,45,,405
  ASEL,S,LOC,Y,0
  ASEL,R,LOC,X,lf+eff/2,L/2
  ASBA,5,ALL
  WPCSYS,-1
  WPOFFS,lf+3*eff/2
  WPROTA,,,90
  ALLSEL
  ASBW,ALL
  WPCSYS,-1
  KSEL,S,LOC,Y,0

```

KSEL,R,LOC,Z,g,(b-t/2)
KSEL,R,LOC,X,lf+eff,lf+3*eff/2
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
KSEL,S,LOC,Y,0
KSEL,R,LOC,Z,0,g
KSEL,R,LOC,X,lf+eff,lf+3*eff/2
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
KSEL,S,LOC,Y,0
KSEL,R,LOC,Z,g,(b-t/2)
KSEL,R,LOC,X,lf+eff/2,lf+eff
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
KSEL,S,LOC,Y,0
KSEL,R,LOC,Z,0,g
KSEL,R,LOC,X,lf+eff/2,lf+eff
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
WPROTA,,90
CYL4,lf + 2*eff,g,d/2,45,,405
ASEL,S,LOC,Y,0
ASEL,R,LOC,X,lf+3*eff/2,L/2
ASBA,5,ALL
WPCSYS,-1
WPOFFS,2*lf+2*eff
WPROTA,,90
ALLSEL
ASBW,ALL
WPCSYS,-1
KSEL,S,LOC,Y,0
KSEL,R,LOC,Z,g,(b-t/2)
KSEL,R,LOC,X,lf+2*(eff),2*lf+2*eff
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
KSEL,S,LOC,Y,0
KSEL,R,LOC,Z,0,g
KSEL,R,LOC,X,lf+2*(eff),2*lf+2*eff
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
KSEL,S,LOC,Y,0
KSEL,R,LOC,Z,g,(b-t/2)
KSEL,R,LOC,X,lf+3*eff/2,lf+2*(eff)
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX

```

*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
KSEL,S,LOC,Y,0
KSEL,R,LOC,Z,0,g
KSEL,R,LOC,X,lf+3*eff/2,lf+2*(eff)
*GET,NMAX,KP,,NUM,MAX
*GET,NMIN,KP,,NUM,MIN
L,NMIN,NMAX
comp_lig = 2*lf+2*eff
*ENDIF

```

```

!DETALHAMENTO DA LIGAÇÃO
ASEL,S,LOC,Y,0
ASEL,R,LOC,X,0,comp_lig
LSEL,S,LOC,X,0,comp_lig
LSLA,U
ASBL,ALL,ALL

```

```

ALLSEL

```

```

!DEFINIÇÃO DO ELEMENTO: SHELL181
ET,1,181

```

```

!PROPRIEDADES ELÁSTICAS DO AÇO ASTM A36
MP,EX,1,Mod
MP,PRXY,1,poisson

```

```

!DEFINIÇÃO DA SEÇÃO TRANSVERSAL
SECTYPE,1,SHELL,,CANTONEIRA
SECDATA,t,1,,5

```

```

!CRIAÇÃO DA MALHA

```

```

!CRIAÇÃO DA MALHA NA LIGAÇÃO
ASEL,R,LOC,X,0,comp_lig
LSLA,S
LESIZE,ALL,,NDIV
AMESH,ALL

```

```

!CRIAÇÃO DA MALHA DO PERFIL
ASEL,S,LOC,X,0,comp_lig
ASEL,INVE
AATT,1,,1,,1
AESIZE,ALL,ESIDE
AMESH,ALL

```

```

ALLSEL

```

```

!CRIAÇÃO DA MALHA NO INTERIOR DO FURO

```

```
!DEFINIÇÃO DO ELEMENTO: MPC184
ET,2,184,1
TYPE,2
```

```
!CRIAÇÃO DO NÓ CENTRAL E DE ELEMENTOS NO INTERIOR DO FURO
```

```
*IF,furos,GE,1,THEN          !Um Furo
  *GET,MAXNODE,NODE,0,NUM,MAXD
  LSEL,S,LOC,X,(lf-d/2),(lf+d/2)
  NSEL,S,LOC,Y,0
  NSEL,R,LOC,X,(lf-d/2),(lf+d/2)
  NSEL,R,LOC,Z,(g-d/2),(g+d/2)
  NSLL,R,1
  N,MAXNODE+1,(lf),0,g
  *GET,NEWMAX,NODE,0,NUM,MAXD
  *GET,NUMNODES,NODE,,COUNT
  *DO,I,1,NUMNODES-1,1
    *GET,FIRSTNODE,NODE,0,NUM,MIN
      E,FIRSTNODE,NEWMAX
      NSEL,U,NODE,,FIRSTNODE
    *ENDDO

*IF,furos,GE,2,THEN          !Dois Furos
  *GET,MAXNODE,NODE,0,NUM,MAXD
  LSEL,S,LOC,X,((lf+eff)-d/2),((lf+eff)+d/2)
  NSEL,S,LOC,Y,0
  NSEL,R,LOC,X,((lf+eff)-d/2),((lf+eff)+d/2)
  NSEL,R,LOC,Z,(g-d/2),(g+d/2)
  NSLL,R,1
  N,MAXNODE+1,((lf+eff)),0,g
  *GET,NEWMAX,NODE,0,NUM,MAXD
  *GET,NUMNODES,NODE,,COUNT
  *DO,I,1,NUMNODES-1,1
    *GET,FIRSTNODE,NODE,0,NUM,MIN
      E,FIRSTNODE,NEWMAX
      NSEL,U,NODE,,FIRSTNODE
    *ENDDO

*IF,furos,GE,3,THEN          !Três Furos
  *GET,MAXNODE,NODE,0,NUM,MAXD
  LSEL,S,LOC,X,((lf+2*eff)-d/2),((lf+2*eff)+d/2)
  NSEL,S,LOC,Y,0
  NSEL,R,LOC,X,((lf+2*eff)-d/2),((lf+2*eff)+d/2)
  NSEL,R,LOC,Z,(g-d/2),(g+d/2)
  NSLL,R,1
  N,MAXNODE+1,((lf+2*eff)),0,g
  *GET,NEWMAX,NODE,0,NUM,MAXD
  *GET,NUMNODES,NODE,,COUNT
  *DO,I,1,NUMNODES-1,1
    *GET,FIRSTNODE,NODE,0,NUM,MIN
      E,FIRSTNODE,NEWMAX
```

```

        NSEL,U,NODE,,FIRSTNODE
    *ENDDO
    *ENDIF
    *ENDIF
*ENDIF

```

!CONDIÇÕES DE CONTORNO

!NOS FUROS

```

*IF,furos,GE,1,THEN    !Um Furo
    NSEL,S,LOC,Y,0
    NSEL,R,LOC,X,lf
    NSEL,R,LOC,Z,g
    D,ALL,UY,0
    D,ALL,UZ,0
    D,ALL,ROTX,0

```

```

*IF,furos,GE,2,THEN    !Dois Furos
    NSEL,S,LOC,Y,0
    NSEL,R,LOC,X,lf+eff
    NSEL,R,LOC,Z,g
    D,ALL,UY,0
    D,ALL,UZ,0
    D,ALL,ROTX,0

```

```

*IF,furos,GE,3,THEN    !Três Furos
    NSEL,S,LOC,Y,0
    NSEL,R,LOC,X,lf+2*eff
    NSEL,R,LOC,Z,g
    D,ALL,UY,0
    D,ALL,UZ,0
    D,ALL,ROTX,0

```

```

*ENDIF
*ENDIF
*ENDIF

```

!NA SEÇÃO TRANSVERSAL DE SIMETRIA

```

NSEL,S,LOC,X,L/2
D,ALL,UX,0
D,ALL,ROTY,0
D,ALL,ROTZ,0

```

!APLICAÇÃO DA CARGA DE COMPRESSÃO PARA ANÁLISE LINEARIZADA DE ESTABILIDADE

!UM FURO

```

*IF,furos,GE,1,THEN
    NSEL,S,LOC,Y,0
    NSEL,R,LOC,X,lf
    NSEL,R,LOC,Z,g

```

```
F,ALL,FX,forceFLAMB
*ENDIF
```

```
!DOIS FUROS
```

```
*IF,furos,GE,2,THEN
  NSEL,S,LOC,Y,0
  NSEL,R,LOC,X,lf
  NSEL,R,LOC,Z,g
  F,ALL,FX,forceFLAMB/2
  NSEL,S,LOC,Y,0
  NSEL,R,LOC,X,lf+eff
  NSEL,R,LOC,Z,g
  F,ALL,FX,forceFLAMB/2
*ENDIF
```

```
!TRÊS FUROS
```

```
*IF,furos,GE,3,THEN
  NSEL,S,LOC,Y,0
  NSEL,R,LOC,X,lf
  NSEL,R,LOC,Z,g
  F,ALL,FX,forceFLAMB/3
  NSEL,S,LOC,Y,0
  NSEL,R,LOC,X,lf+eff
  NSEL,R,LOC,Z,g
  F,ALL,FX,forceFLAMB/3
  NSEL,S,LOC,Y,0
  NSEL,R,LOC,X,lf+2*eff
  NSEL,R,LOC,Z,g
  F,ALL,FX,forceFLAMB/3
*ENDIF
```

```
ALLSEL
```

```
!ANÁLISE ESTÁTICA
```

```
/SOLU
ANTYPE,0
PSTRES,ON
SOLVE
```

```
!PÓS-PROCESSAMENTO DA ANÁLISE ESTÁTICA
```

```
/POST1
SET,FIRST
```

```
!ANÁLISE LINEARIZADA DE ESTABILIDADE
```

```
/SOLU
ANTYPE,BUCKLE
BUCOPT,LANB,10,0,0,RANGE
SOLVE
```

```
!PÓS-PROCESSAMENTO DA ANÁLISE LINEARIZADA DE ESTABILIDADE
```

```
/POST1  
SET,FIRST  
PLDISP
```

```
!DETERMINAÇÃO DO DESLOCAMENTO MÁXIMO DO PRIMEIRO MODO DE  
FLAMBAGEM
```

```
*GET,NUMNOS,NODE,0,COUNT  
MAXDISP=0  
*DO,I,1,NUMNOS,1  
  *GET,NOATUAL,NODE,0,NUM,MIN  
  *GET,DESLOC,NODE,NOATUAL,U,SUM  
  *IF,DESLOC,GE,MAXDISP,THEN  
    MAXDISP = DESLOC  
  *ENDIF  
  NSEL,U,NODE,,NOATUAL  
*ENDDO
```

```
ALLSEL
```

```
/PREP7
```

```
!PROPRIEDADES ELASTOPLÁSTICAS DO AÇO ASTM A36
```

```
TB,MISO,1,1,,  
TBPT,,fy/(Mod),fy  
TBPT,,eu,fy
```

```
!APLICAÇÃO DA CARGA DE COMPRESSÃO PARA ANÁLISE NÃO LINEAR  
GEOMÉTRICA E DE MATERIAL
```

```
FDELE,ALL,ALL
```

```
!Um Furo
```

```
*IF,furos,GE,1,THEN  
  NSEL,S,LOC,Y,0  
  NSEL,R,LOC,X,lf  
  NSEL,R,LOC,Z,g  
  F,ALL,FX,forceULT  
*ENDIF
```

```
!Dois Furos
```

```
*IF,furos,GE,2,THEN  
  NSEL,S,LOC,Y,0  
  NSEL,R,LOC,X,lf  
  NSEL,R,LOC,Z,g  
  F,ALL,FX,forceULT/2
```

```
NSEL,S,LOC,Y,0  
NSEL,R,LOC,X,lf+eff  
NSEL,R,LOC,Z,g  
F,ALL,FX,forceULT/2
```

*ENDIF

!Três Furos

```
*IF,furos,GE,3,THEN
  NSEL,S,LOC,Y,0
  NSEL,R,LOC,X,lf
  NSEL,R,LOC,Z,g
  F,ALL,FX,forceULT/3
  NSEL,S,LOC,Y,0
  NSEL,R,LOC,X,lf+eff
  NSEL,R,LOC,Z,g
  F,ALL,FX,forceULT/3
  NSEL,S,LOC,Y,0
  NSEL,R,LOC,X,lf+2*eff
  NSEL,R,LOC,Z,g
  F,ALL,FX,forceULT/3
*ENDIF
```

ALLSEL

/SOLU

!APLICAÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS

```
*IF,TR,EQ,1,THEN
  NSEL,S,LOC,Y,0
  *GET,NUMNOS,NODE,0,COUNT
  INISTATE,SET,DTYP,STRE
  INISTATE,SET,NODE,1
  *DO,I,1,NUMNOS,1
    *GET,NOATUAL,NODE,0,NUM,MIN
    LOCZ = NZ(NOATUAL)
    *IF,LOCZ,LE,(b-t/2)/2,THEN
      INISTATE,DEFINE,NOATUAL,,,(0.98*LOCZ/(b-t/2)-0.25)*fy
    *ELSE
      INISTATE,DEFINE,NOATUAL,,,(0.92*LOCZ/(b-t/2)+0.7)*fy
    *ENDIF
    NSEL,U,NODE,,NOATUAL
  *ENDDO
  ALLSEL
  NSEL,S,LOC,Z,0
  *GET,NUMNOS,NODE,0,COUNT
  INISTATE,SET,DTYP,STRE
  INISTATE,SET,NODE,1
  *DO,I,1,NUMNOS,1
    *GET,NOATUAL,NODE,0,NUM,MIN
    LOCY = NY(NOATUAL)
    *IF,LOCY,LE,(b-t/2)/2,THEN
      INISTATE,DEFINE,NOATUAL,,,(0.98*LOCY/(b-t/2)-0.25)*fy
    *ELSE
      INISTATE,DEFINE,NOATUAL,,,(0.92*LOCY/(b-t/2)+0.7)*fy
```

```

        *ENDIF
        NSEL,U,NODE,,NOATUAL
    *ENDDO
*ENDIF

ALLSEL

!APLICAÇÃO DA IMPERFEIÇÃO GEOMÉTRICA INICIAL
/PREP7
*IF,IGI,EQ,1,THEN
    FACTOR = Imp/MAXDISP
    UPGEOM,FACTOR,1,1,'testeBatch',RST    !Atualização da geometria do modelo
*ENDIF

!ANÁLISE NÃO LINEAR GEOMÉTRICA E DE MATERIAL
/SOLU
ANTYPE,0
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,ALL
NLGEOM,ON
NSUBST,10
ARCLLEN,ON,0.001,0.0001
/DEVDISP,Font,1,TIMES*NEW*ROMAN,400,0,-15
/REPLOT
SOLVE

!PÓS-PROCESSAMENTO DA ANÁLISE NÃO LINEAR GEOMÉTRICA E DE
MATERIAL

/POST1
SET,FIRST
MAXTIME = 0
*GET,NUMSET,ACTIV,0,SET,NSET
*DO,I,1,NUMSET,1
    *GET,CURRTIME,ACTIV,0,SET,TIME
    *GET,SBSTPNUM,ACTIV,0,SET,SBST
    *IF,CURRTIME,GE,MAXTIME,AND,SBSTPNUM,NE,999999,THEN
        MAXTIME = CURRTIME
        SETNUMBER = I
        SET,NEXT
    *ELSE
        *EXIT
    *ENDIF
*ENDDO
SET,,,,,,,,,SETNUMBER

!OBTENÇÃO DAS TENSÕES DE VON MISES RELATIVA A CAPACIDADE
RESISTENTE DA CANTONEIRA
PLNSOL,S,EQV

```