

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

Rafael Luiz Galvão de Oliveira

**Estudo Teórico sobre os Esforços Resistentes de Perfis
Formados a Frio com Presença de Furos**

Belo Horizonte

2017

Estudo Teórico sobre os Esforços Resistentes de Perfis Formados a Frio com Presença de Furos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do grau de “Mestre em Engenharia de Estruturas”.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Carlos Rodrigues

Co-orientador: Prof. Dr. Rodrigo Barreto Caldas

Belo Horizonte

2017

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

Estudo Teórico sobre os Esforços Resistentes de Perfis Formados a Frio com Presença de Furos

Rafael Luiz Galvão de Oliveira

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do grau de “Mestre em Engenharia de Estruturas”.

Comissão avaliadora:

Prof. Dr. Francisco Carlos Rodrigues
DEES - UFMG – (Orientador)

Prof. Dr. Rodrigo Barreto Caldas
DEES - UFMG – (Co-orientador)

Prof. Dr. Hermes Carvalho
DEES - UFMG

Prof. Dr. Maximiliano Malite
EESC/USP – Departamento de Engenharia de Estruturas

Belo Horizonte, 17 de agosto de 2017

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho à minha filha por alegrar meus dias com sua constante alegria. E ao meu pai (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a Deus pelas oportunidades de crescimento pessoal e profissional.

O apoio de minha mãe Márcia e de meu padrasto Ronaldo para a realização de vários sonhos foi importantíssimo. A vocês, que abdicaram de sonhos para que os filhos tivessem um futuro melhor, meu muito obrigado.

Agradeço à minha filha Ana Luiza por iluminar meus dias com seus sorrisos e à minha namorada Priscila.

Agradeço à minha família, em especial à minha querida irmã Amanda e ao meu padrinho Geraldo Magela. Agradeço também aos meus amigos sempre presentes, que se mostraram como uma família que Deus me permitiu escolher.

Ao Professor Dr. Francisco Carlos Rodrigues e ao Professor Dr. Rodrigo Barreto Caldas pela dedicação, suporte, paciência e pelo conhecimento fornecido ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores e colaboradores do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais que tanto contribuíram com minha formação. Aos amigos da Pós-Graduação, em especial ao Raphael Nonato Cabana Vieira e Lucas Figueiredo Grilo, pelo apoio ao longo da jornada.

À equipe da Caltra Projetos e Consultoria, onde iniciei meu aprendizado na área de cálculos estruturais, minha gratidão e meu reconhecimento.

RESUMO

OLIVEIRA, R. L. O. *Estudo Teórico sobre os Esforços Resistentes de Perfis Formados a Frio com a Presença de Furos*. Belo Horizonte, 2017 - Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais.

Esta pesquisa tem como principal objetivo realizar um estudo teórico sobre os esforços resistentes de perfis formados a frio com a presença de furos. No sistema construtivo *Light Steel Framing* (LSF) a execução de furos nos montantes e vigas são usadas comumente, para passagem de tubulações elétricas, hidráulicas, de gás, aquecimento e afins. A execução dos furos pode causar redução da capacidade resistente dos perfis, entretanto, a norma técnica brasileira destinada ao dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio, ABNT NBR 14762:2010, aborda a presença de furos somente os capítulos que tratam de barras tracionadas e ligações parafusadas. Realizou-se ao longo do estudo uma revisão bibliográfica sobre o assunto, com intuito de determinar o comportamento dos perfis com furos, com base em normas internacionais e artigos que contemplam a existência destes. São apresentados métodos de dimensionamento de perfis com a presença de furos preconizados na norma AISI S100-16. Os resultados obtidos com este método foram comparados com os resultados dos ensaios apresentados na revisão bibliográfica. Também são apresentados gráficos para o pré-dimensionamento dos principais perfis utilizados no sistema LSF. E por fim, foi desenvolvido um aplicativo utilizando programação orientada a objetos (POO) para o dimensionamento de perfis formados a frio com e sem a presença de furos.

Palavras-chave: Perfis formados a frio; Light Steel Framing; Perfurações; Furos.

ABSTRACT

The aim of this study is to present a theoretical study on the structural resistance of cold-formed steel with holes. In Light Steel Framing (LSF) construction system, structural members are usually provided with holes to accommodate plumbing, electrical conduits and heating conduits. The presence of holes may reduce the ultimate strength of the frame. Therefore, the Brazilian Standard ABNT NBR 14762:2010 present the design rules in that case only for tensile frames and bolted connections. It was made a literature review on the subject, based on international standard and papers, in order to determinate the behavior of cold-formed steel with openings. The design rules of AISI S100-16 for frames with holes were presented. The results obtained based on AISI S100-16 were compared with the experimental results presented on literature review. It was presented the preliminary design abacus of the most common frames used on LSF. It was also developed a *software* for the design of cold-formed profiles with or without holes.

Key words: Cold-Formed Steel; Light Steel Framing; Perforations; Holes.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	iii
AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xx
LISTA DE SÍMBOLOS	xxii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xxviii
1. Introdução.....	1
1.1 Considerações Gerais.....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Metodologia.....	3
1.4 Justificativa	4
1.4.1 Estudo do comportamento de perfis formados a frio com a presença de furos....	4
1.4.2 Desenvolvimento do <i>software</i>	5
1.5 Desenvolvimento da dissertação.....	6
2. Revisão bibliográfica.....	7
2.1 Normas brasileiras	7
2.1.1 Método da Largura Efetiva.....	7
2.1.2 Método da Seção Efetiva.....	8
2.1.3 Método da Resistência Direta.....	9
2.1.4 Prescrições da ABNT NBR 14762:2010 para o dimensionamento de barras	9
2.1.5 Barras submetidas à força axial de tração	10
2.1.6 Barras submetidas à força axial de compressão	11
2.1.7 Barras submetidas à flexão simples.....	13
2.1.8 Barras submetidas à força cortante	15
2.1.9 Barras submetidas à força cortante e momento fletor	15

2.1.10	Barras submetidas à flexão composta.....	16
2.1.11	Outras normas brasileiras	16
2.2	Eurocode	17
2.3	Norma norte americana AISI S100-16	18
2.3.1	MLE aplicado em elementos enrijecidos uniformemente comprimidos com furos circulares ou não circulares.....	18
2.3.2	MLE aplicado em almas de perfis Ue sujeitas a gradiente de tensões	20
2.3.3	Força cortante resistente de cálculo para perfis Ue com furos na alma	20
2.3.4	Força resistente ao enrugamento da alma (<i>web crippling</i>) para perfis Ue com furos na alma	21
2.3.5	Método da Resistência Direta aplicado às barras em compressão centrada, sem furos	23
2.3.6	Método da Resistência Direta aplicado às barras em flexão, sem furos.....	25
2.3.7	Método da Resistência Direta aplicado aos perfis com furos.....	26
2.3.8	Flambagem elástica de barras com furos segundo AISI S100-16.....	27
2.4	Flambagem elástica de barras com furos	27
2.4.1	Forças de flambagem elástica global.....	27
2.4.2	Forças de flambagem elástica distorcional	29
2.4.3	Forças de flambagem elástica local	30
2.5	Método da Resistência Direta aplicado em barras em compressão com furos	34
2.6	Método da Resistência Direta aplicado em barras em flexão com furos	37
2.7	Experimentos realizados em barras em compressão Ue com furos na alma	38
2.8	Experimentos realizados em <i>steel joist</i> constituídos por barras em flexão com seção Ue e furos na alma	42
2.9	Comportamento de perfis com furos sujeitos ao enrugamento da alma (<i>web crippling</i>)	48
2.10	Flambagem elástica de perfis formados a frio com furos enrijecidos	49
2.11	Análise crítica e comparativa.....	51
2.11.1	Comparações entre as normas estudadas.....	51
2.11.2	Comparações entre o MRD para perfis sem furos e perfis com furos.....	53
2.11.3	Comparação entre as formulações de Uzzaman et al (2012) e AISI S100-16 para o dimensionamento de perfis Ue sujeitos ao enrugamento da alma (<i>web crippling</i>).....	58
3.	Desenvolvimento do <i>software</i> CFD	63

3.1	Java e a Linguagem Orientada a Objetos.....	63
3.2	Estruturação básica do aplicativo	64
3.3	Funcionalidade das classes	67
3.3.1	Classes do pacote Geometria.....	67
3.3.2	Classes do pacote <i>Sections</i>	68
3.3.3	Classes do pacote Modelo	74
3.3.4	Classes do pacote Esforço Resistente.....	75
3.3.5	Classes do pacote Verificações.....	77
3.3.6	Classes do pacote <i>Library</i>	78
3.3.7	Classes do pacote GIG.....	78
3.3.8	Classes do pacote <i>App</i>	78
3.3.9	Classes do pacote Útil	78
3.4	Validação do <i>software</i>	78
3.4.1	Barras em flexão.....	78
3.4.2	Barras em compressão	81
3.5	Exemplos de aplicação.....	83
3.5.1	Exemplo 1 – Viga Ue 140x40x12x0,95 sem abertura na alma submetida à flexão simples.....	83
3.5.2	Exemplo 2 – Viga Ue 140x40x12x0,95 com abertura na alma submetida à flexão simples.....	86
3.5.3	Exemplo 3– Montante Ue 90x40x12x0,95 sem abertura na alma submetido à flexão composta.....	89
3.5.4	Exemplo 4 – Montante Ue 90x40x12x0,95 com abertura na alma submetido à compressão centrada	93
4.	Comportamento de barras de aço com a presença de furos	96
4.1	Estudo de barras de aço comprimidas do sistema LSF com a presença de furos	96
4.2	Estudo de barras de aço fletidas do sistema LSF com a presença de furos	100
4.2.1	Determinação do momento fletor resistente de cálculo.....	100
4.2.2	Verificação dos deslocamentos de perfis com a presença de furos.....	103
4.2.3	Determinação da força cortante resistente de cálculo	103
4.3	Gráficos de pré-dimensionamento	106
4.3.1	Gráficos $L \times N_{sd}$ – Barras submetidas à força axial de compressão	106
4.3.2	Gráficos $L \times q_{sd}$ – Barras submetidas à flexão na maior inércia.....	116

4.3.3	Gráficos q_{sd} x N_{sd} – Barras submetidas à flexo-compressão	124
5.	Discussões e Conclusões	148
5.1	Considerações Finais	148
5.1.1	Dimensionamento de perfis formados a frio com a presença de furos.....	148
5.1.2	Desenvolvimento de um <i>software</i> para dimensionamento de perfis formados a frio	150
5.2	Recomendações e Sugestões para Estudos Posteriores	151
5.2.1	Dimensionamento de perfis formados a frio com a presença de furos.....	151
5.2.2	Futuras implementações do <i>software</i> CFD.....	151
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	153

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Estrutura de uma residência em Light Steel Framing (CBCA, 2006).....	1
Figura 1.2 – Furos para a passagem de tubulações elétricas	2
Figura 1.3 – Reforço para perfurações feitas em obra (Fonte: Manual CBCA – Arquitetura) .	3
Figura 2.1 – Abertura nos perfis do LSF (ABNT NBR 15253:2014).....	17
Figura 2.2 – Nomenclatura adotada na norma norte americana (AISI S100-16).....	18
Figura 2.3 – Condições de carregamento. (a) IOF, (b) EOF (adaptada de AISI Report. RP02-2).....	22
Figura 2.4 – (a) Seção líquida, (b) Seção bruta	28
Figura 2.5 – Guia para modelagem da seção líquida de uma barra em compressão no CUFSM, exemplos incluem: a) Perfil Ue e b) Perfil Cr (Adaptada de Moen & Schafer, 2009).....	31
Figura 2.6 - Curva de flambagem local elástica de uma seção líquida, onde: a) $L_h < L_{crlh}$ e b) $L_h > L_{crlh}$ (Adaptada de Moen & Schafer, 2009)	32
Figura 2.7 - Guia para modelagem da seção líquida de barras em flexão no CUFSM, exemplos incluem: a) Perfil Ue e b) Perfil Cr (Adaptada de Moen & Schafer, 2009).....	33
Figura 2.8 - Curva de flambagem elástica, obtida via método das faixas finitas (Adaptada de Moen e Schafer, 2011).....	34
Figura 2.9 - Redução de força resistente da barra em compressão devido à flambagem distorcional: $P_{ynet}/P_y=0,80$ (Adaptada de Moen e Schafer, 2011)	36
Figura 2.10 - Redução de força resistente da barra em compressão devido à flambagem distorcional: (a) $P_{ynet}/P_y = 0,60$ (Adaptada de Moen e Schafer, 2011).....	36
Figura 2.11 - Modos de flambagem esperado para barras em compressão curtas: (a) Flambagem Local; (b) Flambagem Distorcional (Adaptada de Moen e Schafer, 2008).....	39
Figura 2.12 – Modos de flambagem esperado para barras em compressão de comprimento intermediário: (a) Flambagem Local; (b) Flambagem Distorcional (Adaptada de Moen e Schafer, 2008).....	39

Figura 2.13 – Nomenclatura adotada no estudo (Adaptada de Moen e Schafer, 2008)	40
Figura 2.14 - Esquema adotado nos ensaios realizados por Moen et al. (Adaptada de Moen et al, 2013).....	43
Figura 2.15 – Procedimento de análise da seção líquida via método das faixas finitas (Adaptada de Moen et al., 2013)	44
Figura 2.16 – Nomenclatura adotada no estudo (Moen et al., 2013)	45
Figura 2.17 - Dados da seção transversal e condições de apoio. (a) ITF (b) ETF (Uzzaman et al., 2012).....	48
Figura 2.18 - Representação esquemática do modelo estudado (Adaptada de Moen e Yu, 2010).....	50
Figura 2.19 - Condições de carregamento. (a) Interior One Flange Loading (IOF), (b) Interior Two Flange Loading, (ITF); (c) End One Flange Loading (EOF), (d) EndTwo Flange Loading, (ETF); (Adaptada de AISI Report RP02-2)	58
Figura 2.20 – Fator R_c para condição EOF – AISI S100-16	59
Figura 2.21 – Fator R_c para condição IOF – AISI S100-16	60
Figura 2.22 – Fator R_p para condição ETF- Mesas livres – Uzzaman et al (2012)	60
Figura 2.23 – Fator R_p para condição ETF- Mesas presas – Uzzaman et al (2012)	61
Figura 2.24 – Fator R_p para condição ITF- Mesas livres – Uzzaman et al (2012)	61
Figura 2.25 – Fator R_p para condição ITF- Mesas presas – Uzzaman et al (2012)	62
Figura 3.1 - Estrutura básica do aplicativo – Parte 1 de 2	65
Figura 3.2 - Estrutura básica do aplicativo – Parte 2 de 2	66
Figura 3.3 - Composição de seção L	67
Figura 3.4 - Composição de seção Cr.....	68
Figura 3.5 - Composição de seção cartola com mesas inclinadas	69
Figura 3.6 - Composição de seção caixa	69
Figura 3.7 - Composição de seção I composta por dois U	70
Figura 3.8 - Composição de seção I composta por dois Cr	70
Figura 3.9 - Composição de seção Ie composta por dois Ue.....	71

Figura 3.10 - Composição da cantoneira enrijecida - Le.....	71
Figura 3.11 - Composição de seção U.....	72
Figura 3.12 - Composição de seção Ue.....	72
Figura 3.13 - Composição de seção Z.....	73
Figura 3.14 - Composição de seção Z enrijecido a 45° - Z45.....	73
Figura 3.15 - Composição de seção Z enrijecida a 90° - Z90.....	74
Figura 3.16 – Esquema do experimento (Moen et al, 2013).....	79
Figura 3.17 - Dados de Entrada.....	83
Figura 3.18 – Propriedades Geométricas da Seção Transversal.....	84
Figura 3.19 – Esforços críticos elásticos.....	84
Figura 3.20 - Cálculo Detalhado.....	85
Figura 3.21 - Dados de Entrada.....	86
Figura 3.22 - Propriedades Geométricas da Seção Transversal.....	87
Figura 3.23 – Esforços críticos elásticos.....	87
Figura 3.24 - Cálculo Detalhado de M_{xRd}	88
Figura 3.25 - Cálculo Detalhado de V_{yRd}	88
Figura 3.26 - Dados de Entrada.....	89
Figura 3.27 - Propriedades Geométricas da Seção Transversal.....	90
Figura 3.28 – Esforços críticos elásticos.....	90
Figura 3.29 - Cálculo Detalhado – N_{cRd}	91
Figura 3.30 - Cálculo Detalhado - M_{xRd}	92
Figura 3.31 - Cálculo Detalhado – V_{yRd}	92
Figura 3.32 - Dados de Entrada.....	93
Figura 3.33 - Propriedades Geométricas da Seção Transversal.....	94
Figura 3.34 – Esforços críticos elásticos.....	94
Figura 3.35 - Cálculo Detalhado.....	95

Figura 4.1 – Gráfico da força axial de compressão resistente de cálculo em função do comprimento do perfil Ue 90x40x12x0,80 com a presença de furos oblongos	96
Figura 4.2 – Redução percentual da força axial de compressão resistente de cálculo para a relação d_h/h variando de 0,10 a 0,50 em função do comprimento do perfil Ue 90x40x12x0,80 com a presença de furos oblongos	98
Figura 4.3 – Variação da redução percentual em fundação da relação d_h/h , para os comprimentos do perfil Ue 90x4x12x0,80 variando de 50 cm a 400 cm.....	98
Figura 4.4 – Gráfico da força distribuída de cálculo que pode ser aplicada em uma barra em flexão com seção Ue 90x40x12x0,80 e a presença de furos oblongos	101
Figura 4.5 – Comparação entre os coeficientes de redução q_s para furos circulares e não circulares na alma de um perfil Ue 90x40x12x0,80.....	104
Figura 4.6 – Coeficientes de redução q_s para furos circulares na alma de perfis Ue 90x40x12	104
Figura 4.7 – Coeficientes de redução q_s para furos circulares na alma de perfis Ue 140x40x12	105
Figura 4.8 – Coeficientes de redução q_s para furos circulares na alma de perfis Ue 200x40x12	105
Figura 4.9 - Barras submetidas à força axial de compressão: Perfil Ue 90x40x12x0,80; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 2$	107
Figura 4.10 - Barras submetidas à força axial de compressão: Perfil Ue 90x40x12x0,95; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 2$	107
Figura 4.11 - Barras submetidas à força axial de compressão: Perfil Ue 90x40x12x1,25; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 2$	108
Figura 4.12 - Barras submetidas à força axial de compressão: Perfil Ue 140x40x12x0,80; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 2$	108
Figura 4.13 - Barras submetidas à força axial de compressão: Perfil Ue 140x40x12x0,95; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 2$	109
Figura 4.14 - Barras submetidas à força axial de compressão: Perfil Ue 140x40x12x1,25; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 2$	109

Figura 4.15 - Barras submetidas à força axial de compressão: Perfil Ue 200x40x12x0,80; $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 2$	110
Figura 4.16 - Barras submetidas à força axial de compressão: Perfil Ue 200x40x12x0,95; $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 2$	110
Figura 4.17 - Barras submetidas à força axial de compressão: Perfil Ue 200x40x12x1,25; $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 2$	111
Figura 4.18 - Barras submetidas à força axial de compressão: Perfil Ue 90x40x12x0,80; $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 3$	111
Figura 4.19 - Barras submetidas à força axial de compressão: Perfil Ue 90x40x12x0,95; $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 3$	112
Figura 4.20 - Barras submetidas à força axial de compressão: Perfil Ue 90x40x12x1,25; $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 3$	112
Figura 4.21 - Barras submetidas à força axial de compressão: Perfil Ue 140x40x12x0,80; $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 3$	113
Figura 4.22 - Barras submetidas à força axial de compressão: Perfil Ue 140x40x12x0,95; $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 3$	113
Figura 4.23 - Barras submetidas à força axial de compressão: Perfil Ue 140x40x12x1,25; $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 3$	114
Figura 4.24 - Barras submetidas à força axial de compressão: Perfil Ue 200x40x12x0,80; $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 3$	114
Figura 4.25 - Barras submetidas à força axial de compressão: Perfil Ue 200x40x12x0,95; $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 3$	115
Figura 4.26 - Barras submetidas à força axial de compressão: Perfil Ue 200x40x12x1,25; $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 3$	115
Figura 4.27 - Barras submetidas à flexão simples: Perfil Ue 90x40x12x0,80; $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 2$	117
Figura 4.28 - Barras submetidas à flexão simples: Perfil Ue 90x40x12x0,95; $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 2$	118
Figura 4.29 - Barras submetidas à flexão simples: Perfil Ue 90x40x12x1,25; $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 2$	118

Figura 4.30 - Barras submetidas à flexão simples: Perfil Ue 140x40x12x0,80; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 2$	119
Figura 4.31 - Barras submetidas à flexão simples: Perfil Ue 140x40x12x0,95; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 2$	119
Figura 4.32 - Barras submetidas à flexão simples: Perfil Ue 140x40x12x1,25; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 2$	120
Figura 4.33 - Barras submetidas à flexão simples: Perfil Ue 200x40x12x1,25; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 2$	120
Figura 4.34 - Barras submetidas à flexão simples: Perfil Ue 90x40x12x0,80; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 3$	121
Figura 4.35 - Barras submetidas à flexão simples: Perfil Ue 90x40x12x0,95; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 3$	121
Figura 4.36 - Barras submetidas à flexão simples: Perfil Ue 90x40x12x1,25; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 3$	122
Figura 4.37 - Barras submetidas à flexão simples: Perfil Ue 140x40x12x0,80; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 3$	122
Figura 4.38 - Barras submetidas à flexão simples: Perfil Ue 140x40x12x0,95; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 3$	123
Figura 4.39 - Barras submetidas à flexão simples: Perfil Ue 140x40x12x1,25; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 3$	123
Figura 4.40 - Barras submetidas à flexão simples: Perfil Ue 200x40x12x1,25; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 3$	124
Figura 4.41 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 90x40x12x0,80; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 2$ – Sem furos.....	126
Figura 4.42 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 90x40x12x0,80; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 2$ – $d_h/h=0,25$	127
Figura 4.43 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 90x40x12x0,80; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 2$ – $d_h/h=0,50$	127
Figura 4.44 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 90x40x12x0,95; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 2$ – Sem furos.....	128

Figura 4.45 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 90x40x12x0,95; $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 2 - d_h/h=0,25$	128
Figura 4.46 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 90x40x12x0,95; $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 2 - d_h/h=0,50$	129
Figura 4.47 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 90x40x12x1,25; $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 2 -$ Sem furos.....	129
Figura 4.48 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 90x40x12x1,25; $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 2 - d_h/h=0,25$	130
Figura 4.49 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 90x40x12x1,25; $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 2 - d_h/h=0,50$	130
Figura 4.50 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 140x40x12x0,80; $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 2 -$ Sem furos.....	131
Figura 4.51 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 140x40x12x0,80; $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 2 - d_h/h=0,225$	131
Figura 4.52 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 140x40x12x0,80; $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 2 - d_h/h=0,45$	132
Figura 4.53 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 140x40x12x0,95; $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 2 -$ Sem furos.....	132
Figura 4.54 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 140x40x12x0,95; $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 2 - d_h/h=0,225$	133
Figura 4.55 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 140x40x12x0,95; $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 2 - d_h/h=0,45$	133
Figura 4.56 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 140x40x12x1,25; $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 2 -$ Sem furos.....	134
Figura 4.57 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 140x40x12x1,25; $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 2 - d_h/h=0,225$	134
Figura 4.58 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 140x40x12x1,25; $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 2 - d_h/h=0,45$	135
Figura 4.59 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 200x40x12x1,25; $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 2 -$ Sem furos.....	135

Figura 4.60 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 200x40x12x1,25; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 2 - d_h/h=0,15$	136
Figura 4.61 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 200x40x12x1,25; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 2 - d_h/h=0,30$	136
Figura 4.62 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 90x40x12x0,80; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 3 -$ Sem furos.....	137
Figura 4.63 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 90x40x12x0,80; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 3 - d_h/h=0,25$	137
Figura 4.64 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 90x40x12x0,80; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 3 - d_h/h=0,50$	138
Figura 4.65 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 90x40x12x0,95; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 3 -$ Sem furo	138
Figura 4.66 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 90x40x12x0,95; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 3 - d_h/h=0,25$	139
Figura 4.67 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 90x40x12x0,95; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 3 - d_h/h=0,50$	139
Figura 4.68 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 90x40x12x1,25; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 3 -$ Sem furos.....	140
Figura 4.69 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 90x40x12x1,25; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 3 - d_h/h=0,25$	140
Figura 4.70–Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 90x40x12x1,25; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 3 - d_h/h=0,50$	141
Figura 4.71–Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 140x40x12x0,80; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 3 -$ Sem furos.....	141
Figura 4.72–Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 140x40x12x0,80; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 3 - d_h/h=0,225$	142
Figura 4.73–Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 140x40x12x0,80; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 3 - d_h/h=0,45$	142
Figura 4.74–Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 140x40x12x0,95; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 3 -$ Sem furos.....	143

Figura 4.75–Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 140x40x12x0,95; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 3$ –.....	143
Figura 4.76–Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 140x40x12x0,95; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 3$ – $d_h/h=0,45$	144
Figura 4.77–Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 140x40x12x1,25; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 3$ – Sem furos.....	144
Figura 4.78–Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 140x40x12x1,25; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 3$ – $d_h/h=0,225$	145
Figura 4.79–Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 140x40x12x1,25; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 3$ – $d_h/h=0,45$	145
Figura 4.80–Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 200x40x12x1,25; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 3$ – Sem furos.....	146
Figura 4.81–Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 200x40x12x1,25; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 3$ – $d_h/h=0,15$	146
Figura 4.82–Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 200x40x12x1,25; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 3$ – $d_h/h=0,30$	147

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 – Resumo dos dados das seções transversais e do material (Moen & Schafer, 2008)	41
Tabela 2-2 – Força axial de flambagem elástica dos modelos e influência do furos na flambagem elástica (Moen & Schafer, 2008).....	41
Tabela 2-3 – Força axial de compressão resistente dos modelos (Moen & Schafer, 2008).....	42
Tabela 2-4 – Resumo dos dados das seções transversais (Moen et al., 2013).....	45
Tabela 2-5 – Locação dos furos (Moen et al., 2013).....	46
Tabela 2-6 – Momento fletor de flambagem local elástica dos modelos e influência do furos na flambagem elástica (Moen et al., 2013).....	46
Tabela 2-7 – Momento fletor de flambagem distorcional elástica dos modelos e influência do furos na flambagem elástica (Moen et al., 2013)	47
Tabela 2-8 – Momento fletor resistente dos modelos (Moen et al., 2013).....	47
Tabela 2-9 – Comparação das disposições contrutivas da ABNT NBR 15253:2013 e AISI S100-16 para execução de furos em perfis.....	52
Tabela 2-10 - Relações h/t para os perfis usualmente adotados no sistema LSF	52
Tabela 2-11 - Comparação do MRD aplicado à barras em compressão apresentados pela AISI S100-16 (sem furos), AISI S100-16 (com furos) e Moen e Schafer (2011)	54
Tabela 2-12 - Comparação do MRD aplicado à barras em flexão apresentados pela AISI S100-16 (sem furos), AISI S100-16 (com furos) e Moen et al (2013).....	56
Tabela 2-13 – Propriedades médias da seção transversal para furos uniformemente distribuidos, AISI S100-16.....	57
Tabela 2-14 – Comparação das disposições construtivas da AISI S100-16 e Uzzaman et al (2012)	59
Tabela 3-1 – Resistência ao escoamento do aço e dimensões das seções ensaiadas – Moen et al (2013).....	80

Tabela 3-2 – Cálculo do momento fletor resistente nominal pelo MRD – Moen et al (2013).	80
Tabela 3-3 – Cálculo do momento fletor resistente de cálculo pelo aplicativo desenvolvido .	80
Tabela 3-4 – Resistência ao escoamento do aço e dimensões das seções ensaiadas – Moen e Schafer (2008)	81
Tabela 3-5 – Cálculo da força axial de compressão resistente nominal pelo MRD.....	82
Tabela 3-6 – Cálculo da força axial de compressão resistente nominal pelo aplicativo desenvolvido.....	82
Tabela 4-1 – Percentual de redução da força axial de compressão resistente para o perfil Ue 90x40x12x0,80 com furos	97
Tabela 4-2 – Porcentagem máxima de redução da força axial de compressão resistente para perfis usualmente adotados no sistema LSF.....	99
Tabela 4-3 – Percentual de redução da força distribuida que pode ser aplicada ao perfil Ue 90x40x12x0,80 com a presença de furos oblongos	102

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras romanas maiúsculas

A – Área bruta da seção transversal da barra;

A_{ef} – área efetiva da seção transversal da barra;

A_n – área líquida da seção transversal da barra na região de ligação;

A_{no} – área líquida da seção transversal da barra fora da região de ligação;

C_b – fator de modificação para diagrama de momento fletor não uniforme;

C_t – coeficiente de redução, usado no cálculo da área líquida efetiva;

D – largura nominal do enrijecedor de borda;

E – módulo de elasticidade do aço, adotado igual 200 000 MPa;

G – módulo de elasticidade transversal do aço, adotado igual a 77 000 Mpa;

I_a – Momento de inércia de referência do enrijecedor de borda

I_{net} – Momento de inércia da seção líquida;

I_s – Momento de inércia da seção bruta do enrijecedor de borda, em torno do seu próprio eixo baricêntrico paralelo ao elemento a ser enrijecido;

$I_x; I_y$ - Momento de inércia da seção bruta em relação aos eixos principais x e y , respectivamente;

J – constante de torção;

$K_x L_x$ – comprimento efetivo de flambagem global em relação ao eixo x ;

$K_y L_y$ – comprimento efetivo de flambagem global em relação ao eixo y ;

$K_z L_z$ – comprimento efetivo de flambagem global em relação ao eixo z ;

L – comprimento da barra; vão teórico entre apoios ou o dobro do comprimento teórico do balanço;

L_h – comprimento do furo – AISI S100-16;

M_{d2} – momento fletor de flambagem distorcional elástica de referência para o dimensionamento de perfis com furos – AISI S100-16;

M_{dist} – momento fletor de flambagem distorcional elástica;

M_{crd} – momento fletor de flambagem distorcional elástica – AISI S100-16;

M_{cre} – momento fletor de flambagem global elástica – AISI S100-16

M_{crl} – momento fletor de flambagem local elástica – AISI S100-16

M_e – momento fletor de flambagem global elástica (FLT – Flambagem lateral com torção);

M_{nd} – valor característico do momento fletor resistente, associado à flambagem distorcional - AISI S100-16;

M_{ne} – valor característico do momento fletor resistente, associado à flambagem global AISI S100-16;

M_{nl} – valor característico do momento fletor resistente, associado à flambagem local - AISI S100-16;

M_{Rd} – momento fletor resistente de cálculo;

M_{Re} – valor característico do momento fletor resistente, associado à flambagem global;

M_{Rk} – valor característico do momento fletor resistente;

M_{Rl} – valor característico do momento fletor resistente, associado à flambagem local;

M_{Rdist} – valor característico do momento fletor resistente, associado à flambagem distorcional;

$M_{x,Rd}$; $M_{y,Rd}$ – momento fletor resistente de cálculo em relação aos eixos x e y, respectivamente;

M_{Sd} – momento fletor solicitante de cálculo;

$M_{x,Sd}$; $M_{y,Sd}$ – momento fletor solicitante de cálculo em relação aos eixos x e y, respectivamente;

N – largura do apoio, usado no cálculo da força resistente ao enrugamento da alma (*web crippling*) – AISI S100-16;

$N_{c,Rd}$ – força axial de compressão resistente de cálculo;

$N_{c,Re}$ – valor característico da força axial de compressão resistente, associado à flambagem global;

$N_{c,Rk}$ – valor característico da força axial de compressão resistente;

$N_{c,RI}$ – valor característico da força axial de compressão resistente, associado à flambagem local;

$N_{c,Rdist}$ – valor característico da força axial de compressão resistente, associado à flambagem distorcional;

$N_{c,Sd}$ – força axial de compressão solicitante de cálculo;

N_{dist} – força axial de flambagem distorcional elástica;

N_e – força axial de flambagem global elástica;

N_{ex} ; N_{ey} – forças axiais de flambagem global elástica por flexão em relação aos eixos x e y, respectivamente;

N_{ez} - força axial de flambagem global elástica por torção;

N_{exz} - força axial de flambagem global elástica por flexo-torção;

N_l – força axial de flambagem local elástica;

$N_{t,Rd}$ – força axial de tração resistente de cálculo;

$N_{t,Sd}$ – força axial de tração solicitante de cálculo;

P_{crd} – força axial de flambagem distorcional elástica – AISI S100-16;

P_{cre} – força axial de flambagem global elástica – AISI S100-16;

P_{crl} – força axial de flambagem local elástica – AISI S100-16;

P_{d2} – força axial de flambagem distorcional elástica de referência para o dimensionamento de perfis com furos – AISI S100-16;

P_{nd} – valor característico da força axial de compressão resistente, associado à flambagem distorcional – AISI S100-16;

P_{ne} – valor característico da força axial de compressão resistente, associado à flambagem global – AISI S100-16;

P_{nl} – valor característico da força axial de compressão resistente, associado à flambagem local – AISI S100-16;

R_c – fator de redução usado no cálculo da força resistente ao enrugamento da alma (*web crippling*) de perfis Ue com furos na alma – AISI S100-16;

R_p – fator de redução usado no cálculo da força resistente ao enrugamento da alma (*web crippling*) de perfis Ue com furos na alma – Uzzaman *et al.* (2012);

V_{Rd} – força cortante resistente de cálculo;

V_{Sd} – força cortante solicitante de cálculo;

W – módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra extrema que atinge o escoamento;

W_c – módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra extrema comprimida;

$W_{c,ef}$ – módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra extrema comprimida;

W_{ef} – módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra extrema que atinge o escoamento;

Letras romanas minúsculas

a – diâmetro do furo – Uzzaman *et al.* (2012);

b – largura do elemento, é a dimensão plana no elemento sem incluir dobras;

b_c – largura do trecho comprimido de elementos sob gradiente de tensões normais;

b_{ef} – largura efetiva;

b_f – largura nominal da mesa;

b_w – largura nominal da alma;

c – fator usado no cálculo da força cortante resistente de perfis Ue com furos na alma – AISI S100-16;

d – altura da seção;

d_{ef} – largura efetiva do enrijecedor de borda;

d_h – diâmetro do furo;

d_s – largura efetiva reduzida do enrijecedor de borda;

f_u – resistência à ruptura do aço na tração;

f_y – resistência ao escoamento do aço;

h – largura da alma (altura da parte plana da alma);

k – coeficiente de flambagem local do elemento;

k_v – coeficiente de flambagem local por cisalhamento;

n – expoente empregado no cálculo do coeficiente de flambagem local k ;

q_s – fator de redução usado no cálculo da força cortante resistente de perfis Ue com furos na alma – AISI S100-16;

q_{sd} – força uniformemente distribuída solicitante de cálculo;

r – raio de giração da seção bruta;

r_o – raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção;

r_x – raio de giração da seção bruta em relação ao eixo principal x ;

r_y – raio de giração da seção bruta em relação ao eixo principal y ;

s – distância entre centro de furos – AISI S100-16;

s_{end} – distância entre centro de furo e final da barra – AISI S100-16;

t – espessura da chapa ou do elemento;

t_n – espessura nominal da chapa, igual à soma das espessuras da chapa de aço e do revestimento metálico ($t_n = t + t_r$). Para chapas de aço sem revestimento, $t_n = t$;

t_r – espessura do revestimento metálico; espessura da alma reduzida para simulação da presença do furo na alma;

w – largura da alma (altura da parte plana da alma) – AISI S100-16;

x_o – distância do centro de torção ao centroide, na direção do eixo x ;

y_o – distância do centro de torção ao centroide, na direção do eixo y ;

Letras Gregas

β – coeficiente de dilatação térmica, adotado igual a $1,2 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$;

δ – deslocamento, flecha em geral;

γ – coeficiente de ponderação das ações ou das resistências, em geral;

λ_c – índice de esbeltez reduzido associado à flambagem global – AISI S100-12;

λ_d – índice de esbeltez reduzido associado à flambagem distorcional – AISI S100-12;

λ_{d1} – índice de esbeltez reduzido associado à flambagem distorcional de referência para o dimensionamento de perfis com furos – AISI S100-12;

λ_{d2} – índice de esbeltez reduzido associado à flambagem distorcional de referência para o dimensionamento de perfis com furos – AISI S100-12;

λ_{dist} – índice de esbeltez reduzido associado à flambagem distorcional;

λ_l – índice de esbeltez reduzido associado à flambagem local;

λ_p – índice de esbeltez reduzido do elemento ou da seção completa;

λ_{p0} – valor de referência do índice de esbeltez reduzido do elemento;

λ_0 – índice de esbeltez reduzido associado à flambagem global;

ν – coeficiente de Poisson do aço, adotado igual a 0,30;

ρ – massa específica do aço, adotada igual a $7\,850 \text{ kg/m}^3$;

χ – fator de redução da força axial de compressão resistente, associado à flambagem global;

χ_{dist} – fator de redução do esforço resistente, associado à flambagem distorcional;

χ_{FLT} – fator de redução do momento fletor resistente, associado à flambagem lateral com torção;

σ – tensão normal, em geral;

σ_{cr} – tensão convencional de flambagem elástica da chapa;

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;

AISI – *American Iron and Steel Institute*;

AS / NZS – *Australia Standards / New Zeland Standards*;

CFD – *Cold Formed Design*

CUFSM – *Cornell University Finite Strip Method*

DEES - Departamento de Engenharia de Estruturas;

EOF – (Condição de Apoio) *Exterior-one-flange*;

ETF – (Condição de Apoio) *Exterior-two-flange*;

IOF – (Condição de Apoio) *Interior-one-flange*;

ITF – (Condição de Apoio) *Interior-two-flange*;

OSB – *Oriented Strand Board*;

PFF – Perfil Formado a Frio;

POO – Programação Orientada a Objetos;

LSF – *Light Steel Framing*;

MRD – Método da Resistência Direta;

MLE – Método da Largura Efetiva;

MSE – Método da Seção Efetiva;

NBR - Norma Brasileira;

UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais;

ZAR – Zinado de Alta Resistência;

1

1. Introdução

1.1 Considerações Gerais

O sistema construtivo *Light Steel Framing* (LSF) tem seu uso crescente em edificações residenciais no Brasil. Ele é composto por subsistemas estruturais trabalhando de forma conjunta, com uma concepção racional para fabricação, transporte e montagem. Os montantes são compostos por perfis U enrijecidos (Ue) equidistantes de 400 mm ou 600 mm. Neles podem ser fixadas placas que têm a função de vedar a estrutura e podem servir para a composição de painéis de contraventamento.

O sistema LSF apresenta uma série de vantagens inerentes às estruturas metálicas e pode tornar-se mais rápido e com menor custo relativo que o custo de estruturas compostas por outros perfis quando aplicado à construção de edifícios residenciais (RODRIGUES, 2006). A Figura 1.1 apresenta um exemplo da estrutura de residência construída em LSF.



Figura 1.1 – Estrutura de uma residência em *Light Steel Framing* (CBCA, 2006)

Os perfis formados a frio (PFF) adotados na constituição do reticulado metálico do sistema LSF usualmente recebem furos para a passagem e acomodação de tubulações elétricas, hidráulicas, de gás, etc., como os mostrados na Figura 1.2. A presença de furos em perfis é comum, inclusive para conexões com elementos construtivos e estruturais. Tais furos usualmente são feitos na alma dos perfis por punção ou com a utilização de brocas, e podem alterar a rigidez elástica e a força resistente das barras (MOEN et al, 2008). Perfurações feitas em fábrica com a finalidade de passagem e acomodação de tubulação são chamadas de “Punch”.



Figura 1.2 – Furos para a passagem de tubulações elétricas

Quando furos são feitos na alma de perfis formados a frio, a rigidez rotacional fornecida pela alma à mesa é reduzida, de modo que força axial de flambagem distorcional elástica e momento fletor de flambagem distorcional elástica diminuam (MOEN E SCHAFER, 2009).

Apesar das alterações citadas anteriormente, a norma de “dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio”, ABNT NBR 14762:2010, só contempla em seu escopo a ocorrência de furos nos capítulos de barras submetidas à força axial de tração e de ligações parafusadas. A norma norte americana *American Iron and Steel Institute (AISI) S100* 2016, apresenta recomendações e fórmulas que levam em conta a presença de furos circulares e não circulares nos perfis, que não sejam somente para a passagem de parafusos nos casos anteriormente citados.

Para perfurações feitas em obra, o Manual do Centro Brasileiro de Construções em Aço (CBCA): Arquitetura (Santiago et al. 2012), recomenda que sejam feitos reforços nestes trechos. Para tanto, deve-se adotar uma chapa que será parafusada na alma do perfil que recebeu o furo. A Figura 1.3 apresenta um esboço do procedimento de reforço.

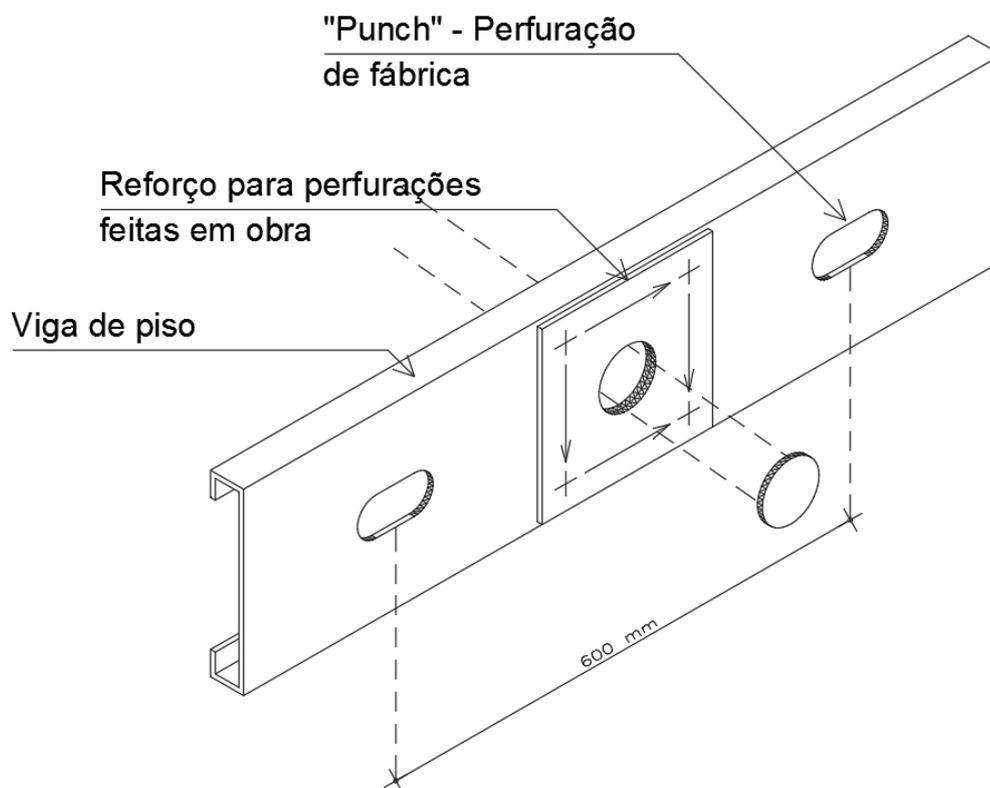


Figura 1.3 – Reforço para perfurações feitas em obra (Fonte: Manual CBCA – Arquitetura)

1.2 Objetivos

O objetivo do presente estudo é investigar o comportamento e a capacidade resistente de perfis formados a frio com a presença de furos, uma vez que a execução de furos nos perfis estruturais é usual no sistema LSF e pode resultar na redução da capacidade resistente dos perfis.

1.3 Metodologia

Para desenvolvimento deste trabalho, foi realizada uma revisão bibliográfica com base em normas nacionais e estrangeiras e artigos que tratam do assunto.

Com base no resultado obtido são apresentados gráficos de pré-dimensionamento para os perfis com furos usualmente adotados no sistema LSF. Também foi desenvolvido um

aplicativo em Java para o dimensionamento de perfis formados a frio, com ou sem a existência de furos.

As seguintes etapas foram seguidas para elaboração deste trabalho:

- a) Realização de uma revisão bibliográfica para verificar os estudos teóricos e experimentais já realizados sobre o comportamento de perfis formados a frio com a existência de furos visando comparação posterior com resultados teóricos;
- b) Com base na revisão bibliográfica, análise do comportamento dos perfis formados a frio com a presença de furos, no que tange barras tracionadas, comprimidas, fletidas e sob a ação de esforço cortante, bem como os seus respectivos modos de falha;
- c) Apresentação um estudo comparativo entre as especificações de normas e artigos apresentados anteriormente;
- d) Apresentação gráficos de pré-dimensionamento para os perfis usuais do sistema LSF com a presença de furos;
- e) Apresentação dos métodos de dimensionamento constantes da NBR 14762:2010 que serão implementadas no *software*;
- f) Apresentação dos princípios básicos de programação em Java, abordando os principais conceitos de uma linguagem orientada a objetos e as características e funcionalidades do compilador Eclipse Kepler;
- g) Desenvolvimento de um aplicativo em Java para o dimensionamento de perfis formados a frio considerando esforços solicitantes axiais de tração e de compressão, momentos fletores, forças cortantes, esforços combinados com a existência de furos nos perfis.

1.4 Justificativa

1.4.1 Estudo do comportamento de perfis formados a frio com a presença de furos

A utilização do sistema construtivo LSF é muito comum nos Estados Unidos, Canadá e diversos países da Europa e tem se desenvolvido nacionalmente nos últimos anos. No Brasil, as normas que tratam dos perfis formados a frio são a NBR 14762:2010, que aborda os princípios para dimensionamento; a ABNT NBR 6355:2012, que trata da padronização dos perfis e apresenta a metodologia para cálculo das propriedades das seções transversais, inspeção e aceitação dos perfis, e a ABNT NBR 15253:2014 – “Perfis de Aço Formados a

Frio, com Revestimento Metálico, para Painéis Reticulados em Edificações” padroniza os perfis a serem aplicados no método construtivo LSF.

A execução de furos na alma dos perfis é muito comum para a passagem de tubulações elétricas, hidráulicas, de gás e também para fixação de elementos estruturais, como o sistema Frame Master. A presença de furo altera o comportamento elástico do perfil e pode reduzir a força resistente do mesmo.

Entretanto, a NBR 14762:2010 não sugere o dimensionamento de perfis formados a frio com a existência de furos, com exceção dos capítulos que tratam de barras submetidas à força axial de tração e de ligações parafusadas. De modo que, para dimensionar barras em tais situações, é necessário lançar mão da norma norte americana AISI S100-16.

Desta forma, propõe-se o estudo do comportamento de barras com furos abordando os métodos propostos por normas internacionais e estudos realizados com barras em situação semelhante.

1.4.2 Desenvolvimento do *software*

RODRIGUES (1993) ressalta o fato de que ainda existem muitos projetistas que utilizam as prescrições da projeto aplicadas nos perfis soldados e laminados, ou seja, a ABNT NBR 8800:2008 – Projeto de Estrutura de Aço e de Estrutura Mista de Aço e Concreto de Edifícios para o dimensionamento de estruturas compostas de perfis formados a frio, o que é incorreto, visto que estes apresentam comportamento muito diferenciado.

Os perfis obtidos por conformação a frio podem sofrer flambagem local em seus elementos, o que nem sempre representa um estado-limite último, e acarreta apenas em uma redução de sua rigidez. Além disso, os perfis formados a frio podem também estar sujeitos à flambagem distorcional, à flambagem global (por flexão, torção ou flexo-torção) e, geralmente, à interação entre estes modos.

Devido à dificuldade do dimensionamento de perfis formados a frio, que pode envolver processos iterativos e pouca disponibilidade de *softwares* no mercado que façam o dimensionamento com base na NBR 14762:2010, propõe-se a elaboração de um aplicativo para tal, que esteja apto ao dimensionamento com as principais seções comercialmente adotadas.

1.5 Desenvolvimento da dissertação

O primeiro capítulo deste trabalho apresenta uma breve introdução do assunto abordado, onde são descritas as principais características do sistema construtivo LSF, porque geralmente são necessários a execução de furos nos perfis e suas consequências. Além disto, apresenta os objetivos e a metodologia do trabalho e suas justificativas.

O segundo capítulo deste trabalho apresenta uma revisão bibliográfica, onde são apresentadas as principais normas que tratam do dimensionamento dos perfis formados a frio, além das preconizações da AISI S100-16 para o dimensionamento de perfis com furos. Também são apresentados os principais estudos realizados em perfis formados a frio com a presença de furos, estes tratam do comportamento estrutural de barras em flexão e barras em compressão, da aplicação do método da resistência direta em perfis com furos, da força resistente ao enrugamento da alma (*web crippling*) em perfis com furos, dentre outros. Por fim, é feita uma análise crítica e comparativa das referências bibliográficas adotadas.

O terceiro capítulo trata da elaboração do *software* para dimensionamento de perfis formados a frio, conforme ABNT NBR 14762:2010. Os princípios básicos do Java e da Linguagem Orientada a Objetos são apresentados nesta seção. Além disso, é apresentado um breve resumo da estruturação básica do aplicativo CFD e das funcionalidades das classes e pacotes que o compõem. Ao final do capítulo, o aplicativo é testado e validado.

O quarto capítulo apresenta estudos sobre o comportamento de barras submetidas a compressão centrada e flexão com a presença de furos. Adicionalmente, são apresentados gráficos de pré-dimensionamento dos perfis usualmente adotados no sistema LSF com a presença de furos. São apresentados gráficos para barras submetidas à força axial de compressão, barras submetidas à flexão na maior inércia e barras submetidas à flexo-compressão.

O quinto capítulo apresenta as considerações finais para o dimensionamento de perfis formados a frio com a presença de furos. Este capítulo também apresenta recomendações e sugestões para estudos posteriores e para futuras melhorias do *software* desenvolvido.

2

2. Revisão bibliográfica

2.1 Normas brasileiras

Atualmente, no Brasil, o dimensionamento de perfis formados a frio deve ser realizado com base na ABNT NBR 14762:2010. Esta norma apresenta os materiais que podem ser adotados na fabricação dos perfis, trata da segurança estrutural, dos estados-limites aplicáveis, das ações, da análise estrutural e das condições específicas para o dimensionamento de barras e ligações.

A ABNT NBR 14323:2013, por sua vez, trata do dimensionamento de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio. Esta norma foi usada no desenvolvimento do aplicativo para determinação dos coeficientes de redução para o dimensionamento de estruturas em temperaturas elevadas, visando implementação futura em tais situações.

A norma NBR 14762:2010 tem base nas principais normas internacionais que tratam do assunto, dentre as quais podemos citar a norma norte americana AISI S100-2007, a norma europeia Eurocode EN 1993-1-3:2006 e a norma australiana AS/NZS 4600:2005.

A norma NBR 14762:2010 apresenta três métodos de dimensionamento, sendo eles o Método da Largura Efetiva (MLE), o Método da Seção Efetiva (MSE) e o Método da Resistência Direta (MRD). Todos estes são apresentados ao longo da dissertação, sendo que o MLE e o MRD foram implementados no *software* CFD.

2.1.1 Método da Largura Efetiva

O comportamento pós-crítico de elementos esbeltos é regido por equações diferenciais não lineares, de complexo tratamento matemático. Deve-se, portanto, lançar mão de estudos numéricos e computacionais para solução de tais problemas. Para o tratamento de chapas esbeltas perfeitas em regime pós-crítico, von Karman (1932) propôs uma redução na rigidez

da chapa, que tinha inicialmente largura “b”, substituindo esta largura por uma largura efetiva “b_e” menor do que “b”.

Winter (1947) adaptou a formulação proposta por von Karman e chegou a bons resultados para obtenção de largura efetiva de chapas imperfeitas no estado-limite último de escoamento do material. A ABNT NBR 14762:2010 adota a formulação de Winter, que é apresentada da seguinte maneira:

$$\frac{b_{ef}}{b} = \frac{1}{\lambda_p} \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p}\right) \leq 1,00 \quad (2.1)$$

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{\sigma}{\sigma_{cr}}} = \frac{b/t}{0,95 \sqrt{\frac{kE}{\sigma}}} \quad (2.2)$$

$$\sigma_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)(b/t)^2} \quad (2.3)$$

Sendo E o módulo de elasticidade longitudinal do aço, adotado igual a 200 000 MPa; ν o coeficiente de Poisson do aço, adotado igual a 0,30; σ_{cr} a tensão convencional de flambagem elástica de chapa; λ_p o índice de esbeltez reduzido do elemento; b a largura do elemento; t a espessura do elemento, e σ a tensão normal aplicada à chapa.

Para $\lambda_p \leq 0,673$, tem-se que a largura efetiva é a própria largura do elemento; “k” é o coeficiente de flambagem local do elemento, que depende de sua condição de contorno e pode ser calculado pela Tabela 5 da ABNT NBR 14762:2010 para elementos vinculado-vinculado e pela Tabela 6 da mesma norma para elementos vinculado-livre.

Para que se obtenha as propriedades efetivas de uma seção transversal, é necessário calcular a largura efetiva de cada elemento e em seguida fazer uma composição de suas propriedades. Para o caso de um perfil U, por exemplo, submetido à compressão centrada, deve-se calcular a largura efetiva de suas mesas e a largura efetiva de sua alma separadamente. Em seguida, somar estes valores à largura dos elementos curvos, que não estão sujeitos à flambagem local, e multiplicar pela espessura da chapa, para obter então sua área efetiva.

2.1.2 Método da Seção Efetiva

O Método da Seção Efetiva é apresentado na ABNT NBR 14762:2010 e pode ser usado em substituição ao Método da Largura Efetiva para seções transversais genéricas. Entretanto não se aplica aos modos de falha associados à flambagem distorcional. Sua principal vantagem

perante o MLE é fornecer diretamente as propriedades efetivas da seção, tais como área efetiva ou inércia efetiva. Para o caso de barras submetidas à força axial de compressão, o cálculo da área efetiva (A_{ef}) usado no dimensionamento pode ser feito da seguinte maneira:

$$A_{ef} = A, \quad \text{se } \lambda_p \leq 0,776 \quad (2.4)$$

$$A_{ef} = A \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_p^{0,80}} \right) \frac{1}{\lambda_p^{0,80}}, \quad \text{se } \lambda_p > 0,776 \quad (2.5)$$

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{\chi A f_y}{N_l}} \quad (2.6)$$

Sendo N_l a força axial de flambagem local elástica da barra, calculada com base na análise de estabilidade elástica ou conforme a fórmula apresenta no item 9.7.2 da ABNT NBR 14762:2010. Uma desvantagem do MSE é o fato de não identificar quais elementos do perfil estão sujeitos à flambagem local e ser limitado a algumas seções transversais.

2.1.3 Método da Resistência Direta

O Método da Resistência Direta é apresentado no Anexo C da ABNT NBR 14762:2010 e pode ser usado no dimensionamento de barras submetidas à compressão centrada e à flexão simples, em substituição ao Método da Largura Efetiva e ao Método da Seção Efetiva.

Para se usar o Método da Resistência Direta é necessário fazer uma análise geral da estabilidade elástica da barra, por meio de formulações ou utilizando algum *software* que se baseie na análise da teoria da estabilidade elástica, como o CUFSM, elaborado por Li e Schafer (2010a), por exemplo. O MRD fornece os valores característicos dos esforços resistentes da barra e também a inércia efetiva de seções submetidas à flexão, usada para cálculo dos deslocamentos.

2.1.4 Prescrições da ABNT NBR 14762:2010 para o dimensionamento de barras

Nas seções a seguir, são apresentadas as prescrições normativas na ABNT NBR 14762:2010 para o dimensionamento de perfis formados a frio. Tais prescrições foram implementadas no *software* desenvolvido para o dimensionamento de perfis sem furos.

Para o dimensionamento de perfis formados a frio com a presença de furos, será adotada a formulação presente na AISI S100-16, apresentada nas próximas seções deste trabalho.

2.1.5 Barras submetidas à força axial de tração

A seção 9.6 da ABNT NBR 14762:2010 apresenta as condições específicas para o dimensionamento de barras submetidas à força axial de tração. De acordo com a norma, deve ser atendida a seguinte condição:

$$N_{t,Sd} \leq N_{t,Rd} \quad (2.7)$$

Onde $N_{t,Sd}$ é a força axial de tração solicitante de cálculo e $N_{t,Rd}$ é a força axial de tração resistente de cálculo. Esta última é obtida tomando-se o menor dos valores considerando os estados-limites últimos de escoamento da seção bruta, ruptura da seção líquida fora da ligação e ruptura da seção líquida na região da ligação.

Para o escoamento da seção bruta, tem-se a seguinte força axial de tração resistente de cálculo:

$$N_{t,Rd} = Af_y/\gamma \quad (\gamma = 1,10) \quad (2.8)$$

Para a ruptura da seção líquida fora da região de ligação, tem-se a seguinte força axial de tração resistente de cálculo:

$$N_{t,Rd} = A_{n0}f_u/\gamma \quad (\gamma = 1,35) \quad (2.9)$$

Para o escoamento da seção líquida na região de ligação, tem-se a seguinte força axial de tração resistente de cálculo:

$$N_{t,Rd} = C_t A_n f_u / \gamma \quad (\gamma = 1,65) \quad (2.10)$$

Onde A é a área bruta da seção transversal da barra; A_{n0} é a área líquida da seção transversal da barra fora da região de ligação; A_n é a área líquida da seção transversal da barra na região de ligação; C_t é o coeficiente de redução da área líquida; f_y é a resistência ao escoamento do aço; f_u é a resistência à ruptura do aço na tração e γ é o coeficiente de ponderação de resistência.

A seção 9.6 da ABNT NBR 14762:2010 apresenta os procedimentos para obtenção dos valores de área líquida da seção transversal da barra fora da região de ligação, a área líquida da seção transversal da barra na região de ligação e o coeficiente de redução da área líquida.

A norma recomenda ainda que o índice de esbeltez das barras tracionadas não exceda 300. Para barras compostas, ou seja, aquelas constituídas por dois ou mais perfis, recomenda-se que a esbeltez de cada elemento isolado não supere 300.

2.1.6 Barras submetidas à força axial de compressão

A seção 9.7 da ABNT NBR 14762:2010 apresenta as condições específicas para o dimensionamento de barras submetidas à força axial de compressão. De acordo com a norma, deve ser atendida a seguinte condição:

$$N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd} \quad (2.11)$$

Onde $N_{c,Sd}$ é a força axial de compressão solicitante de cálculo e $N_{c,Rd}$ é a força axial de compressão resistente de cálculo. Esta é obtida tomando-se o menor dos valores considerando os estados-limites últimos de flambagem global por flexão, por torção ou flexo-torção e, separadamente, de flambagem distorcional.

A força axial de compressão resistente de cálculo para o estado-limite de flambagem global por flexão, torção ou flexo-torção é obtida por:

$$N_{c,Rd} = \chi A_{ef} f_y / \gamma \quad (\gamma = 1,20) \quad (2.12)$$

Onde A_{ef} é a área efetiva da seção, calculada conforme o método da largura efetiva ou conforme método da seção efetiva e χ é o fator de redução da força axial de compressão resistente, relacionado com a flambagem global. χ é calculado por:

$$\chi = 0,658^{\lambda_0^2} \quad \text{se } \lambda_0 \leq 1,5 \quad (2.13)$$

$$\chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2} \quad \text{se } \lambda_0 > 1,5 \quad (2.14)$$

λ_0 é o índice de esbeltez reduzido associado à flambagem global, calculado por:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Af_y}{N_e}} \quad (2.15)$$

Sendo N_e o menor dos valores calculado para a força axial de flambagem global elástica por flexão, torção ou flexo-torção. Para perfis duplamente simétricos N_e é dada pelo menor valor entre N_{ex} , N_{ey} e N_{ez} . As seções 9.7.2.1, 9.7.2.2 e 9.7.2.3 da ABNT NBR 14762:2010 apresentam como estes valores podem ser obtidos para perfis duplamente simétricos ou simétricos em relação a um ponto, monossimétricos e assimétricos, respectivamente.

A força axial de compressão resistente de cálculo para o estado-limite de flambagem distorcional é obtida por:

$$N_{c,Rd} = \chi_{dist} Af_y / \gamma \quad (\gamma = 1,20) \quad (2.16)$$

Onde A é a área bruta da seção e χ_{dist} é o fator de redução da força axial de compressão resistente, relacionado com a flambagem distorcional. Para obtenção de χ_{dist} é necessário calcular a força axial de flambagem distorcional elástica, N_{dist} , com base em uma análise de estabilidade elástica. Pode-se usar o *software* CUFSM para obtenção deste valor.

A norma preconiza que o índice de esbeltez das barras comprimidas não exceda 200. Para barras comprimidas compostas, o índice de esbeltez de cada perfil componente deve ser inferior:

- i) à metade do índice de esbeltez máximo do conjunto, quando se usa chapas espaçadoras; e
- ii) ao índice de esbeltez máximo do conjunto, para o caso de travejamento em treliças, sendo adicionalmente menor que 140.

2.1.7 Barras submetidas à flexão simples

Na seção 9.8, barras submetidas à flexão simples da NBR 14762:2010 são apresentadas as condições específicas para o dimensionamento de barras fletidas. De acordo com a norma, deve ser atendida a seguinte condição:

$$M_{Sd} \leq M_{Rd} \quad (2.17)$$

Onde M_{Sd} é o momento fletor solicitante de cálculo e M_{Rd} é o momento fletor resistente de cálculo. Este último é obtido tomando-se o menor dos valores considerando os estados-limites últimos de início de escoamento da seção efetiva, flambagem lateral com torção (FLT) e flambagem distorcional.

O momento fletor resistente de cálculo, para o estado-limite último de início escoamento da seção efetiva, é obtido por:

$$M_{Rd} = W_{ef} f_y / \gamma \quad (\gamma = 1,10) \quad (2.18)$$

Onde W_{ef} é o módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra que atinge o escoamento, calculado conforme o método da largura efetiva ou conforme método da seção efetiva.

O momento fletor resistente de cálculo, para o estado-limite último de flambagem lateral com torção, é obtido por:

$$M_{Rd} = \chi_{FLT} W_{c,ef} f_y / \gamma \quad (\gamma = 1,10) \quad (2.19)$$

Onde $W_{c,ef}$ é o módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra extrema comprimida, calculado com base no método da largura efetiva ou conforme método da seção efetiva, e χ_{FLT} é o fator de redução do momento fletor resistente, associado à flambagem lateral com torção, calculado por:

$$\chi_{FLT} = 1,00 \text{ se } \lambda_0 \leq 0,60 \quad (2.20)$$

$$\chi_{FLT} = 1,11(1 - 0,278\lambda_0^2) \text{ se } 0,60 < \lambda_0 < 1,336 \quad (2.21)$$

$$\chi_{FLT} = 1/\lambda_0^2 \text{ se } \lambda_0 \geq 1,336 \quad (2.22)$$

Sendo λ_0 o índice de esbeltez reduzido para flambagem lateral com torção, calculado por:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{W_c f_y}{M_e}} \quad (2.23)$$

Onde M_e é o momento fletor de flambagem lateral com torção em regime elástico. A na seção 9.8.2.2 da ABNT NBR 14762:2010 apresenta fórmulas para cálculo de M_e para cada tipo de seção transversal.

O momento fletor resistente de cálculo para o estado-limite último de flambagem distorcional, é obtido por:

$$M_{Rd} = \chi_{dist} W f_y / \gamma \quad (\gamma = 1,10) \quad (2.24)$$

Onde W é o módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra externa que atinge o escoamento e χ_{dist} é o fator de redução do momento fletor resistente, relacionado com a flambagem distorcional. Sendo χ_{dist} calculado por:

$$\chi_{dist} = 1,00 \text{ se } \lambda_{dist} \leq 0,673 \quad (2.25)$$

$$\chi_{dist} = (1 - 0,22/\lambda_{dist})/\lambda_{dist} \text{ se } \lambda_{dist} > 0,673 \quad (2.26)$$

λ_{dist} é o índice de esbeltez reduzido para flambagem distorcional, calculado por:

$$\lambda_{dist} = \sqrt{\frac{W f_y}{M_{dist}}} \quad (2.27)$$

Onde M_{dist} é o momento fletor de flambagem distorcional elástica, calculado com base em uma análise de estabilidade elástica. Pode-se usar o *software* CUFSM para obtenção deste valor.

2.1.8 Barras submetidas à força cortante

De acordo com a ABNT NBR 14762:2010 a força cortante resistente de cálculo V_{Rd} pode ser calculada por:

$$V_{Rd} = 0,60 f_y h t / \gamma \quad (\gamma = 1,10), \text{ para } \frac{h}{t} \leq 1,08 \sqrt{\frac{E k_v}{f_y}} \quad (2.28)$$

$$V_{Rd} = 0,65 t^2 \sqrt{k_v f_y E} / \gamma \quad (\gamma = 1,10), \text{ para } 1,08 \sqrt{\frac{E k_v}{f_y}} < \frac{h}{t} \leq 1,40 \sqrt{\frac{E k_v}{f_y}} \quad (2.29)$$

$$V_{Rd} = (0,905 E k_v t^3 / h) / \gamma \quad (\gamma = 1,10), \text{ para } \frac{h}{t} > 1,40 \sqrt{\frac{E k_v}{f_y}} \quad (2.30)$$

Onde t é a espessura da alma do perfil; h é a largura da parte plana da alma; E é o módulo de elasticidade longitudinal do material e k_v é um coeficiente de flambagem local por cisalhamento.

A norma ainda recomenda que para seções com duas ou mais almas, é importante fazer uma análise separada para cada alma, com cada elemento resistindo a sua parcela de força cortante.

2.1.9 Barras submetidas à força cortante e momento fletor

A ABNT NBR 14762:2010 recomenda que barras sem enrijecedores transversais sujeitas à força cortante e momento fletor, devem atender a seguinte expressão de interação:

$$(M_{Sd}/M_{Rd})^2 + (V_{Sd}/V_{Rd})^2 \leq 1,0 \quad (2.31)$$

Onde M_{Rd} é o momento fletor resistente de cálculo para o estado-limite de início de escoamento da seção transversal.

A norma também recomenda uma expressão de interação para barras com enrijecedores transversais, quando $(M_{Sd}/M_{Rd}) > 0,50$ e $(V_{Sd}/V_{Rd}) > 0,70$:

$$0,60(M_{Sd}/M_{Rd}) + (V_{Sd}/V_{Rd}) \leq 1,3 \quad (2.32)$$

2.1.10 Barras submetidas à flexão composta

A ABNT NBR 14762:2010 recomenda que barras sujeitas à flexão composta, devem atender a seguinte expressão de interação:

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \leq 1,0 \quad (2.33)$$

2.1.11 Outras normas brasileiras

A ABNT NBR 6355:2012 trata da padronização dos perfis estruturais formados a frio. Essa apresenta as séries comerciais de perfis estruturais e suas respectivas designações, a metodologia para cálculo das propriedades das seções transversais e estabelece critérios para inspeção e aceitação dos perfis.

A norma ABNT NBR 14323:2013 apresenta os procedimentos para o dimensionamento de estruturas de aço e mistas de aço e concreto em situação de incêndio. Parte do conteúdo desta norma foi adotada no *software* para determinação dos coeficientes de redução para o módulo de elasticidade do aço e da resistência ao escoamento do aço, preparando o mesmo para implementação futura do dimensionamento de estruturas de aço em situações de incêndio.

A norma ABNT NBR 15253:2014 estabelece os requisitos gerais e métodos de ensaios para os perfis de aço formados a frio, com revestimento metálico, para painéis reticulados utilizados em edificações e destinados à execução de paredes com função estrutural, estruturas de entrespisos, estruturas de telhados e de fachadas das edificações do sistema LSF.

A norma ABNT NBR 15253:2014 apresenta também a forma e as dimensões máximas das aberturas sem reforços que podem ser realizadas nas almas dos perfis do sistema LSF, desde que consideradas em cálculo, conforme apresentado na Figura 2.1. Além disso, apresenta as distâncias mínimas entre centro das aberturas, a distância mínima entre centro de aberturas e extremidade do perfil e a distância mínima entre extremidade de uma abertura e a face lateral de apoio do perfil. Ainda segundo esta norma, aberturas com outras geometrias e dimensões podem ser executadas, desde que reforçadas e consideradas no dimensionamento.

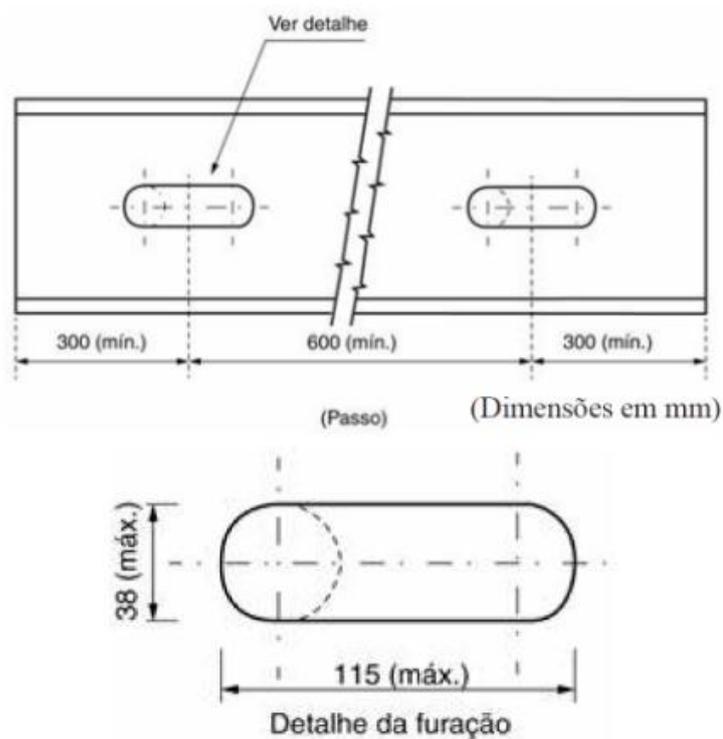


Figura 2.1 – Abertura nos perfis do LSF (ABNT NBR 15253:2014)

2.2 Eurocode

O *EN 1993-1-3 (2006)* é a norma europeia que trata do dimensionamento de perfis formados a frio, apresentando as condições específicas para o dimensionamento de barras. O *EN 1993-1-8 (2005)*, por sua vez, apresenta as condições específicas para o dimensionamento de ligações em estruturas de aço. Adicionalmente, o *EN 1993-1-5 (2006)* trata do comportamento de chapas apresentando metodologia para o cálculo da largura efetiva e afins.

Ambas as normas citadas consideram que os furos existentes nos perfis sejam furos padrões, ou seja, não apresentam em seu escopo formulação específica para o dimensionamento de perfis com furos de maiores diâmetros.

2.3 Norma norte americana AISI S100-16

A norma norte americana AISI S100-16, *North American Cold-Formed Steel Specifications*, trata do dimensionamento de perfis formados a frio e de sistemas e subsistemas constituídos com esses perfis. Esta é a norma que mais aborda o assunto de perfis formados a frio com a existência de furos. A nomenclatura adotada é apresentada na Figura 2.2.

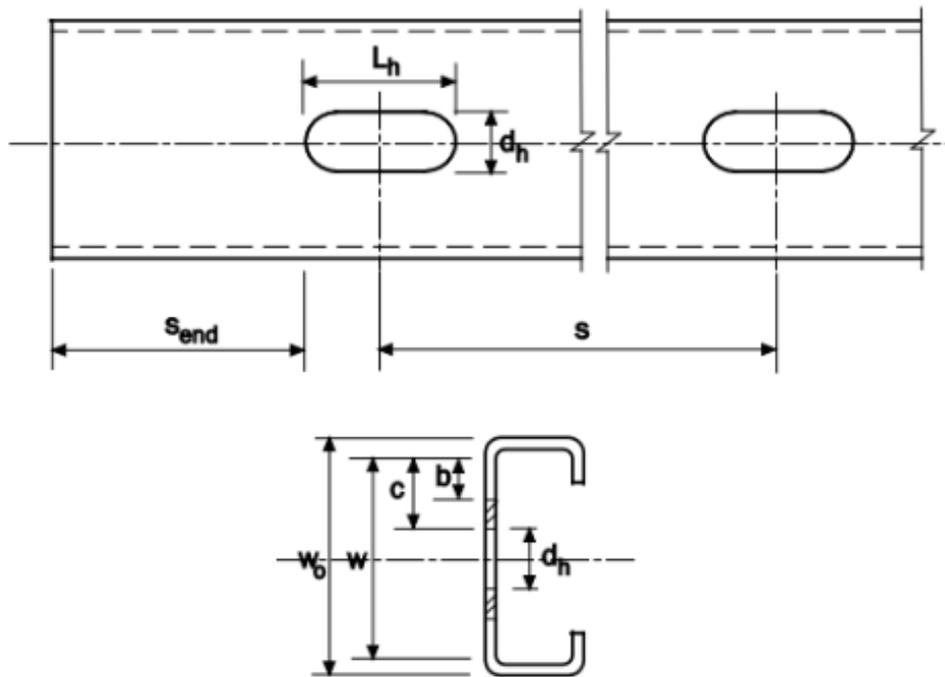


Figura 2.2 – Nomenclatura adotada na norma norte americana (AISI S100-16)

Sendo L_h o comprimento da abertura, d_h o diâmetro da abertura; s o espaçamento entre centro de aberturas; s_{end} o espaçamento entre a extremidade da abertura e o final da barra; w_o a altura total do perfil; w a altura da parte plana da alma do perfil; b a largura da parte efetiva do elemento e c a largura do elemento entre o furo e elemento curvo.

2.3.1 MLE aplicado em elementos enrijecidos uniformemente comprimidos com furos circulares ou não circulares

A norma norte americana AISI S100-16, apresenta a formulação para cálculo da largura efetiva de elementos com furos. Para elementos enrijecidos uniformemente comprimidos com furos circulares, a norma norte americana recomenda (item 1.1.1 do apêndice 1) que a formulação para o cálculo da largura efetiva apresentada na seguinte equação:

$$b = w - d_h, \text{ se } \lambda \leq 0,673 \quad (2.34)$$

$$b = w[1 - (0,22)/\lambda - (0,8d_h)/w + (0,085d_h)/w\lambda]/\lambda, \text{ se } \lambda > 0,673 \quad (2.35)$$

Onde b é a largura efetiva do elemento, w é a largura da parte plana do elemento; t é a espessura do elemento; d_h é o diâmetro do furo e λ é o índice de esbeltez definido na seção 1.1 da AISI S100-16. Em todos os casos, deve-se adotar $b \leq w - d_h$.

Para furos circulares, as seguintes disposições construtivas devem ser atendidas:

- a) $0 \leq d_h/w \leq 0,50$;
- b) $w/t \leq 70$;
- c) Distância entre furos $\geq 0,50 w$;
- d) Distância entre furos $\geq 3d_h$.

Para o caso de elementos enrijecidos uniformemente comprimidos, com furos não circulares, deve-se considerar a alma como dois elementos não enrijecidos, de largura c , calculando sua largura efetiva separadamente e adotando-se $k=0,43$. Adicionalmente, as seguintes disposições construtivas devem ser atendidas:

- a) Distância entre centro de furos (s) ≥ 610 mm (24 in);
- b) Distância entre o furo e o final da barra (s_{end}) ≥ 254 mm (10 in);
- c) Profundidade do furo: $d_h \leq 63,5$ mm (2,5 in);
- d) Comprimento do furo: $L_h \leq 114$ mm (4,5 in);
- e) Relação $d_h / w_o \leq 0,50$.

Para cálculo da largura efetiva do elemento b_d , em estado-limite de serviço, deve-se adotar a formulação apresentada na seção 1.1(b) da AISI S100-16, assumindo que não existe furo na alma.

Segundo o item E3.1.2 da norma AISI S100-16, caso o número de furos multiplicado pelos diâmetros dos furos e dividido pelo comprimento efetivo da barra não ultrapassar 0,015, a área efetiva pode ser determinada ignorando a existência dos furos.

2.3.2 MLE aplicado em almas de perfis Ue sujeitas a gradiente de tensões

As seguintes disposições devem ser atendidas:

- a) Relação $d_h/h \leq 0,70$;
- b) Relação $h/t \leq 200$;
- c) Furos centralizados na meia altura da alma do perfil;
- d) Distância entre furos ≥ 457 mm (18 in);
- e) Furos não circulares com raio de borda ≥ 2 t;
- f) Furos não circulares com $d_h \leq 63,5$ mm (2,5 in) e $L_h \leq 114$ mm (4,5 in);
- g) Diâmetro dos furos circulares ≤ 152 mm (6 in);
- h) $d_h > 14,3$ mm (9/16 in).

Para almas de perfis Ue sujeitas a gradiente de tensões, a norma AISI S100-16 recomenda, no item 1.1.3 do apêndice 1, que para a determinação da força resistente, para as relações $d_h/h < 0,38$ deve-se adotar as formulações apresentadas na seção 1.1(a), para cálculo da largura efetiva do elemento, assumindo-se que não existe furo na alma.

Para as relações $d_h/h \geq 0,38$, o cálculo da largura efetiva da alma deve ser feito conforme seção 1.2.1(a), assumindo que a parte comprimida da alma consiste em um elemento não enrijecido adjacente ao furo, submetida à máxima tensão de compressão, f_1 neste caso.

Para cálculo da largura efetiva do elemento, em estado-limite de serviço, deve-se adotar a formulação apresentada na seção 1.1.2(a), assumindo que não existe furo na alma.

2.3.3 Força cortante resistente de cálculo para perfis Ue com furos na alma

O item G3 da norma AISI S100-16 recomenda que a força cortante resistente de perfis Ue com furos na alma seja calculada conforme a seção G2.3, que trata de perfis sem furos. Em seguida, deve-se aplicar o fator de redução q_s sobre a força resistente, conforme apresentado na equação abaixo:

$$q_s = 1,0, \text{ se } c/t \geq 54 \quad (2.36)$$

$$q_s = c/54t, \text{ se } 5 \leq c/t < 54 \quad (2.37)$$

Onde c é um fator que varia para furos circulares e não circulares e pode ser obtido pelas seguintes equações:

$$c = h/2 - d_h/2,38, \text{ para furos circulares} \quad (2.38)$$

$$c = h/2 - d_h/2,00, \text{ para furos não circulares} \quad (2.39)$$

Adicionalmente, as disposições construtivas apresentadas anteriormente devem ser atendidas.

- a) Relação $d_h/h \leq 0,70$;
- b) Relação $h/t \leq 200$;
- c) Furos centralizados na meia altura da alma do perfil;
- d) Distância entre furos ≥ 457 mm (18 in);
- e) Furos não circulares com raio de borda $\geq 2t$;
- f) Furos não circulares com $d_h \leq 63,5$ mm (2,5 in) e $L_h \leq 114$ mm (4,5 in);
- g) Diâmetro dos furos circulares ≤ 152 mm (6 in);
- h) $d_h > 14,3$ mm (9/16 in).

2.3.4 Força resistente ao enrugamento da alma (*web crippling*) para perfis Ue com furos na alma

O item G6 da norma AISI S100-16 recomenda que a força resistente ao enrugamento da alma (*web crippling*) de perfis Ue com furos na alma seja calculada conforme a seção G5, que trata de perfis sem furos. Em seguida, deve-se aplicar o fator de redução R_c sobre a força resistente, conforme apresentado na equação abaixo:

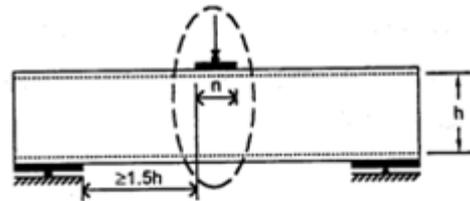
$$R_c = 1,01 - \frac{0,325d_h}{h} + \frac{0,083x}{h} \leq 1,0, \quad \text{condição end one flange (EOF) reaction}$$

$$N \geq 25,4 \text{ mm} = 1 \text{ in} \quad (2.40)$$

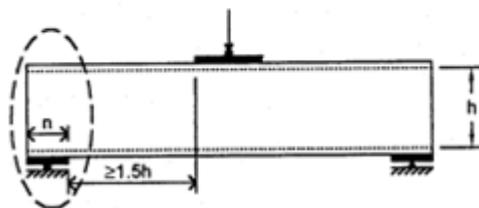
$$R_c = 0,90 - \frac{0,047d_h}{h} + \frac{0,053x}{h} \leq 1,0, \quad \text{condição interior one flange (IOF) reaction}$$

$$N \geq 76,2 \text{ mm} = 3 \text{ in} \quad (2.41)$$

Sendo x a menor distância entre a borda do furo e a mesa, d_h o diâmetro do furo, h a altura da seção transversal e N a largura do apoio. As condições ETF e ITF são apresentadas na Figura 2.3.



(a) Condição de carregamento sobre uma mesa interna (IOF)



(b) Condição de carregamento sobre uma mesa externa (EOF)

Figura 2.3 – Condições de carregamento. (a) IOF, (b) EOF (adaptada de AISI Report. RP02-2)

Adicionalmente, as seguintes disposições construtivas devem ser atendidas:

- a) Relação $d_h/h \leq 0,70$;
- b) Relação $h/t \leq 200$;
- c) Furos centralizados à meia altura da alma do perfil;
- d) Distância entre furos ≥ 457 mm (18 in);
- e) Distância entre o fim do perfil e a borda do furo $>$ altura da seção transversal;
- f) Furos não circulares com raio de borda $\geq 2t$;
- g) Furos não circulares com $d_h \leq 63,5$ mm (2,5 in) e $L_h \leq 114$ mm (4,5 in);
- h) Diâmetro dos furos circulares ≤ 152 mm (6 in);
- i) Diâmetro do furo $d_h > 14,3$ mm (9/16 in).

2.3.5 Método da Resistência Direta aplicado às barras em compressão centrada, sem furos

A norma norte americana AISI S100-16, apresenta soluções analíticas para cálculo dos esforços resistentes de seções, com e sem furos, pelo Método da Resistência Direta.

Os itens E e F apresentam as generalidades do método, especificando seções pré-qualificados, para os quais é possível aplicar o MRD.

Conforme apresentado nos itens E2 (para a flambagem global), E3.2.1 (para interação entre escoamento e flambagem global) e E4.1 (para a flambagem distorcional) da AISI S100-16, a força axial de compressão nominal de uma barra em compressão sem furos é a menor entre os três estados-limites: flambagem global da barra por flexão, torção ou flexo-torção (P_{ne}), interação entre a flambagem local (P_{nl}) e flambagem distorcional (P_{nd}).

Para uma barra em compressão sem furos, a resistência axial nominal para flambagem por flexão, torção ou flexo-torção (P_{ne}), pode ser obtida pelo produto da área bruta (A_g) e da tensão de compressão resistente (F_n), de modo que $P_{ne} = A_g * F_n$. F_n pode ser obtida conforme a equação abaixo:

$$F_n = (0,658^{\lambda_c^2})F_y, \quad \text{para } \lambda_c \leq 1,50 \quad (2.42)$$

$$F_n = \left(\frac{0,877}{\lambda_c^2}\right)F_y, \quad \text{para } \lambda_c > 1,50 \quad (2.43)$$

Onde λ_c é o índice de esbeltez associado à flambagem global da barra, apresentado na equação 2.44, sendo F_y a resistência ao escoamento do aço e F_{cre} é a tensão de flambagem global elástica da barra.

$$\lambda_c = \sqrt{F_y/F_{cre}} \quad (2.44)$$

A força axial de flambagem elástica local (P_{nl}) pode ser obtida pelas equações apresentadas abaixo:

$$P_{nl} = P_{ne}, \quad \text{para } \lambda_l \leq 0,776 \quad (2.45)$$

$$P_{nl} = \left[1 - 0,15 \left(\frac{P_{crl}}{P_{ne}} \right)^{0,4} \right] \left(\frac{P_{crl}}{P_{ne}} \right)^{0,4} P_{ne}, \quad \text{para } \lambda_l > 0,776 \quad (2.46)$$

Onde λ_l é o índice de esbeltez associado à flambagem local da barra, apresentado na equação 2.47 e P_{crl} é a força de flambagem local elástica da barra. P_{crl} pode ser obtido via análise de estabilidade elástica da barra, com o auxílio do CUFSM.

$$\lambda_l = \sqrt{P_{ne}/P_{crl}} \quad (2.47)$$

A força axial nominal para flambagem distorcional, P_{nd} , pode ser obtida pelas equações abaixo.

$$P_{nd} = P_y, \quad \text{para } \lambda_d \leq 0,561 \quad (2.48)$$

$$P_{nd} = \left[1 - 0,25 \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0,6} \right] \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0,6} P_y, \quad \text{para } \lambda_d > 0,561 \quad (2.49)$$

Onde λ_d é o índice de esbeltez associado à flambagem distorcional da barra, apresentado na equação 2.50 e P_{crd} é a força de flambagem distorcional da barra. P_{crd} pode ser obtido via análise de estabilidade elástica da barra, com o auxílio do CUFSM.

$$\lambda_d = \sqrt{P_y/P_{crd}} \quad (2.50)$$

A norma AISI S100-16 também apresenta uma extensão do método da resistência direta para determinação da força cortante resistente de cálculo.

2.3.6 Método da Resistência Direta aplicado às barras em flexão, sem furos

Conforme apresentado nos itens F2.1 (para flambagem lateral com torção), F3.2.1 (para o início do escoamento da seção transversal), e F4.1 (para flambagem distorcional) da norma AISI S100-16, o momento fletor resistente nominal de uma barra em flexão sem furos é o menor entre os três estados-limites: flambagem lateral com torção (M_{ne}), flambagem local (M_{nl}) e flambagem distorcional (M_{nd}).

O momento fletor resistente nominal para a flambagem lateral com torção de uma barra em flexão (M_{ne}) é obtido pelo produto $M_{ne} = S_f * F_n \leq M_y$, sendo S_f o módulo elástico da seção e F_n dado pela equação abaixo:

$$F_n = F_y \quad \text{para } F_{cre} \geq 2,78F_y \quad (2.51)$$

$$F_n = \frac{10}{9} F_y \left(1 - \frac{10F_y}{36F_{cre}} \right) \quad \text{para } 2,78 > F_{cre} > 0,56F_y \quad (2.52)$$

$$F_n = F_{cre} \quad \text{para } F_{cre} \leq 0,56F_y \quad (2.53)$$

O momento fletor resistente nominal para o início do escoamento da seção efetiva (M_{nl}) é dado pela equação abaixo:

$$M_{nl} = M_{ne} \quad \text{para } \lambda_l \leq 0,776 \quad (2.54)$$

$$M_{nl} = \left[1 - 0,15 \left(\frac{M_{crl}}{M_{ne}} \right)^{0,4} \right] \left(\frac{M_{crl}}{M_{ne}} \right)^{0,4} M_{ne} \quad \text{para } \lambda_l > 0,776 \quad (2.55)$$

Onde λ_l é o índice de esbeltez dado pela equação abaixo e M_{crl} é o momento crítico de flambagem local, que pode ser obtido via análise de estabilidade elástica da barra, com o auxílio do CUFSM.

$$\lambda_l = \sqrt{\frac{M_{ne}}{M_{crl}}} \quad (2.56)$$

O momento fletor resistente nominal para a flambagem distorcional (M_{nd}), é dado pela equação abaixo:

$$M_{nd} = M_y, \quad \text{para } \lambda_d \leq 0,673 \quad (2.57)$$

$$M_{nd} = \left(1 - 0,22 \left(\frac{M_{crd}}{M_y}\right)^{0,5}\right) \left(\frac{M_{crd}}{M_y}\right)^{0,5} M_y, \quad \text{para } \lambda_d > 0,673 \quad (2.58)$$

Onde λ_d é o índice de esbeltez associado à flambagem distorcional da barra, apresentado na equação abaixo e M_{crd} é o momento fletor de flambagem distorcional da barra. M_{crd} pode ser obtido via análise de estabilidade elástica da barra, com o auxílio do CUFSM.

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{M_y}{M_{crd}}} \quad (2.59)$$

2.3.7 Método da Resistência Direta aplicado aos perfis com furos

Para o dimensionamento de barras em compressão com a presença de furos, a norma AISI S100-16, recomenda que P_{ne} e P_{nl} sejam calculados da mesma maneira que se calcula para perfis sem furos, tomando-se $P_{nl} \leq P_{ynet}$ e P_{nd} seja calculado conforme seção E 4.2. Em ambos os casos, o cálculo de P_{cre} , P_{crl} e P_{crd} , deve levar em conta a presença de furos.

Para o dimensionamento de barras em flexão com a presença de furos, a norma AISI S100-16, recomenda que M_{ne} e M_{nl} sejam calculados da mesma maneira que se calcula para barras em flexão sem furos, tomando-se $M_{nl} \leq M_{ynet}$. E M_{nd} seja calculado conforme seção F 4.2. Em ambos os casos, o cálculo de M_{cre} , M_{crl} e M_{crd} , deve levar em conta a presença de furos.

Nas seções seguintes deste trabalho, as formulações adotadas neste método são mais bem discutidas e um estudo de Moen e Schafer (2009) para aproximação das forças críticas de flambagem global, local e distorcional de perfis formados a frio com a presença de furos será apresentado.

2.3.8 Flambagem elástica de barras com furos segundo AISI S100-16

O apêndice 2 da AISI S100-16, trata da análise de flambagem elástica de perfis. A norma apresenta previsões gerais, soluções analíticas e numéricas e para determinação das forças de flambagem elástica. Para barras em compressão, a norma apresenta métodos para determinação da força axial de flambagem global elástica (P_{cre}), força axial de flambagem local elástica (P_{crl}) e força axial de flambagem distorcional elástica (P_{crd}). Para barras em flexão, a norma apresenta metodologia para determinação do momento fletor de flambagem global elástica (M_{cre}), momento fletor de flambagem local elástica (M_{crl}) e momento fletor de flambagem distorcional elástica (M_{crd}).

Além disso, também apresenta metodologia para determinação das forças axial e momento fletor de flambagem elástica para barras em compressão e barras em flexão com furos. As formulações presentes na norma são similares às propostas por Moen e Schafer (2009) e são apresentadas no próximo capítulo.

2.4 Flambagem elástica de barras com furos

Moen e Schafer (2009) apresentaram um método simplificado para determinar de modo aproximado as forças críticas de flambagem global, flambagem local e flambagem distorcional de perfis formados a frio com a presença de furos. O método proposto pelos autores resulta em boas aproximações, quando os resultados são comparados com resultados obtidos via método dos elementos finitos, e são aplicáveis em seções genéricas.

O método simplificado é uma alternativa a soluções via método dos elementos finitos para a análise de flambagem elástica, uma vez que estes últimos são trabalhosos, principalmente no que tange a geração de malha na região próxima ao furo. Além disto a solução via MEF, necessita de percepção do engenheiro, visto que é necessário identificar, visualmente, os modos de flambagem que ocorrem.

2.4.1 Forças de flambagem elástica global

Para determinação da força axial de flambagem global elástica de perfil em compressão com furos regularmente espaçados, os autores propõem a seguinte formulação:

$$P_{cre} = \frac{\pi^2 E}{L^2} (I_g L_g + I_{net} L_{net}) / L \quad (2.60)$$

Onde os sub índices *g* e *net* representam as propriedades brutas (fora da região dos furos) e líquidas da seção (na região dos furos), respectivamente, conforme apresentado na Figura 2.4. Outra formulação proposta seria calcular P_{cre} com a inércia líquida da seção na região do furo, o que resultaria em um resultado mais conservador. Para determinação de P_{cre} de perfis que não possuam dupla simetria, pode-se consultar o item 2.3.2.1 da AISI S100-16.

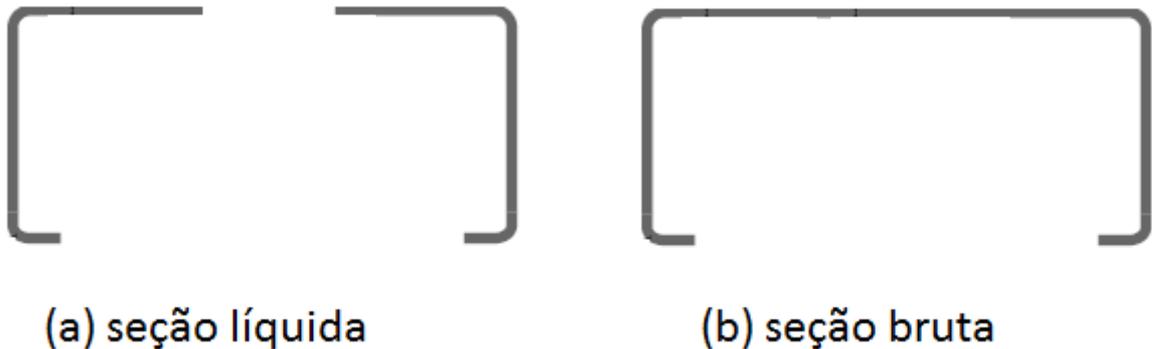


Figura 2.4 – (a) Seção líquida, (b) Seção bruta

Para determinação do momento fletor de flambagem global elástica de barras em flexão com furos regularmente espaçados, Moen et al (2013) propõem a seguinte formulação:

$$M_{cre} = \frac{\pi}{k_y L} \sqrt{EI_{yavg} \left[GJ_{avg} + EC_{wnet} \frac{\pi^2}{(k_t L)^2} \right]} \quad (2.61)$$

Na equação acima, L é o comprimento destravado da barra em flexão, k_y e k_t são os fatores de comprimento efetivo da barra, E é o módulo de elasticidade longitudinal, G é o módulo de elasticidade transversal, I_{yavg} e J_{yavg} são o momento de inércia médio e a constante de torção média da seção, calculados conforme equações abaixo:

$$I_{yavg} = \frac{I_{yg}L_g + I_{ynet}L_{net}}{L} \quad (2.62)$$

$$J_{yavg} = \frac{J_{yg}L_g + J_{ynet}L_{net}}{L} \quad (2.63)$$

Nas equações 2.61 a 2.63 os sub índices *g* e *net* se referem às propriedades brutas e líquidas da seção, respectivamente; C_{wnet} é a constante de empenamento da seção líquida e pode ser obtida via CUFSM configurando a espessura na região do furo igual a zero.

2.4.2 Forças de flambagem elástica distorcional

Segundo Moen et al (2013), a força axial de compressão de flambagem elástica distorcional para perfis com furos (P_{crd}), deve ser tomada como a menor entre P_{crdnh} e P_{crdh} , onde P_{crdnh} é a força axial de compressão de flambagem elástica distorcional ignorando os furos e P_{crdh} é a força axial de compressão de flambagem elástica distorcional considerando os furos.

$$P_{crd} = \text{menor}(P_{crdh}, P_{crdnh}) \quad (2.64)$$

Deve-se inicialmente realizar uma análise da seção bruta via método das faixas finitas, visando identificar o comprimento de semiondas associado à flambagem distorcional, nesta análise é obtido o valor da força crítica de flambagem distorcional do perfil sem furos, P_{crdnh} . Em seguida, deve-se realizar uma segunda análise, modificando a espessura da alma do perfil, conforme equação 2.65.

$$t_r = \left(1 - \frac{L_{hole}}{L_{crdnh}}\right)^{1/3} t \geq 0 \quad (2.65)$$

Onde t_r representa a espessura reduzida da alma, L_{hole} é comprimento do furo e L_{crdnh} é o comprimento de semiondas associado à flambagem distorcional do perfil sem furos, anteriormente obtido. O valor da força crítica de flambagem distorcional do perfil com furos, P_{crdh} , é obtido considerando o comprimento de semiondas (L_{crdnh}) obtido na análise sem a existência dos furos.

A análise em questão considera que o comprimento de semiondas associado à flambagem distorcional não se altera quando um furo é feito na alma do perfil. O mesmo procedimento pode ser realizado para determinação do momento fletor de flambagem elástica associado à flambagem distorcional.

Segundo Moen et al (2013), para o momento fletor de flambagem elástica distorcional para perfis com furos (M_{crd}), deve ser tomado como o menor entre M_{crdnh} e M_{crdh} , onde M_{crdnh} é o momento fletor flambagem elástica distorcional ignorando os furos e M_{crdh} é o momento fletor de flambagem elástica distorcional considerando os furos.

$$M_{crd} = \text{menor}(M_{crdh}, M_{crdnh}) \quad (2.66)$$

Para furos não enrijecidos, usualmente M_{crdh} é menor do que M_{crdnh} , conforme resultados apresentados por Moen et Al (2013). Entretanto, estudos realizados por Grey e Moen (2011) indicam que furos enrijecidos podem apresentar momentos críticos de flambagem distorcional na região com furos, M_{crdh} , maiores que momentos críticos de flambagem distorcional na região sem furos, M_{crdnh} .

Adicionalmente a norma norte americana AISI S100-16 apresenta formulações complementares para o cálculo de P_{crd} e M_{crd} de perfis com furos.

2.4.3 Forças de flambagem elástica local

Segundo Moen e Schafer (2009), para a força axial de compressão de flambagem elástica local para perfis com furos (P_{crl}), deve ser tomada como a menor entre P_{crlnh} e P_{crlh} , onde P_{crlnh} é a força axial de compressão de flambagem elástica local ignorando o furo e P_{crlh} é a força axial de compressão de flambagem elástica considerando os furos.

$$P_{crl} = \text{menor}(P_{crlh}, P_{crlnh}) \quad (2.67)$$

P_{crlh} pode ser calculado via método das faixas finitas na seção líquida, com o auxílio do CUFSM, restringindo as deformações à flambagem local. É necessário examinar somente as semiondas com comprimento menor que o comprimento do furo.

Durante a modelagem é fundamental evitar restringir completamente os deslocamentos dos elementos da seção transversal, uma vez que tal restrição evita deformações devidas ao efeito Poisson e artificialmente enrijece a seção transversal. Um perfil Ue com furos na alma, deve

receber restrições de translação na direção Z, conforme ilustrado na Figura 2.5. Esta apresenta um guia para modelagem da seção líquida de uma barra em compressão com furos no CUFSM.

A única condição em que um vértice deve ser restrito em ambas as direções é quando dois elementos isolados se conectam em um vértice, como caso de um perfil Ue com furo na mesa (Figura 2.5 a). Adicionalmente, quando o furo isola uma faixa não apoiada da seção, este elemento deve ser desprezado, uma vez que não contribui para rigidez, conforme apresentado na Figura 2.5 b.

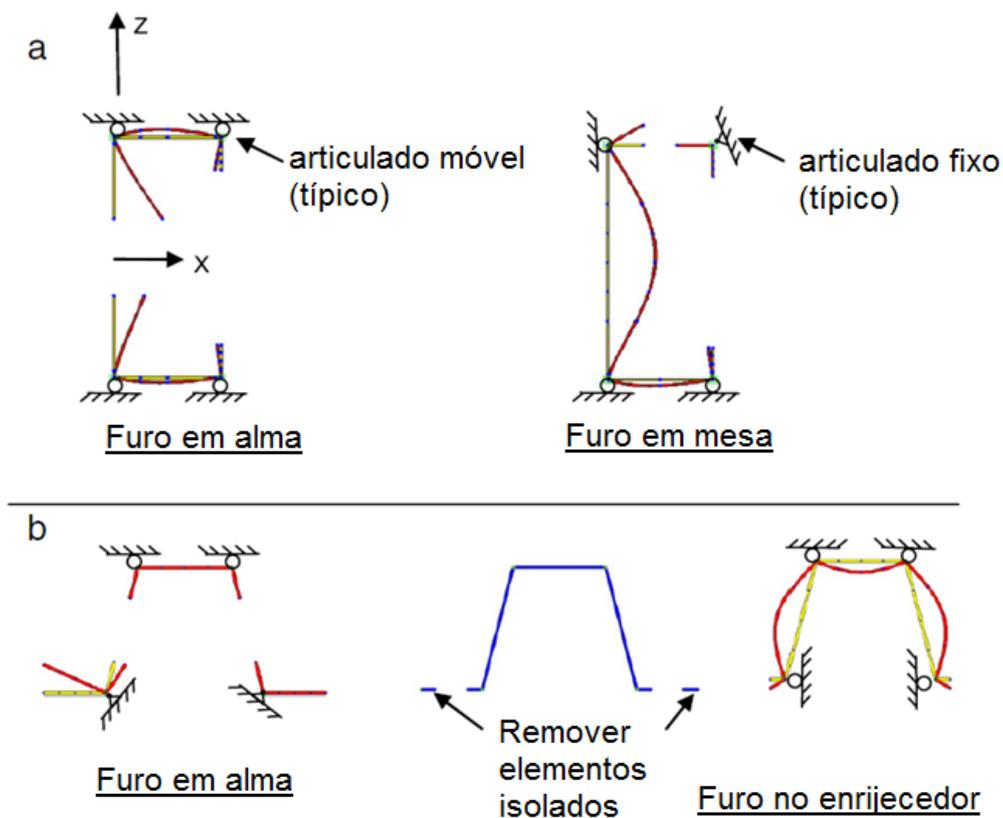


Figura 2.5 – Guia para modelagem da seção líquida de uma barra em compressão no CUFSM, exemplos incluem: a) Perfil Ue e b) Perfil Cr (Adaptada de Moen & Schafer, 2009)

Uma vez feita a modelagem e configurada as corretas restrições, uma análise deve ser realizada, e uma curva de flambagem elástica será obtida, similar à apresentada na Figura 2.6. O comprimento de semionda associado à força de flambagem distorcional elástica, L_{crlh} , é identificado no eixo das abscissas como o comprimento inerente ao menor valor da curva.

Caso o comprimento dos furos, L_h , seja maior ou igual L_{crlh} , P_{crlh} deve ser tomado como o menor valor obtido no gráfico, conforme apresentado na Figura 2.6 a. Caso o comprimento dos furos, L_h , seja menor que L_{crlh} , P_{crlh} deve ser considerado para o comprimento de

semionda L_h , conforme apresentado na Figura 2.6 b. A força axial de referência usada para cálculo de P_{crlh} e P_{crh} deve ser a mesma, ou seja, se o carregamento aplicado no CUFSM para cálculo de P_{crlh} foi 1 kN, deve-se aplicar 1 kN para cálculo de P_{crh} .

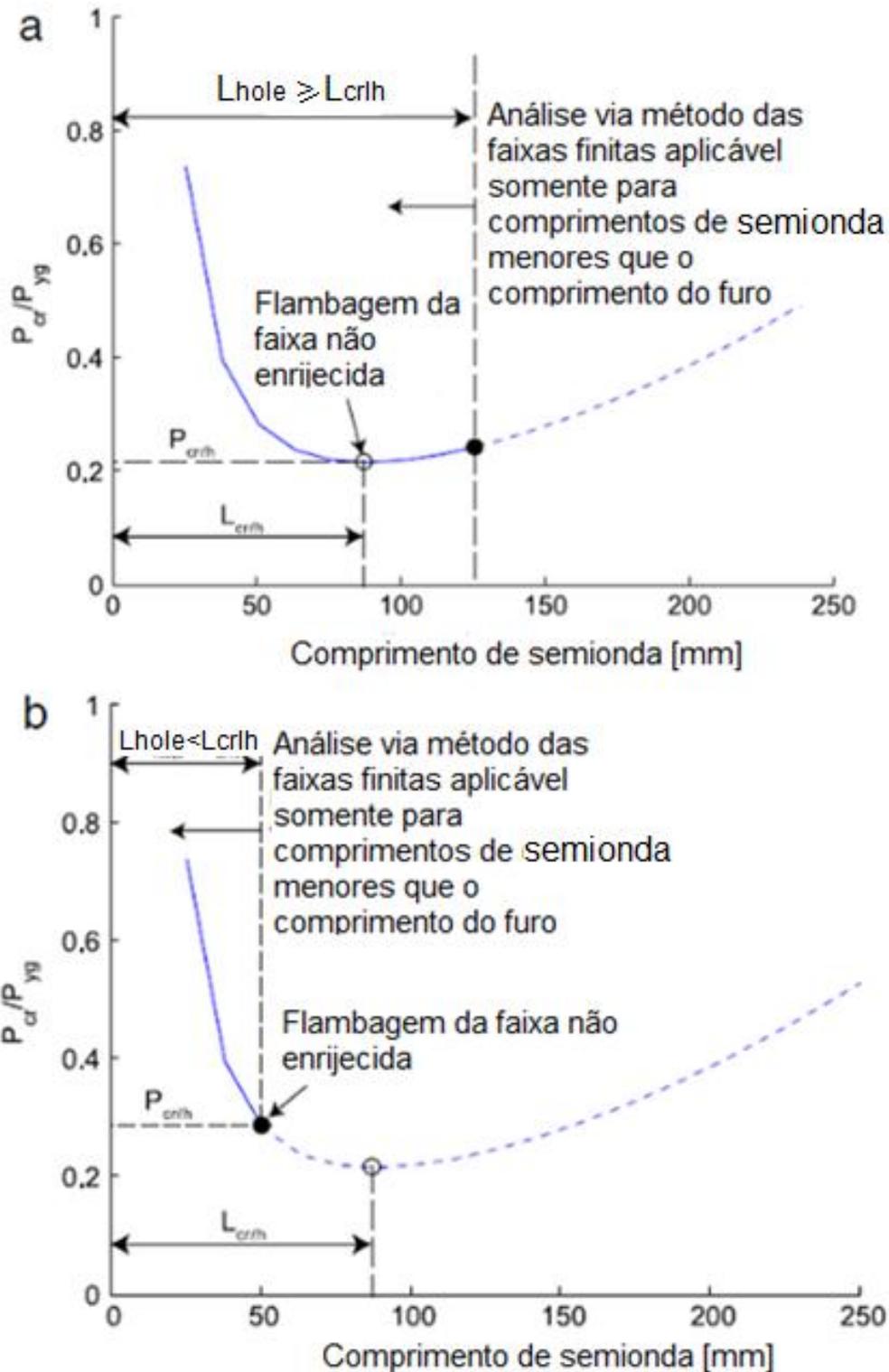


Figura 2.6 - Curva de flambagem local elástica de uma seção líquida, onde: a) $L_h < L_{cr,h}$ e b) $L_h > L_{cr,h}$ (Adaptada de Moen & Schafer, 2009)

Ainda segundo Moen e Schafer (2009), o momento fletor de flambagem elástica local para perfis com furos (M_{crl}), deve ser tomado como o menor entre M_{crlnh} e M_{crlh} , onde M_{crlnh} é o momento fletor de flambagem elástica local desconsiderando os furos e M_{crlh} é o momento fletor de flambagem elástica local considerando os furos.

$$M_{crl} = \text{menor}(M_{crlh}, M_{crlnh}) \quad (2.68)$$

M_{crlh} pode ser calculado via método das faixas finitas na seção líquida, com o auxílio do CUFSM, restringindo as deformações à flambagem local. Deve-se examinar somente as semiondas com comprimentos menores que o comprimento do furo.

Durante a modelagem, é necessário tomar providências semelhantes às apresentadas anteriormente. Um perfil Ue com furos na alma, deve receber restrições de translação na direção Z nos vértices comprimidos, conforme ilustrado na Figura 2.7. Esta apresenta um guia para modelagem da seção líquida de barras em flexão com furos no CUFSM.

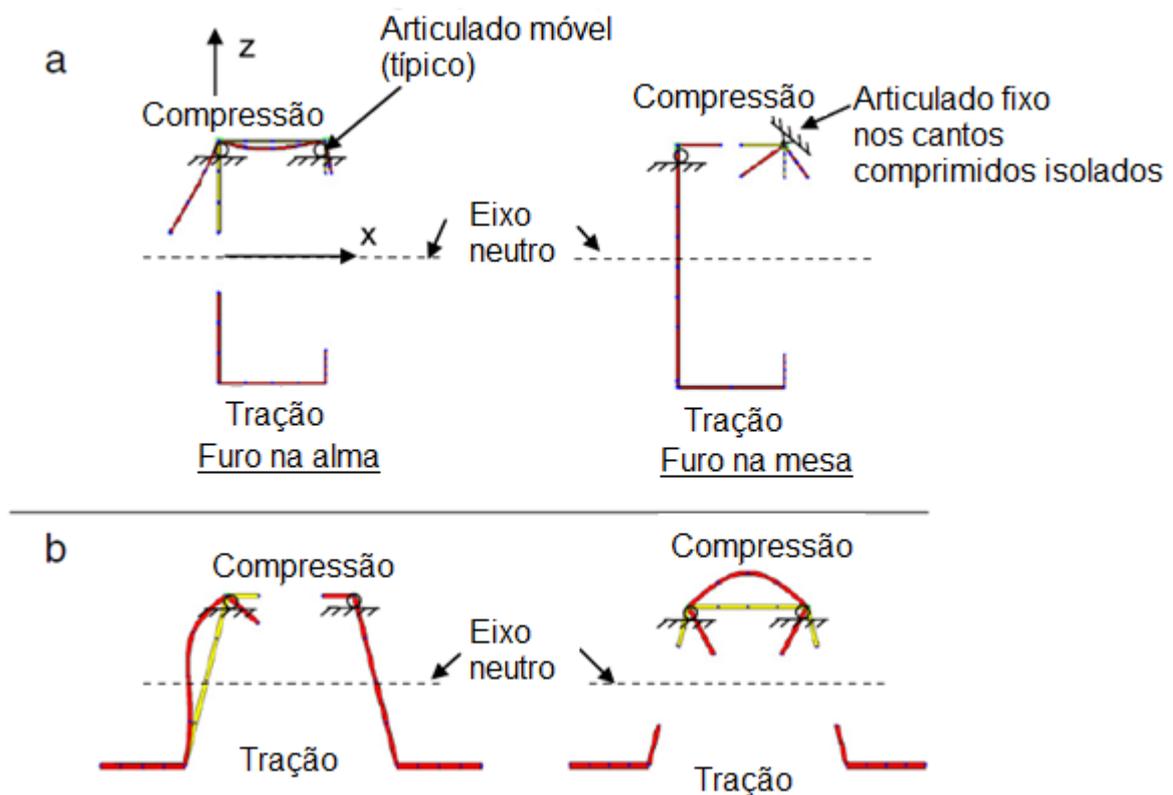


Figura 2.7 - Guia para modelagem da seção líquida de barras em flexão no CUFSM, exemplos incluem: a) Perfil Ue e b) Perfil Cr (Adaptada de Moen & Schafer, 2009)

De maneira semelhante ao cálculo de P_{cr} , caso L_h seja maior ou igual a L_{crlh} , M_{crlh} deve ser avaliado como o menor valor obtido no gráfico de flambagem local L_{crlh} , conforme apresentado na Figura 2.6 a. Caso L_h seja menor que L_{crlh} , M_{crlh} deve ser considerado para o comprimento de semionda L_h , conforme apresentado na Figura 2.6 b. O momento fletor de referência usado para cálculo de M_{crlh} e M_{crlnh} deve ser o mesmo.

2.5 Método da Resistência Direta aplicado em barras em compressão com furos

O MRD representa um importante avanço no processo de dimensionamento de perfis formados a frio, pois fornece aos engenheiros e fabricantes ferramentas para cálculo de barras com seções transversais genéricas (Moen & Schafer, 2011).

Moen e Schafer (2011) apresentaram um estudo que estendia o processo de dimensionamento via MRD para perfis estruturais de aço formados a frio, resultando em um método aplicável a uma série de seções transversais e uma variedade de dimensões de furos e peças.

Para perfis sem furos, as forças críticas de flambagem podem ser obtidas da curva de flambagem elástica do perfil, facilmente determinada via Método das Faixas Finitas, com auxílio do *software* CUFSM, por exemplo (Schafer e Adány, 2006). As forças críticas de flambagem elástica local (P_{cr}) e distorcional (P_{crd}) são os pontos mínimos locais da curva apresentada na Figura 2.8. A força crítica de flambagem global (P_{cre}) corresponde ao ponto da curva associado ao comprimento efetivo da barra (Li e Schafer, 2010b).

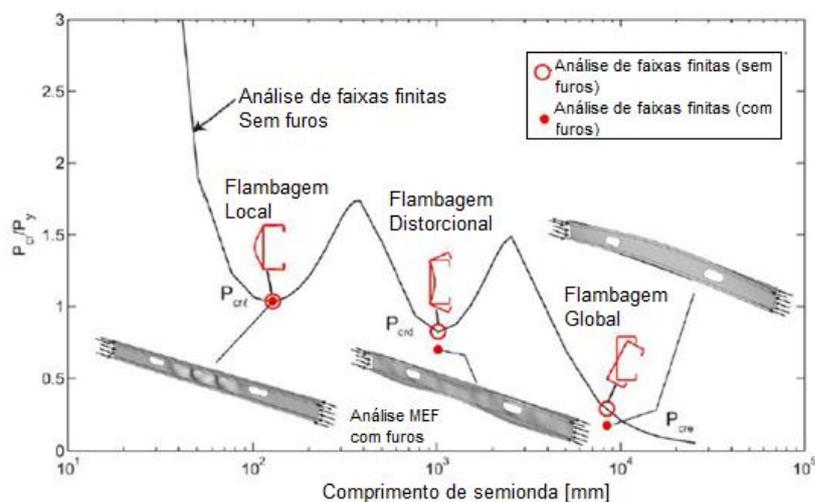


Figura 2.8 - Curva de flambagem elástica, obtida via método das faixas finitas (Adaptada de Moen e Schafer, 2011)

Para uma barra em compressão com furos, as forças críticas de flambagem elástica P_{cr1} , P_{crd} e P_{cre} são calculadas incluindo a existência de furos e em seguida aplicadas nas formulações do MRD. Para cálculo das forças de flambagem elásticas de perfis com furos Moen e Schafer (2011) estudaram seis formulações, que foram calibradas via Método dos Elementos Finitos. No artigo em questão, os autores chegaram à conclusão da melhor formulação, sendo que esta é adotada na norma norte americana AISI S100-16 e é apresentada a seguir.

Moen e Schafer (2011) recomendam que P_{nl} seja limitada a P_{ynet} , sendo $P_{ynet}=A_{net}*f_y$. Os autores adicionalmente recomendam uma modificação da curva de flambagem distorcional, conforme apresentado nas equações 2.69 a 2.71 e ilustrado pela Figura 2.9.

$$P_{nd} = P_{ynet} \quad \text{para } \lambda_d \leq \lambda_{d1} \quad (2.69)$$

$$P_{nd} = P_{ynet} - \left(\frac{P_{ynet} - P_{d2}}{\lambda_{d2} - \lambda_{d1}} \right) (\lambda_d - \lambda_{d1}) \quad \text{se } \lambda_{d1} < \lambda_d \leq \lambda_{d2} \quad (2.70)$$

$$P_{nd} = \left[1 - 0,25 \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0,6} \right] \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0,6} P_y, \quad \text{para } \lambda_d > \lambda_{d2} \quad (2.71)$$

Nas equações 2.69 a 2.71, λ_{d1} e λ_{d2} são índices de esbeltez de referência, calculados conforme equações 2.72 e 2.73, e P_{d2} é uma força de flambagem distorcional de referência calculada conforme equação 2.74.

$$\lambda_{d1} = 0,561 \left(\frac{P_{ynet}}{P_y} \right) \quad (2.72)$$

$$\lambda_{d2} = 0,561 \left[14 \left(\frac{P_y}{P_{ynet}} \right)^{0,4} - 13 \right] \quad (2.73)$$

$$P_{d2} = \left[1 - 0,25 \left(\frac{1}{\lambda_{d2}} \right)^{1,2} \right] \left(\frac{1}{\lambda_{d2}} \right)^{1,2} P_y \quad (2.74)$$

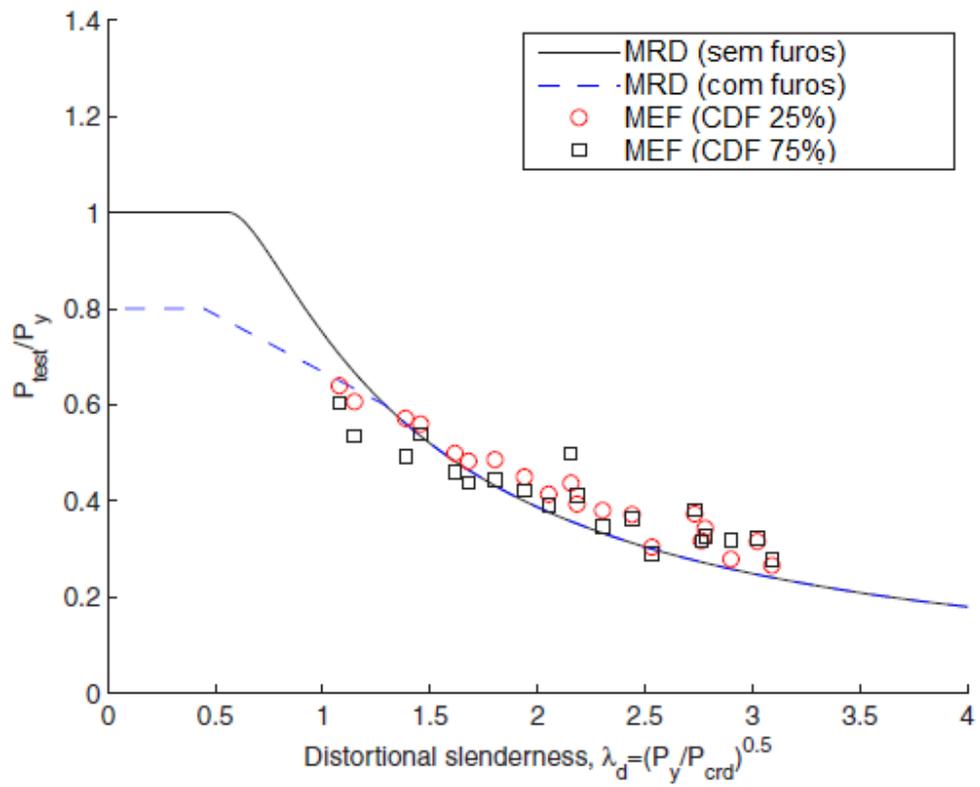


Figura 2.9 - Redução de força resistente da barra em compressão devido à flambagem distorcional: $P_{y,net}/P_y=0,80$ (Adaptada de Moen e Schafer, 2011)

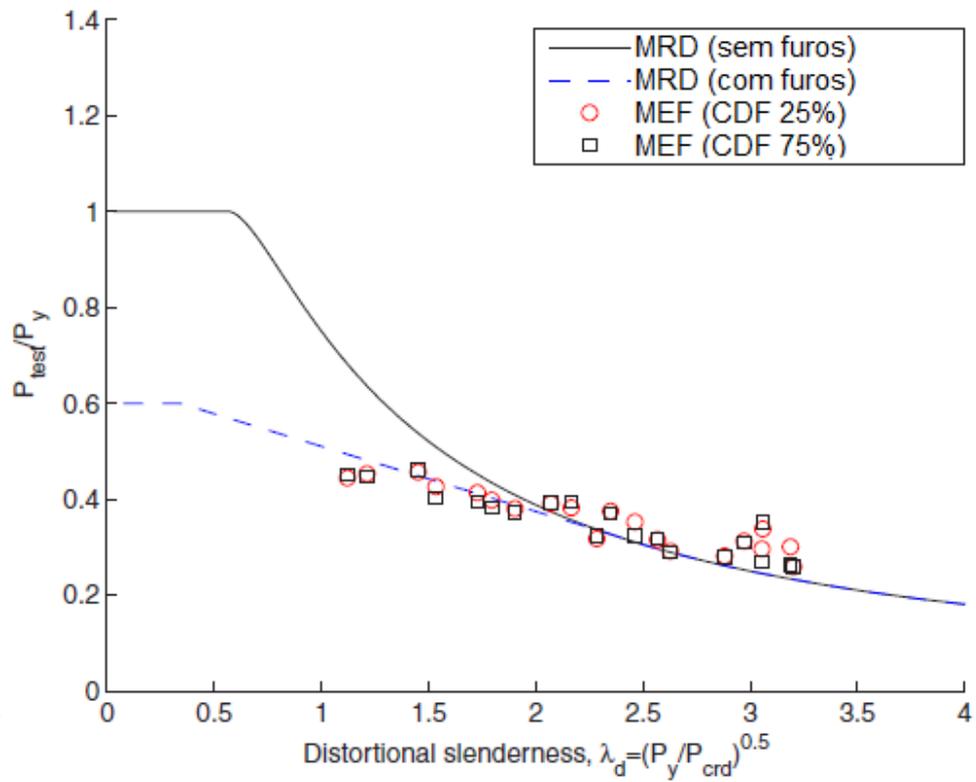


Figura 2.10 - Redução de força resistente da barra em compressão devido à flambagem distorcional: (a) $P_{y,net}/P_y = 0,60$ (Adaptada de Moen e Schafer, 2011)

Na Figura 2.9 e Figura 2.10, a linha contínua representa os valores obtidos via método da resistência direta em perfis sem furos, a linha tracejada representa os valores obtidos via método da resistência direta em perfis com furos. Os pontos em vermelho e azul representam os valores obtidos via métodos dos elementos finitos para perfis com imperfeições iniciais locais e distorcionais com probabilidade de excedência superior a 25% e 75%, respectivamente, conforme proposto por Schafer e Pekoz (1998).

2.6 Método da Resistência Direta aplicado em barras em flexão com furos

Moen et al (2013) propuseram uma adaptação do MRD para o cálculo de barras em flexão com furos. O momento fletor resistente nominal de uma barra em flexão com furos é o menor entre os três estados-limites: flambagem lateral com torção (M_{ne}), interação entre a flambagem global e local (M_{nl}) e flambagem distorcional (M_{nd}).

O momento fletor resistente nominal para a flambagem distorcional (M_{nd}) incluindo a presença de furos é dado pelas equações 2.75 e 2.76:

$$M_{nd} = M_{ynet} \quad \text{para } \lambda_d \leq \lambda_{d1} \quad (2.75)$$

$$M_{nd} = M_{ynet} - \left(\frac{M_{ynet} - M_{d2}}{\lambda_{d2} - \lambda_{d1}} \right) (\lambda_d - \lambda_{d1}) \leq \left[1 - 0,22 \left(\frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0,5} \right] \left(\frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0,5} M_y \quad \text{para } \lambda_d > \lambda_{d1} \quad (2.76)$$

Onde λ_{d1} e λ_{d2} são os índices de esbeltez dados pelas equações 2.78 e 2.79, M_{crd} é o momento crítico de flambagem distorcional, considerando a existência de furos no perfil e M_{d2} é um momento de referência dado pela equação 2.80:

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{M_y}{M_{crd}}} \quad (2.77)$$

$$\lambda_{d1} = 0,673 \left(\frac{M_{ynet}}{M_y} \right)^{3,0} \quad (2.78)$$

$$\lambda_{d2} = 0,673 \left[1,7 \left(\frac{M_y}{M_{ynet}} \right)^{2,7} - 0,7 \right] \quad (2.79)$$

$$M_{d2} = \left[1 - 0,22 \left(\frac{1}{\lambda_{d2}} \right) \right] \left(\frac{1}{\lambda_{d2}} \right) M_y \quad (2.80)$$

O M_{crd} deve ser calculado como o menor entre o momento crítico de flambagem distorcional na seção bruta (M_{crd}) e o momento crítico de flambagem distorcional na região do furo (M_{crdh}). Para cálculo de M_{crdh} , considera-se a redução da espessura da seção t para t_r , de modo a simular a redução da rigidez rotacional provida pela alma para a mesa (Moen e Schafer, 2009), conforme a equação 2.81, onde L_{hole} é o comprimento do furo e L_{crdh} é o comprimento de semionda de flambagem distorcional do perfil sem furo.

$$t_r = \left(1 - \frac{L_{hole}}{L_{crdh}} \right)^{1/3} t \geq 0 \quad (2.81)$$

2.7 Experimentos realizados em barras em compressão Ue com furos na alma

Para avaliar o comportamento de comportamento de barras em compressão com seção Ue e furos oblongos, Moen e Schafer (2008) realizaram ensaios destrutivos com 24 corpos de prova. As dimensões da seção transversal foram especificamente escolhidas para observar a relação entre flambagem local, flambagem distorcional e flambagem global, e seus respectivos mecanismos de falha.

O comprimento das barras ensaiadas foi de 610 mm (24 in) e 1219 mm (48 in), por serem os comprimentos destravados típicos de montantes no sistema LSF. Um furo oblongo estava localizado na meia altura da barra de comprimento de 610 mm e dois furos oblongos foram feitos nas barras de 1219 mm, espaçados de 610 mm. Os furos foram localizados na região onde se esperava o máximo deslocamento da flambagem distorcional (Moen e Schafer, 2008).

Os autores realizaram simulações via método dos elementos finitos, pelo *software* ABAQUS, para estimar as forças de flambagem e deformações esperadas nas barras. Os modos de flambagem esperados são apresentados nas Figura 2.11 e Figura 2.12.

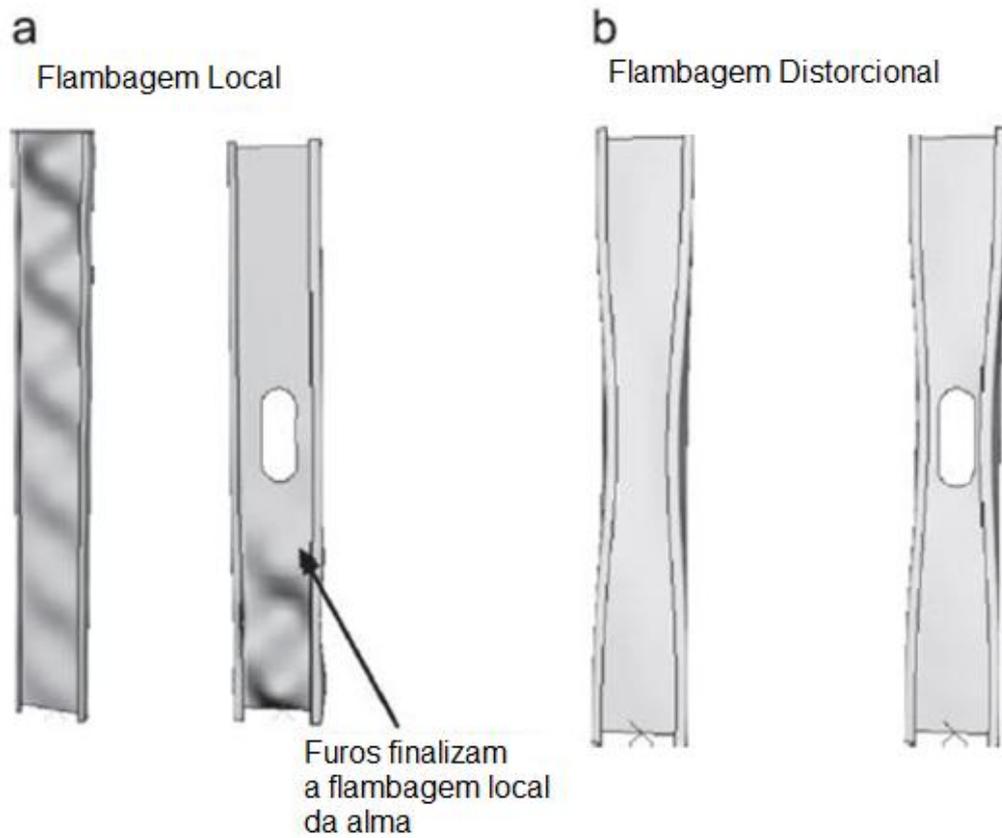


Figura 2.11 - Modos de flambagem esperado para barras em compressão curtas: (a) Flambagem Local; (b) Flambagem Distorcional (Adaptada de Moen e Schafer, 2008)

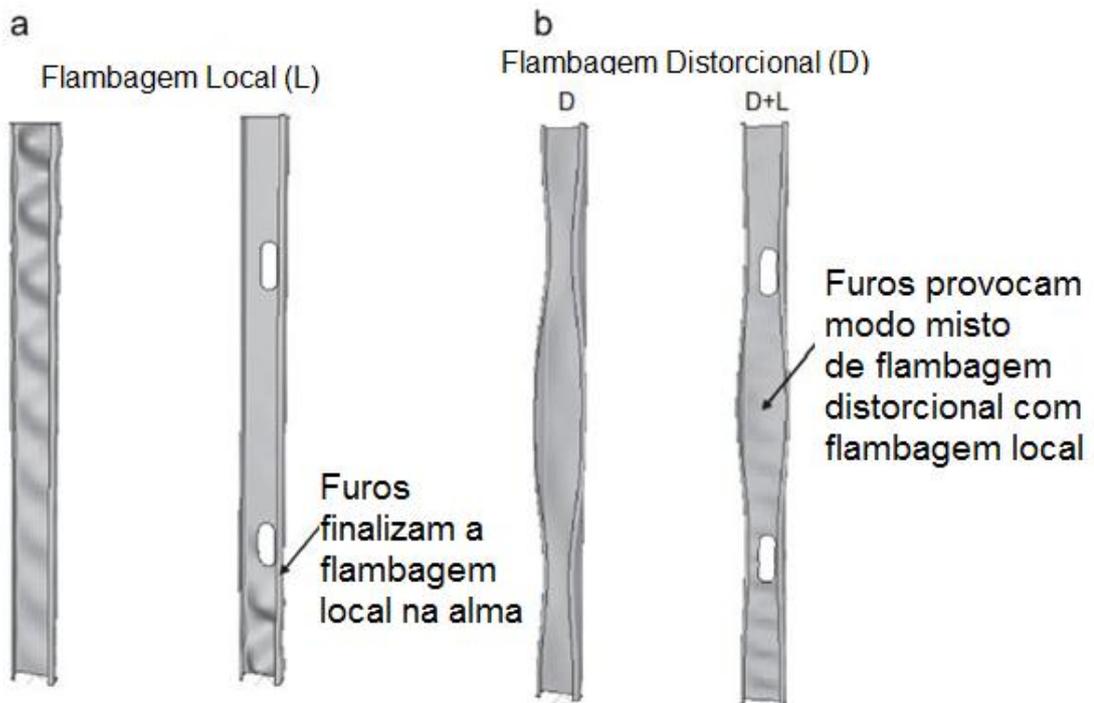


Figura 2.12 – Modos de flambagem esperado para barras em compressão de comprimento intermediário: (a) Flambagem Local; (b) Flambagem Distorcional (Adaptada de Moen e Schafer, 2008)

Moen e Schafer (2008) concluíram que a presença de furos oblongos discretos na alma de perfis Ue sujeitos à força axial de compressão provoca uma pequena redução na força axial de compressão resistente do mesmo, apesar da resposta pós-estável e a ductilidade da barra terem sido alteradas. Em alguns modelos, os furos reduziram a força de flambagem local da alma, fazendo com a maior parte da força de compressão fosse transmitida pela mesa e pelo enrijecedor, induzindo o perfil a falha pelo modo distorcional.

A seguir serão apresentados os resultados do estudo de Moen e Schafer. Estes serão utilizados para calibração dos resultados teóricos obtidos com o *software* implementado. A Figura 2.13 apresenta a nomenclatura usada no estudo. A Tabela 2-1 apresenta os dados das seções transversais adotadas no estudo, bem como o resultado do ensaio do aço que compõe os perfis. A Tabela 2-2 apresenta as forças axiais de flambagem global elástica, local elástica e distorcional elástica dos modelos com e sem furos, e avalia a influência dos furos nas forças de flambagem elástica. A Tabela 2-3 apresenta a força axial de compressão resistente obtida nos ensaios.

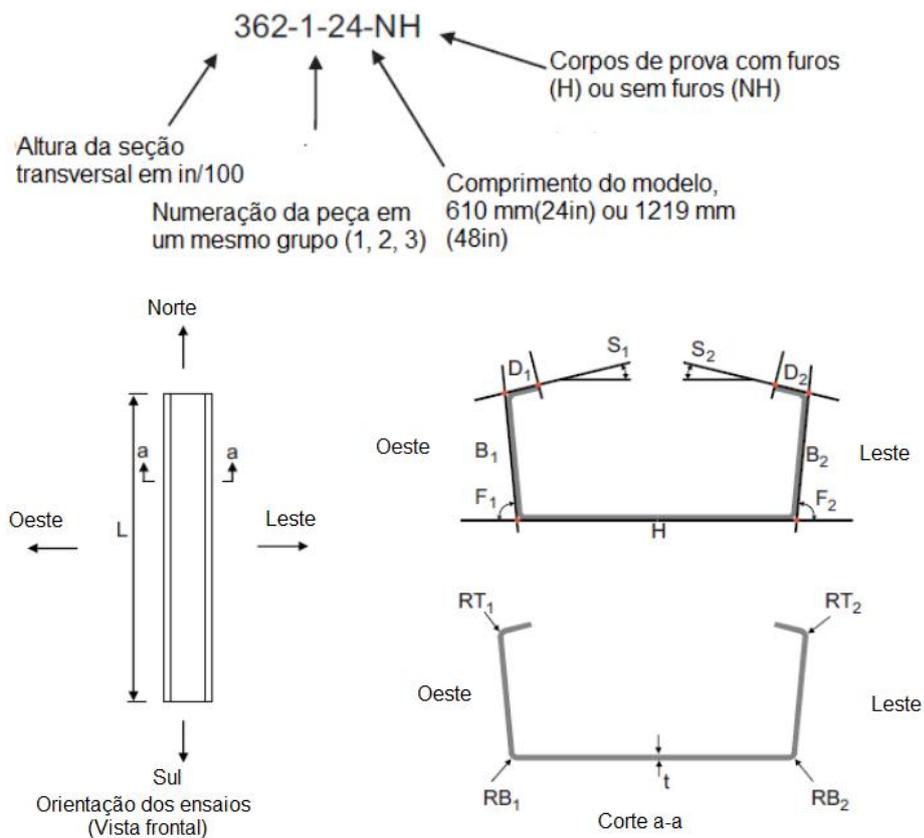


Figura 2.13 – Nomenclatura adotada no estudo (Adaptada de Moen e Schafer, 2008)

Tabela 2-1 – Resumo dos dados das seções transversais e do material (Moen & Schafer, 2008)

Specimen	f_y (MPa)	t (mm)	L (mm)	H (mm)	B_1 (mm)	B_2 (mm)	D_1 (mm)	D_2 (mm)	RT_1 (mm)	RT_2 (mm)	RB_1 (mm)	RB_2 (mm)	S_1 (deg)	S_2 (deg)	F_1 (deg)	F_2 (deg)
362-1-24-NH	380	0.98	612	92.8	39.4	41.2	10.4	10.9	4.8	4.8	4.4	4.8	12.8	8.4	86.0	86.8
362-2-24-NH	380	0.98	612	94.3	40.3	40.3	10.6	10.7	4.4	5.2	6.7	7.1	11.4	11.6	87.6	85.5
362-3-24-NH	380	0.98	612	92.0	42.6	42.6	10.8	10.1	4.8	4.4	7.1	7.1	9.6	9.4	86.3	85.4
362-1-24-H	400	0.99	612	91.0	41.9	40.5	10.9	11.1	4.8	5.2	7.1	7.1	11.1	10.9	87.6	85.6
362-2-24-H	394	0.97	612	92.6	41.3	40.5	11.2	9.9	4.8	4.8	7.1	7.1	4.4	10.3	86.3	85.2
362-3-24-H	386	1.00	612	93.3	42.5	43.1	10.6	10.8	4.8	4.8	6.7	6.7	10.5	10.8	87.7	86.1
362-1-48-NH	412	1.00	1225	92.0	40.9	40.8	10.5	10.8	4.4	4.4	7.1	7.1	7.8	10.1	85.0	85.6
362-2-48-NH	409	1.00	1227	92.0	40.9	40.3	10.3	10.7	4.8	4.4	7.5	7.1	8.0	10.8	84.2	84.6
362-3-48-NH	407	0.99	1224	91.8	40.7	40.6	10.8	10.2	4.8	4.8	6.7	6.7	9.1	12.2	85.3	84.1
362-1-48-H	404	1.00	1225	92.0	40.7	40.5	10.7	10.5	4.4	4.4	7.1	7.1	8.5	9.8	85.6	84.2
362-2-48-H	412	0.99	1225	92.0	40.5	40.9	10.8	10.2	4.4	4.4	7.1	7.1	8.3	11.2	85.6	83.8
362-3-48-H	402	1.01	1224	92.3	40.7	40.9	10.0	11.0	4.4	4.4	7.1	6.4	9.7	7.3	84.1	85.3
600-1-24-NH	405	1.11	612	153.3	40.6	41.4	12.4	9.3	4.4	4.0	6.4	5.2	1.6	2.1	91.4	93.8
600-2-24-NH	405	1.11	612	154.2	40.2	41.0	12.0	9.7	5.2	5.2	6.7	6.7	1.7	2.3	91.5	93.3
600-3-24-NH	405	1.11	612	153.2	40.7	40.4	9.4	12.3	4.0	4.4	6.7	5.6	-2.2	3.5	92.7	89.7
600-1-24-H	427	1.07	612	153.4	40.5	40.8	12.3	9.1	4.4	4.4	6.4	5.6	1.0	2.0	91.2	92.6
600-2-24-H	403	1.05	612	152.7	40.9	40.7	9.4	12.7	4.4	4.4	5.2	6.0	1.8	1.1	92.0	89.0
600-3-24-H	415	1.09	612	153.2	40.8	40.0	9.1	12.1	4.4	4.4	6.4	5.2	0.1	4.1	90.1	86.3
600-1-48-NH	415	1.10	1226	152.9	41.2	40.9	12.3	9.5	4.4	4.4	6.0	5.6	0.2	1.4	90.6	92.8
600-2-48-NH	437	1.10	1226	152.8	40.5	40.7	12.2	9.1	4.4	4.4	6.0	6.0	2.0	2.4	89.9	91.9
600-3-48-NH	422	1.10	1227	153.1	40.3	41.3	12.4	8.6	4.4	4.4	6.7	5.6	2.6	2.3	90.0	92.1
600-1-48-H	423	1.09	1221	152.6	40.6	41.3	12.2	9.9	4.8	4.0	6.4	5.6	2.5	2.1	90.0	92.6
600-2-48-H	428	1.09	1226	152.8	40.4	40.8	12.1	9.0	4.4	4.4	6.0	6.0	2.4	1.0	88.9	91.2
600-3-48-H	424	1.10	1221	154.0	41.5	40.3	9.3	12.2	4.4	4.4	5.6	6.4	0.7	3.6	92.3	89.4

Tabela 2-2 – Força axial de flambagem elástica dos modelos e influência do furos na flambagem elástica (Moen & Schafer, 2008)

Specimen name	Elastic buckling				Hole influence ^a		
	P_{yg} (kN)	P_{cre} (kN)	P_{crl} (kN)	P_{crd} (kN)	P_{cre}/P_{cre}^{noH}	P_{crl}/P_{crl}^{noH}	P_{crd}/P_{crd}^{noH}
362-1-24-NH	68.8	486.8	21.6	46.9			
362-2-24-NH	69.2	500.2	21.1	45.3		N/A	
362-3-24-NH	69.9	498.9	22.1	47.6			
362-1-24-H	72.7	530.5	26.0	59.9	0.98	1.03	1.12
362-2-24-H	69.9	501.6	24.1	55.1	0.98	1.02	1.13
362-3-24-H	73.0	580.7	25.4	57.5	0.99	1.02	1.12
362-1-48-NH	75.3	135.5	22.9	43.0			
362-2-48-NH	74.5	131.1	23.0	42.9		N/A	
362-3-48-NH	73.8	131.5	22.7	42.4			
362-1-48-H	73.7	133.2	23.5	42.0	0.94	1.03	0.98
362-2-48-H	74.9	132.2	23.2	41.5	0.94	1.03	0.98
362-3-48-H	74.9	160.9	25.3	42.6	0.95	1.03	0.98
600-1-24-NH	109.7	1087.5	15.3	30.1			
600-2-24-NH	109.1	1044.9	15.3	29.6		N/A	
600-3-24-NH	108.8	971.5	15.3	29.5			
600-1-24-H	111.3	1064.6	14.5	31.2	1.01	1.02	1.09
600-2-24-H	102.8	1060.6	14.3	30.0	1.01	1.01	1.08
600-3-24-H	110.0	1079.2	15.4	32.7	1.02	1.01	1.08
600-1-48-NH	111.8	274.9	15.4	23.0			
600-2-48-NH	116.5	265.3	15.0	25.3		N/A	
600-3-48-NH	112.9	267.6	15.2	25.2			
600-1-48-H	112.3	250.3	15.1	22.5	0.87	1.02	1.02
600-2-48-H	113.2	235.9	15.1	22.1	0.87	1.02	1.02
600-3-48-H	113.7	248.0	15.3	22.4	0.86	1.02	1.02

^aFor specimens with holes (H), the holes are removed and elastic buckling calculated (noH). The hole (H) and no hole (noH) finite element models are otherwise identical, isolating the influence of the holes.

Tabela 2-3 – Força axial de compressão resistente dos modelos (Moen & Schafer, 2008)

Specimen	P_{test} (kN)	P_{test} statistics	
		Mean (kN)	Std. dev. (kN)
362-1-24-NH	46.6	46.2	0.9
362-2-24-NH	46.7		
362-3-24-NH	45.1		
362-1-24-H	44.5	45.0	1.1
362-2-24-H	46.2		
362-3-24-H	44.2		
362-1-48-NH	40.4	41.6	1.0
362-2-48-NH	42.2		
362-3-48-NH	42.2		
362-1-48-H	39.8	40.8	0.9
362-2-48-H	40.8		
362-3-48-H	41.7		
600-1-24-NH	53.1	53.6	0.8
600-2-24-NH	53.2		
600-3-24-NH	54.4		
600-1-24-H	54.0	52.7	1.2
600-2-24-H	51.7		
600-3-24-H	52.4		
600-1-48-NH	49.6	50.2	0.6
600-2-48-NH	50.9		
600-3-48-NH	50.2		
600-1-48-H	49.6	50.4	1.4
600-2-48-H	52.0		
600-3-48-H	49.6		

2.8 Experimentos realizados em *steel joist* constituídos por barras em flexão com seção Ue e furos na alma

Para avaliar experimentalmente o comportamento de *steel joist* constituídos por barras formadas a frio em flexão com furos na alma, Moen et al. (2013) realizaram ensaios em dezoito peças, sendo nove com furos e nove sem furos. Uma seção transversal comercial sujeita à distorção foi escolhida e atenção especial foi dada para a amplificação da deformação causada pela flambagem distorcional nas peças com furos. Este ensaio foi realizado em flexão de quatro pontos com controle de deslocamentos, conforme apresentado na Figura 2.14.

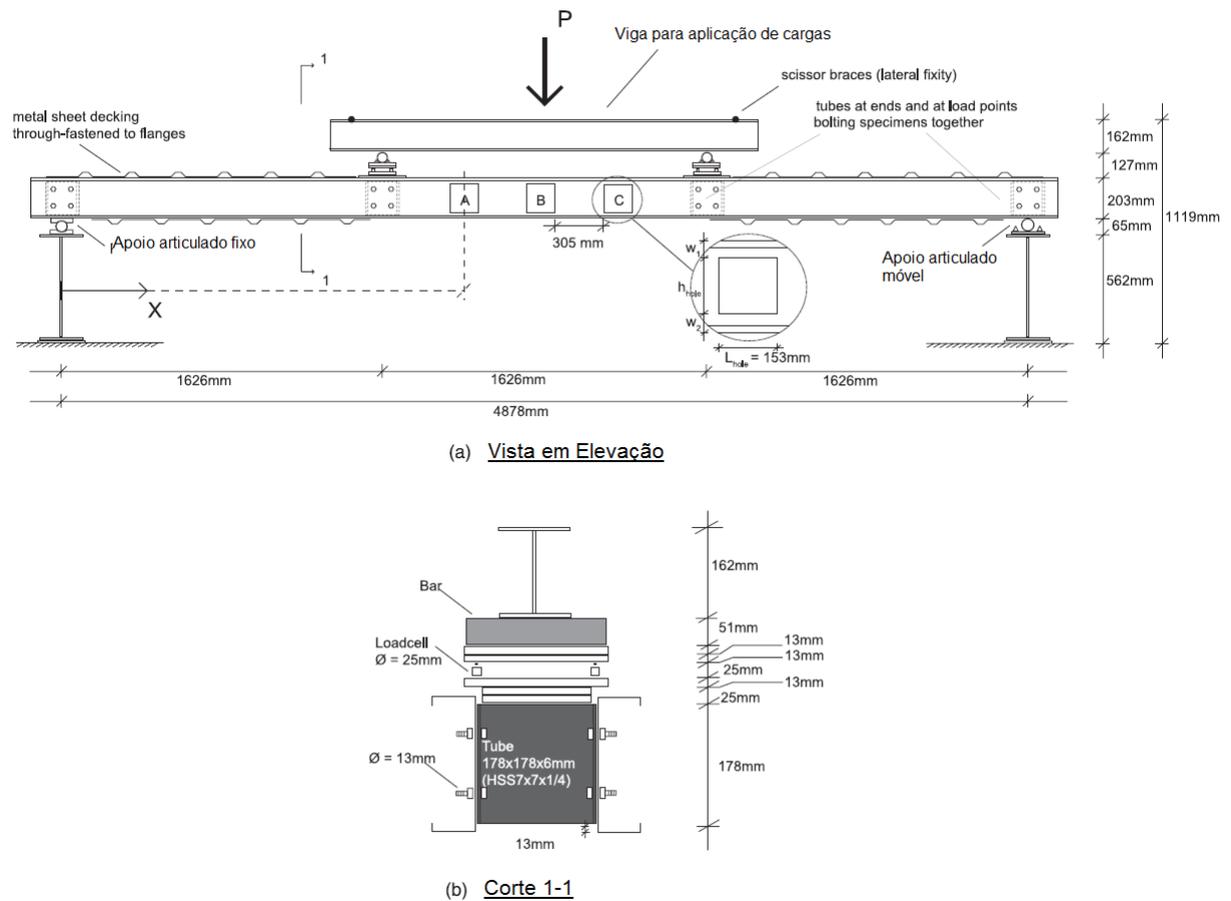


Figura 2.14 - Esquema adotado nos ensaios realizados por Moen et al. (Adaptada de Moen et al, 2013)

Cada *steel joist* possuía três furos retangulares em sua alma, feitos com um sistema de corte de água pressurizada. Foram ensaiadas peças sem furos e peças com furos. A dimensão dos furos foi escolhida de modo a garantir que a relação entre inércia bruta da seção e inércia líquida na região dos furos fosse de 0,90 e 0,80.

Os momentos críticos de flambagem foram calculados para cada perfil, incluindo a influência dos furos, via MRD. O comportamento de uma barra em flexão com furos é apresentado na Figura 2.15, que também apresenta um procedimento para análise de estabilidade elástica da região com furo no CUFSM.

Moen et al. (2013) observaram que o momento resistente sofreu uma redução média de 19% para as peças com $I_{net}/I_g = 0,90$ e de 34% para as peças com $I_{net}/I_g = 0,80$. Nestas peças foi observado flambagem distorcional na região do furo, acompanhada de flambagem local na região comprimida da alma próxima ao furo. Para alguns modelos observou-se o colapso repentino da peça na região do furo.

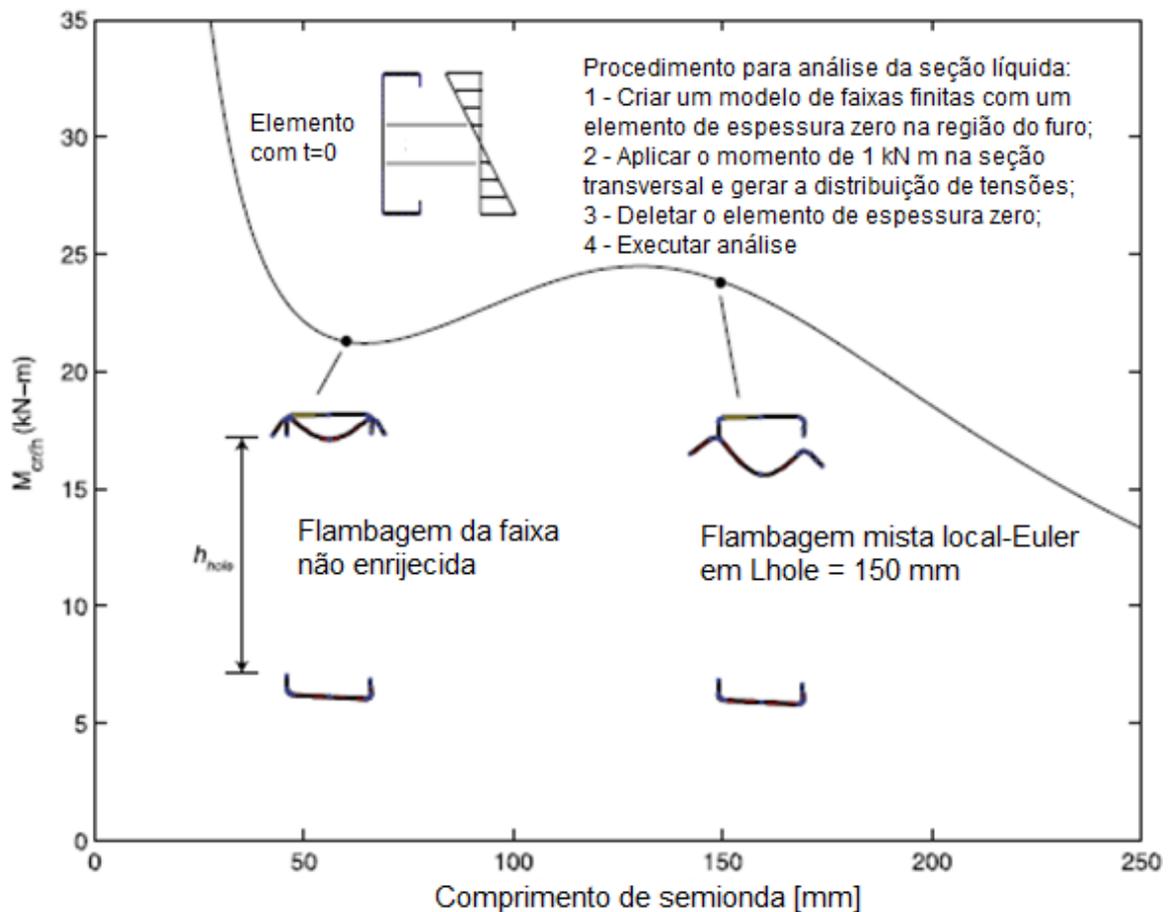


Figura 2.15 – Procedimento de análise da seção líquida via método das faixas finitas (Adaptada de Moen et al., 2013)

Moen et al. (2013) concluíram que a presença de furos reduz a capacidade resistente do perfil e aumentam os deslocamentos provenientes da flambagem distorcional. Também foi comprovado que o método da resistência direta é viável para cálculo dos momentos críticos de perfis Ue analisados no experimento.

A seguir serão apresentados os resultados do estudo de Moen et al. (2013). Estes serão utilizados para calibração dos resultados teóricos obtidos com o *software* implementado. A Figura 2.13 apresenta a nomenclatura usada no estudo. A Tabela 2-4 apresenta os dados das seções transversais adotadas, a Tabela 2-5 apresenta a locação e dimensão dos furos. Tabela 2-6 apresenta os momentos fletores de flambagem local elástica, enquanto a Tabela 2-7 apresenta os momentos fletores de flambagem distorcional elástica dos modelos com e sem furos, e avalia a influência dos furos nos mesmos. A Tabela 2-8 apresenta o momento fletor resistente obtido nos ensaios.

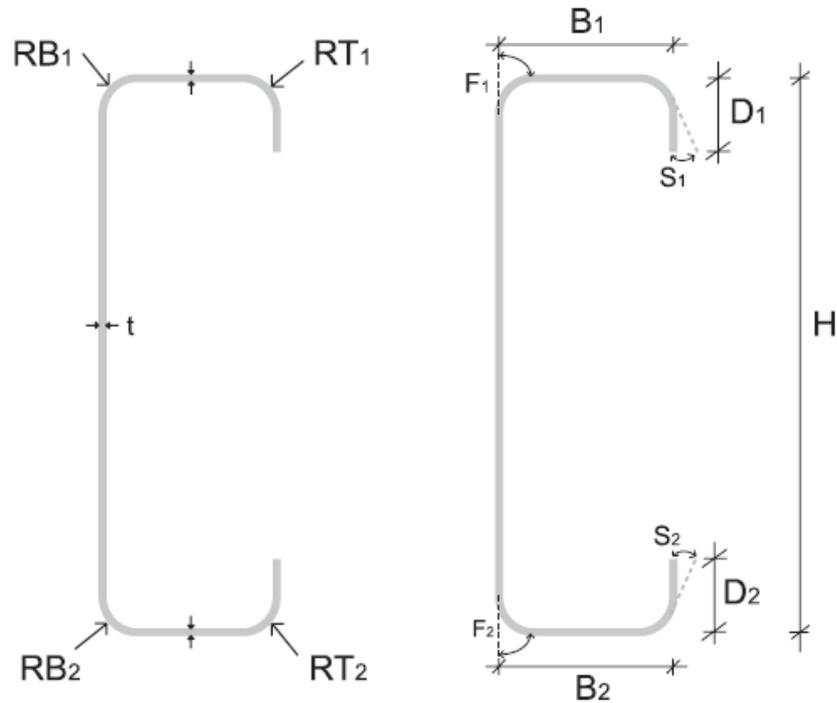


Figura 2.16 – Nomenclatura adotada no estudo (Moen et al., 2013)

Tabela 2-4 – Resumo dos dados das seções transversais (Moen et al., 2013)

Specimen	f_y (MPa)	t (mm)	H (mm)	B_1 (mm)	B_2 (mm)	D_1 (mm)	D_2 (mm)	F_1 (degrees)	F_2 (degrees)	S_1 (degrees)	S_2 (degrees)	RB_1 (mm)	RB_2 (mm)	RT_1 (mm)	RT_2 (mm)
NH-1.1	380	1.76	203.0	63.0	63.4	15.4	13.9	88.3	89.3	3.6	4.1	4.6	4.7	4.5	4.1
NH-1.2	363	1.77	203.2	62.8	63.4	15.3	14.0	87.6	89.9	4.0	3.7	4.7	5.5	4.9	4.4
NH-2.1	364	1.76	203.3	62.7	63.5	15.4	14.2	88.0	89.5	3.7	3.6	5.1	4.8	4.6	4.5
NH-2.2	375	1.78	203.1	62.7	63.5	15.2	14.0	86.5	89.3	3.9	4.1	4.9	4.7	4.9	4.2
NH-3.1	378	1.78	203.1	62.7	63.5	13.1	14.2	87.0	89.0	4.6	4.8	5.2	4.9	4.8	4.7
NH-3.2	371	1.77	203.0	62.7	63.4	15.3	14.1	87.7	89.0	3.8	3.5	4.7	4.9	4.2	3.9
H0.9-1.1	365	1.76	203.0	63.7	62.6	13.7	15.6	89.6	87.6	2.9	3.5	5.2	5.3	5.2	5.0
H.09-1.2	366	1.77	203.0	62.7	63.5	15.5	13.8	87.7	90.1	3.7	3.6	5.3	5.2	4.8	5.0
H.09-2.1	368	1.76	203.1	62.7	63.6	15.4	13.9	87.2	89.9	4.0	4.2	5.2	4.7	5.2	4.4
H0.9-2.2	363	1.77	203.1	62.6	63.6	15.3	13.9	87.9	89.9	4.3	3.3	5.4	4.7	5.1	4.8
H0.9-3.1	370	1.77	203.0	62.8	63.4	15.5	13.8	86.7	89.1	4.1	3.7	5.0	5.1	4.4	4.9
H0.9-3.2	369	1.78	202.9	62.8	63.4	15.6	13.6	86.7	89.6	3.4	3.8	5.2	5.3	4.7	4.3
H0.8-1.1	364	1.76	203.0	62.7	63.4	15.0	13.7	88.2	89.8	3.5	2.8	4.3	5.1	3.9	3.8
H0.8-1.2	360	1.77	203.0	63.5	62.9	14.0	15.2	89.8	87.1	3.3	4.3	4.7	5.4	4.7	4.5
H0.8-2.1	363	1.77	203.1	62.8	63.6	15.1	14.0	87.3	89.3	3.3	3.5	5.8	5.3	5.2	4.9
H0.8-2.2	363	1.75	203.1	63.5	62.7	14.3	15.3	89.7	87.3	3.0	4.0	5.2	5.1	4.4	4.7
H0.8-3.1	375	1.76	202.9	63.4	62.7	13.7	15.4	88.9	87.7	3.3	3.4	5.8	5.7	4.8	5.2
H0.8-3.2	376	1.76	203.1	63.4	62.6	14.0	15.2	89.7	87.3	3.6	3.6	4.4	5.7	4.7	4.4

Tabela 2-5 – Locação dos furos (Moen et al., 2013)

Specimen	Hole A					Hole B					Hole C				
	X (mm)	L_{hole} (mm)	h_{hole} (mm)	w_1 (mm)	w_2 (mm)	X (mm)	L_{hole} (mm)	h_{hole} (mm)	w_1 (mm)	w_2 (mm)	X (mm)	L_{hole} (mm)	h_{hole} (mm)	w_1 (mm)	w_2 (mm)
H0.9-1.1	1,980	152.3	136.6	32.5	33.3	2,438	152.3	136.7	32.7	33.1	2,895	152.3	136.7	32.6	33.1
H.09-1.2	1,980	152.3	136.7	33.5	31.8	2,438	152.3	136.7	33.1	32.2	2,895	152.3	136.8	33.0	32.6
H.09-2.1	1,980	152.3	136.7	33.0	32.6	2,438	152.3	136.7	33.2	32.6	2,895	152.4	136.7	33.3	32.4
H0.9-2.2	1,980	152.4	136.7	32.8	32.8	2,438	152.3	136.7	32.7	32.9	2,895	152.3	136.7	32.4	33.3
H0.9-3.1	1,980	152.3	136.7	32.4	33.3	2,438	152.3	136.7	32.8	33.1	2,895	152.3	136.7	32.9	32.8
H0.9-3.2	1,980	152.4	136.6	33.4	32.3	2,438	152.3	136.7	33.3	32.5	2,895	152.4	136.7	33.2	32.6
H0.8-1.1	1,980	152.1	172.1	15.4	14.9	2,438	152.0	172.1	15.4	15.0	2,895	152.0	171.9	15.4	15.3
H0.8-1.2	1,980	151.9	172.2	14.9	15.3	2,438	151.9	172.1	15.0	15.1	2,895	152.1	172.0	15.1	14.9
H0.8-2.1	1,980	151.8	172.1	15.5	14.9	2,438	152.0	172.1	15.4	15.2	2,895	152.1	171.8	15.3	15.4
H0.8-2.2	1,980	152.1	172.0	14.9	15.5	2,438	152.0	172.2	14.8	15.3	2,895	152.0	171.9	15.0	15.6
H0.8-3.1	1,980	152.0	172.0	14.6	15.9	2,438	152.0	172.2	14.4	15.8	2,895	152.1	172.3	14.5	15.6
H0.8-3.2	1,980	151.9	172.2	14.6	15.6	2,438	152.0	172.1	14.6	15.9	2,895	152.0	171.8	14.8	15.8

Tabela 2-6 – Momento fletor de flambagem local elástica dos modelos e influência do furos na flambagem elástica (Moen et al., 2013)

Specimen	Gross section local buckling		Net section local buckling		M_{crl} (kN m)
	L_{crlnh} (mm)	M_{crlnh} (kN m)	L_{crlh} (mm)	M_{crlh} (kN m)	
NH-1.1	113	15.9	—	—	15.9
NH-1.2	113	16.2	—	—	16.2
NH-2.1	113	16.2	—	—	16.2
NH-2.2	113	16.5	—	—	16.5
NH-3.1	113	16.1	—	—	16.1
NH-3.2	113	16.3	—	—	16.3
H0.9-1.1	113	15.5	80.0	18.1	15.5
H.09-1.2	113	16.2	80.0	18.6	16.2
H.09-2.1	113	16.2	80.0	19.0	16.2
H0.9-2.2	113	15.7	80.0	18.3	15.7
H0.9-3.1	113	16.3	80.0	18.7	16.3
H0.9-3.2	113	16.2	80.0	18.8	16.2
H0.8-1.1	113	16.0	65.0	21.0	16.0
H0.8-1.2	113	15.8	65.0	20.8	15.8
H0.8-2.1	113	16.0	65.0	21.5	16.0
H0.8-2.2	113	16.1	65.0	21.1	16.1
H0.8-3.1	113	16.1	65.0	21.3	16.1
H0.8-3.2	113	16.0	65.0	21.2	16.0

Tabela 2-7 – Momento fletor de flambagem distorcional elástica dos modelos e influência do furos na flambagem elástica (Moen et al., 2013)

Specimen	Gross section distorcional buckling		Net section distorcional buckling			
	L_{crdnh}	M_{crdnh}	L_{crdh}	t_r	M_{crdh}	M_{crd}
	(mm)	(kN m)	(mm)	(mm)	(kN m)	(kN m)
NH-1.1	491	13.3	—	—	—	13.3
NH-1.2	480	13.5	—	—	—	13.5
NH-2.1	480	13.5	—	—	—	13.5
NH-2.2	480	13.6	—	—	—	13.6
NH-3.1	428	11.9	—	—	—	11.9
NH-3.2	480	13.5	—	—	—	13.5
H0.9-1.1	448	11.9	448	1.53	10.1	10.1
H.09-1.2	480	13.5	480	1.55	11.6	11.6
H.09-2.1	480	13.5	480	1.56	11.2	11.2
H0.9-2.2	480	13.2	480	1.54	11.2	11.2
H0.9-3.1	491	13.5	491	1.56	11.7	11.7
H0.9-3.2	491	13.5	491	1.56	11.6	11.6
H0.8-1.1	480	13.1	480	1.55	11.0	11.0
H0.8-1.2	458	12.3	458	1.54	10.4	10.4
H0.8-2.1	480	13.1	480	1.55	11.2	11.2
H0.8-2.2	469	12.7	469	1.56	10.7	10.7
H0.8-3.1	448	12.3	448	1.55	10.4	10.4
H0.8-3.2	458	12.5	458	1.55	10.5	10.5

Tabela 2-8 – Momento fletor resistente dos modelos (Moen et al., 2013)

Specimen	Yield moment		Slenderness			Predicted capacity				Test-to-predicted		Test-to-predicted statistics	
	M_y (kN m)	M_{ynet} (kN m)	λ_c	λ_ℓ	λ_d	M_{ne} (kN m)	M_{nt} (kN m)	M_{nd} (kN m)	M_n (kN m)	M_{test} (kN m)	M_{test}/M_n	Mean	COV
NH-1.1	13.8	—	0.68	0.92	1.02	13.3	12.0	10.6	10.6	12.6	1.19		
NH-2.1	13.5	—	0.67	0.90	1.00	13.1	11.9	10.5	10.5	12.5	1.19	1.20	0.02
NH-3.2	13.7	—	0.68	0.90	1.01	13.3	12.1	10.6	10.6	13.0	1.22		
H0.9-1.1	13.2	11.98	0.71	0.90	1.14	12.7	11.5	9.4	9.4	9.7	1.03		
H0.9-2.2	13.2	11.90	0.71	0.90	1.08	12.6	11.5	9.7	9.7	10.5	1.09		
H0.9-3.1	13.4	12.32	0.71	0.89	1.07	12.8	11.8	9.9	9.9	10.8	1.09		
H0.8-1.2	13.2	10.67	0.75	0.89	1.13	12.4	11.4	8.5	8.5	8.2	0.96		
H0.8-2.2	13.3	10.78	0.75	0.88	1.12	12.4	11.4	8.6	8.6	8.6	1.00		
H0.8-3.2	13.8	11.16	0.77	0.90	1.15	12.9	11.7	8.8	8.8	8.6	0.98		

Note: $\lambda_c = (M_y/M_{cre})^{0.5}$; $\lambda_\ell = (M_{ne}/M_{crl})^{0.5}$; $\lambda_d = (M_y/M_{crd})^{0.5}$; and $M_n = \min(M_{ne}, M_{nt}, M_{nd})$; COV = coefficient of variation

2.9 Comportamento de perfis com furos sujeitos ao enrugamento da alma (*web crippling*)

Uzzaman *et al.* (2012) realizaram um estudo paramétrico sobre o comportamento de perfis formados a frio com aberturas na alma, sujeitos ao enrugamento da alma (*web crippling*), sob a condição de carregamento nas duas mesas.

Os autores adotaram uma análise não linear elastoplástica via método dos elementos finitos para investigar o efeito de furos circulares na alma dos perfis sob as condições de carregamento supracitadas. A força resistente da barra dependia da relação entre o diâmetro do furo (a) e a altura da alma do perfil (h) e da relação entre o comprimento de apoio (N), como pode ser analisado na Figura 2.17.

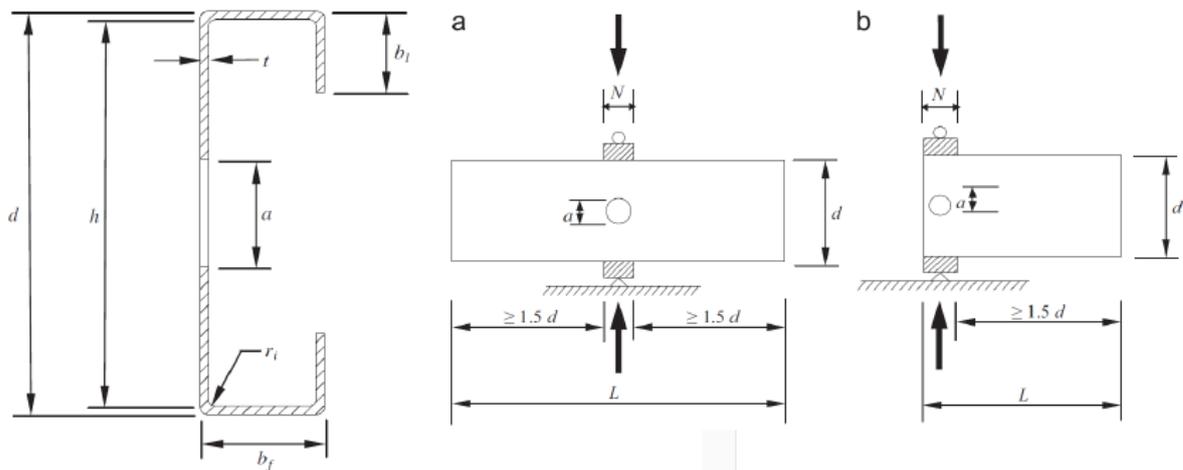


Figura 2.17 - Dados da seção transversal e condições de apoio. (a) ITF (b) ETF (Uzzaman et al., 2012)

Os autores propuseram a aplicação de fatores de redução R_p para as duas condições de carregamentos estudadas, apresentados nas equações 2.82 a 2.85. Os valores propostos para coeficientes de redução são conservadores e compatíveis com os resultados dos experimentos práticos e teóricos realizados.

$$R_p = 1,05 - \frac{0,54a}{h} + \frac{0,01N}{h} \leq 1, \quad \text{condição ITF - Mesa não conectada} \quad (2.82)$$

$$R_p = 1,01 - 0,51a/h + 0,06N/h \leq 1, \quad \text{condição ITF - Mesa conectada} \quad (2.83)$$

$$R_p = 0,90 - \frac{0,60a}{h} + \frac{0,12N}{h} \leq 1, \quad \text{condição ETF - Mesa não conectada} \quad (2.84)$$

$$R_p = 0,95 - 0,50a/h + 0,08N/h \leq 1, \quad \text{condição ETF - Mesa conectada} \quad (2.85)$$

A condição ITF (*Interior Two Flanges*) corresponde à situação de duas mesas internas carregadas, enquanto a condição ETF (*Exterior Two Flanges*) corresponde à situação de duas mesas externas carregadas, conforme apresentado na Figura 2.17 (a) e (b), respectivamente.

As equações supracitadas são válidas, caso as seguintes disposições construtivas sejam atendidas:

- a) Relação $h/t \leq 156$;
- b) Relação $N/t \leq 84$;
- c) Relação $N/h \leq 0,63$;
- d) Relação $a/h \leq 0,80$;
- e) Inclinação das mesas em relação à alma: 90° .

2.10 Flambagem elástica de perfis formados a frio com furos enrijecidos

Moen e Yu (2010) realizaram um estudo sobre a flambagem elástica de perfis formados a frio com furos enrijecidos. Os autores ressaltam que a presença de furos em componentes estruturais usualmente complica o processo de dimensionamento.

Segundo Moen e Yu (2010) em elementos com paredes finas, onde a flambagem local e as forças aplicadas estão intimamente relacionadas, os furos podem induzir modos de flambagem com o potencial de provocar o colapso repentino da peça em estado-limite último.

Moen e Yu (2010) ressaltam a limitação do método das faixas finitas para a análise de perfis com furos, uma vez que a descontinuidade provocada pelos furos não pode ser representada no modelo, de modo que é necessário fazer adaptações no mesmo ou lançar mão do método dos elementos finitos. Este último método, por sua vez, exige mais recursos computacionais; exige que o engenheiro tenha que modelar a região do furo, atentando para geração de malha neste trecho, além de avaliar os resultados, procurando pelos modos de flambagem pertinentes para cálculo manualmente.

O estudo foi feito com o *software* ABAQUS, onde foi analisado um perfil Ue 305x41,3x12,7x1,81, sujeito a flexo-compressão, com comprimento de 2500 mm e furos enrijecidos circulares espaçados de 500 mm. O diâmetro dos furos variou entre 10% e 70% da altura da seção transversal e a largura do enrijecedor de borda do furo variou mantendo a relação de 12% do diâmetro do furo. Conforme esquematizado na Figura 2.18.

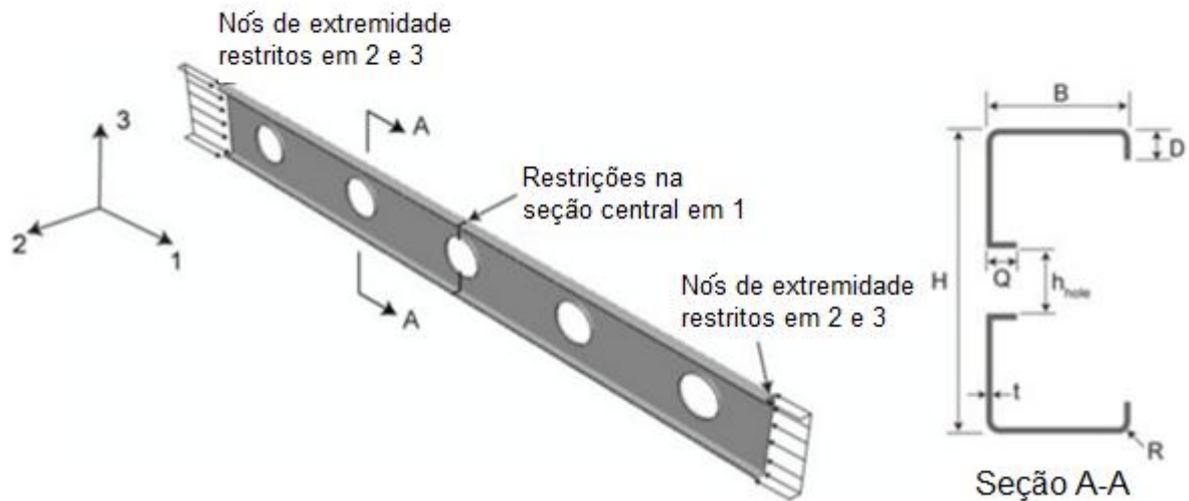


Figura 2.18 - Representação esquemática do modelo estudado (Adaptada de Moen e Yu, 2010)

Moen e Yu (2010) concluíram que a presença de furos enrijecedores reduz a força de flambagem global por flexão, por torção e por flexo-torção e o momento fletor de flambagem lateral com torção de perfis formados a frio. Com maior redução para a flambagem com global por flexo-torção.

Perfis com furos enrijecedores tiveram um aumento pouco significativo na força axial de flambagem global elástica, quando comparados com perfis com furos sem enrijecedores. Entretanto, foi observado um aumento na força axial de flambagem distorcional elástica quando comparados aos perfis sem enrijecedores, à medida que o diâmetro do furo e largura do enrijecedor foram aumentados.

Um modo único de flambagem distorcional foi observado, com as semiondas formadas entre os furos e força axial de flambagem distorcional elástica similar à de um perfil sem furos. Para a flambagem local, os enrijecedores de borda previnem a flambagem local no furo, as semiondas são formadas entre os furos conforme as semiondas obtidas via método das faixas finitas.

2.11 Análise crítica e comparativa

Nesta seção é realizada uma análise crítica e comparativa entre as normas e estudos apresentados ao longo da revisão bibliográfica.

2.11.1 Comparações entre as normas estudadas

Com base no exposto anteriormente, a norma brasileira ABNT NBR 14762:2010 contempla em seu escopo as condições específicas para o dimensionamento de perfis com furos somente nos capítulos inerentes ao dimensionamento de barras tracionadas e ligações parafusadas. A norma brasileira ABNT NBR 15253:2014, por sua vez, apresenta disposições construtivas e requisitos para a execução de furos em perfis estruturais sem a presença de reforços. Esta norma ainda alerta o calculista para a necessidade de se considerar a presença do furo no dimensionamento.

As normas europeias *EN 1993-1-3 (2006)*, *EN 1993-1-5 (2006)*, *EN 1993-1-8 (2005)* também não apresentam em seu escopo as condições específicas para o dimensionamento de perfis com a presença de furos em situações em que estes não sejam usados para a conexão entre perfis.

A norma norte americana AISI S100-16, por sua vez, apresenta em seu escopo a formulação completa para o dimensionamento de perfis formados a frio com a presença de furos, incluindo aqueles com função não só de passagem de parafusos. Apresenta disposições construtivas para execução de furos em perfis e como aplicar o método da largura efetiva e o método da resistência direta para o dimensionamento de perfis com furos. A Tabela 2-9 apresenta uma comparação entre as recomendações da ABNT NBR 15253:2014 e da AISI S100-16.

Tabela 2-9 – Comparação das disposições construtivas da ABNT NBR 15253:2013 e AISI S100-16 para execução de furos em perfis.

Disposições Construtivas	ABNT NBR 15.253:2014	AISI S100-16			
		Barras em compressão		Barras em flexão	
		Furos circulares	Furos não circulares	Furos circulares	Furos não circulares
Diâmetro máximo do furo	38 mm	0,5 w	63,5 mm (2,5 in) 0,5 w _o	152 mm (6 in) 0,7 w	63,5 mm (2,5 in) 0,7 w
Comprimento máximo do furo	115 mm	N.A.	114 mm (4,5 in)	N.A.	114 mm (4,5 in)
Espaçamento mínimo entre centro de furos	600 mm	0,5 w 3,0 d _h	610 mm (24 in)	457 mm (18 in)	457 mm (18 in)
Espaçamento mínimo entre borda de furo e final do perfil	250 mm	N.A.	254 mm (10 in)	N.A.	N.A.
Relação w/t	Não se aplica	w/t ≤ 70	N.A.	w/t ≤ 200	w/t ≤ 200

Com base nas disposições construtivas apresentadas na Tabela 2-1, é possível concluir que para os perfis usualmente adotados no sistema *Light Steel Framing*, não se pode adotar a formulação apresentada para o dimensionamento de barras em compressão com furos circulares, onde é considerado que a alma do perfil possui $k=4$, uma vez que todos os perfis apresentem relação h/t maior que 70, conforme apresentado na Tabela 2-2. Para o dimensionamento destes, deve-se considerar, portanto, as almas dos perfis como sendo constituídas por dois elementos não enrijecidos (AL) adjacentes ao furo, adotando-se $k=0,43$.

É importante ressaltar também que barras em flexão compostas pelas seções Ue 200x40x12x0,80 e Ue 200x300x12x0,95, segundo a AISI S100-16, não podem receber furos na alma, uma vez que a relação h/t destes perfis são 257,8 e 214,8 superando o limite de 200, conforme apresentado na Tabela 2-10.

Tabela 2-10 - Relações h/t para os perfis usualmente adotados no sistema LSF

Ue	b_w	b_f	D [mm]	t_n [mm]	t_r	t [mm]	r_i [mm]	h [mm]	h/t
	[mm]	[mm]			[mm]				
90x40x12x0,80	90	40	12	0,8	0,036	0,764	0,8	86,94	113,8
90x40x12x0,95	90	40	12	0,95	0,036	0,914	0,95	86,34	94,5
90x40x12x1,25	90	40	12	1,25	0,036	1,214	1,25	85,14	70,1
140x40x12x0,80	140	40	12	0,8	0,036	0,764	0,8	136,94	179,2
140x40x12x0,95	140	40	12	0,95	0,036	0,914	0,95	136,34	149,2
140x40x12x1,25	140	40	12	1,25	0,036	1,214	1,25	135,14	111,3
200x40x12x0,80	200	40	12	0,8	0,036	0,764	0,8	196,94	257,8
200x40x12x0,95	200	40	12	0,95	0,036	0,914	0,95	196,34	214,8
200x40x12x1,25	200	40	12	1,25	0,036	1,214	1,25	195,14	160,7

2.11.2 Comparações entre o MRD para perfis sem furos e perfis com furos

A norma norte americana AISI S100-16 apresenta em seu escopo o Método da Resistência Direta para o dimensionamento de perfis formados a frio, que é estendido para o dimensionamento de perfis com a presença de furos.

Moen e Schafer (2009) apresentaram uma metodologia para o cálculo das forças axiais de flambagem elástica de perfis com a presença de furos via método das faixas finitas. Um estudo realizado por Moen e Schafer (2011) propõe uma metodologia para dimensionamento de barras em compressão com a presença de furos, via método da resistência direta. Outro estudo realizado por Moen et al (2013) propõe uma metodologia para o dimensionamento de barras em flexão com a presença de furos pelo mesmo método.

Para o dimensionamento de barras submetidas à compressão com furos, a norma AISI S100-16 preconiza que P_{ne} pode ser calculada conforme seção que trata de barras em compressão sem furos. Entretanto a influência de furos deve ser considerada para cálculo de P_{cre} .

P_{nl} também pode ser calculada conforme seção que trata de barras em compressão sem furos, limitando P_{nl} a força de escoamento da seção transversal na região do furo. A influência de furos deve ser considerada para cálculo de P_{crf} .

Para o cálculo de P_{nd} , a norma apresenta uma nova formulação, que leva em conta novos intervalos para o índice de esbeltez reduzido associado à flambagem distorcional. P_{nd} também fica limitado a $P_{ynet} = F_y * A_{net}$. P_{crd} deve ser calculada considerando a influência dos furos.

Para o dimensionamento de barras submetidas à flexão com a presença de furos, a norma AISI S100-16 preconiza que M_{ne} pode ser calculada conforme seção que trata de barras em flexão sem furos. Entretanto a influência de furos deve ser considerada para cálculo de M_{cre} .

M_{nl} também pode ser calculada conforme seção que trata de barras submetidas à flexão sem furos, limitando esta ao momento de escoamento da seção transversal na região do furo. A influência de furos deve ser considerada para cálculo de M_{crf} .

Para o cálculo de M_{nd} , a norma AISI S100-16 apresenta uma nova formulação, que leva em conta novos intervalos para o índice de esbeltez reduzido associado à flambagem distorcional. M_{nd} também fica limitado à $M_{ynet} = F_y * S_{net}$. M_{crd} deve ser calculada considerando a influência dos furos.

O método proposto por Moen et al (2013) nos estudos supracitados é semelhante à apresentada na norma americana. As formulações do estudo apresentado por Moen e Schafer

(2009) para o cálculo das forças axiais de compressão e dos momentos fletores de flambagem elástica local, distorcional e global, contabilizando a influência de furos nos perfis são semelhantes aos apresentados nos itens 2.3.2 e 2.3.4 da AISI S100-16. Esta norma apresenta formulações adicionais para condições mais específicas de dimensionamento, enquanto Moen e Schafer (2009) apresentam mais detalhadamente o procedimento a ser adotado. A Tabela 2-11 apresenta uma comparação entre os métodos para barras em flexão e a Tabela 2-12 apresenta uma comparação entre os métodos para barras em compressão.

Tabela 2-11 - Comparação do MRD aplicado à barras em compressão apresentados pela AISI S100-16 (sem furos), AISI S100-16 (com furos) e Moen e Schafer (2011)

	AISI S-100 SEM FUROS	AISI S-100 COM FUROS
P_{ne}	$P_{ne} = A_g F_n$	$P_{ne} = A_g F_n$
	For $\lambda_c \leq 1.5$ $F_n = (0.658 \lambda_c^2) F_y$	For $\lambda_c \leq 1.5$ $F_n = (0.658 \lambda_c^2) F_y$
	For $\lambda_c > 1.5$ $F_n = \left(\frac{0.877}{\lambda_c^2} \right) F_y$	For $\lambda_c > 1.5$ $F_n = \left(\frac{0.877}{\lambda_c^2} \right) F_y$
	$\lambda_c = \sqrt{\frac{F_y}{F_{cre}}}$	$\lambda_c = \sqrt{\frac{F_y}{F_{cre}}}$
	$\sigma_{ex} = \frac{\pi^2 E}{(K_x L_x / r_x)^2}$	$F_{cre} = \frac{\pi^2 E I_{avg}}{A_g (KL)^2}$
	$\sigma_{ey} = \frac{\pi^2 E}{(K_y L_y / r_y)^2}$	
	$\sigma_t = \frac{1}{A_g r_c^2} \left[GJ + \frac{\pi^2 E C_w}{(K_t L)^2} \right]$	
P_{nl}	For $\lambda_\ell \leq 0.776$; $P_{nl} = P_{ne}$	For $\lambda_\ell \leq 0.776$; $P_{nl} = P_{ne}$
	For $\lambda_\ell > 0.776$; $P_{nl} = \left[1 - 0.15 \left(\frac{P_{cr\ell}}{P_{ne}} \right)^{0.4} \right] \left(\frac{P_{cr\ell}}{P_{ne}} \right)^{0.4} P_{ne}$	For $\lambda_\ell > 0.776$; $P_{nl} = \left[1 - 0.15 \left(\frac{P_{cr\ell}}{P_{ne}} \right)^{0.4} \right] \left(\frac{P_{cr\ell}}{P_{ne}} \right)^{0.4} P_{ne}$
	$P_{nl} \leq P_{ynet}$	$P_{ynet} = A_{net} F_y$
	$\lambda_\ell = \sqrt{P_{ne}/P_{cr\ell}}$	$\lambda_\ell = \sqrt{P_{ne}/P_{cr\ell}}$
P_{nd}	For $\lambda_{d1} \leq 0.561$; $P_{nd} = P_y$	For $\lambda_{d1} \leq \lambda_{d1}$; $P_{nd} = P_{ynet}$
	For $\lambda_{d1} > 0.561$; $P_{nd} = \left[1 - 0.25 \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0.6} \right] \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0.6} P_y$	For $\lambda_{d1} < \lambda_{d2} \leq \lambda_{d2}$; $P_{nd} = P_{ynet} - \left(\frac{P_{ynet} - P_{d2}}{\lambda_{d2} - \lambda_{d1}} \right) (\lambda_{d1} - \lambda_{d1})$
	$\lambda_{d1} = \sqrt{P_y/P_{crd}}$	$\lambda_{d1} = 0.561 \left(\frac{P_{ynet}}{P_y} \right)$
		$\lambda_{d2} = 0.561 \left[14.0 \left(\frac{P_y}{P_{ynet}} \right)^{0.4} - 13.0 \right]$
		$P_{d2} = \left[1 - 0.25 \left(\frac{1}{\lambda_{d2}} \right)^{1.2} \right] \left(\frac{1}{\lambda_{d2}} \right)^{1.2} P_y$

Tabela 2-11 - Comparação do MRD aplicado à barras em compressão apresentados pela AISI S100-16 (sem furos), AISI S100-16 (com furos) e Moen e Schafer (2011) - Continuação

	MOEN E SCHAFER (2011) SEM FUROS	MOEN E SCHAFER (2011) COM FUROS
P_{ne}	$P_{ne} = A_g F_n$ -	-
	For $\lambda_c \leq 1.5$ E for $\lambda_c \leq 1.5$, $P_{ne} = (0.658\lambda_c^2) P_y$	for $\lambda_c \leq 1.5$, $P_{ne} = (0.658\lambda_c^2) P_y$
	For $\lambda_c > 1.5$ F for $\lambda_c > 1.5$, $P_{ne} = \left(\frac{0.877}{\lambda_c^2}\right) P_y$	for $\lambda_c > 1.5$, $P_{ne} = \left(\frac{0.877}{\lambda_c^2}\right) P_y$
	$\lambda_c = \sqrt{\frac{F_y}{F_{cre}}}$ $\lambda_c = (P_y/P_{cre})^{0.5}$	$\lambda_c = (P_y/P_{cre})^{0.5}$
$\sigma_{ex} = \frac{\pi^2 E}{(K_x L_x/r_x)^2}$ $\sigma_{ey} = \frac{\pi^2 E}{(K_y L_y/r_y)^2}$ $\sigma_t = \frac{1}{A_g t_c} \left[GJ + \frac{\pi^2 E C_w}{(K_t L_t)^2} \right]$	$\sigma_{ex} = \frac{\pi^2 E}{(K_x L_x/r_x)^2}$ $\sigma_{ey} = \frac{\pi^2 E}{(K_y L_y/r_y)^2}$ $\sigma_t = \frac{1}{A_g t_c} \left[GJ + \frac{\pi^2 E C_w}{(K_t L_t)^2} \right]$	$F_{cre} = \frac{\pi^2 E I_{avg}}{A_g (KL)^2}$
P_{nt}	F_t for $\lambda_\ell \leq 0.776$, $P_{nt} = P_{ne}$	for $\lambda_\ell \leq 0.776$, $P_{nt} = P_{ne}$
	F_t for $\lambda_\ell > 0.776$, $P_{nt} = \left[1 - 0.15 \left(\frac{P_{cr\ell}}{P_{ne}} \right)^{0.47} \right] \left(\frac{P_{cr\ell}}{P_{ne}} \right)^{0.4} P_{ne}$	for $\lambda_\ell > 0.776$, $P_{nt} = \left[1 - 0.15 \left(\frac{P_{cr\ell}}{P_{ne}} \right)^{0.47} \right] \left(\frac{P_{cr\ell}}{P_{ne}} \right)^{0.4} P_{ne}$
	$F_{ynet} = A_{net} F_y$	
$\lambda_\ell = \sqrt{P_{ne}/P_{cr\ell}}$ $\lambda_\ell = (P_{ne}/P_{cr\ell})^{0.5}$	$\lambda_\ell = (P_{ne}/P_{cr\ell})^{0.5}$ $P_{nt} \leq P_{ynet}$	
P_{nd}	for $\lambda_d \leq 0.561$, $P_{nd} = P_y$	for $\lambda_d \leq \lambda_{d1}$, $P_{nd} = P_{ynet}$
	for $\lambda_d > 0.561$, $P_{nd} = \left(1 - 0.25 \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0.6} \right) \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0.6} P_y$	for $\lambda_{d1} < \lambda_d \leq \lambda_{d2}$, $P_{nd} = P_{ynet} - \left(\frac{P_{ynet} - P_{d2}}{\lambda_{d2} - \lambda_{d1}} \right) (\lambda_d - \lambda_{d1})$
		for $\lambda_d > \lambda_{d2}$, $P_{nd} = \left(1 - 0.25 \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0.6} \right) \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0.6} P_y$
$\lambda_{d1} = 0.561 \left(\frac{P_{ynet}}{P_y} \right)$	$\lambda_d = (P_y/P_{crd})^{0.5}$	
$\lambda_{d2} = 0.561 \left[14.0 \left(\frac{P_y \lambda_d}{P_{ynet}} \right)^{0.4} \left(\frac{P_y}{P_{ynet}} \right)^{0.5} \right]$	$\lambda_{d1} = 0.561 (P_{ynet}/P_y)$; $\lambda_{d2} = 0.561 [14 (P_y/P_{ynet})^{0.4} - 13]$	
$P_{d2} = \left[1 - 0.25 \left(\frac{1}{\lambda_{d2}} \right)^{1.2} \right] \left(\frac{1}{\lambda_{d2}} \right)^{1.2} P_y$	$P_{d2} = \left(1 - 0.25 \left(\frac{1}{\lambda_{d2}} \right)^{1.2} \right) \left(\frac{1}{\lambda_{d2}} \right)^{1.2} P_y$	

Tabela 2-12 - Comparação do MRD aplicado à barras em flexão apresentados pela AISI S100-16 (sem furos), AISI S100-16 (com furos) e Moen et al (2013)

	AISI S-100 SEM FUROS	AISI S-100 COM FUROS
M_{ne}	$M_{ne} = S_t F_n \leq M_y$	$M_{ne} = S_t F_n \leq M_y$
	For $F_{cre} \geq 2.78F_y$ $F_n = F_y$ For $2.78F_y > F_{cre} > 0.56F_y$ $F_n = \frac{10}{9} F_y \left(1 - \frac{10F_y}{36F_{cre}} \right)$ For $F_{cre} \leq 0.56F_y$ $F_n = F_{cre}$	For $F_{cre} \geq 2.78F_y$ $F_n = F_y$ For $2.78F_y > F_{cre} > 0.56F_y$ $F_n = \frac{10}{9} F_y \left(1 - \frac{10F_y}{36F_{cre}} \right)$ For $F_{cre} \leq 0.56F_y$ $F_n = F_{cre}$
M_{nl}	For $\lambda_\ell \leq 0.776$ $M_{nl} = M_{ne}$ For $\lambda_\ell > 0.776$ $M_{nl} = \left[1 - 0.15 \left(\frac{M_{cr\ell}}{M_{ne}} \right)^{0.4} \right] \left(\frac{M_{cr\ell}}{M_{ne}} \right)^{0.4} M_{ne}$	For $\lambda_\ell \leq 0.776$ $M_{nl} = M_{ne}$ For $\lambda_\ell > 0.776$ $M_{nl} = \left[1 - 0.15 \left(\frac{M_{cr\ell}}{M_{ne}} \right)^{0.4} \right] \left(\frac{M_{cr\ell}}{M_{ne}} \right)^{0.4} M_{ne}$ $M_{nl} \leq M_{ynet}$
	$\lambda_\ell = \sqrt{M_{ne}/M_{cr\ell}}$	$\lambda_\ell = \sqrt{M_{ne}/M_{cr\ell}}$
M_{nd}	For $\lambda_d \leq 0.673$ $M_{nd} = M_y$ For $\lambda_d > 0.673$ $M_{nd} = \left[1 - 0.22 \left(\frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0.5} \right] \left(\frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0.5} M_y$	For $\lambda_d \leq \lambda_{d1}$ $M_{nd} = M_{ynet}$ For $\lambda_{d1} < \lambda_d \leq \lambda_{d2}$ $M_{nd} = M_{ynet} - \left(\frac{M_{ynet} - M_{d2}}{\lambda_{d2} - \lambda_{d1}} \right) (\lambda_d - \lambda_{d1})$ $M_{nd} \leq \left[1 - 0.22 \left(\frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0.5} \right] \left(\frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0.5} M_y$
	$\lambda_d = \sqrt{M_y/M_{crd}}$	$\lambda_d = \sqrt{M_y/M_{crd}}$ $\lambda_{d1} = 0.673(M_{ynet}/M_y)^3$ $\lambda_{d2} = 0.673[1.7(M_y/M_{ynet})^{2.7} - 0.7]$ $M_{d2} = [1 - 0.22(1/\lambda_{d2})](1/\lambda_{d2})M_y$

Tabela 2-12 - Comparação do MRD aplicado à barras em flexão apresentados pela AISI S100-16 (sem furos), AISI S100-16 (com furos) e Moen et al (2013) – Continuação

	MOEN ET AL (2013) SEM FUROS	MOEN ET AL (2013) COM FUROS
M_{ne}	-	$M_{cre} = \frac{\pi}{k_y L} \sqrt{E I_{avg} \left[G J_{avg} + E C_{vnet} \frac{\pi^2}{(k_y L)^2} \right]}$
	$M_{ne} = M_{cre} \text{ for } M_{cre} < 0.56 M_y$ $M_{ne} = \frac{10}{9} M_y \left(1 - \frac{10 M_y}{36 M_{cre}} \right) \text{ for } 2.78 M_y \geq M_{cre} \geq 0.56 M_y$ $M_{ne} = M_y \text{ for } M_{cre} > 2.78 M_y \quad (1)$	$M_{ne} = M_{cre} \text{ for } M_{cre} < 0.56 M_y$ $M_{ne} = \frac{10}{9} M_y \left(1 - \frac{10 M_y}{36 M_{cre}} \right) \text{ for } 2.78 M_y \geq M_{cre} \geq 0.56 M_y$ $M_{ne} = M_y \text{ for } M_{cre} > 2.78 M_y \quad (1)$
M_{nl}	$M_{nl} = M_{ne} \leq M_{ynet} \text{ for } \lambda_\ell \leq 0.776$ $M_{nl} = \left[1 - 0.15 \left(\frac{M_{crl}}{M_{ne}} \right)^{0.4} \left(\frac{M_{crl}}{M_{ne}} \right)^{0.4} \right] M_{ne} \text{ for } \lambda_\ell > 0.776$	$M_{nl} = M_{ne} \leq M_{ynet} \text{ for } \lambda_\ell \leq 0.776$ $M_{nl} = \left[1 - 0.15 \left(\frac{M_{crl}}{M_{ne}} \right)^{0.4} \left(\frac{M_{crl}}{M_{ne}} \right)^{0.4} \right] M_{ne} \text{ for } \lambda_\ell > 0.776$
	$\lambda_\ell = (M_{ne}/M_{crl})^{0.5}$	$\lambda_\ell = (M_{ne}/M_{crl})^{0.5}$
M_{nd}	$\text{For } \lambda_{d1} \leq 0.673 \quad M_{nd} = M_y$ $\text{For } \lambda_{d1} > 0.673 \quad M_{nd} = \left[1 - 0.22 \left(\frac{M_{crl}}{M_y} \right)^{0.5} \right] \left(\frac{M_{crl}}{M_y} \right)^{0.5} M_y$	$M_{nd} = M_{ynet} \text{ for } \lambda_d \leq \lambda_{d1}$ $M_{nd} = M_{ynet} - \left(\frac{M_{ynet} - M_{d2}}{\lambda_{d2} - \lambda_{d1}} \right) (\lambda_d - \lambda_{d1})$ $\leq \left[1 - 0.22 \left(\frac{M_{crl}}{M_y} \right)^{0.5} \right] \left(\frac{M_{crl}}{M_y} \right)^{0.5} M_y \text{ for } \lambda_d > \lambda_{d1}$
	$\lambda_d = (M_y/M_{crl})^{0.5}$	$\lambda_d = (M_y/M_{crl})^{0.5}$ $\lambda_{d1} = 0.673 (M_{ynet}/M_y)^3$ $\lambda_{d2} = 0.673 [1.7 (M_y/M_{ynet})^{2.7} - 0.7]$ $M_{d2} = [1 - 0.22 (1/\lambda_{d2})] (1/\lambda_{d2}) M_y$

Tabela 2-13 – Propriedades médias da seção transversal para furos uniformemente distribuídos, AISI S100-16

Average Properties	Formulas
Cross-sectional area	$A_{avg} = \frac{A_g L_g + A_{net} L_{net}}{L}$
Moment of inertia about axis of buckling	$I_{avg} = \frac{I_g L_g + I_{net} L_{net}}{L}$
Saint-Venant Torsion constant	$J_{avg} = \frac{J_g L_g + J_{net} L_{net}}{L}$
Distance from centroid to shear center in principal x-axis direction	$x_{o,avg} = \frac{x_{o,g} L_g + x_{o,net} L_{net}}{L}$
Distance from centroid to shear center in principal y-axis direction	$y_{o,avg} = \frac{y_{o,g} L_g + y_{o,net} L_{net}}{L}$
Polar radius gyration about shear center	$r_{o,avg} = \sqrt{x_{o,avg}^2 + y_{o,avg}^2 + \frac{I_{x,avg} + I_{y,avg}}{A_{avg}}}$

2.11.3 Comparação entre as formulações de Uzzaman et al (2012) e AISI S100-16 para o dimensionamento de perfis Ue sujeitos ao enrugamento da alma (*web crippling*)

As formulações apresentadas na norma AISI S100-16 para a determinação da força resistente de perfis Ue sujeitos ao enrugamento da alma (*web crippling*) para os casos de reações em uma mesa, externa e internamente, conforme observados nos itens a e c da figura abaixo. Os estudos de Uzzaman et al (2012) estenderam as formulações na norma para os casos de reações em duas mesas, externa e internamente, conforme observado nos itens b e d da figura abaixo. Estas consideram ainda as condições de contorno das mesas como soltas e livres.

Ressalta-se que as formulações da AISI S100-16 são aplicáveis para furos circulares e não circulares, enquanto as formulações propostas por Uzzaman et al (2012) são aplicáveis somente para furos circulares.

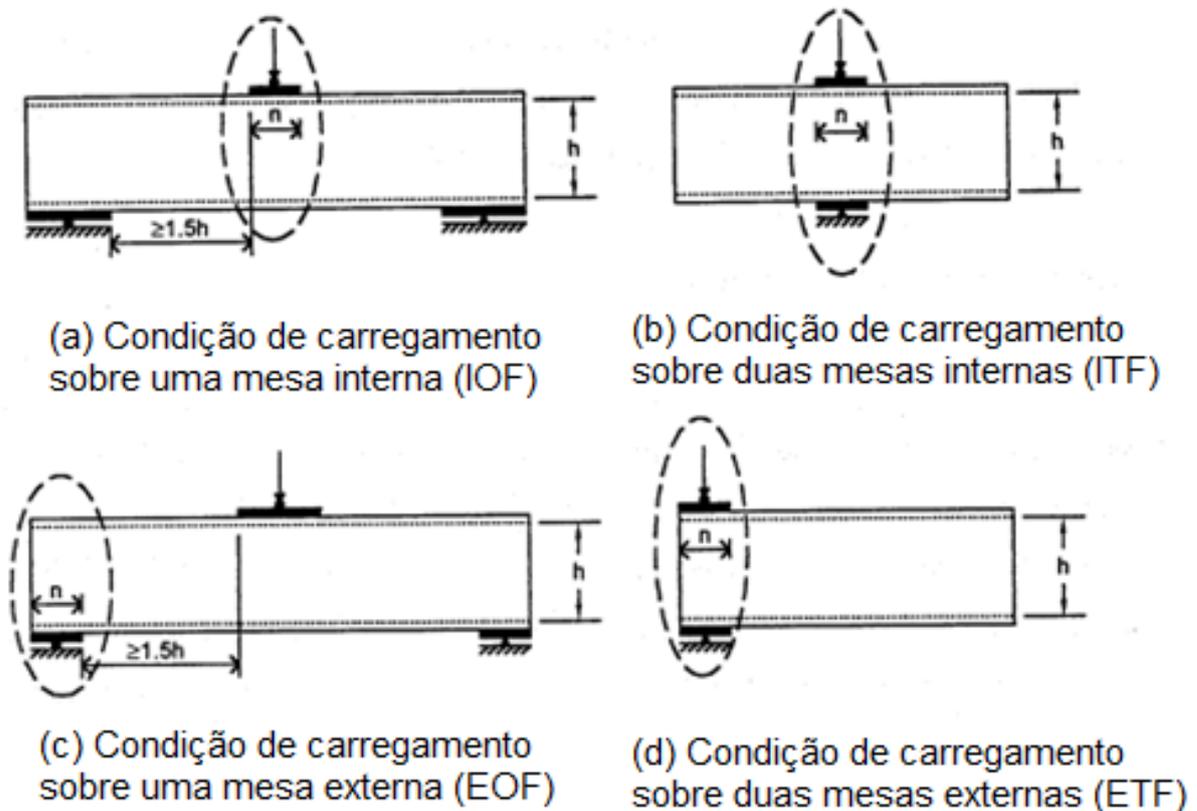
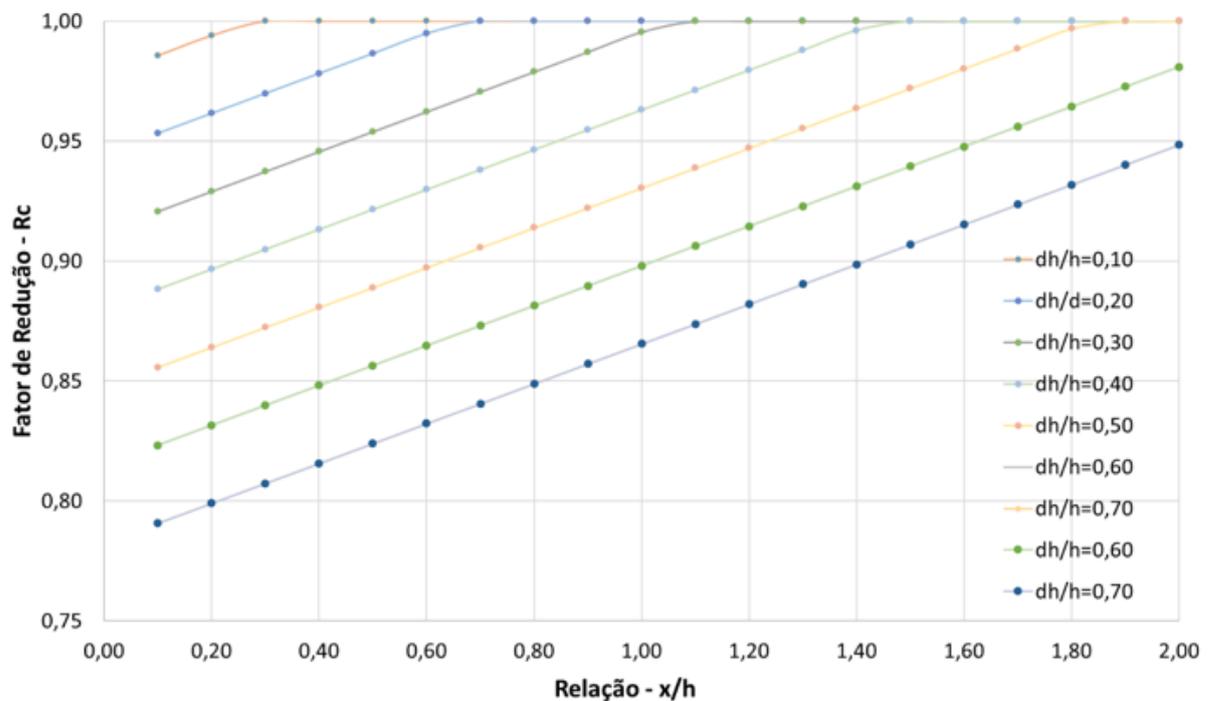


Figura 2.19 - Condições de carregamento. (a) *Interior One Flange Loading* (IOF), (b) *Interior Two Flange Loading*, (ITF); (c) *End One Flange Loading* (EOF), (d) *EndTwo Flange Loading*, (ETF); (Adaptada de AISI Report RP02-2)

Tabela 2-14 – Comparação das disposições construtivas da AISI S100-16 e Uzzaman et al (2012)

Disposições Construtivas	AISI S100-16	Uzzaman et al (2012)
Relações h/t	$h/t \leq 200$	$h/t \leq 156$
Relações d_h/h	$d_h/h \leq 0,70$	$d_h/h \leq 0,80$
Largura do apoio	$N \geq 25,4$ mm (EOF) $N \geq 76,2$ mm (IOF)	$N/t \leq 84$ $N/h \leq 0,63$
Aplicável em furos:	Circulares e Não Circulares	Circulares

Para critérios comparativos, são apresentados gráficos com o cálculo dos fatores R_c , conforme AISI S100-16 e R_p , conforme Uzzaman et al (2012). Para elaboração dos ábacos, considerou-se a relação d_h/h variando de 0,10 a 0,70, conforme limitado pela AISI S100-16. Considerou-se também a relação x/h variando de 0,1 até 2,00.

Figura 2.20 – Fator R_c para condição EOF – AISI S100-16

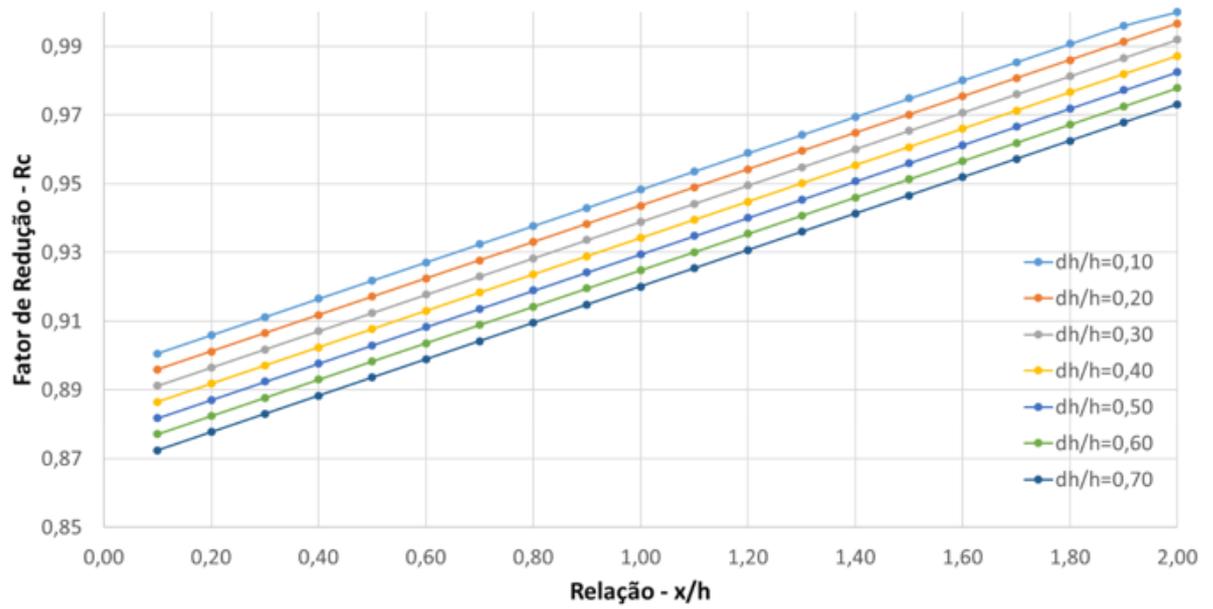


Figura 2.21 – Fator R_c para condição IOF – AISI S100-16

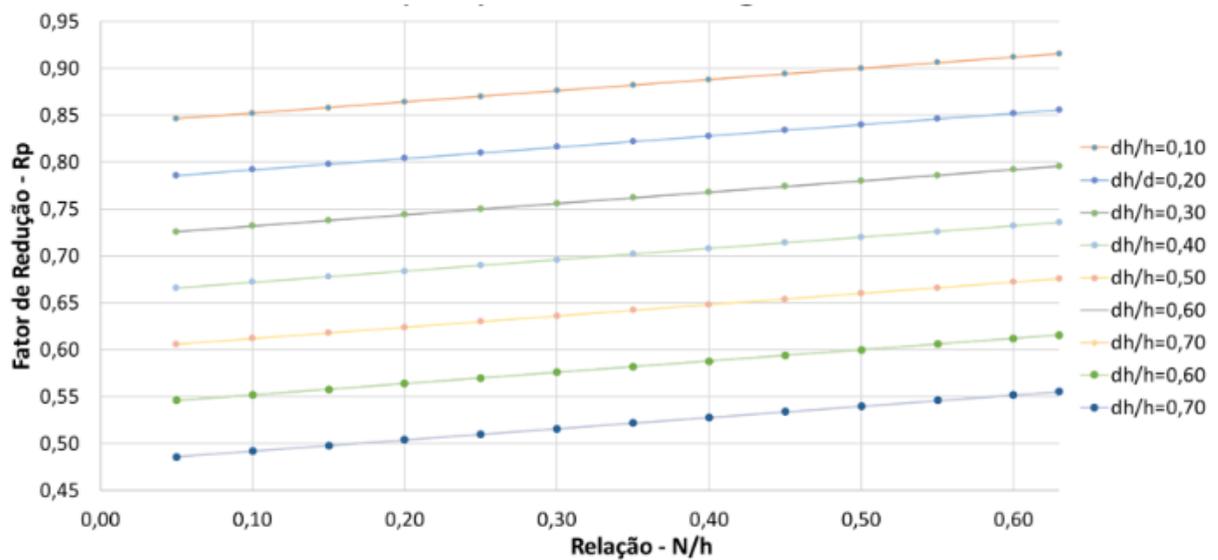


Figura 2.22 – Fator R_p para condição ETF- Mesas livres – Uzzaman et al (2012)

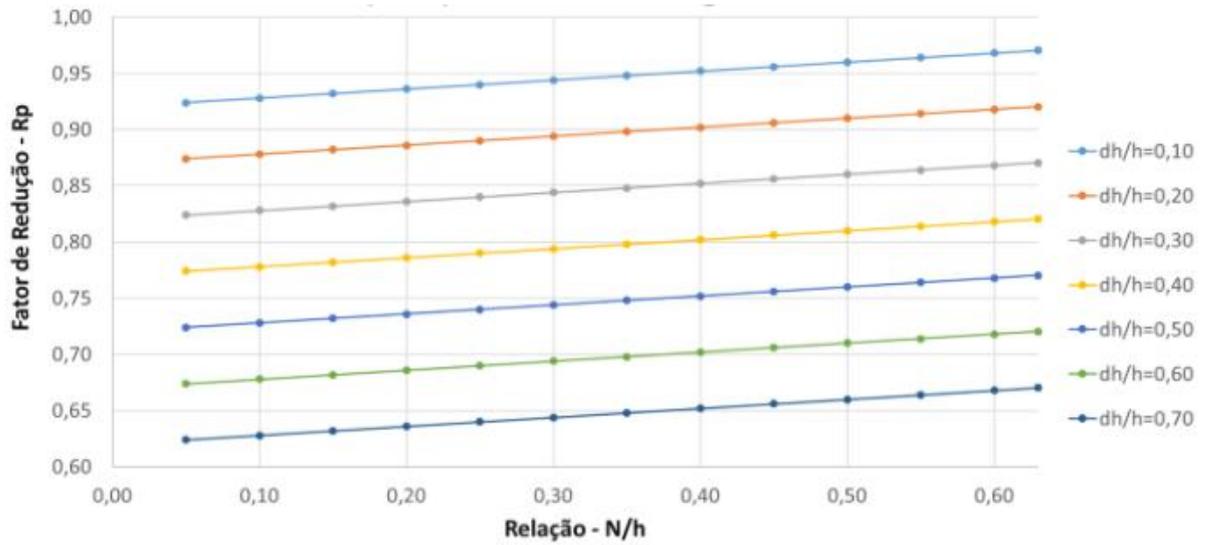


Figura 2.23 – Fator R_p para condição ETF- Mesas presas – Uzzaman et al (2012)

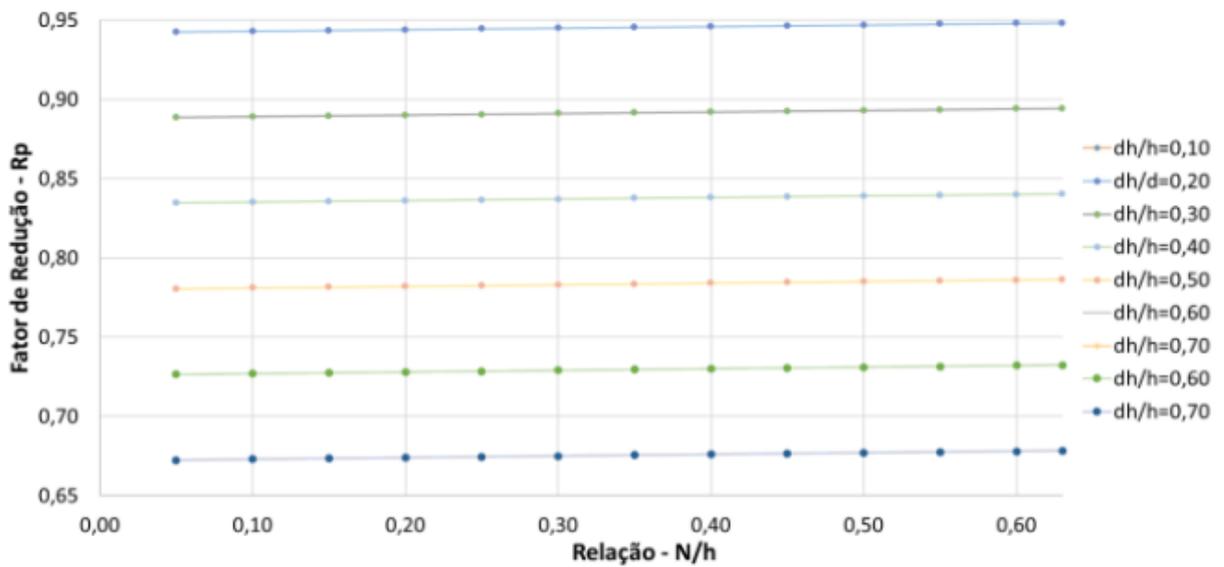


Figura 2.24 – Fator R_p para condição ITF- Mesas livres – Uzzaman et al (2012)

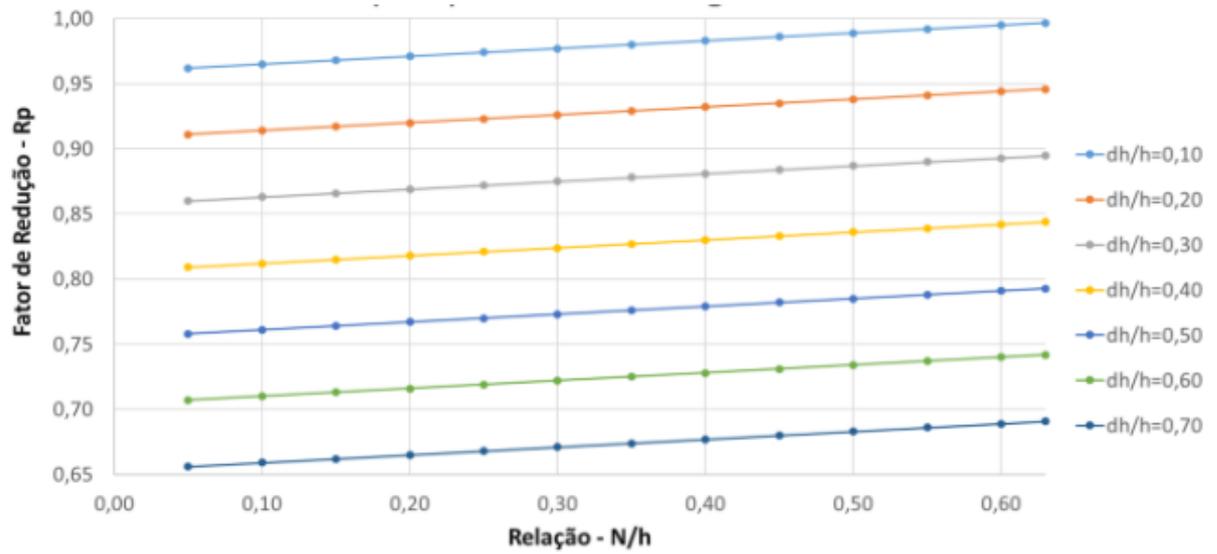


Figura 2.25 – Fator R_p para condição ITF- Mesas presas – Uzzaman et al (2012)

Com base no exposto, conclui-se que o trabalho de Uzzaman et al (2012) complementa a formulação presente na AISI S100-16. Conforme apresentado nos gráficos acima, observa-se que para os casos em que as mesas estão fixas, o fator de R_p é maior, o que resulta consequentemente em uma maior força resistente ao enrugamento da alma (*web crippling*).

3

3. Desenvolvimento do *software* CFD

3.1 Java e a Linguagem Orientada a Objetos

Java é uma linguagem computacional de programação orientada a objetos (POO), desenvolvida nos anos 90 pela empresa Sun Microsystems e se tornou muito popular nos anos 2000, sobretudo no meio acadêmico. Este tipo de linguagem trabalha diferentemente das linguagens convencionais, pois toda informação é compilada para um *bytecode* e executada por uma plataforma virtual.

Segundo SANTOS (2001), programadores que trabalham com programação orientada a objetos criam e usam objetos provenientes de classes. Estas são estruturas que contém dados para representar algum modelo e executar operações com tais dados. Como por exemplo, no *software* desenvolvido, criou-se a classe *U_section* que armazena os dados de uma seção transversal U. Informando a esta classe os valores da largura da alma, largura da mesa e espessura da chapa, ela é capaz de armazenar tais propriedades. No *software* cada tipo de seção transversal é representado por uma classe. Outra classe chamada *Calculator* recebe as informações provenientes das classes que representam as seções e é capaz de calcular e armazenar suas propriedades geométricas, tais como área bruta, momentos de inércia, módulo resistente elástico e afins.

Segundo SANTOS (2001), os dados de uma classe são armazenados em campos. Cada campo é composto por um tipo de dado, podendo ser um número inteiro, um *booleano*, um *float*, um *double*, ou até mesmo uma classe anteriormente já criada. Estas variáveis podem ser acessíveis ou não para outras classes.

Booleano é um tipo de dado primitivo que pode assumir os valores 0 ou 1, representando as variáveis lógicas falso ou verdadeiro, respectivamente. *Float* é um tipo de dado que representa números com ponto-flutuante em precisão simples de 32 bits. *Double* é um tipo de dado que representa números de ponto-flutuante em precisão dupla de 64 bits.

As operações realizadas dentro de uma classe compõem seus métodos. Estes podem receber um ou mais argumentos para realizar cálculos. A largura da alma, largura da mesa e espessura da chapa são os argumentos dos métodos que calculam as propriedades geométricas da seção transversal da classe *U_Section*, por exemplo.

Existem outras ferramentas na POO que são apresentadas nas seções seguintes. A seção 3.2 apresenta a estrutura básica adotada no aplicativo, indicando onde as classes foram armazenadas e como elas estão relacionadas. A seção 3.3 apresenta uma pequena descrição das principais classes do programa, seus principais métodos e variáveis. A validação do *software* desenvolvido é apresentada no item 3.4. Exemplos de aplicação do *software* são apresentados em 3.5.

3.2 Estruturação básica do aplicativo

A linguagem Java permite que se agrupem classes que mantêm alguma relação entre si em pacotes (em inglês, *packages*). Segundo SANTOS (2001), para a criação de pacotes, basta declarar a estas classes que elas pertencem a determinado pacote e criar uma organização destas classes em diretórios. No programa foram adotados nove pacotes, sendo eles: *i) Geometria; ii) Sections; iii) Modelo; iv) Esforço Resistente; v) Verificações; vi) Library; vii) GIG, viii) App; e ix) Útil.*

O pacote Geometria armazena as classes que representam a geometria básica da seção transversal. O pacote *Sections* armazena uma interface que implementa as classes de diversas seções transversais existentes. Existe também uma classe que faz o cálculo das propriedades geométricas do perfil que são usadas no dimensionamento.

O pacote Modelo armazena as classes relacionadas com o modelo de cálculo. Nele estão as propriedades das barras, do material, os valores das forças solicitantes de cálculo e afins. O pacote Esforço Resistente armazena as classes que fazem o cálculo dos esforços resistentes e outros cálculos usados durante o dimensionamento, tais como as forças críticas de flambagem global elástica e as propriedades efetivas das seções transversais.

O pacote Verificações contém as classes que verificam se os esforços resistentes são maiores que os esforços solicitantes; fazem a verificação composta de esforços e afins. O pacote *Library* armazena classes, onde está armazenada uma biblioteca dos principais materiais e seções transversais comerciais.

O pacote GIG é responsável pela interface gráfica do *software*. Neste estão implementadas as classes que compõem toda a interface de operação do mesmo.

O pacote Aplicativo armazena a classe Aplicativo e é responsável por executar o programa.

O pacote Útil armazena algumas classes predefinidas para acesso de teclado e outras funcionalidades afins. A estrutura básica do aplicativo está ilustrada na Figura 3.1 e na Figura 3.2.

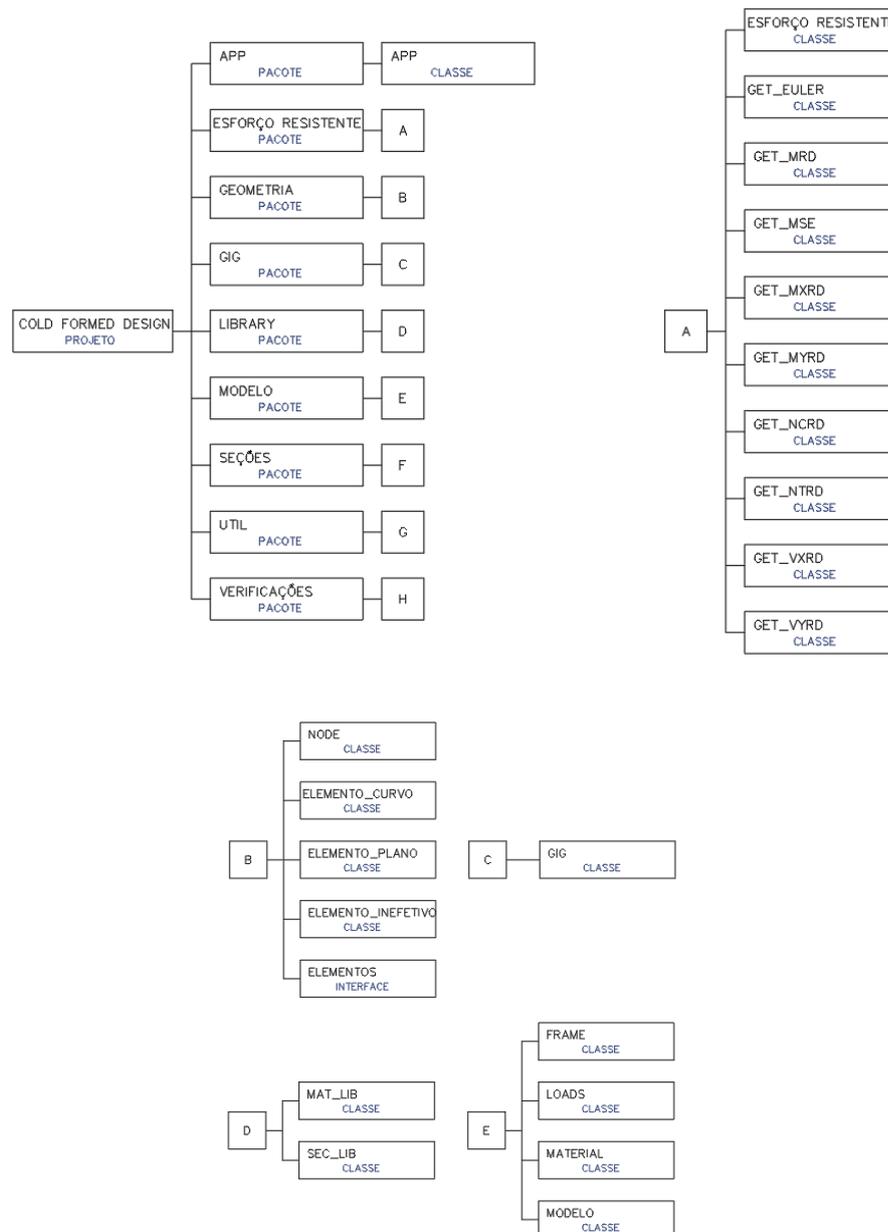


Figura 3.1 - Estrutura básica do aplicativo – Parte 1 de 2

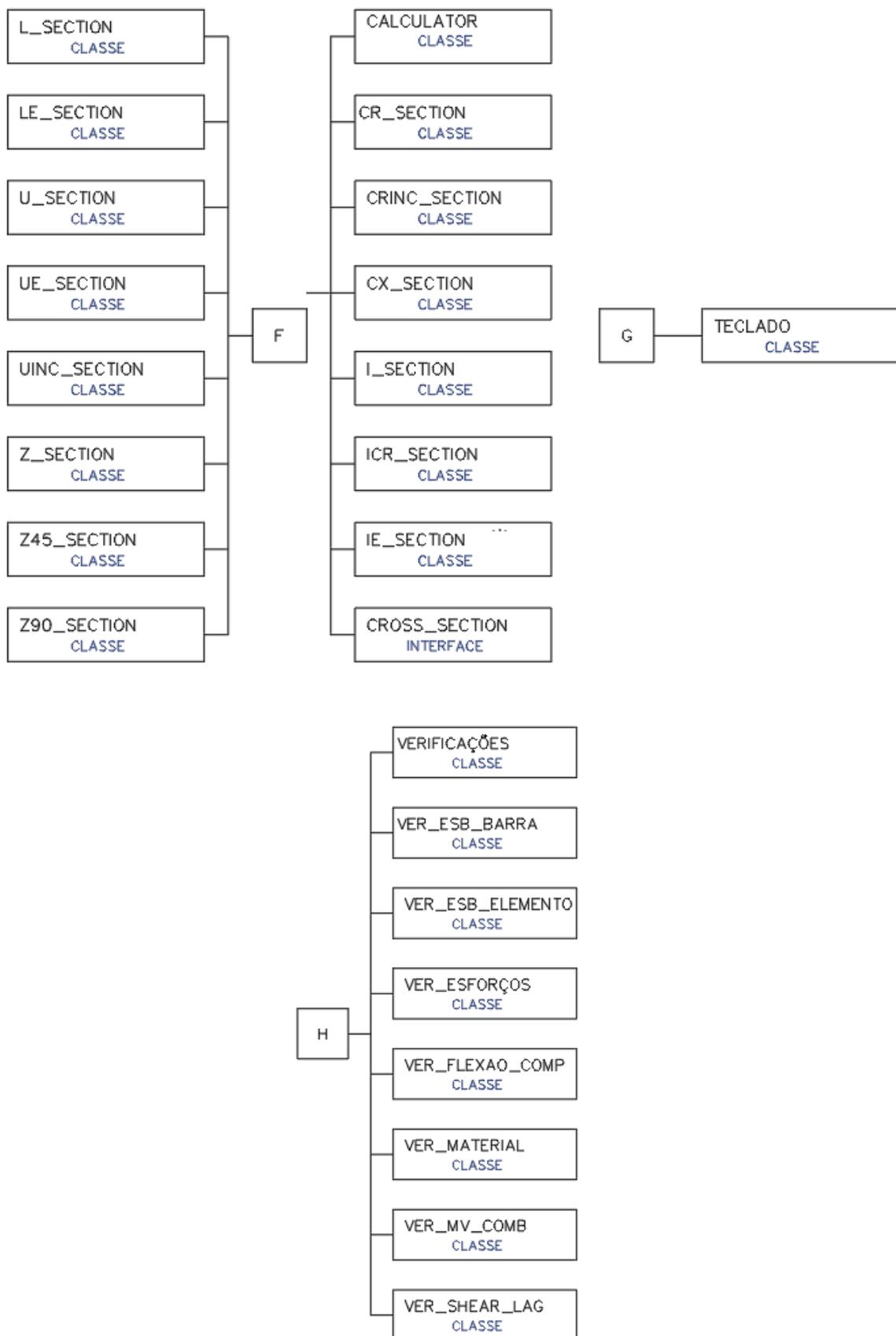


Figura 3.2 - Estrutura básica do aplicativo – Parte 2 de 2

3.3 Funcionalidade das classes

3.3.1 Classes do pacote Geometria

O pacote Geometria armazena as classes que representam a geometria básica das seções transversais implementadas. Foi criada a classe *Node*, que representa os nós que compõem uma seção transversal. Cada nó possui coordenadas C_x e C_y para sua representação em um plano cartesiano, e um identificador para que o mesmo possa ser referenciado e identificado por outras classes.

Cada nó também possui um campo para armazenar tensões e quatro campos para armazenar seus graus de liberdade, sendo estes: *i)* translação na direção X; *ii)* translação na direção Y; *iii)* translação na direção Z e *iv)* rotação. Estes campos referentes aos graus de liberdade foram criados para futuras ampliações do *software*, visando torná-lo um *software* que trabalhe com o método das faixas finitas.

Foram criadas as classes *Elemento_Plano*, *Elemento_Curvo* e *Elemento_Inefetivo*, unificadas por uma interface chamada *Elementos*, que representam os elementos de uma seção transversal. Cada elemento plano é definido por um nó inicial e um nó final, além de uma espessura previamente informada. O elemento curvo precisa adicionalmente de ser definido informando-se um nó de centro da curva ou o desenvolvimento da mesma.

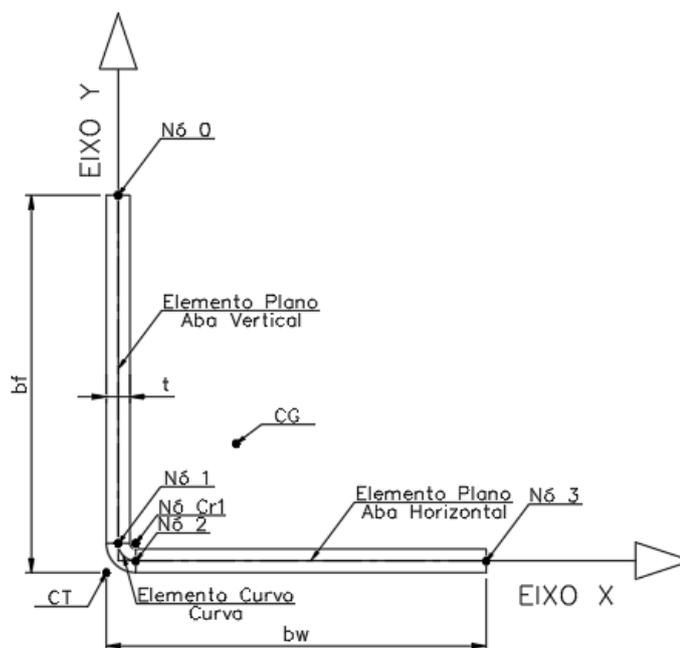


Figura 3.3 - Composição de seção L

As classes da interface elementos calculam as propriedades geométricas de cada elemento, tais como largura, inclinação, área bruta, momentos de inércia em relação ao seu eixo local e em relação ao sistema de coordenadas global, momento de inércia à torção e constante de empenamento. Estas classes também armazenam informações dos elementos, tais como identificador, condição de contorno (AA ou AL), nó inicial, nó final, posição do centroide da seção transversal do perfil e afins. A Figura 3.3 representa a composição de uma cantoneira de abas iguais por meio de quatro nós, dois elementos planos e um elemento curvo.

3.3.2 Classes do pacote *Sections*

O pacote *Sections* armazena as classes que representam as seções transversais comerciais. Cada seção é representada por uma classe, e estas são agrupadas por meio de uma interface chamada *CrossSection*. Na Figura 3.4 a Figura 3.15 são apresentadas a ordenação dos nós e elementos nas seções transversais adotadas.

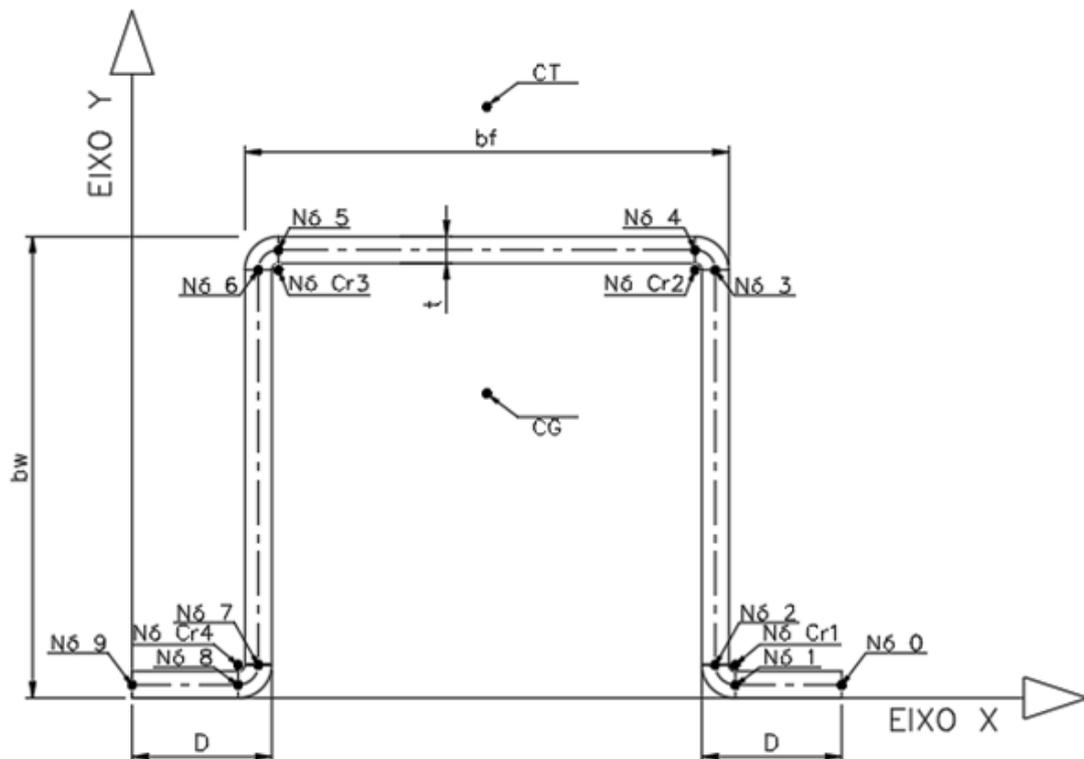


Figura 3.4 - Composição de seção Cr

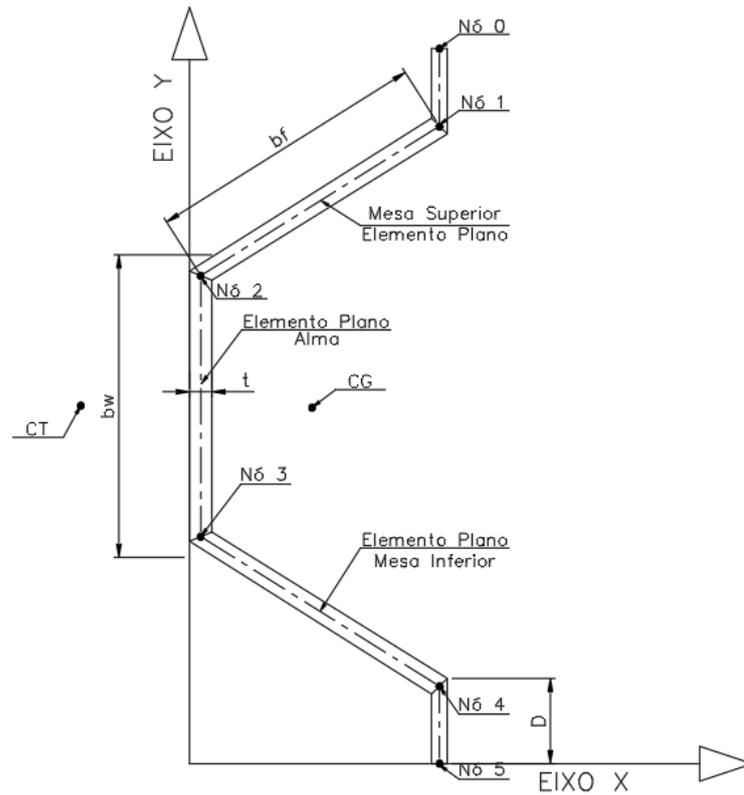


Figura 3.5 - Composição de seção cartola com mesas inclinadas

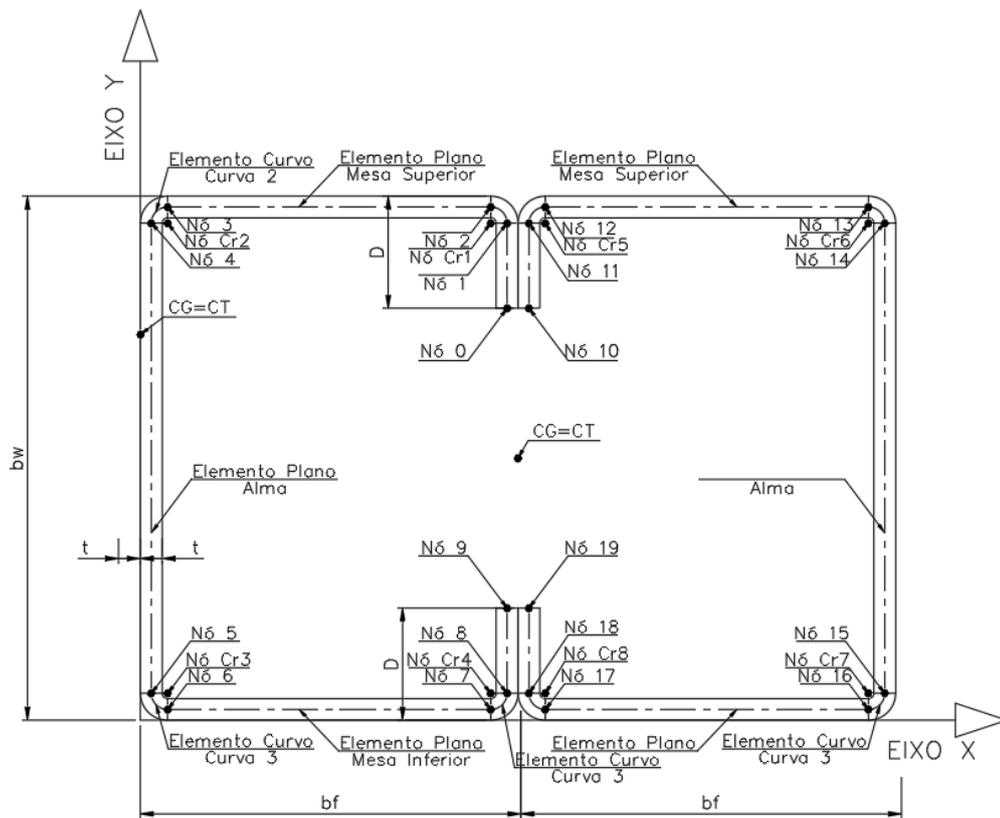


Figura 3.6 - Composição de seção caixa

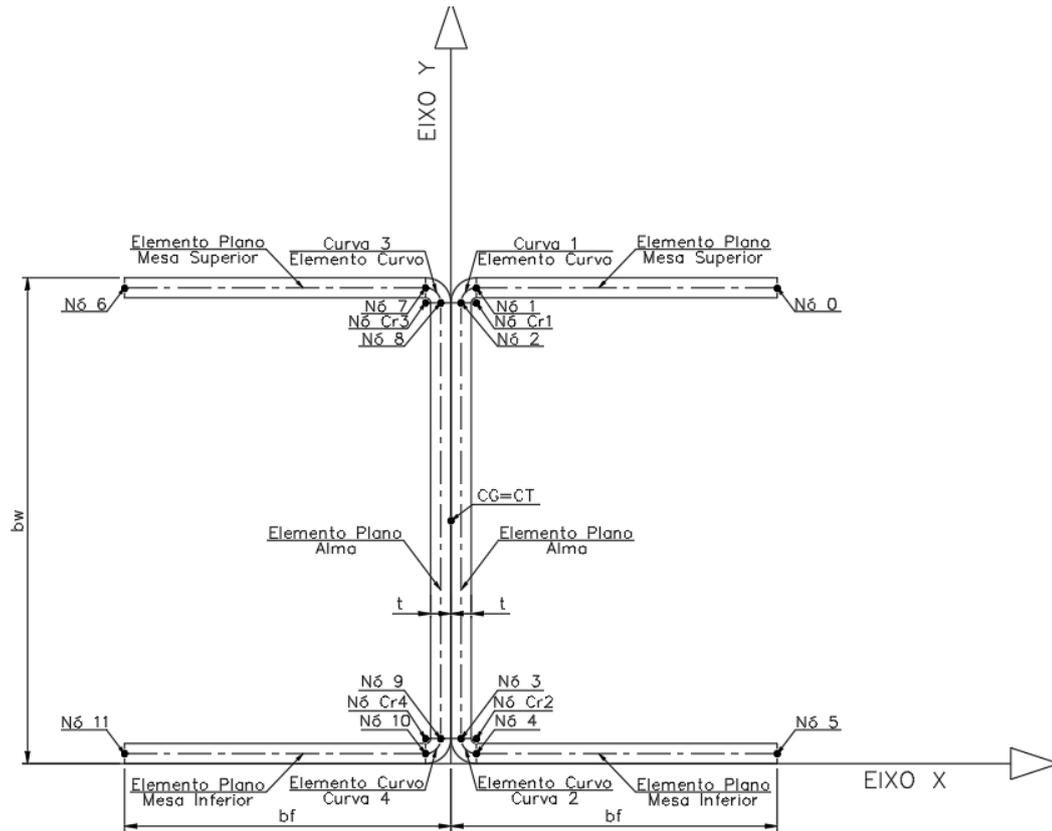


Figura 3.7 - Composição de seção I composta por dois U

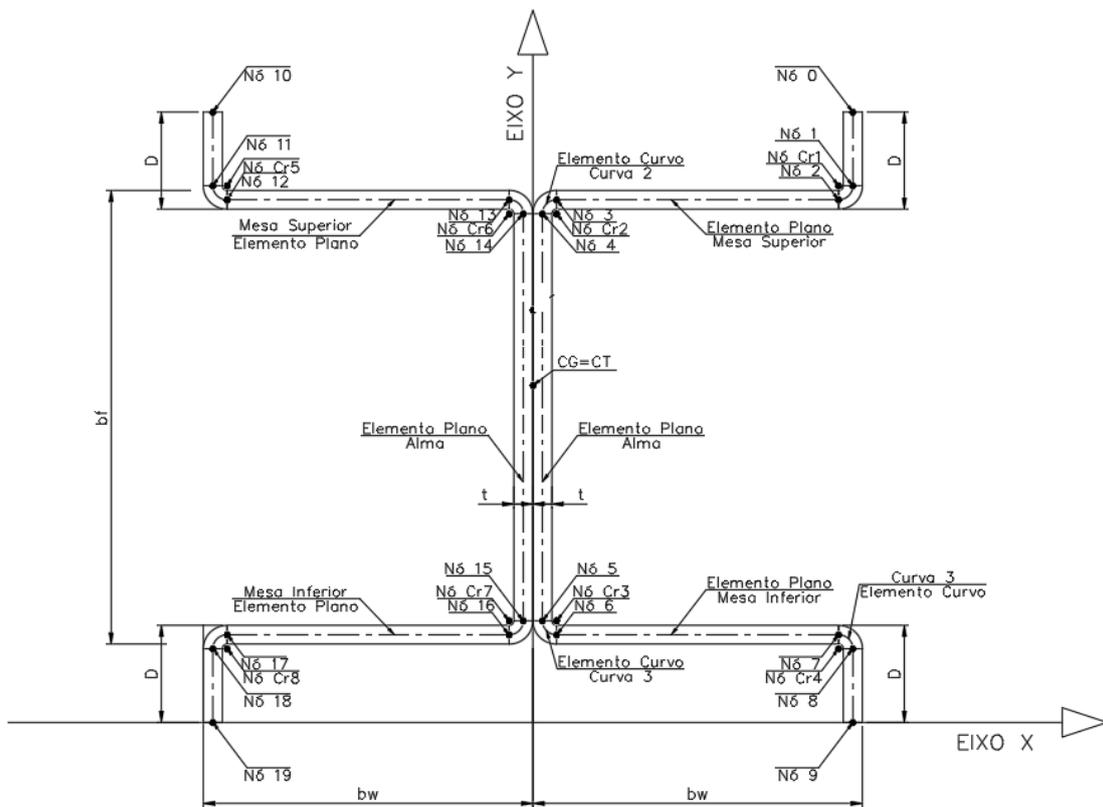


Figura 3.8 - Composição de seção I composta por dois Cr

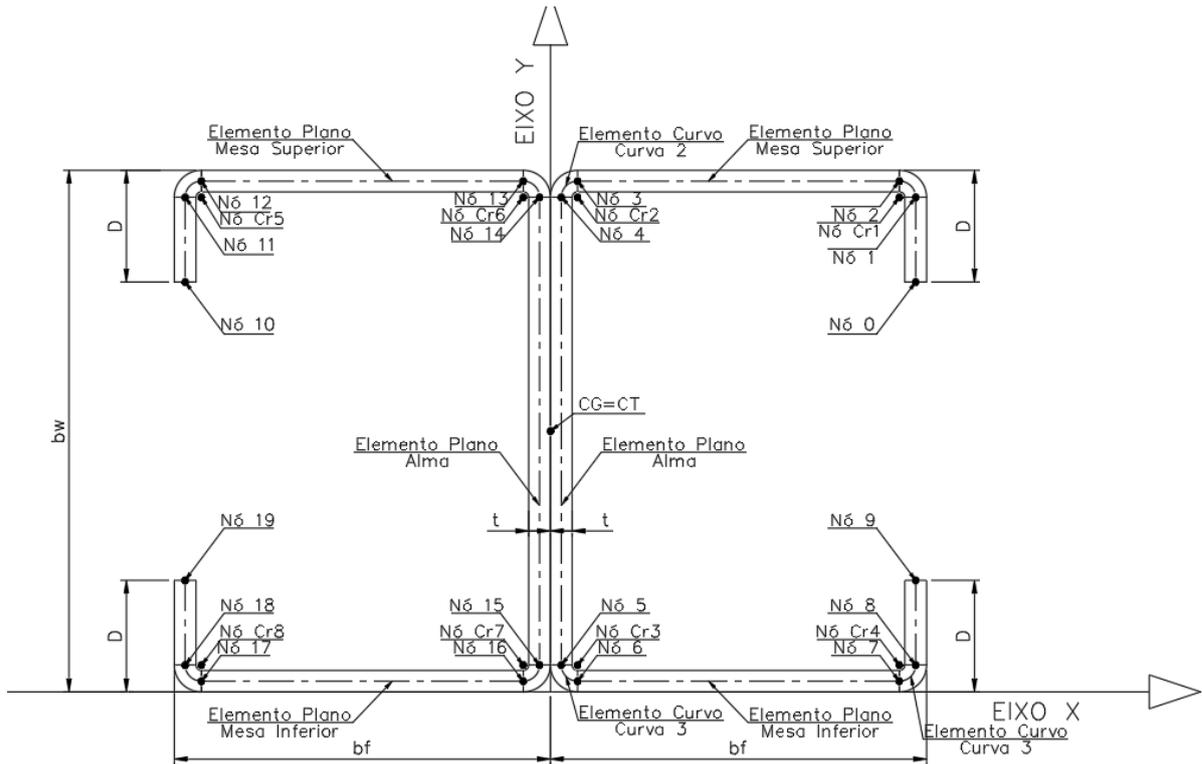


Figura 3.9 - Composição de seção Ie composta por dois Ue

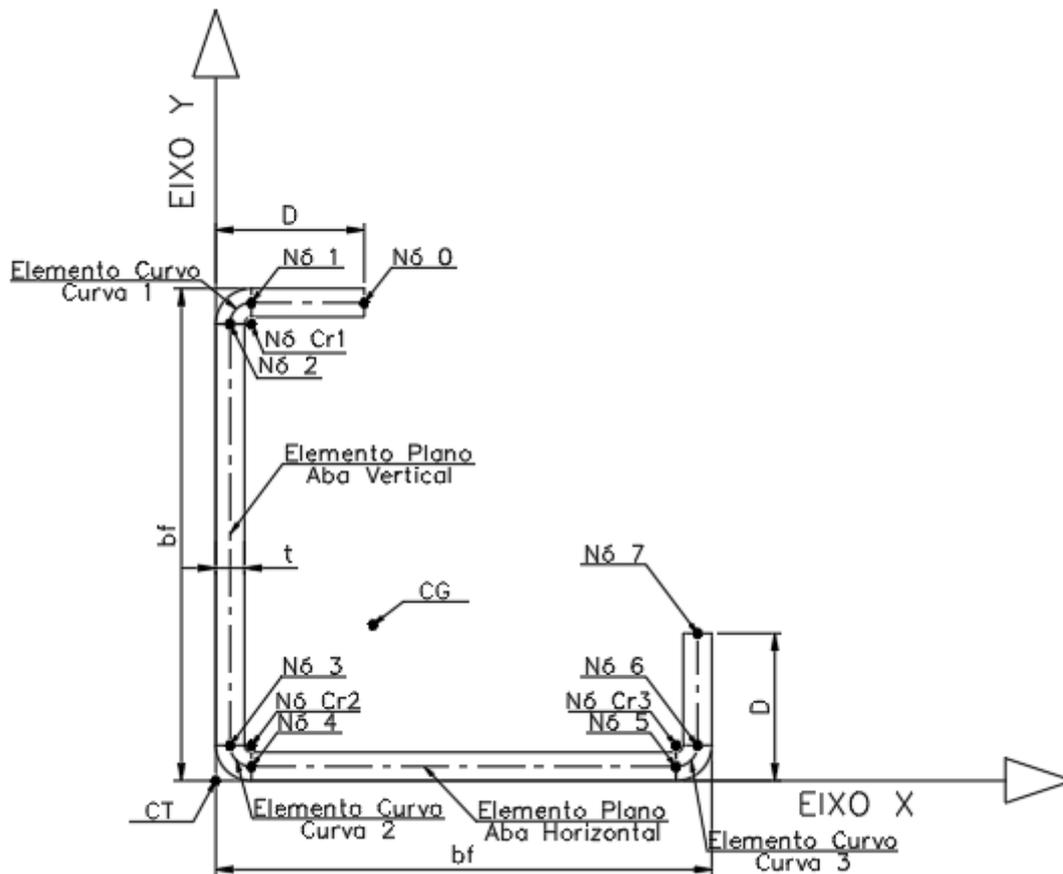


Figura 3.10 - Composição da cantoneira enrijecida - Lc

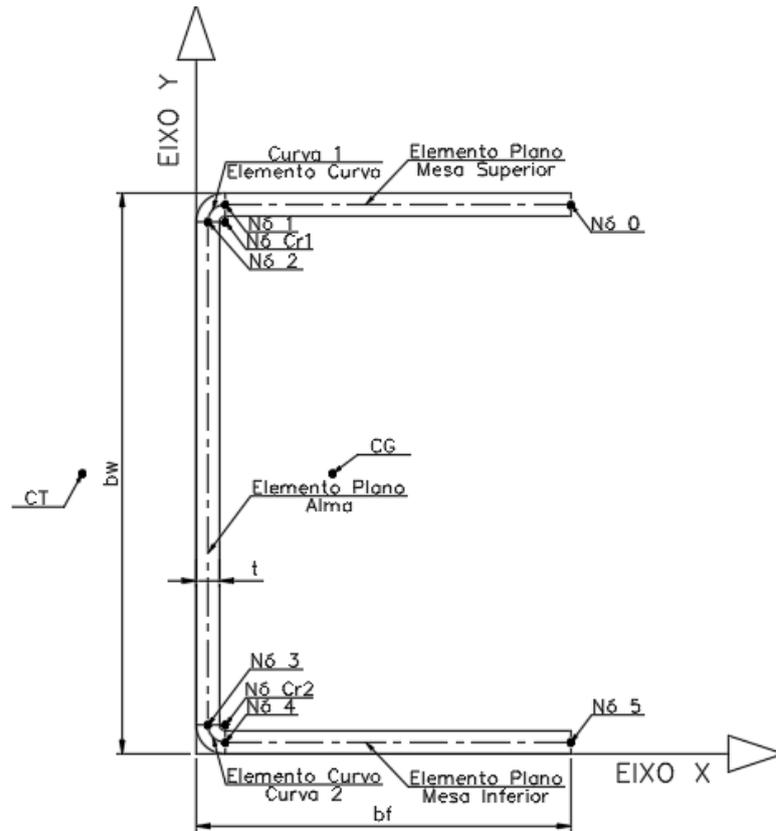


Figura 3.11 - Composição de seção U

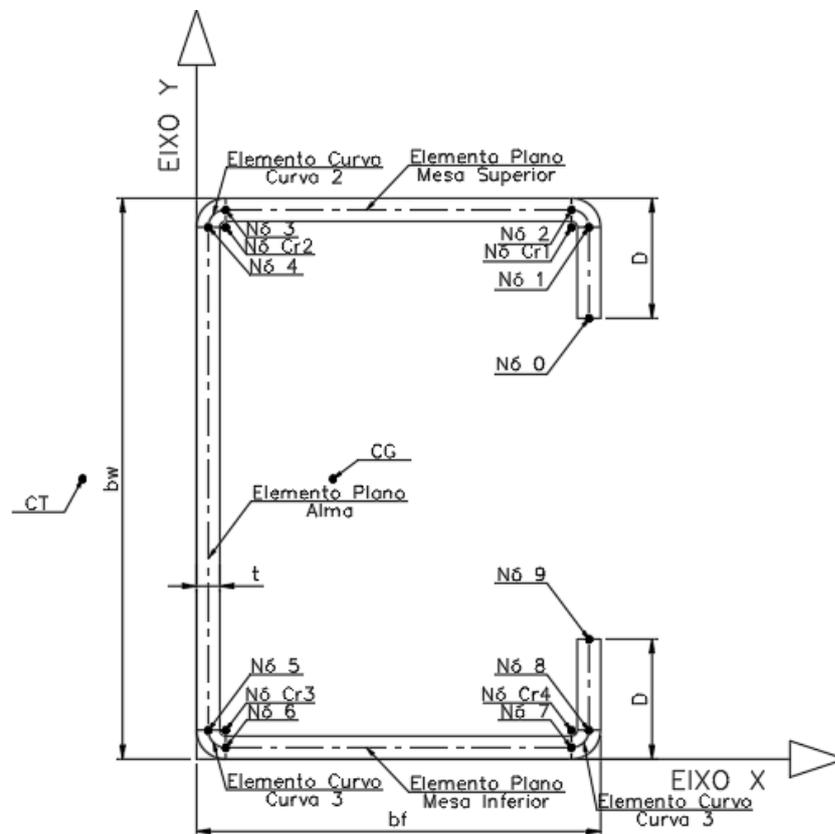


Figura 3.12 - Composição de seção Ue

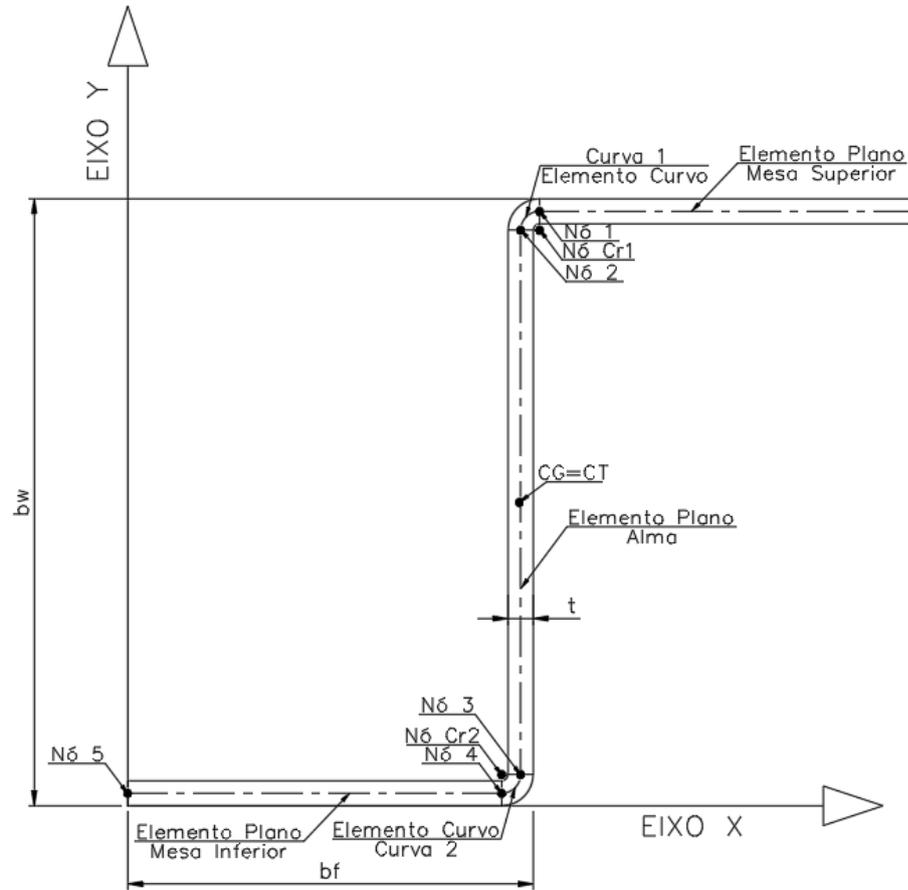


Figura 3.13 - Composição de seção Z

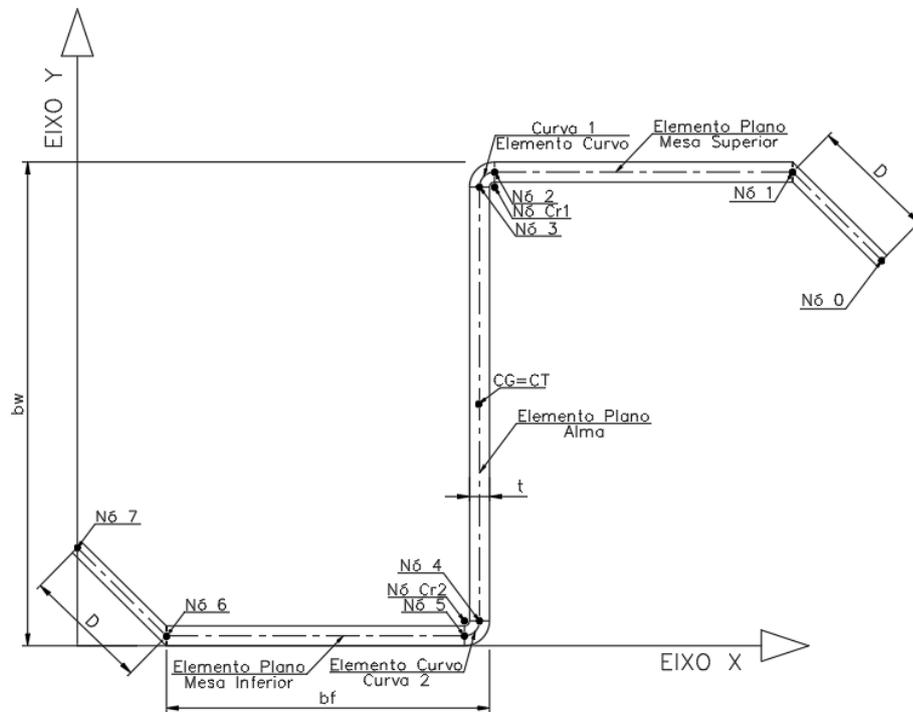


Figura 3.14 - Composição de seção Z enrijecido a 45° - Z45

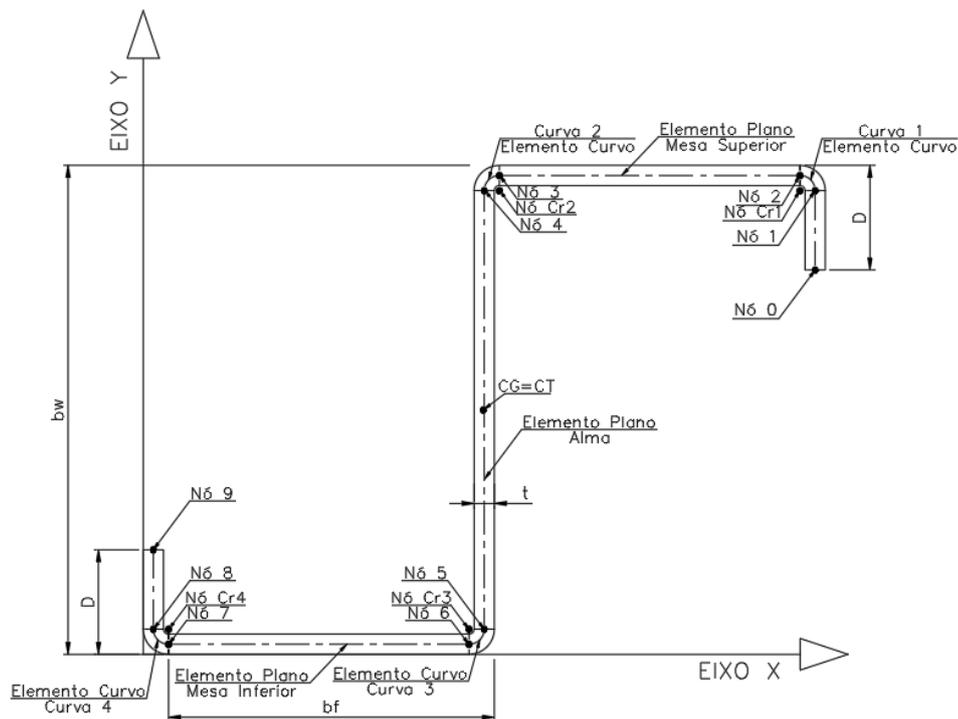


Figura 3.15 - Composição de seção Z enrijecida a 90° - Z90

Adicionalmente o pacote *Sections* possui a classe *Calculator*, responsável por calcular as propriedades geométricas da seção transversal. Tais propriedades são calculadas pela composição das propriedades geométricas de cada elemento. A constante de empenamento da seção transversal foi calculada numericamente conforme recomendado por Lue et al (2007). Esta classe também calcula o centroide da seção transversal e a posição do centro de cisalhamento, conforme apresentado por Lue et al (2007). A classe *Calculator* armazena todas as propriedades para consultas posteriores.

3.3.3 Classes do pacote Modelo

O pacote Modelo armazena as classes relacionadas com o modelo de cálculo. Nele estão os comprimentos destravados da barra, propriedades mecânicas do material, os valores de esforços solicitantes de cálculo e afins.

A classe *Frame* armazena os dados da barra, tais como comprimentos efetivos de flambagem nas direções X, Y, Z, sendo estes, respectivamente, $K_x L_x$, $K_y L_y$ e $K_z L_z$. Os dados armazenados por esta classe podem ser lidos e sobrescritos por outras classes do aplicativo. A classe Modelo também possui campos para armazenar a combinação e a estação de cálculo, para os

casos onde o *software* importe esforços solicitantes de um *software* comercial de análise estrutural via método dos elementos finitos, função ser implementada futuramente.

A classe *Material* armazena os dados referentes ao material que compõe o perfil. Para definir um material, deve-se informar o módulo de elasticidade longitudinal, a resistência ao escoamento do aço, a resistência à ruptura do aço na tração e seu grau. Esta classe já armazena automaticamente o coeficiente de Poisson, o coeficiente de dilatação térmica e a massa específica do aço, conforme apresentado no item 4.6 da ABNT NBR 14762:2010. Com os dados informados a classe calcula o módulo de elasticidade transversal.

Ao se informar a temperatura de dimensionamento, a classe *Material* também calcula os valores de k_y , k_{σ} e k_E para o dimensionamento na situação de incêndio, conforme ABNT NBR 14323:2013. Entretanto, o dimensionamento em situação de incêndio não foi implementado nesta fase.

A classe *Loads* armazena os esforços solicitantes de cálculo para informá-los às outras classes quando solicitados. Os esforços considerados são N_{Sd} , M_{xSd} , V_{xSd} e V_{ySd} . Os esforços deverão ser informados em kN ou kN*cm, unidades com as quais o *software* foi implementado.

A classe *Modelo* unifica todas as classes anteriormente criadas. Para definição de uma classe modelo é necessário informá-la um objeto do tipo barra, um objeto do tipo material, um objeto do tipo conjunto de carregamentos, um objeto do tipo seção transversal e um identificador. A classe modelo, por sua vez armazenará todas as classes anteriormente citadas, e será capaz de informar seus respectivos campos quando solicitado.

3.3.4 Classes do pacote Esforço Resistente

As classes do pacote Esforço Resistente são responsáveis pelo dimensionamento estrutural. Uma vez que se informe o modelo em estudo para a classe *Get_Euler*, esta calcula a força axial de flambagem global elástica, tomando-a como a menor, dentre as aplicáveis para o tipo de seção: *i*) força axial de flambagem global elástica por flexão em relação ao eixo x; *ii*) força axial de flambagem global elástica por flexão em relação ao eixo y; *iii*) força axial de flambagem global elástica por torção; e *iv*) força axial de flambagem global elástica por flexo-torção. Esta classe também calcula o momento fletor de flambagem global elástica para a flambagem lateral com torção.

A classe *get_NtRd* calcula a força axial de tração resistente de cálculo, tomando-a como a menor entre os três estados-limites apresentados na norma brasileira e citados no item 2.1.5,

sendo estes: *i*) escoamento da seção bruta; *ii*) ruptura na seção líquida fora da região de ligação; e *iii*) ruptura da seção líquida na região de ligação. Para cálculo dos dois últimos estados-limites apresentados tem-se a necessidade de informar a área líquida da seção transversal da barra fora da região de ligação (em cm²), a área líquida da seção transversal da barra na região de ligação (em cm²) e o coeficiente de redução da área líquida.

A classe *get_NcRd* calcula a força axial de compressão resistente de cálculo, tomando-a como a menor entre os dois estados-limites apresentados na norma brasileira e citados no item 2.1.6, sendo estes: *i*) flambagem global por flexão, por torção ou por flexo-torção; e *ii*) Flambagem distorcional. A classe possui um método (ou rotina) que calcula, por meio do MLE, a área efetiva da seção transversal, para cada tipo de seção implementada. Para o estado-limite de flambagem distorcional é necessário informar ao *software* a força axial de flambagem distorcional elástica, em kN, que deve ser calculada com base na análise de estabilidade elástica.

A classe *get_MxRd* calcula o momento fletor resistente de cálculo em relação a x, tomando-o como o menor dentre os três estados-limites apresentados na norma brasileira e citados no item 2.1.7, sendo estes: *i*) início do escoamento da seção efetiva; *ii*) flambagem lateral com torção e *iii*) flambagem distorcional. A classe possui um método que calcula, por meio do MLE, o módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra externa que atinge escoamento para cada classe. Para o estado-limite de flambagem distorcional é necessário informar ao *software* o momento fletor de flambagem distorcional elástica, em kN*cm, que deve ser calculado com base na análise de estabilidade elástica.

As classes *get_VxRd* e *get_VyRd* calculam a força cortante resistente de cálculo nas direções x e y, respectivamente, conforme apresentado na ABNT NBR 14762:2010 e citados no item 2.1.8. Para tanto, considera-se perfis sem enrijecedores transversais, ou seja, adota-se $k_v = 5,0$.

A classe *get_MRD* calcula os esforços característicos e resistentes de cálculo por meio do Método da Resistência Direta, apresentado em 2.1.3, para barras sujeitas à compressão centrada e barras sujeitas à flexão simples.

A classe *Esforço_Resistente* armazena os esforços resistentes de cálculo anteriormente calculados e os informam para outras classes quando solicitados.

3.3.5 Classes do pacote Verificações

As classes do pacote Verificações realizam as verificações preconizadas na ABNT NBR 14762:2010.

A classe *Ver_Material* verifica se o material adotado no dimensionamento possui relação f_u/f_y maior do que 1,08, conforme recomendado no item 4.1.1 da norma em questão.

A classe *Ver_Esbeltez_Elementos* verifica as relações largura-espessura dos elementos que compõem a seção transversal adotada. Conforme preconizado no item 9.1.2 da ABNT NBR 14762:2010, tal relação não deve ultrapassar os valores estabelecidos na tabela 4 da norma em questão.

A classe *Ver_Shear_Lag* verifica se o fator de redução do efeito *Shear Lag* é unitário. Conforme item 9.4 da ABNT NBR 14762:2010. Caso o fator de redução não seja unitário, será emitida uma mensagem para o usuário do *software*.

A classe *Ver_Esbeltez_Barra* verifica o índice de esbeltez de barras tracionadas, tomado como a maior relação entre o comprimento destravado e o raio de giração correspondente. Conforme preconizado no item 9.6.3 da norma brasileira, recomenda-se que tal relação não supere 300 para barras tracionadas. Adicionalmente a classe verifica o índice de esbeltez de barras comprimidas, conforme preconizado no item 9.7.4 da ABNT NBR 14762:2010, tal relação não deve superar 200.

A classe *Ver_Esforços* verifica isoladamente, se cada esforço resistente de cálculo é maior que o correspondente esforços solicitante, conforme itens 9.6.1, 9.7.1 e 9.8.1 da ABNT NBR 14762:2010.

A classe *Ver_MV_Comb* verifica se as relações entre momentos fletores solicitantes de cálculo e momentos fletores resistentes de cálculo, e força cortante solicitante de cálculo e força cortante resistente de cálculo atendem a expressão de interação apresentada no item 9.8.4 da ABNT NBR 14762:2010.

A classe *Ver_Flexao_Composta* verifica se a força normal solicitante de cálculo e os momentos fletores solicitantes de cálculo atendem a expressão de interação apresentada no item 9.9 da ABNT NBR 14762:2010.

3.3.6 Classes do pacote *Library*

O pacote *Library* armazena uma pequena biblioteca que poderá ser usada durante a operação do *software*. A classe *Mat_Lib* armazena os materiais estruturais apresentados na tabela 1 da ABNT NBR 14762:2010. A classe *Sec_Lib*, por sua vez, armazena todas as seções comerciais especificadas na ABNT NBR 6355:2012, bem como as seções provenientes da composição destes perfis em uma seção composta, como dois perfis Ue formando um perfil caixa, por exemplo.

3.3.7 Classes do pacote GIG

O pacote GIG armazena as classes responsáveis pela interface gráfica do aplicativo em questão.

3.3.8 Classes do pacote *App*

A única classe do pacote *App*, que possui este mesmo nome, executa o programa. Esta classe é responsável por iniciar o método de preenchimento de dados do modelo, chamar os métodos que fazem os cálculos, chamar os métodos que fazem as verificações e apresentar o resultado final do dimensionamento.

3.3.9 Classes do pacote Útil

As classes do pacote Útil são responsáveis por funções básicas do aplicativo, tais como controle do teclado e outras funcionalidades de apoio ao *software*.

3.4 Validação do *software*

Para validação do *software* desenvolvido realizou-se um estudo comparativo entre os valores obtidos experimentalmente por Moen e Schafer (2008) para barras em compressão e por Moen et al (2013) para barras em flexão e os valores obtidos via *software*.

3.4.1 Barras em flexão

Moen et al (2013) realizaram experimentos em *steel joist* constituídos por perfis Ue com furos retangulares não enrijecidos na alma dos perfis. Os autores ressaltaram que a presença de furos não enrijecidos reduzem a capacidade resistente do *steel joist* e amplificam as

deformações causada pela instabilidade distorcional. A instabilidade distorcional foi acompanhada pela flambagem da faixa não enrijecida da mesa comprimida. O arranjo dos ensaios é apresentado na Figura 3.16.

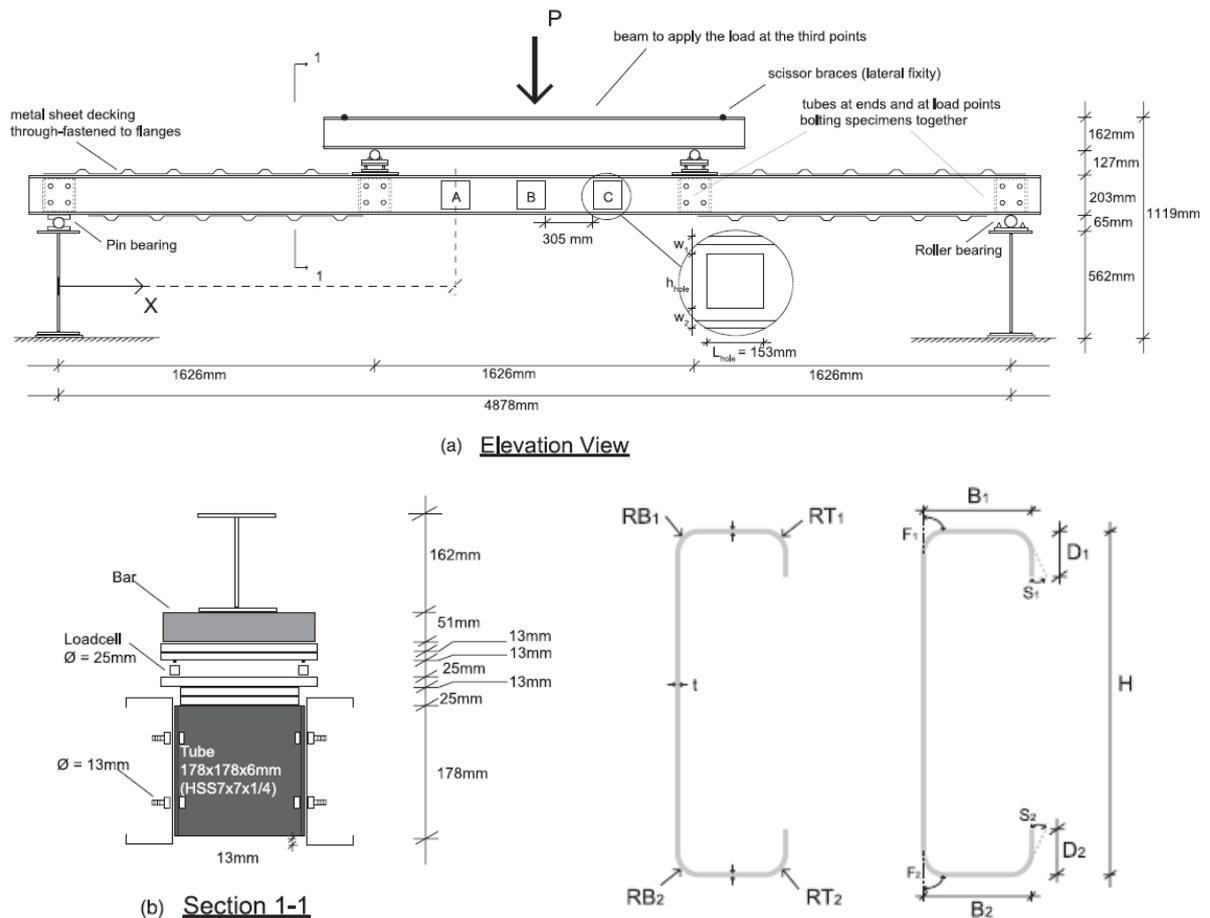


Figura 3.16 – Esquema do experimento (Moen et al, 2013)

As propriedades geométricas das seções dos perfis ensaiados são apresentadas na Tabela 3-1. Os autores calcularam os momentos fletores críticos de flambagem local (M_{nl}), flambagem distorcional (M_{nd}) e flambagem global (M_{ne}) considerando a existência dos furos, tais valores foram usados para determinação do momento fletor resistente nominal (M_n) via método da resistência direta, tais valores estão apresentados na Tabela 3-2, juntamente com os momentos fletores resistentes obtidos nos ensaios (M_{test}).

Tabela 3-1 – Resistência ao escoamento do aço e dimensões das seções ensaiadas – Moen et al (2013)

Modelo	f_y	t	H	B ₁	B ₂	D ₁	D ₂
	MPa	mm	mm	mm	mm	mm	mm
H0.9-1.1	365	1,76	203	63,7	62,6	13,7	15,6
H0.9-2.2	363	1,77	203,1	62,6	63,6	15,3	13,9
H0.9-3.1	370	1,77	203	62,8	63,4	15,5	13,8
H0.8-1.2	360	1,77	203	63,5	62,9	14	15,2
H0.8-2.2	363	1,75	203,1	63,5	62,7	14,3	15,3
H0.8-3.2	376	1,76	203,1	63,4	62,6	14	15,2

Tabela 3-2 – Cálculo do momento fletor resistente nominal pelo MRD – Moen et al (2013)

Modelo	M _n calculado via MRD						M _{test} obtido no ensaio	
	M _y	M _{y_{net}}	M _{ne}	M _{nl}	M _{nd}	M _n	M _{test}	M _{test} / M _n
	kN m	kN m	kN m	kN m	kN m	kN m	kN m	
H0.9-1.1	13,20	11,98	12,70	11,50	9,40	9,40	9,70	1,03
H0.9-2.2	13,20	11,90	12,60	11,50	9,70	9,70	10,50	1,08
H0.9-3.1	13,40	12,32	12,80	11,80	9,90	9,90	10,80	1,09
H0.8-1.2	13,20	10,67	12,40	11,40	8,50	8,50	8,20	0,96
H0.8-2.2	13,30	10,78	12,40	11,40	8,60	8,60	8,60	1,00
H0.8-3.2	13,80	11,16	12,90	11,70	8,80	8,80	8,60	0,98

Os momentos fletores resistentes nominais (M_{Rk}) para as barras ensaiadas foram calculadas por meio do aplicativo desenvolvido, e são apresentados na Tabela 3-3, onde também é realizado uma comparação entre os valores obtidos.

Tabela 3-3 – Cálculo do momento fletor resistente de cálculo pelo aplicativo desenvolvido

Modelo	CFD		
	M _{Rk} [kN m]	M _{test} / M _{Rk}	M _n / M _{Rk}
H0.9-1.1	9,44	1,03	1,00
H0.9-2.2	9,48	1,11	1,02
H0.9-3.1	9,60	1,12	1,03
H0.8-1.2	8,50	0,96	1,00
H0.8-2.2	8,47	1,02	1,02
H0.8-3.2	8,71	0,99	1,01

Legenda

M_{Rk} = Valor característico do momento fletor resistente obtido via aplicativo desenvolvido

M_n = Valor característico do momento fletor resistente obtido via Método da Resistência Direta por Moen et al (2013)

M_{test} = Valor obtido nos ensaios experimentais por Moen et al (2013)

Os modelos H0.8-1.2 e H0.8-3.2 apresentaram relação $M_{test}/M_n < 1,0$. Ressalta-se as observações de Moen et al (2013) que o modelo H0.8-3.2 sofreu colapso repentino na região do furo.

Com base na Tabela 3-3, observa-se que os momentos fletores obtidos via aplicativo são coerentes com os valores obtidos no ensaio experimental, para o modelo H0.9-2.2, observou-se uma diferença percentual máxima entre os valores calculados de 12%. Observa-se também consonância entre os valores calculados via MRD por Moen et al (2013) e via aplicativo desenvolvido, onde foi observado uma diferença percentual máxima de 3%, o que é aceitável uma vez que o aplicativo trabalha com o método da largura efetiva e pode fornecer resultados ligeiramente diferentes dos obtidos via método da resistência direta.

3.4.2 Barras em compressão

Moen e Schafer (2008) realizaram experimentos em barras em compressão constituídas por perfis formados a frio com a presença de furos. Foram ensaiadas 24 barras em compressão, sendo que metade dos modelos possuíam furos alongados.

As propriedades geométricas das seções dos perfis ensaiados são apresentadas na Tabela 3-4. Os autores calcularam as forças críticas de flambagem local (P_{nl}), flambagem distorcional (P_{nd}) e flambagem global (P_{ne}) considerando a existência dos furos, tais valores foram usados para determinação da força axial de compressão resistente nominal (P_n) via método da resistência direta, tais valores estão apresentados na Tabela 3-5, juntamente com os momentos fletores resistentes obtidos nos ensaios (P_{test}).

Tabela 3-4 – Resistência ao escoamento do aço e dimensões das seções ensaiadas – Moen e Schafer (2008)

Modelo	f_y	L	t	H	B ₁	B ₂	D ₁	D ₂
	MPa	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
362-1-24-H	400	612	0,99	91,00	41,90	40,50	10,90	11,10
362-2-24-H	394	612	0,97	92,60	41,30	40,50	11,20	9,90
362-3-24-H	386	612	1,00	93,30	42,50	43,10	10,60	10,80
362-1-48-H	404	1225	1,00	92,00	40,70	40,50	10,70	10,50
362-2-48-H	412	1225	0,99	92,00	40,50	40,90	10,80	10,20
362-3-48-H	402	1224	1,01	92,30	40,70	40,90	10,00	11,00
600-1-24-H	427	612	1,07	153,40	40,50	40,80	12,30	9,10
600-2-24-H	403	612	1,05	152,70	40,90	40,70	9,40	12,70
600-3-24-H	415	612	1,09	153,20	40,80	40,00	9,10	12,10
600-1-48-H	423	1221	1,09	152,60	40,60	41,30	9,90	9,90
600-2-48-H	428	1226	1,09	152,80	40,40	40,80	9,00	9,00
600-3-48-H	424	1221	1,10	154,00	41,50	40,30	12,20	12,12

Tabela 3-5 – Cálculo da força axial de compressão resistente nominal pelo MRD

Modelo	P _n calculado via MRD						P _{test} obtido no ensaio	
	P _y	P _{y_{net}}	P _{ne}	P _{nl}	P _{nd}	P _n	P _{test}	P _{test} / P _n
	kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN	
362-1-24-H	72,70	57,69	68,65	41,82	46,47	41,82	44,50	1,06
362-2-24-H	69,90	55,30	65,94	39,66	44,13	39,66	46,20	1,16
362-3-24-H	73,00	58,37	69,26	41,71	46,62	41,71	44,20	1,06
362-1-48-H	73,70	58,31	58,46	36,37	43,11	36,37	39,80	1,09
362-2-48-H	74,90	59,40	59,09	36,46	43,59	36,46	40,80	1,12
362-3-48-H	74,90	59,51	61,64	38,63	43,99	38,63	41,70	1,08
600-1-24-H	111,30	93,94	106,53	44,74	55,09	44,74	54,00	1,21
600-2-24-H	102,80	86,76	98,71	42,42	51,84	42,42	51,70	1,22
600-3-24-H	110,00	92,86	105,41	45,44	55,95	45,44	52,40	1,15
600-1-48-H	112,30	94,83	93,07	41,71	46,07	41,71	49,60	1,19
600-2-48-H	113,20	95,43	92,60	41,57	45,45	41,57	52,00	1,25
600-3-48-H	113,70	95,98	93,85	42,13	46,08	42,13	49,60	1,18

Tabela 3-6 – Cálculo da força axial de compressão resistente nominal pelo aplicativo desenvolvido

CFD		
P _{Rk}	P _{test} / P _{Rk}	P _n / P _{Rk}
kN		
38,04	1,17	1,10
35,23	1,31	1,13
36,82	1,20	1,13
33,78	1,18	1,08
33,72	1,21	1,08
34,60	1,21	1,12
43,80	1,23	1,02
41,81	1,24	1,01
44,04	1,19	1,03
40,27	1,23	1,04
37,51	1,39	1,11
44,64	1,11	0,94

Legenda

P_{Rk} = Valor característico da força axial de compressão resistente obtido via aplicativo

P_n = Valor característico da força axial de compressão resistente obtido via método da resistência direta por Moen e Schafer (2008)

P_{test} = Valor obtido nos ensaios realizados por Moen e Schafer (2008)

Com base na Tabela 3-3, observa-se que a força axial de compressão resistente nominal obtida via aplicativo são coerentes com os valores obtidos via MRD, onde foi observado uma diferença percentual máxima de 12%, o que pode ser considerada aceitável uma vez que o aplicativo trabalha com o método da largura efetiva e pode fornecer resultados ligeiramente diferentes do método da resistência direta. Os valores obtidos analiticamente diferem dos valores obtidos experimentalmente, chegando a 39% de diferença.

Segundo Moen e Schafer (2008), no caso das colunas com seção 362S162-33, a presença dos furos na alma reduziu a força axial de flambagem distorcional da alma, de modo que maior parte da carga foi transferida pelas mesas e enrijecedores, resultando em uma falha distorcional. Ainda segundo Moen e Schafer (2008), no caso das colunas com seção 600S162-33, a presença do furo teve uma influência diferente, provocando deformações típicas da flambagem local e induzindo os perfis a este modo de falha.

3.5 Exemplos de aplicação

3.5.1 Exemplo 1 – Viga Ue 140x40x12x0,95 sem abertura na alma submetida à flexão simples

Para exemplificação do dimensionamento de peças submetidas à flexão, tomou-se o exemplo de uma viga Ue 140x40x12x0,95, fabricada em aço ZAR230, com comprimento de 2400 mm e travamento central na direção x e em torno de z. Considerou-se que a viga esteja submetida a um momento fletor solicitante de cálculo $M_{Sdx}=93,89$ kN cm. A solução do problema via método da seção efetiva foi apresentada por Rodrigues e Caldas (2016).

The screenshot shows the 'Dados da Seção Transversal' (Cross Section Data) window in the CFD - Cold Formed Design software. The window is divided into several sections:

- Dados da Seção Transversal:**
 - Nome: Ue 140x40x12x0,95
 - Tipoc: Ue_Section
 - bw [cm]: 14.0
 - bf [cm]: 4.000
 - D [cm]: 1.200
 - t [cm]: 0.0914
 - dh [cm]: 0.0
 - Lh [cm]: 0.0
- Dados da Barra:**
 - L [cm]: 240.0
 - KxLx [cm]: 240.0
 - KyLy [cm]: 120.0
 - KzLz [cm]: 120.0
- Dados do Material:**
 - Nome do Material: ZAR-230
 - fy [kN/cm²]: 23.0
 - fu [kN/cm²]: 31.0
 - E [kN/cm²]: 20000
- Esforços Críticos:**
 - Nl[kN]: 9.97
 - Ndist[kN]: 999
 - Mxl[kN cm]: 221.26
 - Mxdist[kN cm]: 274.23
- Esforços Solicitantes:**
 - NSd [kN]: -1
 - MxSd [kN cm]: 93.89
 - VxSd [kN]: 0.00
 - VySd [kN]: 0.00
 - V+M: 0.5804
 - P-M-M: 0.6318
- Esforços Resistentes:**
 - NRd [kN]: 19.4515
 - MxRd [kN cm]: 161.7794
 - VxRd [kN]: 8.3348
 - VyRd [kN]: 4.6074
 - V+R máx.: 1.00
 - PMM máx.: 1.00
- Verificações:**
 - Ver.: OK!
 - Ver.: OK!
- Geometric Properties:**
 - Esbeltez em X: 44.7359
 - Esbeltez em Y: 83.3016
- Buttons:**
 - Calcular
 - Propriedades Geométricas
 - Esforços Críticos Elásticos
 - Verificações
 - Detalhado - NRd
 - Detalhado - NcRd
 - Detalhado - MxRd
 - Detalhado - MyRd
 - Detalhado - VxRd
 - Detalhado - VyRd

Figura 3.17 - Dados de Entrada

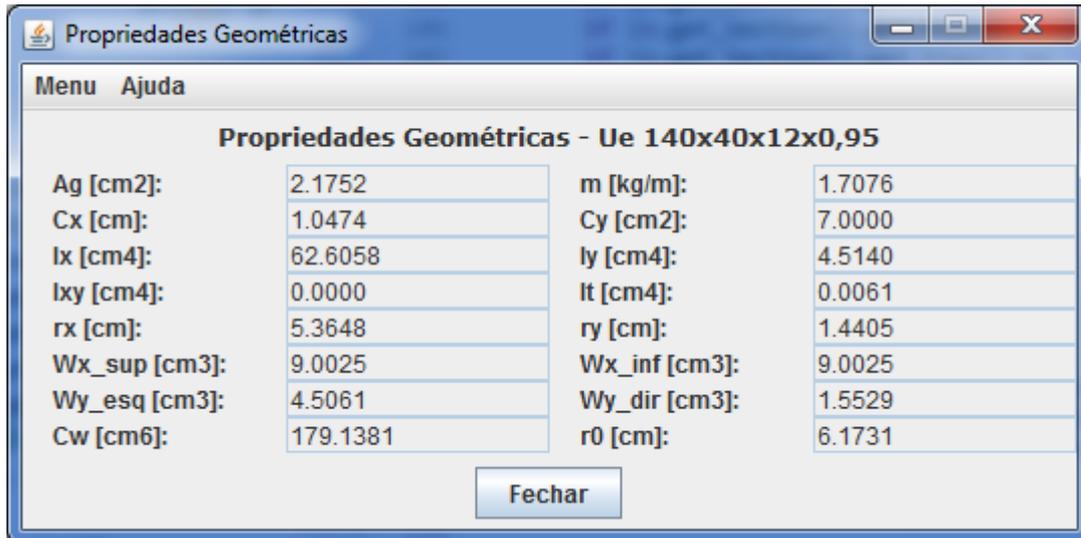


Figura 3.18 – Propriedades Geométricas da Seção Transversal



Figura 3.19 – Esforços críticos elásticos

Cálculo detalhado - MxRd

Índice de Escoamento da Seção Efetiva

fy [kN/cm ²]:	23.0000
Wef [cm ³]:	8.7772
MxRd1 [kNcm]:	181.8319

Flambagem Lateral com Torção

Mex [kNcm]:	393.4808
lambda_o:	0.7254
Xft:	0.9476
Wcef [cm ³]:	8.7772
MxRd2 [kNcm]:	173.9108

Flambagem Distorcional

Mxdist [kNcm]:	274.2300
lambda_dist:	0.7254
Xdist:	0.8595
Wx [cm ³]:	9.0025
MxRd3 [kNcm]:	161.7794
MxRd [kNcm]:	161.7794

Fechar

Figura 3.20 - Cálculo Detalhado

Rodrigo e Caldas (2016) obtiveram o momento fletor resistente de cálculo $M_{xRd} = 161,12$ kN cm. Observa-se que o *software* desenvolvido apresenta resultados similares ($M_{xRd} = 161,78$ kN cm) ao resultado apresentado pelos autores, com uma diferença percentual de apenas 0,40 %.

3.5.2 Exemplo 2 – Viga Ue 140x40x12x0,95 com abertura na alma submetida à flexão simples

Para exemplificação do dimensionamento de peças submetidas à flexão com a presença de furos, tomou-se o exemplo anterior de uma viga Ue 140x40x12x0,95, em que foi realizada um furo oblongo de 32 mm de diâmetro e 50 mm de comprimento. A viga foi fabricada em aço ZAR230, com comprimento de 2400 mm e travamento central. Considerou-se que a viga esteja submetida a um momento fletor solicitante de cálculo $M_{Sdx} = 93,89$ kN cm.

Dados da Seção Transversal

Nome: Ue 140x40x12x0,95
 Tipo: Ue_Section_Along
 bw [cm]: 14.0
 bf [cm]: 4.000
 D [cm]: 1.200
 t [cm]: 0.0914
 dh [cm]: 3.2
 Lh [cm]: 5.0

Dados da Barra

L [cm]: 240.0
 KxLx [cm]: 240.0
 KyLy [cm]: 120.0
 KzLz [cm]: 120.0

Dados do Material

Nome do Material: ZAR-230
 fy [kN/cm²]: 23.0
 fu [kN/cm²]: 31.0
 E [kN/cm²]: 20000

Esforços Críticos

NI[kN]: 9.97
 Ndist[kN]: 999
 MxI[kN cm]: 221.26
 Mxdist[kN cm]: 274.23

Esforços Solicitantes	Esforços Resistentes	Ver.:
NSd [kN]: -1	NRd [kN]: 17.1747	Ver.: OK!
MxSd [kN cm]: 93.89	MxRd [kN cm]: 152.0085	Ver.: OK!
VxSd [kN]: 0.00	VxRd [kN]: 8.3348	Ver.: OK!
VySd [kN]: 0.00	VyRd [kN]: 4.6074	Ver.: OK!
V+M: 0.6177	V+R máx.: 1.00	Ver.: OK!
P-M-M: 0.6759	PMM máx.: 1.00	Ver.: OK!

Esbeltez em X: 44.7359
 Esbeltez em Y: 83.3016

Calcular	Propriedades Geométricas
Esforços Críticos Elásticos	Verificações
Detalhado - NtRd	Detalhado - NcRd
Detalhado - MxRd	Detalhado - MyRd
Detalhado - VxRd	Detalhado - VyRd

Figura 3.21 - Dados de Entrada

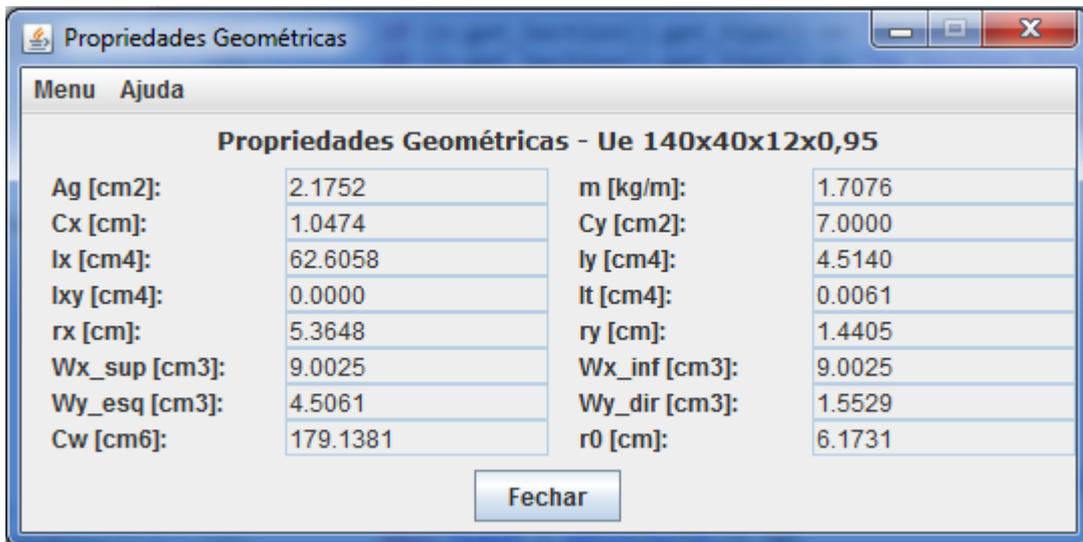


Figura 3.22 - Propriedades Geométricas da Seção Transversal



Figura 3.23 – Esforços críticos elásticos

Cálculo detalhado - M_{xRd}

Íncio de Escoamento da Seção Efetiva

fy [kN/cm ²]:	23.0000
Wef [cm ³]:	7.6718
MxRd1 [kNcm]:	157.7018

Flambagem Lateral com Torção

Mex [kNcm]:	393.4808
lambda_o:	0.7254
Xflit:	0.9476
Wcef [cm ³]:	7.6718
MxRd2 [kNcm]:	152.0085

Flambagem Distorcional

Mxdist [kNcm]:	274.2300
lambda_dist:	0.7254
Xdist:	0.8595
Wx [cm ³]:	9.0025
MxRd3 [kNcm]:	161.7794
MxRd [kNcm]:	152.0085

Fechar

Figura 3.24 - Cálculo Detalhado de M_{xRd}

Cálculo detalhado - V_{yRd}

h [cm]:	13.6344
t [cm]:	0.0914
kv:	5.0000
h/t:	149.1729
Limite 1:	71.2131
Limite 2:	92.3133
Número Almas:	1.0000
c:	5.2172
qs:	1.0000
VRdi [kN]:	4.6074
VRdy [kN]:	4.6074

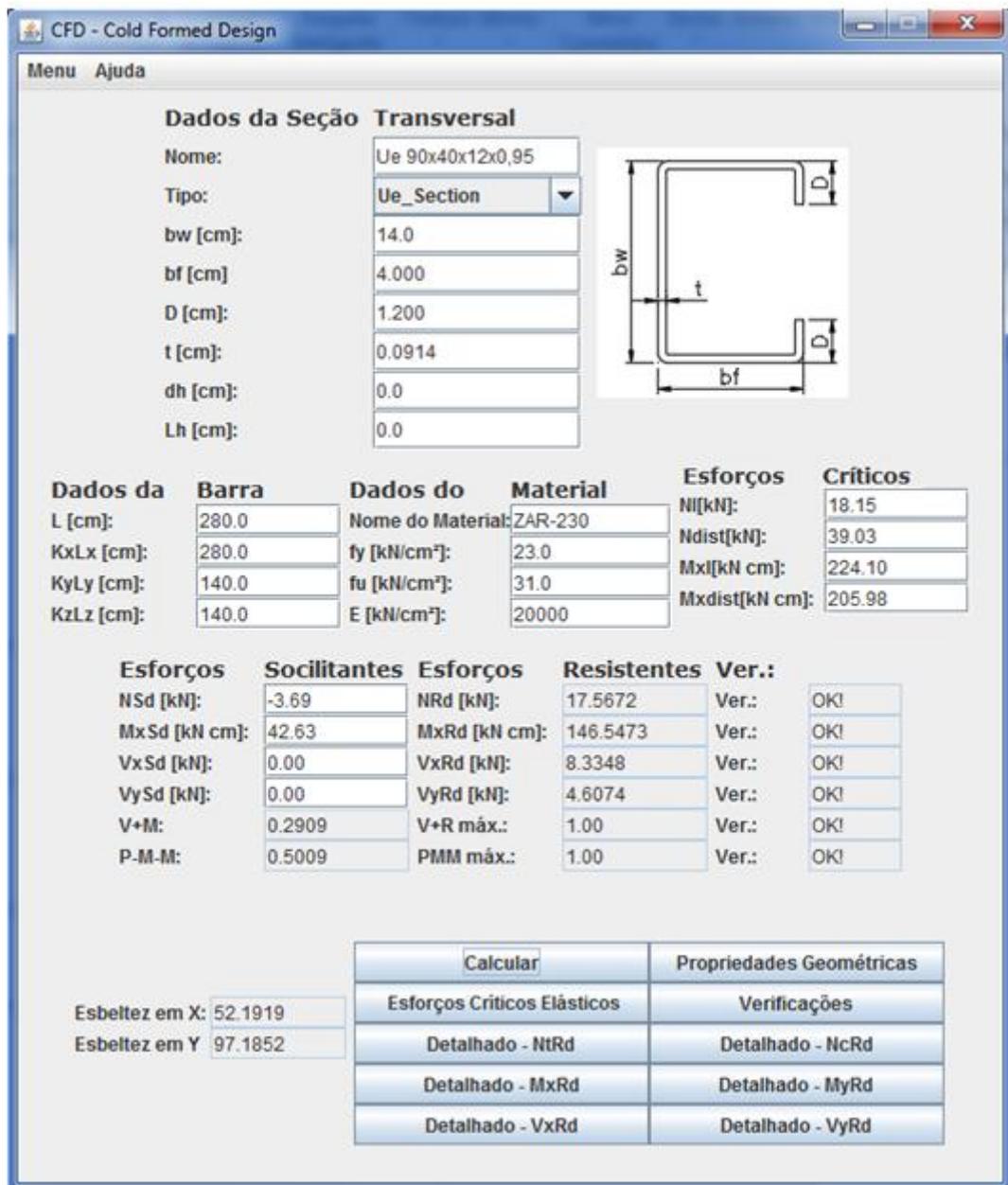
Fechar

Figura 3.25 - Cálculo Detalhado de V_{yRd}

Com base nos resultados obtidos para o perfil com furos, observou-se uma redução do momento fletor resistente de cálculo de $M_{xRd} = 161,78$ kN cm para o perfil sem furos para $M_{xRd} = 152,00$ kN cm.

3.5.3 Exemplo 3– Montante Ue 90x40x12x0,95 sem abertura na alma submetido à flexão composta

Para exemplificação do dimensionamento de peças submetidas à flexão composta, tomou-se o exemplo de um montante Ue 90x40x12x0,95, fabricado em aço ZAR230, com comprimento de 2800 mm e travamento central. Considerou-se que o montante esteja submetido à um momento fletor solicitante de cálculo $M_{Sdx} = 42,63$ kN cm e a uma força de axial de compressão solicitante de cálculo $N_{cSd} = 3,69$ kN. A solução do problema via método da seção efetiva foi apresentada por Rodrigues e Caldas (2016).



Dados da Seção Transversal

Nome: Ue 90x40x12x0,95
 Tipo: Ue_Section
 bw [cm]: 14.0
 bf [cm]: 4.000
 D [cm]: 1.200
 t [cm]: 0.0914
 dh [cm]: 0.0
 Lh [cm]: 0.0

Dados da Barra

L [cm]: 280.0
 KxLx [cm]: 280.0
 KyLy [cm]: 140.0
 KzLz [cm]: 140.0

Dados do Material

Nome do Material: ZAR-230
 fy [kN/cm²]: 23.0
 fu [kN/cm²]: 31.0
 E [kN/cm²]: 20000

Esforços Críticos

NI[kN]: 18.15
 Ndist[kN]: 39.03
 Mxl[kN cm]: 224.10
 Mxdist[kN cm]: 205.98

Esforços Solicitantes	Esforços Resistentes	Ver.:
NSd [kN]: -3.69	NRd [kN]: 17.5672	Ver.: OK!
MxSd [kN cm]: 42.63	MxRd [kN cm]: 146.5473	Ver.: OK!
VxSd [kN]: 0.00	VxRd [kN]: 8.3348	Ver.: OK!
VySd [kN]: 0.00	VyRd [kN]: 4.6074	Ver.: OK!
V+M: 0.2909	V+R máx.: 1.00	Ver.: OK!
P-M-M: 0.5009	PMM máx.: 1.00	Ver.: OK!

Esbeltez em X: 52.1919
 Esbeltez em Y: 97.1852

Calcular	Propriedades Geométricas
Esforços Críticos Elásticos	Verificações
Detalhado - NtRd	Detalhado - NcRd
Detalhado - MxRd	Detalhado - MyRd
Detalhado - VxRd	Detalhado - VyRd

Figura 3.26 - Dados de Entrada

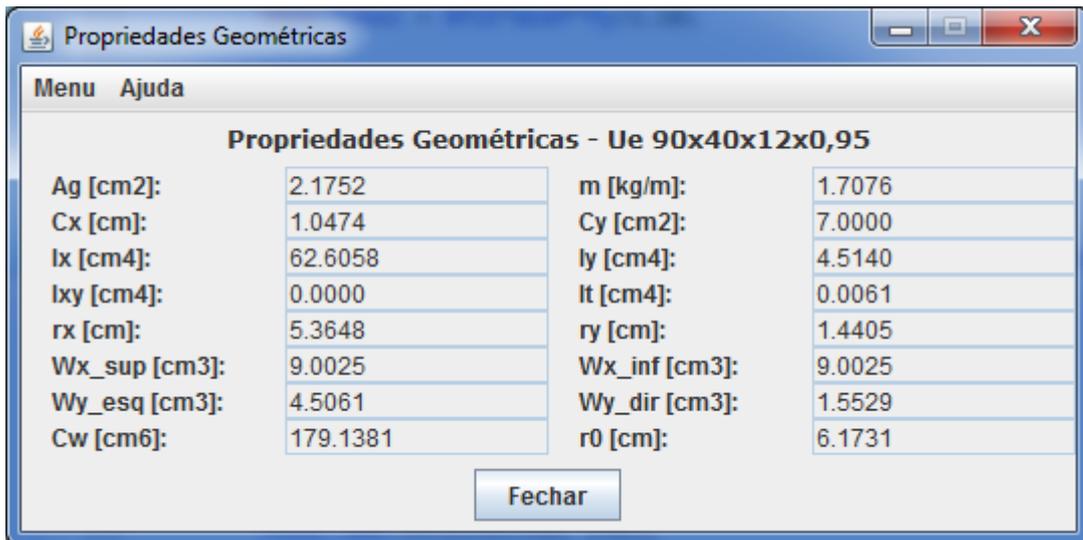


Figura 3.27 - Propriedades Geométricas da Seção Transversal



Figura 3.28 – Esforços críticos elásticos

Cálculo detalhado - NcRd

fy [kN/cm ²]:	23.0000	Ag [cm ²]:	2.1752
lambda_o:	1.0530	X:	0.6287
NcRd1[kN]:	17.5672	Ndist[kN]:	39.0300
lambda_dist:	1.1322	Xdist:	0.6760
NcRd2[kN]:	28.1839	NcRd[kN]:	17.5672

Cálculo detalhado - Aef

b1 [cm]:	13.6344	b2 [cm]:	3.6344
b3 [cm]:	1.0172	t [cm]:	0.0914
k1 :	4.0000	k2 :	3.5991
k3 :	0.4300	lambda_po:	1.7162
lambda_p1:	2.1111	lambda_p2:	0.5933
lambda_p3:	0.4804	n:	0.3726
Ia [cm ⁴]:	0.0036	Is [cm ⁴]:	0.0080
bef1 [cm]:	5.7854	bef2 [cm]:	3.6344
bef3 [cm]:	1.0172	binef1 [cm]:	7.8490
binef2 [cm]:	0.0000	binef3 [cm]:	0.0000
Aef[cm ²]:	1.4578		

Fechar

Figura 3.29 - Cálculo Detalhado – NcRd

Cálculo detalhado - MxRd

Íncio de Escoamento da Seção Efetiva

fy [kN/cm ²]:	23.0000
Wef [cm ³]:	8.8829
MxRd1 [kNcm]:	181.8319

Flambagem Lateral com Torção

Mex [kNcm]:	290.0583
lambda_o:	0.8449
Xfit:	0.8897
Wcef [cm ³]:	8.8829
MxRd2 [kNcm]:	165.2507

Flambagem Distorcional

Mxdist [kNcm]:	205.9800
lambda_dist:	0.8449
Xdist:	0.7785
Wx [cm ³]:	9.0025
MxRd3 [kNcm]:	146.5473
MxRd [kNcm]:	146.5473

Fechar

Figura 3.30 - Cálculo Detalhado - M_{xRd}

Cálculo detalhado - VyRd

h [cm]:	13.6344
t [cm]:	0.0914
kv:	5.0000
h/t:	149.1729
Limite 1:	71.2131
Limite 2:	92.3133
Número Almas:	1.0000
VRdi [kN]:	4.6074
VRdy [kN]:	4.6074

Fechar

Figura 3.31 - Cálculo Detalhado - V_{yRd}

Observa-se que os valores obtidos via aplicativo são coerentes com os valores obtidos por Rodrigues e Caldas (2016).

3.5.4 Exemplo 4 – Montante Ue 90x40x12x0,95 com abertura na alma submetido à compressão centrada

Para exemplificação do dimensionamento de peças submetidas à compressão com a presença de furos, tomou-se o exemplo de um montante Ue 90x40x12x0,95, fabricado em aço ZAR230, com comprimento de 2800 mm e travamento central. Considerou-se que o montante esteja submetido a uma força axial de compressão solicitante de cálculo $N_{cSd} = 3,69$ kN. O perfil em questão possui um furo oblongo de 38 mm de diâmetro por 110 mm de comprimento. A solução do problema via método da seção efetiva foi apresentada por Rodrigues e Caldas (2016).

Dados da Seção Transversal

Nome: Ue 90x40x12x0,95
 Tipo: Ue_Section_Along
 bw [cm]: 9.0
 bf [cm]: 4.000
 D [cm]: 1.200
 t [cm]: 0.0914
 dh [cm]: 3.8
 Lh [cm]: 11.0

Dados da Barra

L [cm]: 280.0
 KxLx [cm]: 280.0
 KyLy [cm]: 140.0
 KzLz [cm]: 140.0

Dados do Material

Nome do Material: ZAR-230
 fy [kN/cm²]: 23.0
 fu [kN/cm²]: 31.0
 E [kN/cm²]: 20000

Esforços Críticos

NI[kN]: 18.15
 Ndist[kN]: 39.03
 MxI[kN cm]: 224.10
 Mxdist[kN cm]: 204.98

Esforços	Socilitantes	Esforços Resistentes	Ver.:
NSd [kN]: -3.69	NRd [kN]: 11.8417	Ver.:	OK!
MxSd [kN cm]: 0.00	MxRd [kN cm]: 98.7505	Ver.:	OK!
VxSd [kN]: 0.00	VxRd [kN]: 8.3348	Ver.:	OK!
VySd [kN]: 0.00	VyRd [kN]: 3.5632	Ver.:	OK!
V+M: 0.0000	V+R máx.: 1.00	Ver.:	OK!
P-M-M: 0.3116	PMM máx.: 1.00	Ver.:	OK!

Esbeltez em X: 77.6775
 Esbeltez em Y: 92.5339

Calcular	Propriedades Geométricas
Esforços Críticos Elásticos	Verificações
Detalhado - NtRd	Detalhado - NcRd
Detalhado - MxRd	Detalhado - MyRd
Detalhado - VxRd	Detalhado - VyRd

Figura 3.32 - Dados de Entrada

Propriedades Geométricas - Ue 90x40x12x0,95

Ag [cm ²]:	1.7182	m [kg/m]:	1.3488
Cx [cm]:	1.3139	Cy [cm ²]:	4.5000
Ix [cm ⁴]:	22.3258	Iy [cm ⁴]:	3.9331
Ixy [cm ⁴]:	0.0000	It [cm ⁴]:	0.0048
rx [cm]:	3.6046	ry [cm]:	1.5130
Wx_sup [cm ³]:	5.0122	Wx_inf [cm ³]:	5.0122
Wy_esq [cm ³]:	3.1014	Wy_dir [cm ³]:	1.4896
Cw [cm ⁶]:	70.2302	r0 [cm]:	5.0501

Fechar

Figura 3.33 - Propriedades Geométricas da Seção Transversal

Esforços Críticos Elásticos

KxLx [cm]:	280.0000	KyLy [cm]:	140.0000
KzLz [cm]:	140.0000	Nex [kN]:	56.2110
Ney [kN]:	39.6104	Nez [kN]:	29.1765
Nexz [kN]:	22.8812	Ne [kN]:	22.8812
Mex [kN cm]:	171.6798	Mey [kN cm]:	0.0000

Fechar

Figura 3.34 – Esforços críticos elásticos

Cálculo detalhado - N_{cRd}

fy [kN/cm ²]:	23.0000	Ag [cm ²]:	1.7182
lambda_o:	1.3142	X:	0.4853
N _{cRd1} [kN]:	11.8417	N _{dist} [kN]:	39.0300
lambda_dist:	1.0062	X _{dist} :	0.7463
N _{cRd2} [kN]:	24.5765	N _{cRd} [kN]:	11.8417

Cálculo detalhado - A_{ef}

b1 [cm]:	8.6344	b2 [cm]:	3.6344
b3 [cm]:	1.0172	t [cm]:	0.0914
k1 :	0.4300	k2 :	3.5991
k3 :	0.4300	lambda_po:	1.5079
lambda_p1:	1.0030	lambda_p2:	0.5212
lambda_p3:	0.4221	n:	0.3980
I _a [cm ⁴]:	0.0019	I _s [cm ⁴]:	0.0080
b _{ef1} [cm]:	3.7628	b _{ef2} [cm]:	3.6344
b _{ef3} [cm]:	1.0172	b _{inef1} [cm]:	4.8716
b _{inef2} [cm]:	0.0000	b _{inef3} [cm]:	0.0000
A _{ef} [cm ²]:	1.2730		

Fechar

Figura 3.35 - Cálculo Detalhado

Rodrigues e Caldas (2016) obtiveram a força axial de compressão resistente de cálculo $N_{cRd} = 11,96$ kN. Observa-se que o *software* desenvolvido apresenta resultados similares ($N_{cRd} = 11,84$ kN) ao resultado apresentado pelos autores, com uma diferença percentual de apenas 1,01 %.

4

4. Comportamento de barras de aço com a presença de furos

4.1 Estudo de barras de aço comprimidas do sistema LSF com a presença de furos

Na Figura 4.1 tem-se o gráfico que apresenta o comportamento do perfil Ue 90x40x12x0,80 comprimido, com furos oblongos. Este gráfico apresenta a força de compressão resistente de cálculo em função de seu comprimento (limitado a 400 cm) e considera a relação d_h/h variando de 0,10 até 0,50, além de apresentar o comportamento do perfil sem furos. Para elaboração do gráfico, adotou-se aço ZAR230 e considerou-se um travamento central, de modo que $K_yL_y = K_zL_z = K_xL_x / 2$. A flambagem distorcional não foi considerada.

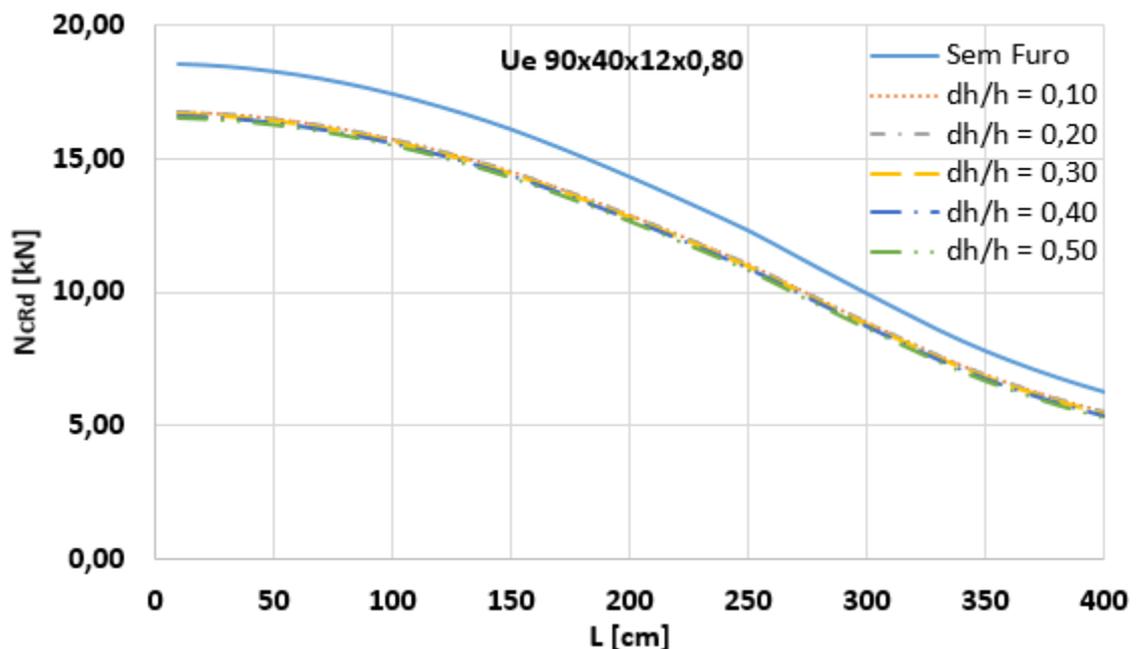


Figura 4.1 – Gráfico da força axial de compressão resistente de cálculo em função do comprimento do perfil Ue 90x40x12x0,80 com a presença de furos oblongos

As barras sujeitas à força axial de compressão, que possuem furos oblongos, apresentam redução da força axial de compressão resistente de cálculo, como pode ser observado na Figura 4.1 para o perfil Ue 90x40x12x0,80. Observou-se que para o perfil estudado, a redução percentual máxima (tomada como a maior redução da força axial de compressão resistente dividida pela força resistente do perfil sem furos) varia de 11,7% a 15,8%.

Conforme apresentado na Tabela 4-1, para uma determinada barra pode-se definir a redução percentual máxima (α) para sua força axial de compressão resistente de cálculo, em função do comprimento do perfil e da relação d_h/h .

Tabela 4-1 – Percentual de redução da força axial de compressão resistente para o perfil Ue 90x40x12x0,80 com furos

$K_x L_x$ [cm]	$K_z L_z =$ $K_y L_y$ [cm]	N_{cr0} [kN] (Sem Furos)	α $d_h/h = 0,10$	α $d_h/h = 0,20$	α $d_h/h = 0,30$	α $d_h/h = 0,40$	α $d_h/h = 0,50$
20	10	18,53	9,7%	9,9%	10,2%	10,6%	11,1%
40	20	18,40	9,7%	9,9%	10,2%	10,6%	11,1%
60	30	18,17	9,7%	9,9%	10,2%	10,6%	11,2%
80	40	17,85	9,7%	10,0%	10,3%	10,7%	11,2%
100	50	17,45	9,8%	10,0%	10,3%	10,7%	11,2%
120	60	16,97	9,8%	10,0%	10,3%	10,7%	11,3%
140	70	16,42	9,8%	10,1%	10,4%	10,8%	11,4%
160	80	15,79	9,9%	10,1%	10,5%	10,9%	11,5%
180	90	15,08	9,9%	10,2%	10,5%	11,0%	11,7%
200	100	14,33	10,0%	10,3%	10,6%	11,1%	11,8%
220	110	13,55	10,1%	10,4%	10,8%	11,3%	12,0%
240	120	12,73	10,2%	10,5%	10,9%	11,4%	12,2%
260	130	11,85	10,3%	10,6%	11,1%	11,7%	12,5%
280	140	10,89	10,5%	10,9%	11,4%	12,0%	12,9%
300	150	9,95	10,7%	11,1%	11,7%	12,4%	13,3%
320	160	9,04	11,0%	11,4%	12,0%	12,8%	13,8%
340	170	8,18	11,2%	11,7%	12,3%	13,2%	14,4%
360	180	7,44	11,4%	11,9%	12,6%	13,6%	14,9%
380	190	6,81	11,5%	12,1%	12,9%	13,9%	15,4%
400	200	6,26	11,7%	12,3%	13,2%	14,3%	15,8%
Redução média			10,3%	10,6%	11,1%	11,7%	12,5%
Redução máxima			11,7%	12,3%	13,2%	14,3%	15,8%
Redução mínima			9,71%	9,92%	10,21%	10,58%	11,11%

A Figura 4.2 apresenta o gráfico com as reduções percentuais da força axial de compressão resistente do perfil Ue 90x40x12x0,80, com relação d_h/h variando de 0,10 a 0,50, em função do comprimento do perfil variando de 0 até 400 cm.

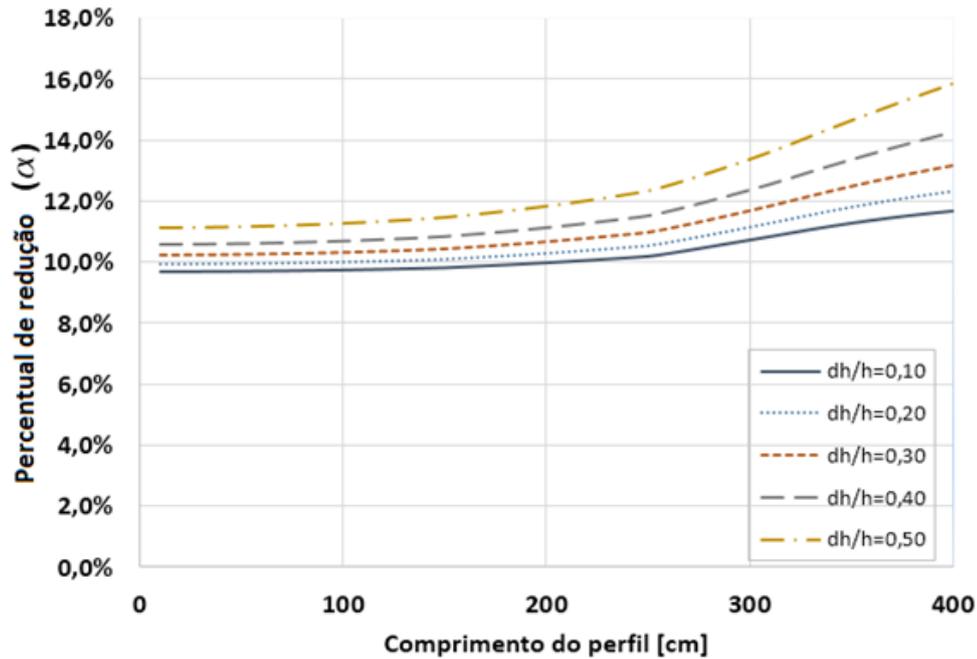


Figura 4.2 – Redução percentual da força axial de compressão resistente de cálculo para a relação d_h/h variando de 0,10 a 0,50 em função do comprimento do perfil Ue 90x40x12x0,80 com a presença de furos oblongos

É possível observar na Figura 4.2, que o percentual de redução α aumenta com o aumento do comprimento do perfil. Observa-se também que redução percentual α aumenta conforme a relação d_h/h cresce.

A Figura 4.3 coloca a variação da redução percentual α em função da relação d_h/h , para os comprimentos do perfil variando de 50 cm até 400 cm.

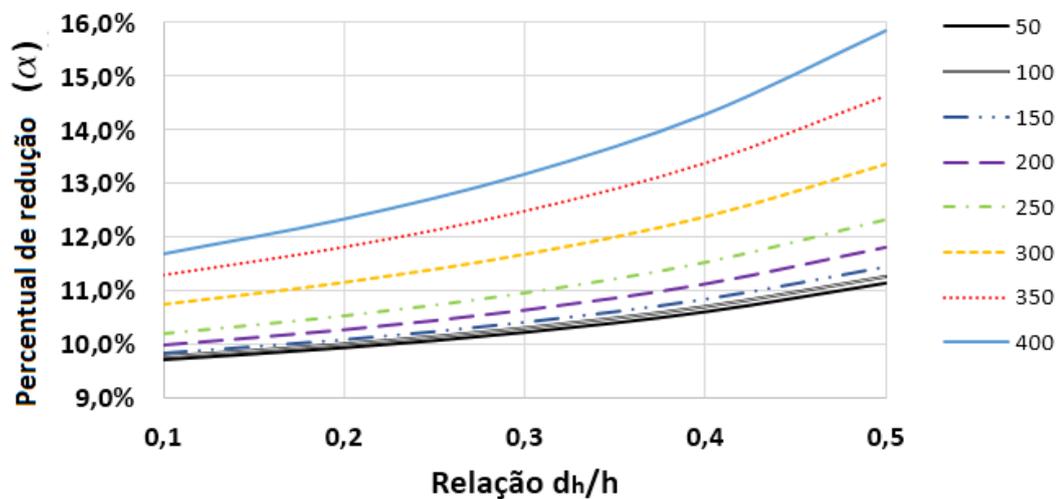


Figura 4.3 – Variação da redução percentual em função da relação d_h/h , para os comprimentos do perfil Ue 90x4x12x0,80 variando de 50 cm a 400 cm

A Tabela 4-2 estende o cálculo da redução percentual da força axial de compressão resistente para os demais perfis usualmente adotados no sistema LSF, apresentando a maior redução percentual α para perfis com comprimentos de até 400 cm (com $K_y L_y = K_z L_z = K_x L_x / 2$) e relação d_h/h variando de 0,1 até 0,5

Tabela 4-2 – Porcentagem máxima de redução da força axial de compressão resistente para perfis usualmente adotados no sistema LSF

Perfil	α $d_h/h= 0,10$	α $d_h/h= 0,20$	α $d_h/h= 0,30$	α $d_h/h= 0,40$	α $d_h/h= 0,50$
Ue 90x40x12x0,80	11,68%	12,33%	13,17%	14,28%	15,83%
Ue 90x40x12x0,95	12,00%	12,89%	14,03%	15,55%	18,16%
Ue 90x40x12x1,25	12,01%	13,20%	14,93%	18,71%	23,38%
Ue 140x40x12x0,80	12,04%	12,31%	12,66%	13,14%	13,53%
Ue 140x40x12x0,95	13,06%	13,43%	13,92%	14,57%	15,10%
Ue 140x40x12x1,25	14,44%	15,07%	15,88%	16,97%	17,87%
Ue 200x40x12x0,80	13,00%	13,21%	13,55%	-	-
Ue 200x40x12x0,95	14,20%	14,49%	14,95%	-	-
Ue 200x40x12x1,25	15,95%	16,42%	17,18%	-	-

Quando furos oblongos são realizados na alma de um perfil submetido à compressão centrada, esta deixa de ser tratada como um elemento vinculado-vinculado com coeficiente de flambagem k na ordem 24, e passa a ser considerada como dois elementos vinculado-livre não enrijecidos, adjacentes ao furo, ambos com $k=0,43$. A largura efetiva de cada elemento deve ser calculada separadamente e resulta em um valor menor do que no elemento vinculado-vinculado. A variação da condição de contorno da alma pode provocar redução significativa da força axial de compressão resistente do perfil, conforme pode ser constatado na Tabela 4-2.

Observou-se que a redução percentual α cresce com o aumento da relação d_h/h , o que é esperado, uma vez que o aumento do furo reduz a largura dos elementos adjacentes ao mesmo. Observou-se também que redução percentual α cresce com o aumento do comprimento do perfil.

Os resultados da Tabela 4-2 podem ser utilizados para o projeto de barras comprimidas, com os perfis e condições analisadas, para prever a influência dos furos na capacidade resistente a compressão. Ressalta-se que a flambagem distorcional deve ser verificada.

4.2 Estudo de barras de aço fletidas do sistema LSF com a presença de furos

4.2.1 Determinação do momento fletor resistente de cálculo

Na Figura 4.4 tem-se o gráfico que apresenta o comportamento do perfil Ue 90x40x12x0,80 submetido à flexão, com furos oblongos. Este gráfico apresenta a força distribuída solicitante de cálculo que pode ser aplicada no perfil em função de seu comprimento (limitado a 200 cm).

Foi considerado a relação d_h/h variando de 0,40 até 0,70, uma vez que para relações $d_h/h < 0,38$ a presença do furo pode ser desconsiderada no dimensionamento à flexão, conforme prescrições da AISI S100-16. Foi apresentado também o comportamento do perfil sem furos.

Para elaboração do gráfico, adotou-se aço ZAR230 e considerou-se um travamento central, de modo que $K_y L_y = K_z L_z = K_x L_x / 2$. A flambagem distorcional não foi considerada.

A carga distribuída solicitante de cálculo, q_{sd} , é igual a máxima carga distribuída que pode ser aplicada na barra. Essa foi tomada como a menor entre os estados limites de:

- i) momento fletor resistente de cálculo;
- ii) força cortante resistente de cálculo e
- iii) deslocamento máximo para vigas biapoiadas.

Conforme apresentado na equação 4.1:

$$q_{sd} \leq \begin{cases} \frac{8M_{Rd}}{L^2} \\ \frac{2V_{Rd}}{L} \\ 1,4 \left(\frac{384}{5} \right) \frac{EI_{ef}}{350L^3} \end{cases} \quad (4.1)$$

O momento fletor resistente de cálculo foi calculado como o menor dos estados limites de início de escoamento da seção efetiva e flambagem lateral com torção. A flambagem distorcional não foi verificada. Foi adotada a formulação apresentada na AISI S100-16 para o cálculo da largura efetiva de elementos com furos sob gradiente de tensões. O coeficiente C_b foi tomado como 1,0.

A força cortante resistente de cálculo, V_{Rd} , foi obtida conforme apresentado na NBR 14762:2010, considerando a alma sem enrijecedores transversais, sendo $k_v=5,0$. Para o cálculo da força cortante resistente de cálculo de perfis com furos, o coeficiente de redução apresentado no AISI S100-16 foi aplicado.

Para cálculo do deslocamento máximo de $L/350$ para vigas com furos, o momento de inércia efetivo foi obtido conforme recomendado no item 1.1.2 da AISI S100-16. Considerou-se que q_{sd} é 1,4 vezes a carga distribuída característica.

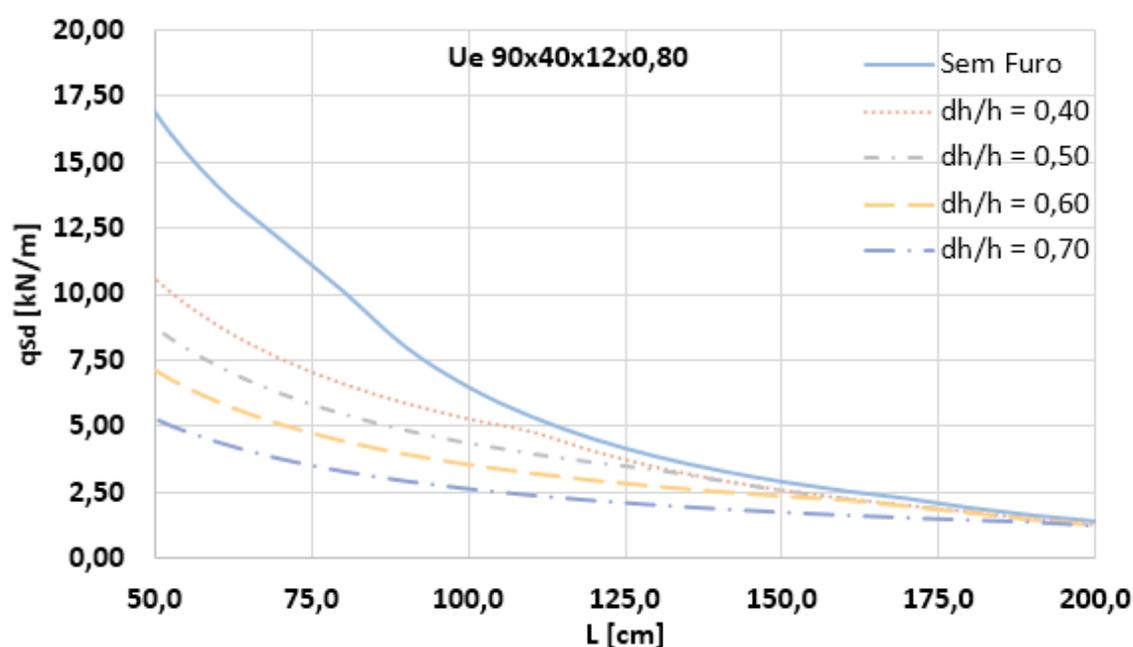


Figura 4.4 – Gráfico da força distribuída de cálculo que pode ser aplicada em uma barra em flexão com seção Ue 90x40x12x0,80 e a presença de furos oblongos

As barras sujeitas à flexão, que possuem furos oblongos, apresentam redução da força axial de compressão resistente de cálculo, como pode ser observado na figura 5 para o perfil Ue 90x40x12x0,80. Observou-se que para o perfil estudado, a redução percentual máxima na carga distribuída solicitante de cálculo (q_{sd}) que pode ser aplicada no varia de 37% a 69%, em função da relação d_h/h .

Conforme apresentado na Tabela 4-3, para uma determinada barra pode-se definir a redução percentual máxima (β) na carga distribuída de cálculo que pode ser aplicada na barra, em função do comprimento do perfil e da relação d_h/h .

Tabela 4-3 – Percentual de redução da força distribuída que pode ser aplicada ao perfil Ue 90x40x12x0,80 com a presença de furos oblongos

$K_x L_x$	$K_z L_z = K_y L_y$	q_{sd} [kN / m]	β	β	β	β
[cm]	[cm]	(Sem Furos)	$d_h/h = 0,40$	$d_h/h = 0,50$	$d_h/h = 0,60$	$d_h/h = 0,70$
20	10	42,20	37,0%	48,0%	57,6%	68,6%
40	20	21,10	37,0%	48,0%	57,6%	68,6%
60	30	14,07	37,0%	48,0%	57,6%	68,6%
80	40	10,09	34,2%	45,6%	55,7%	67,1%
100	50	6,46	17,7%	32,0%	44,7%	58,9%
120	60	4,49	8,9%	18,4%	33,6%	50,7%
140	70	3,30	8,9%	9,4%	22,5%	42,5%
160	80	2,52	8,9%	9,4%	11,5%	34,3%
180	90	1,88	4,5%	5,5%	6,8%	21,6%
200	100	1,37	4,5%	5,5%	6,8%	8,8%
220	110	1,03	4,5%	5,5%	6,8%	8,8%
240	120	0,79	4,5%	5,5%	6,8%	8,8%
260	130	0,62	4,5%	5,5%	6,8%	8,8%
280	140	0,50	4,5%	5,5%	6,8%	8,8%
300	150	0,41	4,5%	5,5%	6,8%	8,8%
320	160	0,33	4,5%	5,5%	6,8%	8,8%
340	170	0,28	4,5%	5,5%	6,8%	8,8%
360	180	0,23	4,5%	5,5%	6,8%	8,8%
380	190	0,20	4,5%	5,5%	6,8%	8,8%
400	200	0,17	4,5%	5,5%	6,8%	8,8%
Redução mínima			4,5%	5,5%	6,8%	8,8%
Redução média			4,5%	5,5%	6,8%	8,8%
Redução máxima			37,0%	48,0%	57,6%	68,6%

Quando furos oblongos são realizados na alma de um perfil submetido à flexão, esta deixa de ser tratada como um elemento vinculado-vinculado com coeficiente de flambagem $k=4$, e passa a ser considerada como dois elementos vinculado-livre não enrijecidos, adjacentes ao furo. O elemento tracionado não está sujeito a flambagem local. Para o elemento comprimido deve se adotar $k=0,43$. As propriedades efetivas da seção, resultam em valores menores do que no elemento vinculado-vinculado. A variação da condição de contorno da alma pode provocar redução significativa do momento fletor resistente do perfil.

4.2.2 Verificação dos deslocamentos de perfis com a presença de furos

Conforme preconizado na norma AISI S100-16 o cálculo da largura efetiva de elementos enrijecidos com a presença de furos, adotado na verificação dos deslocamentos pode ser feito desconsiderando a existência dos furos.

Conforme observado na Figura 4.4 os valores do gráfico convergem para uma mesma carga distribuída para perfis com maiores comprimentos. Isto ocorre devido ao estado-lime predominante para barras fletidas de maiores comprimentos é o deslocamento máximo para vigas (consideradas como biapoiadas neste estudo).

4.2.3 Determinação da força cortante resistente de cálculo

Conforme apresentado no item 2.3.3 para a determinação da força cortante resistente de cálculo de um perfil U_e com a presença de furos na alma, deve-se inicialmente calcular a força resistente de um perfil sem furos. Em seguida aplica-se um fator de redução q_s sobre este valor.

Este fator de redução depende da altura da parte plana da alma (h), espessura da alma (t), diâmetro do furo (d_h) e de um coeficiente (c) que varia para furos circulares e não circulares.

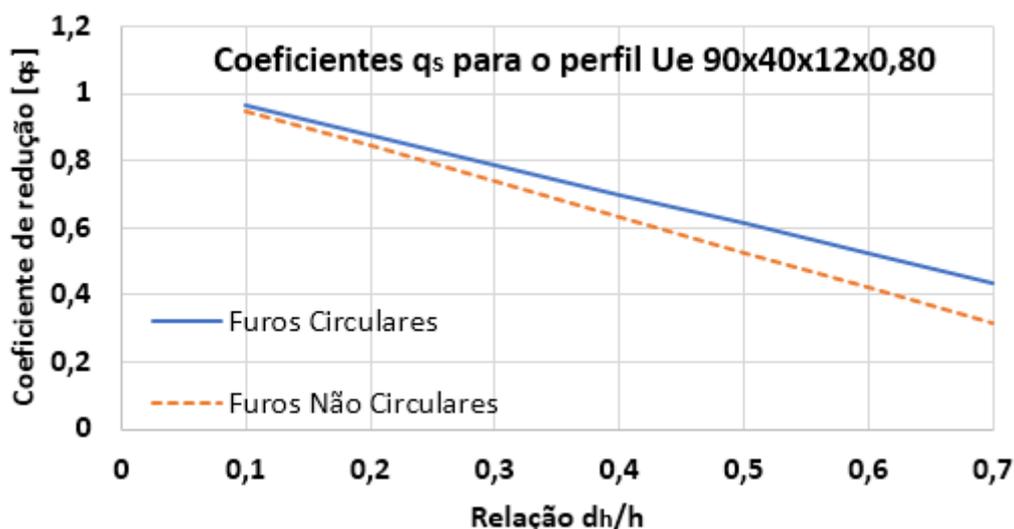


Figura 4.5 – Comparação entre os coeficientes de redução q_s para furos circulares e não circulares na alma de um perfil Ue 90x40x12x0,80

A Figura 4.5 apresenta a comparação entre os q_s para furos circulares e não circulares na alma de um perfil Ue 90x40x12x0,80, conforme esperado a redução da força resistente é maior para furos não circulares. Adicionalmente, ressalta-se o fato de que a dimensão máxima permitida para furos circulares (diâmetro máximo de 152 mm) ser maior do que para furos não circulares (profundidade máxima de 63,5 mm).

A Figura 4.6, Figura 4.8 e Figura 4.9 apresentam os coeficientes de redução q_s para furos circulares na alma dos perfis mais frequentemente usados no sistema LSF. Ressalta-se o fato de que a norma AISI S100-16 recomenda que furos somente devem ser realizados na alma de perfis submetidos à força cortante que apresentem relação $h/t \leq 200$, logo os perfis Ue 200x40x12x0,80 e Ue 200x40x12x0,95 não são considerados.

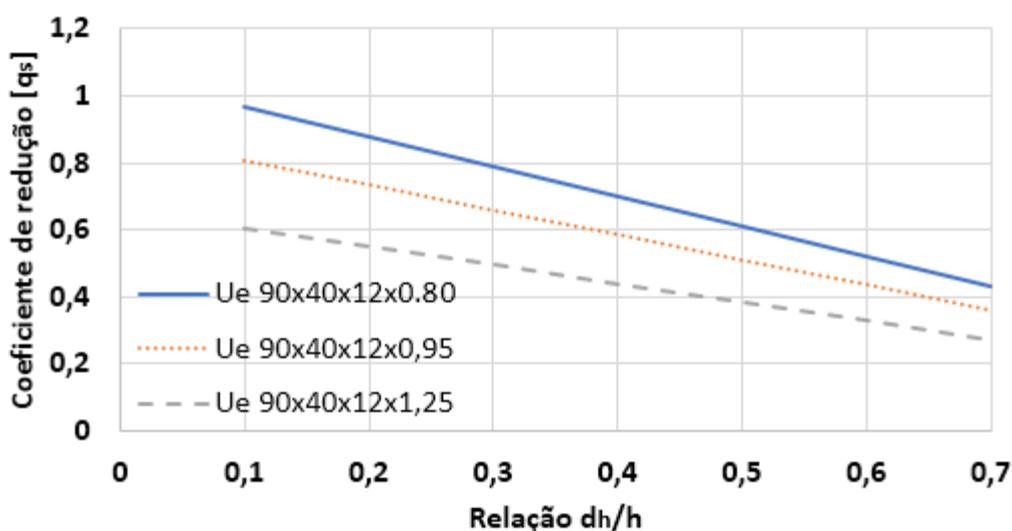


Figura 4.6 – Coeficientes de redução q_s para furos circulares na alma de perfis Ue 90x40x12

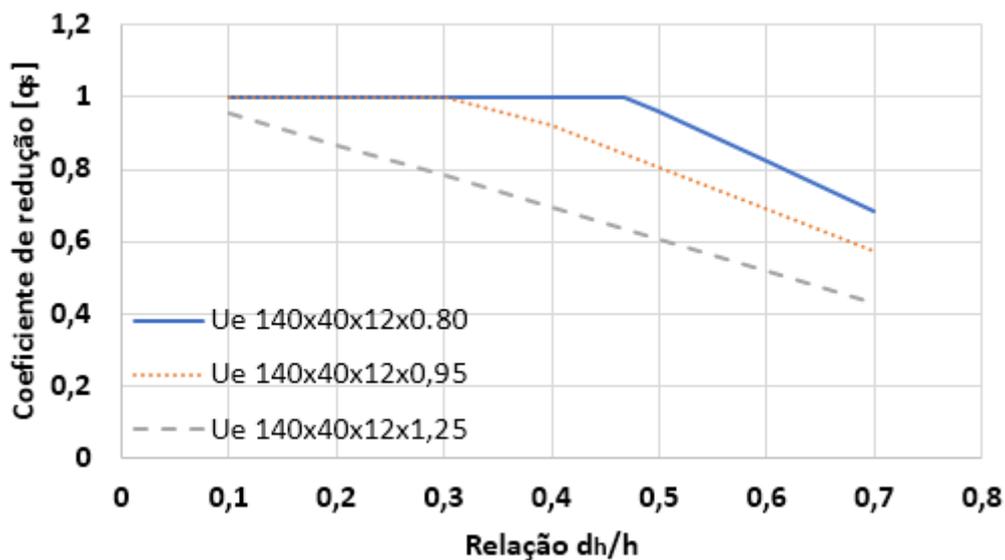


Figura 4.7 – Coeficientes de redução q_s para furos circulares na alma de perfis Ue 140x40x12

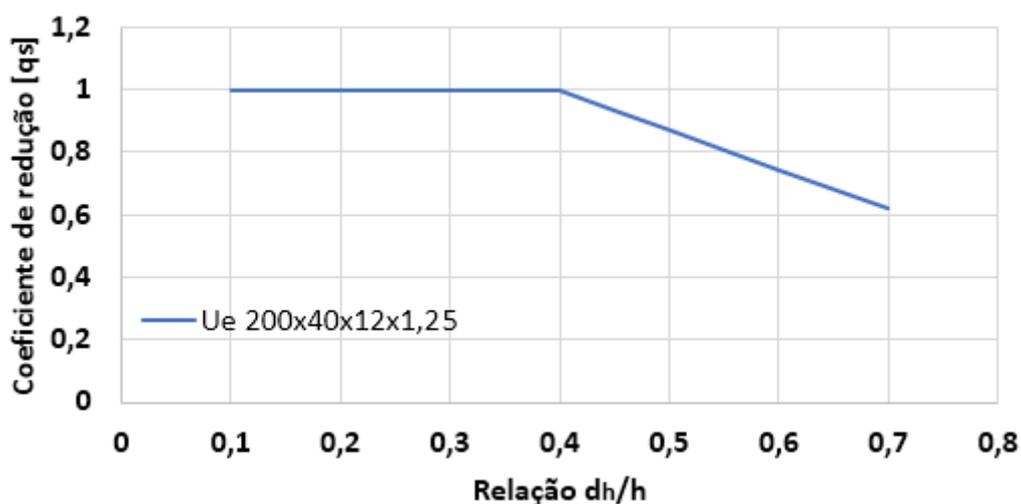


Figura 4.8 – Coeficientes de redução q_s para furos circulares na alma de perfis Ue 200x40x12

A presença de furos circulares na alma de perfis Ue pode causar redução de até 72,6 % na força cortante resistente de cálculo, como observado para o perfil Ue 90x40x12x1,25, na Figura 4.6. A redução na força cortante resistente de cálculo é maior para furos não circulares, conforme observado na Figura 4.5.

4.3 Gráficos de pré-dimensionamento

4.3.1 Gráficos $L \times N_{sd}$ – Barras submetidas à força axial de compressão

Nesta seção são apresentados gráficos de pré-dimensionamento de barras comprimidas com a presença de furos, de maneira semelhante aos apresentados por Rodrigues e Caldas (2016) na seção 7.2.1 do Manual de *Light Steel Framing*: Engenharia do CBCA para perfis sem furos.

Os gráficos são dados pelos pares $L \times N_{sd}$, sendo L o comprimento efetivo de flambagem global por flexão em relação ao eixo x . Foram desenvolvidos gráficos para os casos em que $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 2$ e $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 3$. N_{sd} é a força axial máxima de compressão solicitante de cálculo que pode ser aplicada no perfil, sendo igual à força axial de compressão resistente do perfil.

A largura efetiva de elementos com a presença de furos usada no cálculo da força axial de compressão resistente foi obtida conforme apresentado na norma AISI S100-16, o restante do dimensionamento foi realizado conforme NBR 14762:2010. A flambagem distorcional não foi considerada. Para o pré-dimensionamento adotou-se o aço ZAR 230.

São apresentados os resultados para os perfis sem furos e para perfis com furos. Variou-se a relação d_h/w de 0,10 a 0,50 para perfis com 90mm de largura de alma. Para os perfis com 140mm e 200mm de largura de alma, a relação d_h/h ficou limitada pela dimensão máxima do furo (63,5 mm) em 0,45 e 0,30, respectivamente.

A seguir são apresentados os gráficos com as relações $L \times N_{sd}$ de pré-dimensionamento das barras submetidas à força axial de compressão com a presença de furos alongados, e um travamento ao longo do vão, ou seja, $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 2$. A flambagem distorcional não foi verificada.

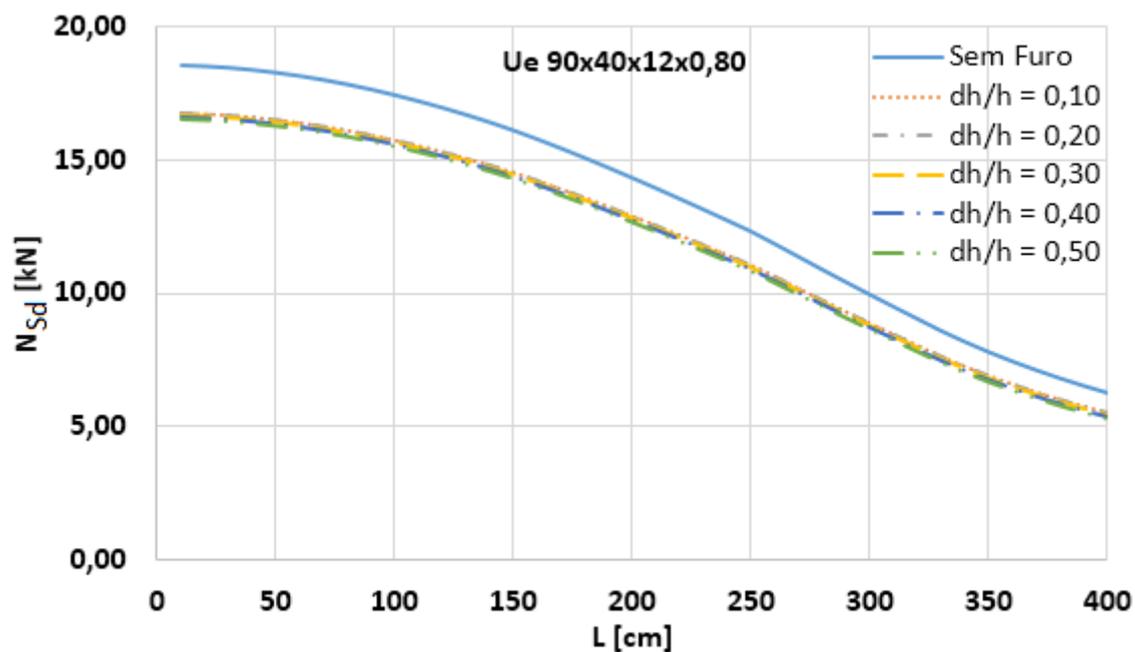


Figura 4.9 - Barras submetidas à força axial de compressão: Perfil Ue 90x40x12x0,80;
 $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 2$

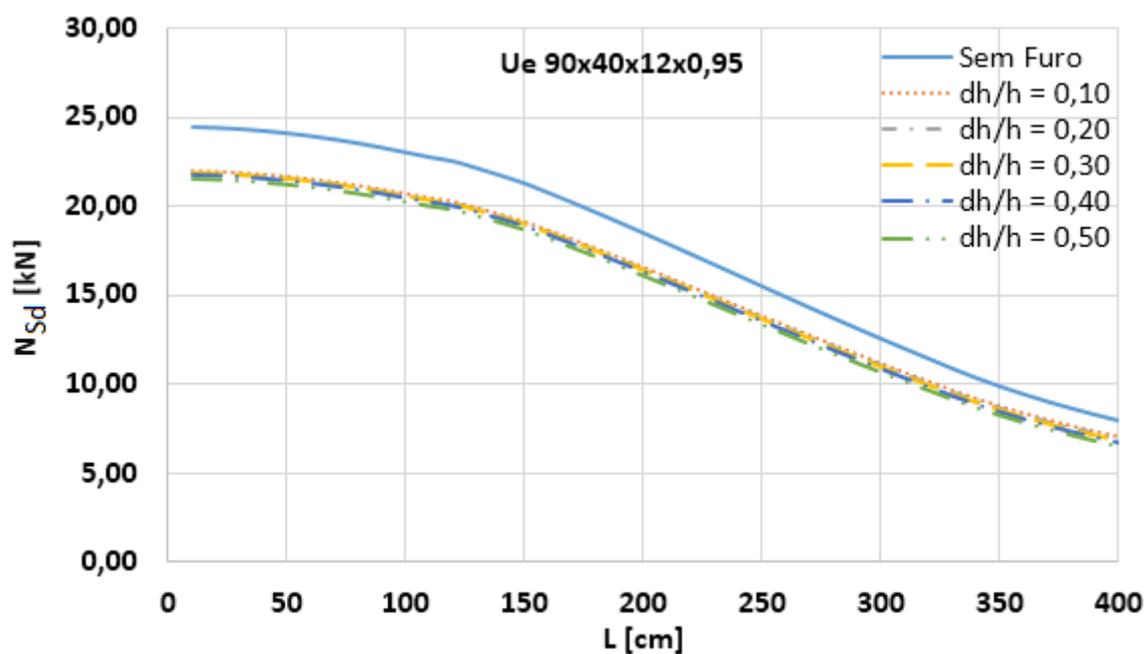


Figura 4.10 - Barras submetidas à força axial de compressão: Perfil Ue 90x40x12x0,95;
 $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 2$

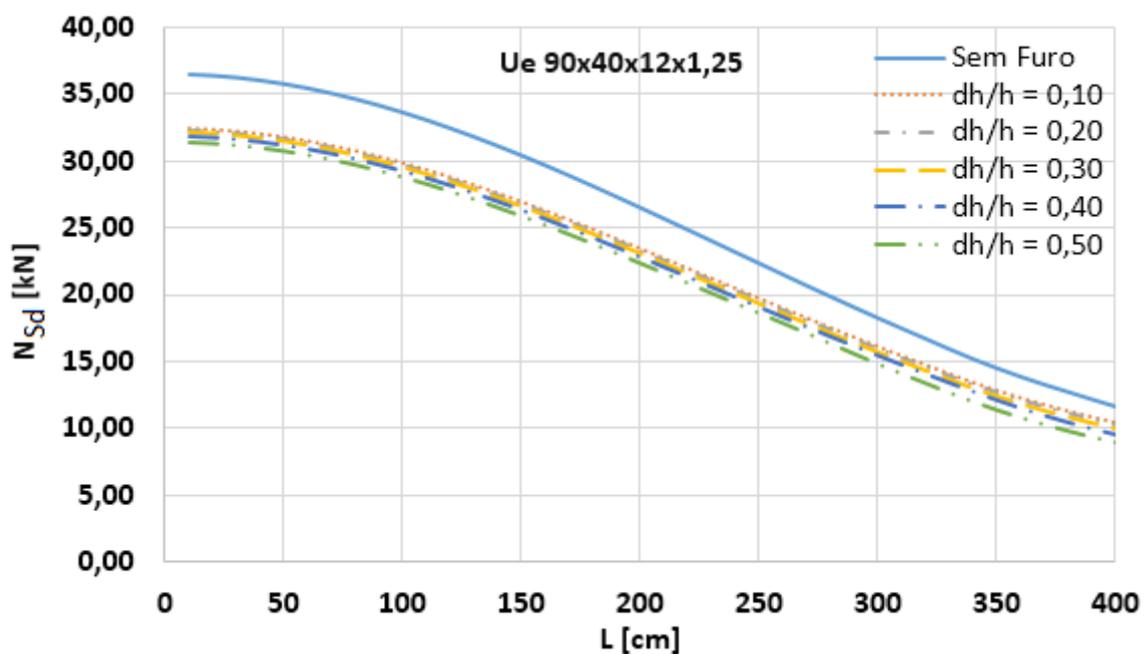


Figura 4.11 - Barras submetidas à força axial de compressão: Perfil Ue 90x40x12x1,25;
 $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 2$

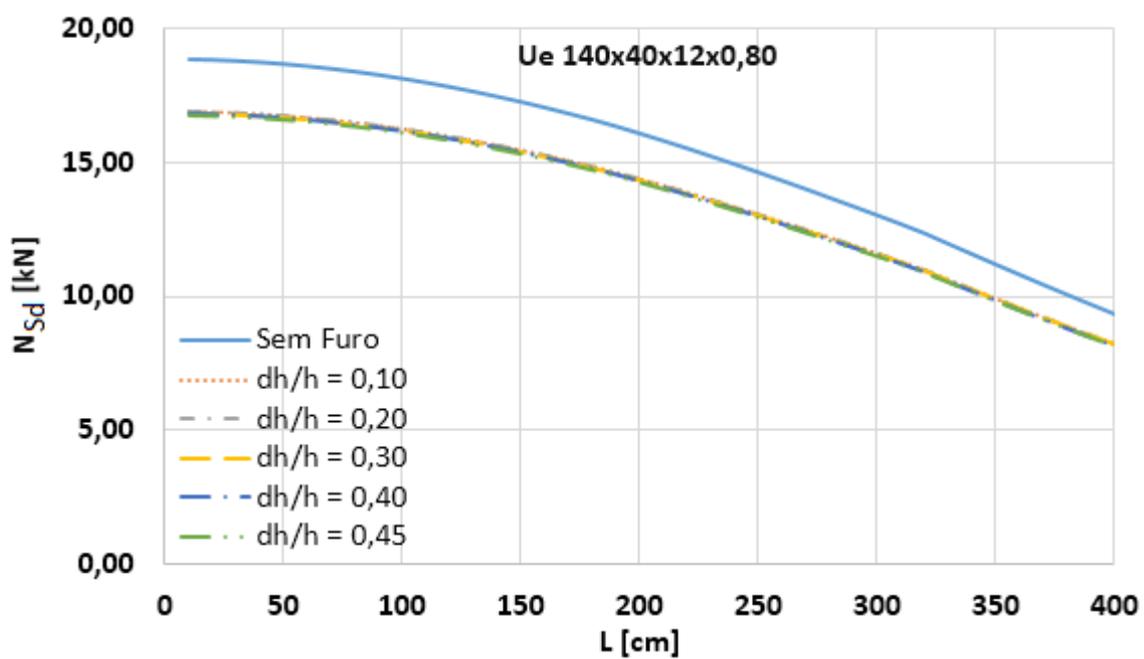


Figura 4.12 - Barras submetidas à força axial de compressão: Perfil Ue 140x40x12x0,80;
 $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 2$

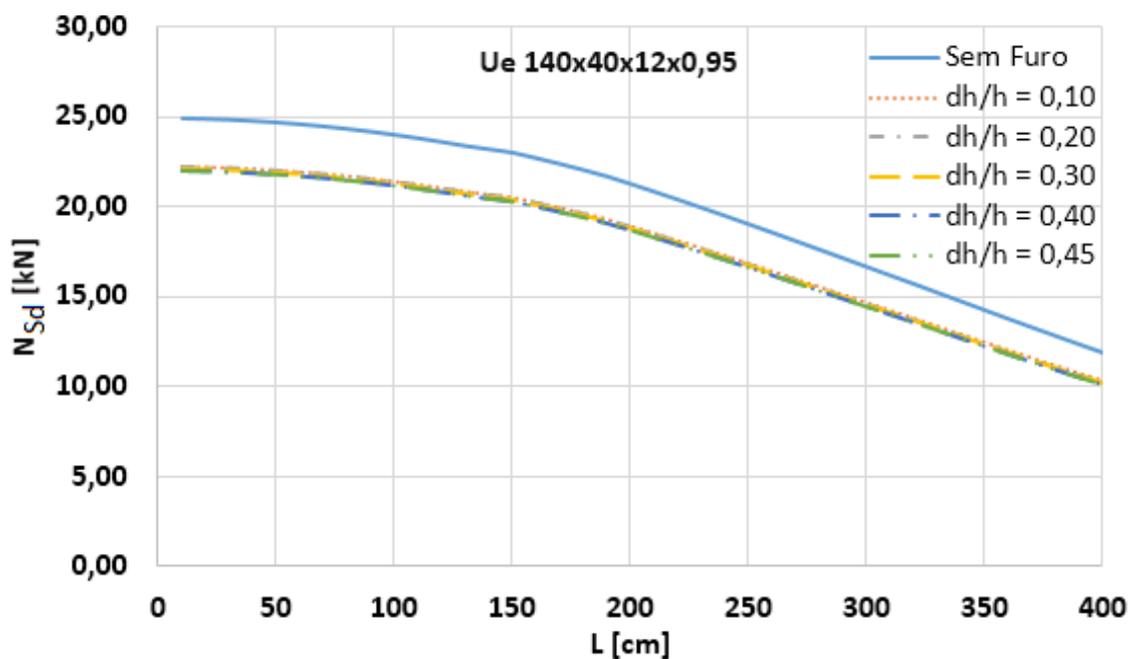


Figura 4.13 - Barras submetidas à força axial de compressão: Perfil Ue 140x40x12x0,95;
 $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 2$

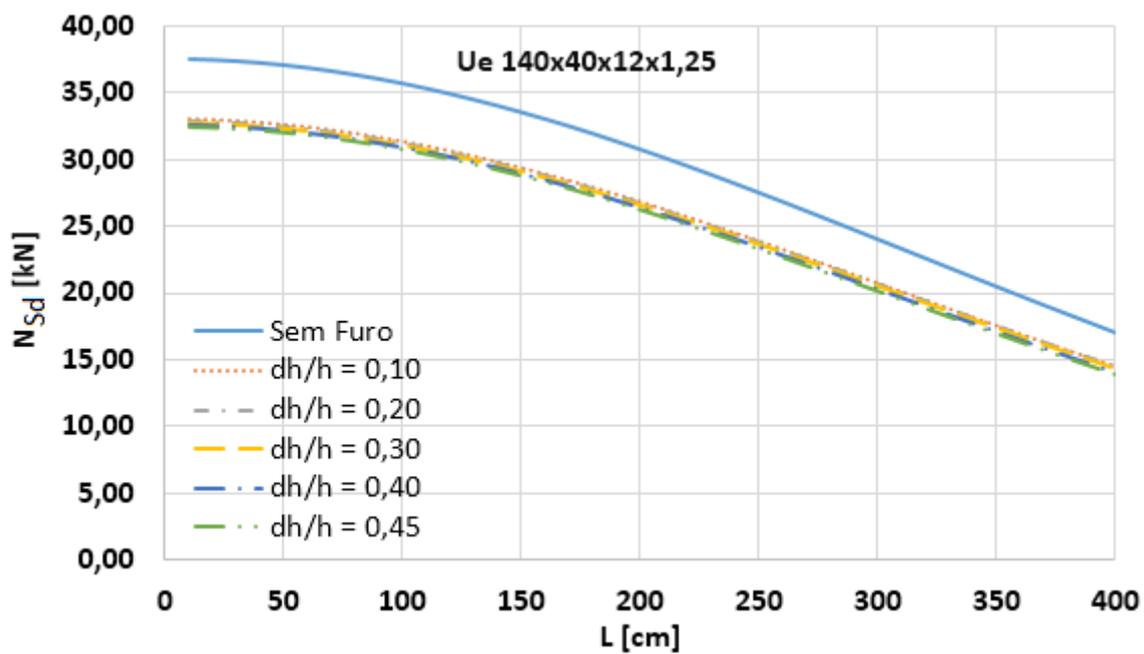


Figura 4.14 - Barras submetidas à força axial de compressão: Perfil Ue 140x40x12x1,25;
 $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 2$

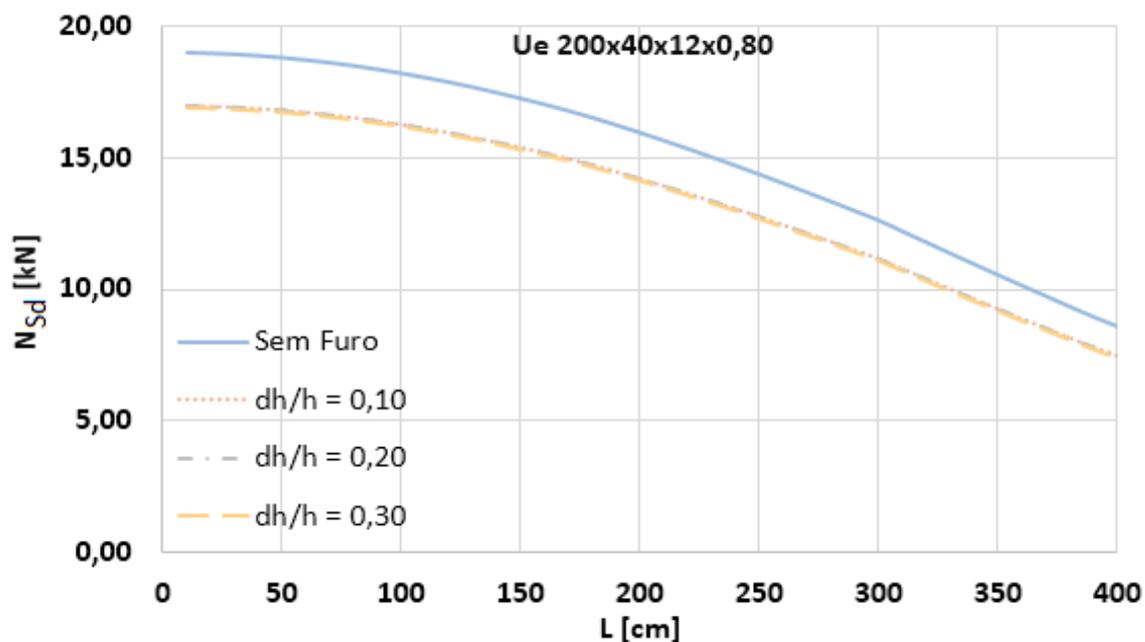


Figura 4.15 - Barras submetidas à força axial de compressão: Perfil Ue 200x40x12x0,80;
 $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 2$

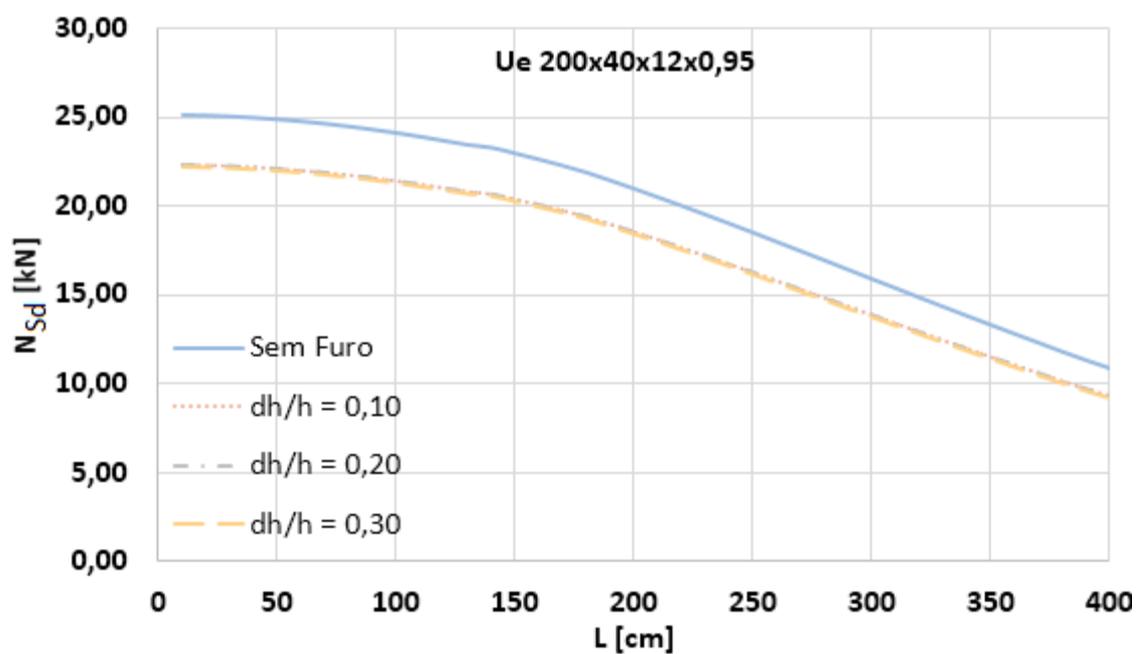


Figura 4.16 - Barras submetidas à força axial de compressão: Perfil Ue 200x40x12x0,95;
 $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 2$

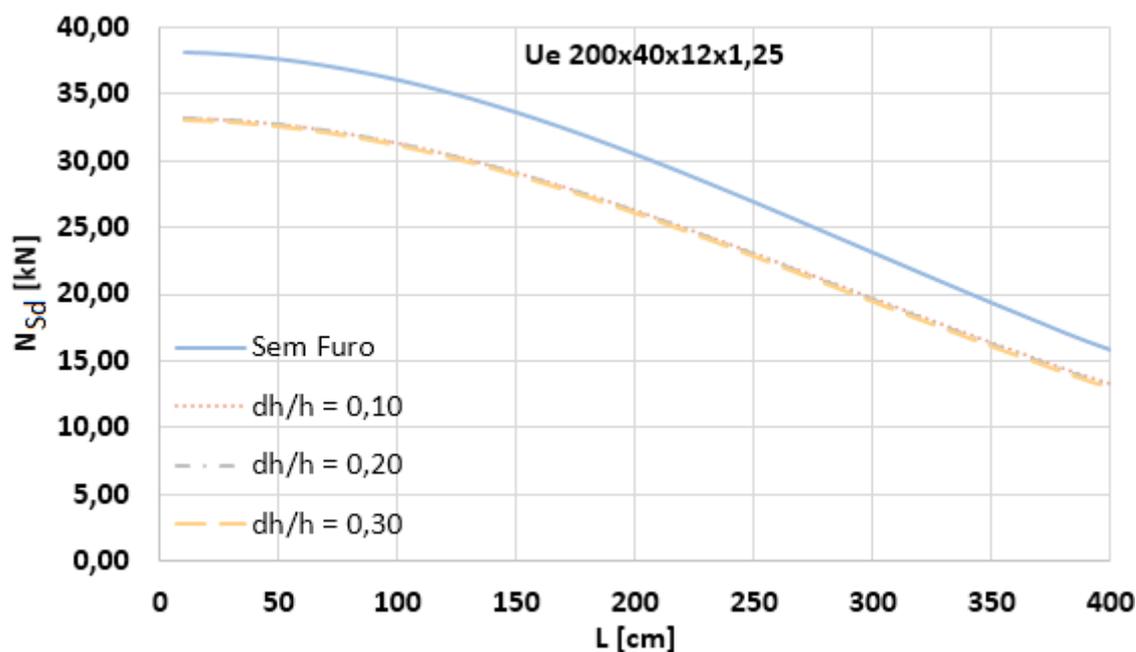


Figura 4.17 - Barras submetidas à força axial de compressão: Perfil Ue 200x40x12x1,25;
 $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 2$

A seguir são apresentados os gráficos com as relações $L \times N_{Sd}$ de pré-dimensionamento das barras submetidas à força axial de compressão com a presença de furos alongados, e dois travamentos ao longo do comprimento, ou seja, $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 3$.

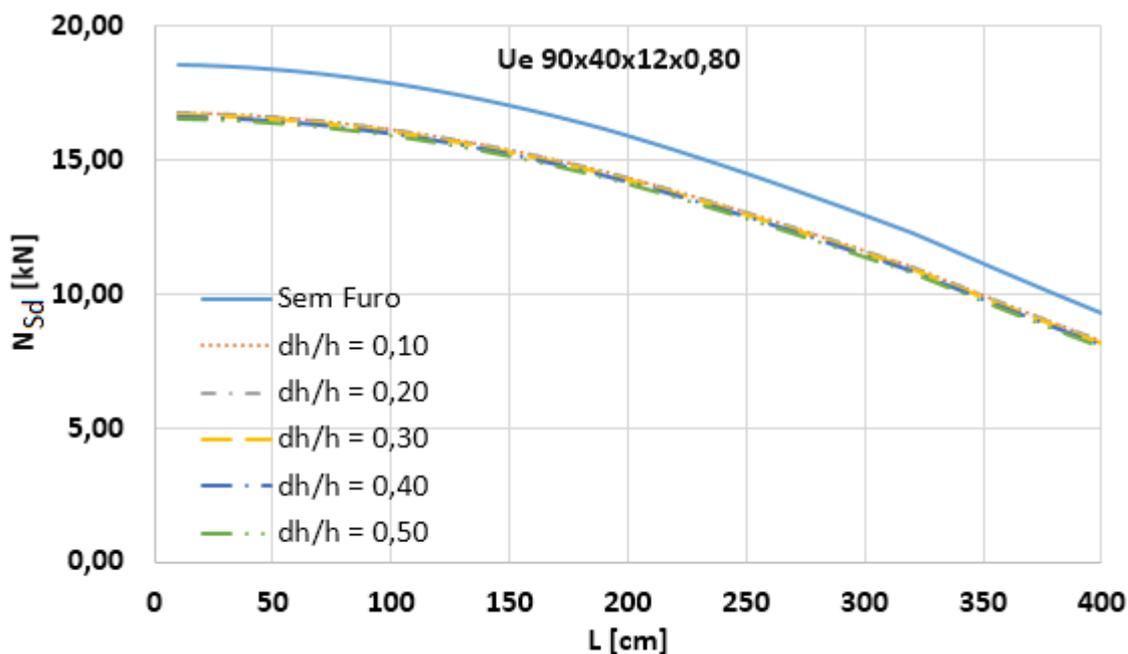


Figura 4.18 - Barras submetidas à força axial de compressão: Perfil Ue 90x40x12x0,80;
 $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 3$

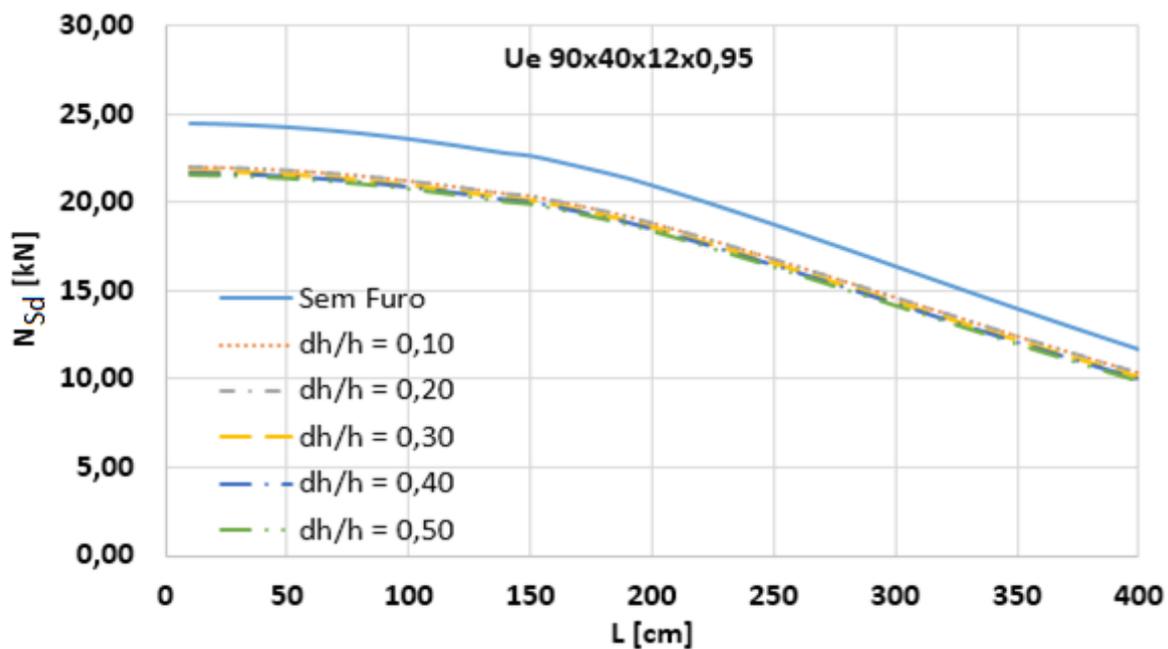


Figura 4.19 - Barras submetidas à força axial de compressão: Perfil Ue 90x40x12x0,95;
 $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 3$

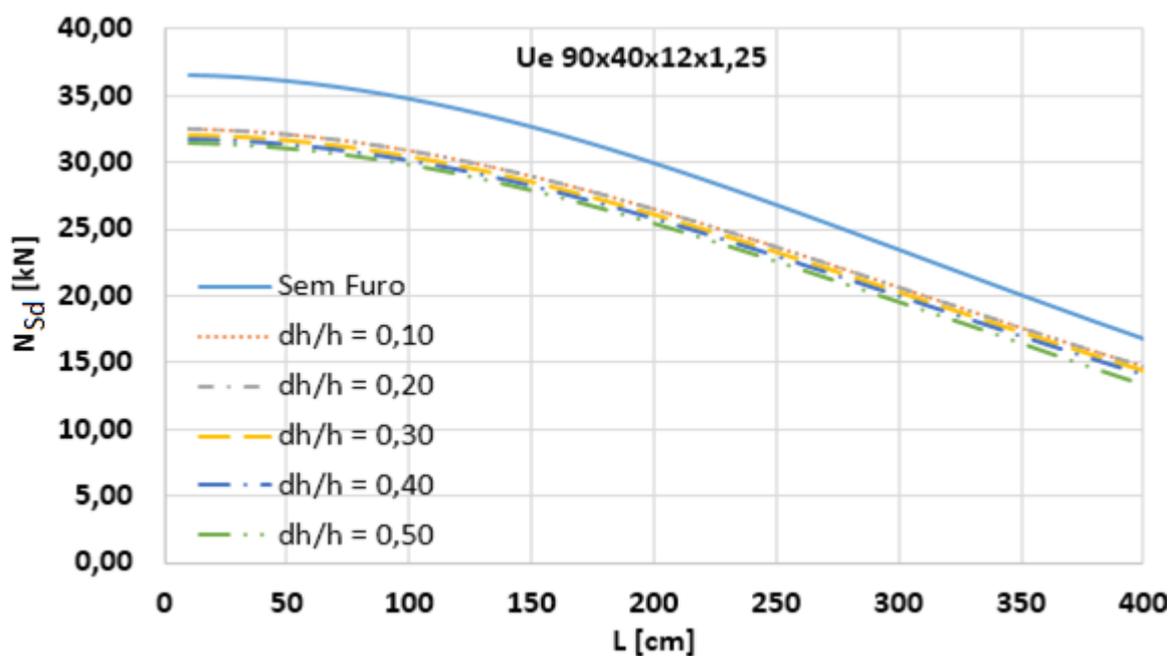


Figura 4.20 - Barras submetidas à força axial de compressão: Perfil Ue 90x40x12x1,25;
 $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 3$

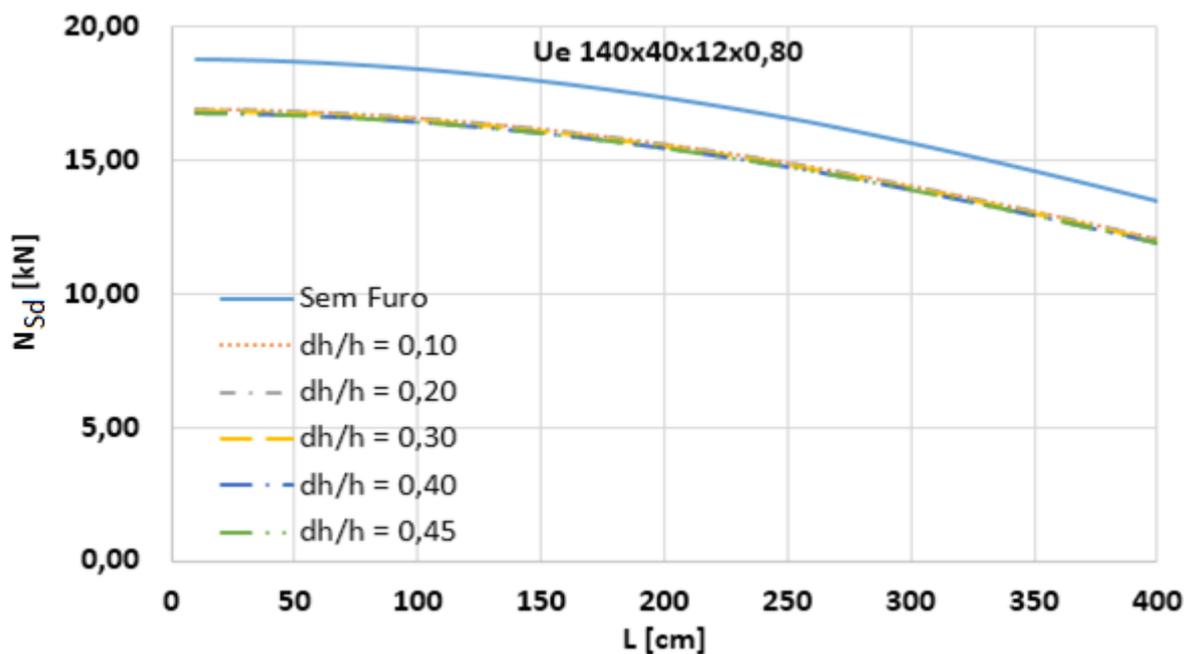


Figura 4.21 - Barras submetidas à força axial de compressão: Perfil Ue 140x40x12x0,80;
 $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 3$

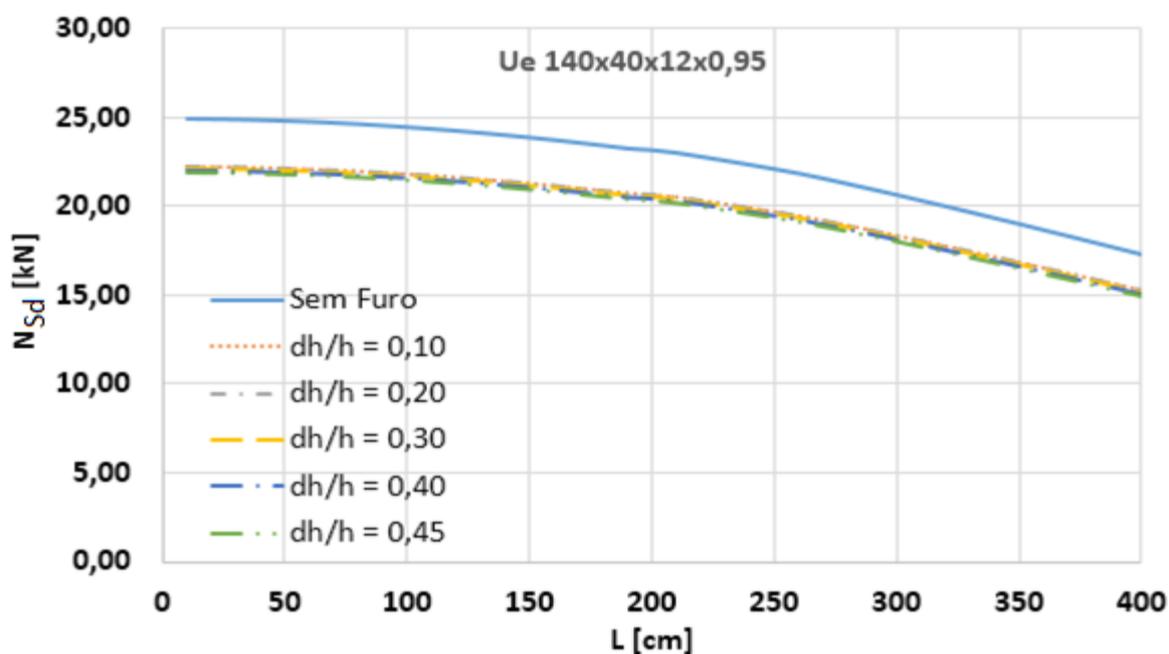


Figura 4.22 - Barras submetidas à força axial de compressão: Perfil Ue 140x40x12x0,95;
 $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 3$

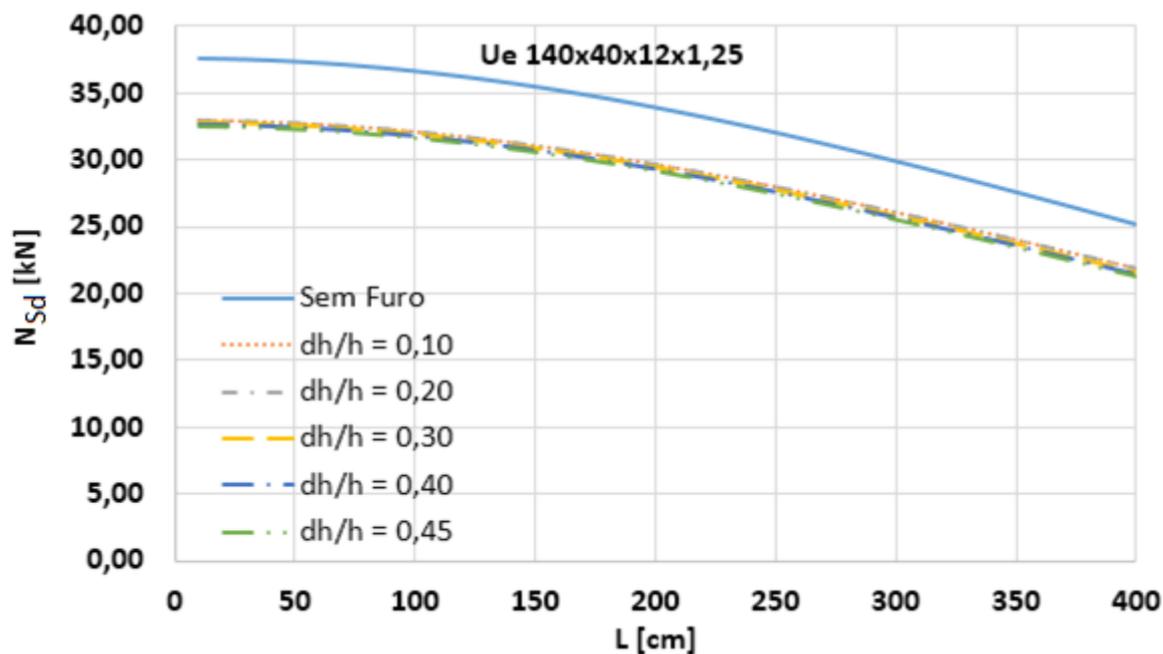


Figura 4.23 - Barras submetidas à força axial de compressão: Perfil Ue 140x40x12x1,25;
 $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 3$

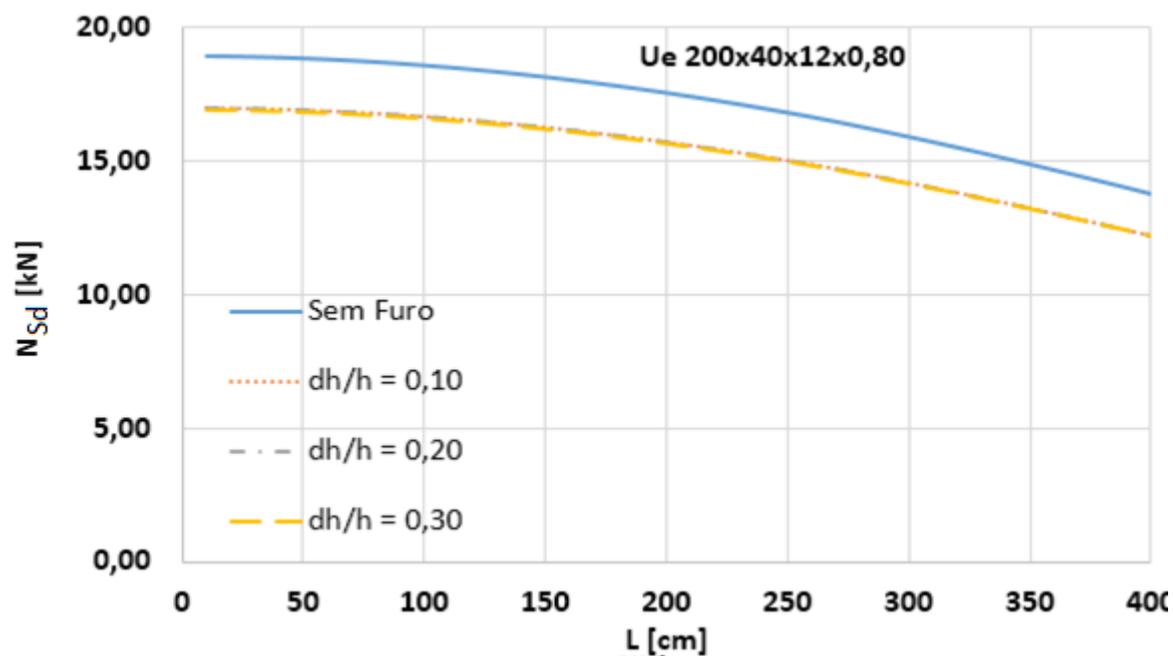


Figura 4.24 - Barras submetidas à força axial de compressão: Perfil Ue 200x40x12x0,80;
 $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 3$

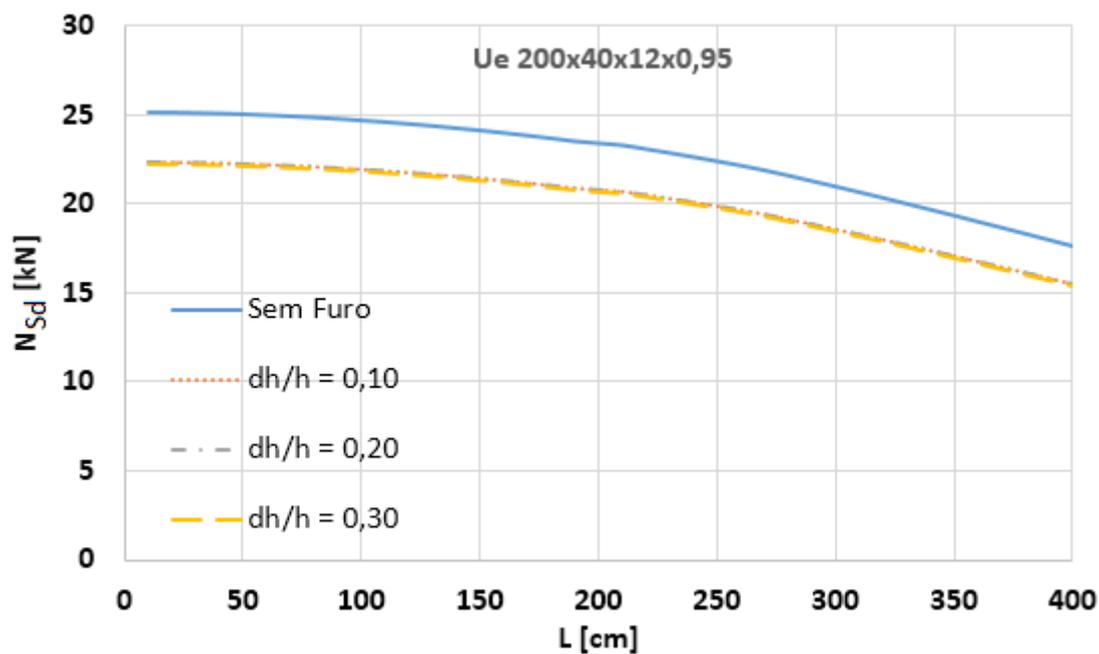


Figura 4.25 - Barras submetidas à força axial de compressão: Perfil Ue 200x40x12x0,95;
 $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 3$

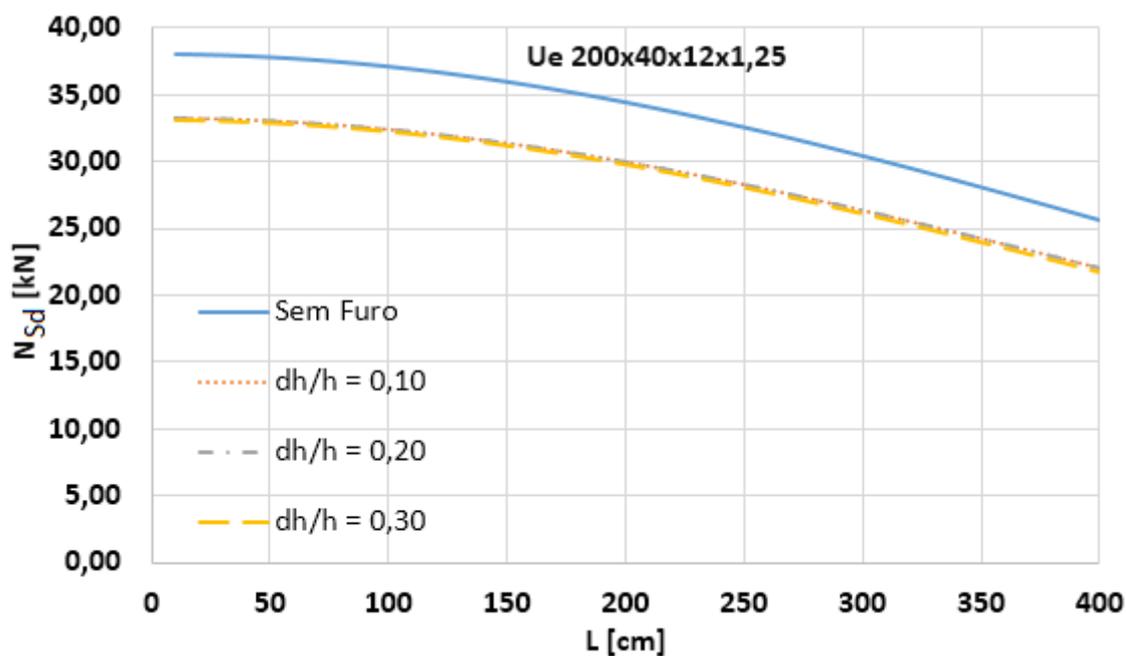


Figura 4.26 - Barras submetidas à força axial de compressão: Perfil Ue 200x40x12x1,25;
 $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 3$

4.3.2 Gráficos $L \times q_{sd}$ – Barras submetidas à flexão na maior inércia

Nesta seção são apresentados gráficos de pré-dimensionamento de barras fletidas com a presença de furos, de maneira semelhante ao apresentado por Rodrigues e Caldas (2016) na seção 7.2.2 do Manual de *Light Steel Framing*: Engenharia do CBCA, considerando a presença dos furos no pré-dimensionamento.

Foram desenvolvidos gráficos para os casos em que $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 2$ e $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 3$. A largura efetiva de elementos com a presença de furos usada para determinação do momento fletor resistente de cálculo foi obtida conforme apresentado na norma AISI S100-16, o restante do dimensionamento foi realizado conforme ABNT NBR 14762:2010.

A flambagem distorcional não foi considerada. Para o pré-dimensionamento adotou-se o aço ZAR 230. Considerou-se o perfil sem furos e o perfil com furos, sendo que se variou a relação d_h/h de 0,40 a 0,70. Conforme prescrições da AISI S100-16, os perfis Ue 200x40x12x0,80 e Ue 200x40x12x0,95 não devem receber furos na alma, uma vez que apresentam relação h/t maior que 200.

A carga distribuída solicitante de cálculo, q_{sd} , é igual a máxima carga distribuída que pode ser aplicada na barra. Essa foi tomada como a menor entre os estados-limites de:

- i) momento fletor resistente de cálculo;
- ii) força cortante resistente de cálculo e
- iii) deslocamento máximo para vigas biapoiadas.

Conforme apresentado na equação 4.2:

$$q_{sd} \leq \begin{cases} \frac{8M_{Rd}}{L^2} \\ \frac{2V_{Rd}}{L} \\ 1,4 \left(\frac{384}{5} \right) \frac{EI_{ef}}{350L^3} \end{cases} \quad (4.2)$$

O momento fletor resistente de cálculo foi calculado como o menor dos estados-limites de início de escoamento da seção efetiva e flambagem lateral com torção. A flambagem

distorcional não foi verificada. Foi adotada a formulação apresentada na AISI S100-16 para o cálculo da largura efetiva de elementos com furos sob gradiente de tensões. O coeficiente C_b foi tomado como 1.

A força cortante resistente de cálculo, V_{Rd} , foi obtida conforme apresentado na NBR 14762:2010, considerando a alma sem enrijecedores transversais, sendo $k_v=5$. Para o cálculo da força cortante resistente de cálculo de perfis com furo, o coeficiente de redução apresentado no AISI S100-16 foi aplicado.

Para cálculo do deslocamento máximo de $L/350$ para vigas com furos, o momento de inércia efetivo foi obtido conforme recomendado 1.1.2 na AISI S100-16. Considerou-se que q_{sd} é 1,4 vezes a carga distribuída característica.

A seguir são apresentados os gráficos com as relações $L \times q_{sd}$ de pré-dimensionamento das barras submetidas à flexão simples com a presença de furos alongados, e um travamento ao longo do vão, ou seja, $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 2$.

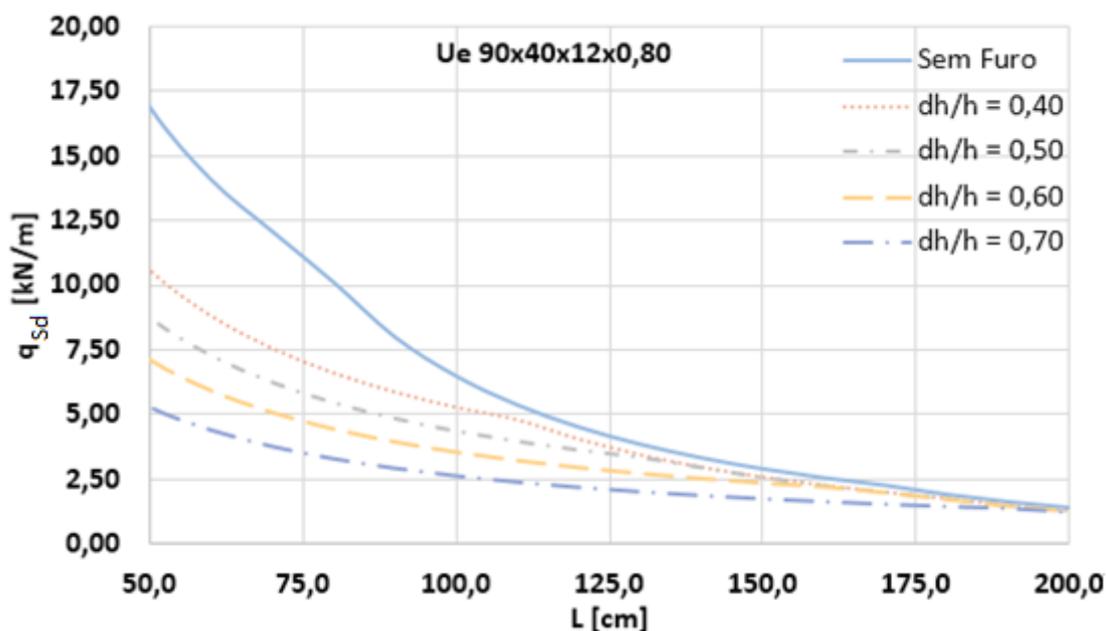


Figura 4.27 - Barras submetidas à flexão simples: Perfil Ue 90x40x12x0,80; $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 2$

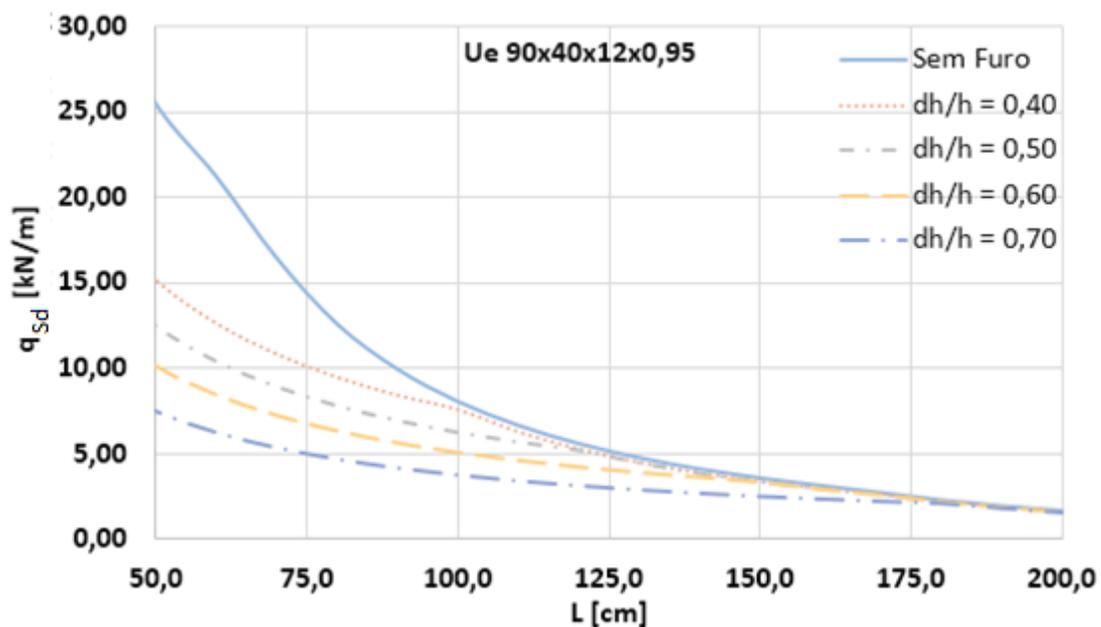


Figura 4.28 - Barras submetidas à flexão simples: Perfil Ue 90x40x12x0,95; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 2$

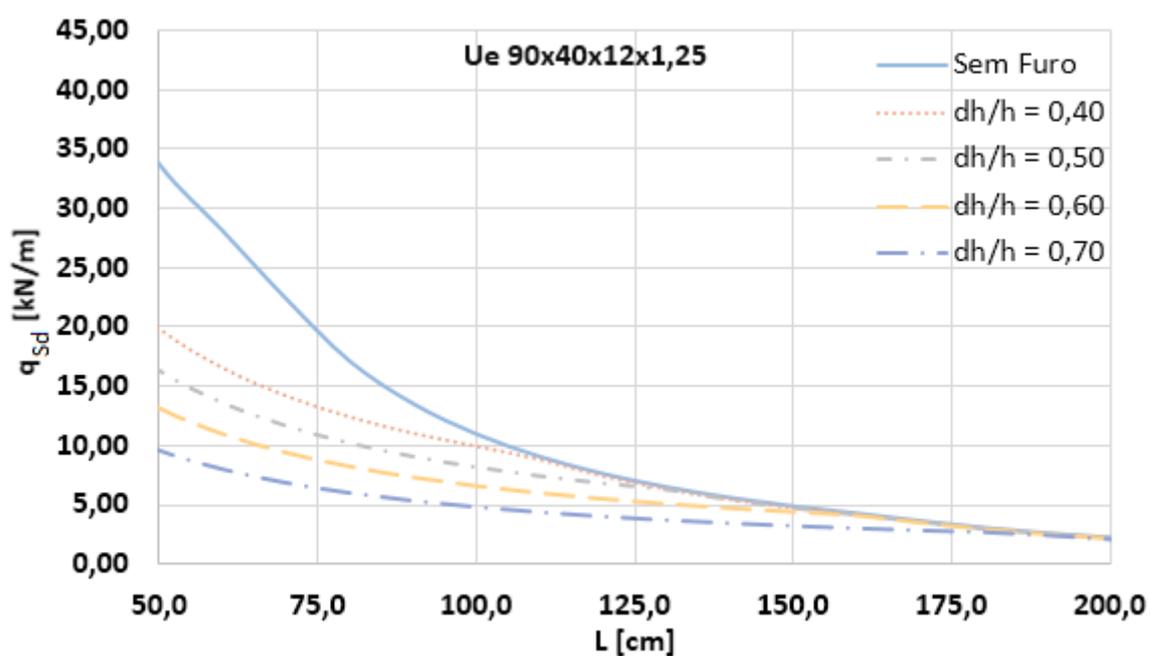


Figura 4.29 - Barras submetidas à flexão simples: Perfil Ue 90x40x12x1,25; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 2$

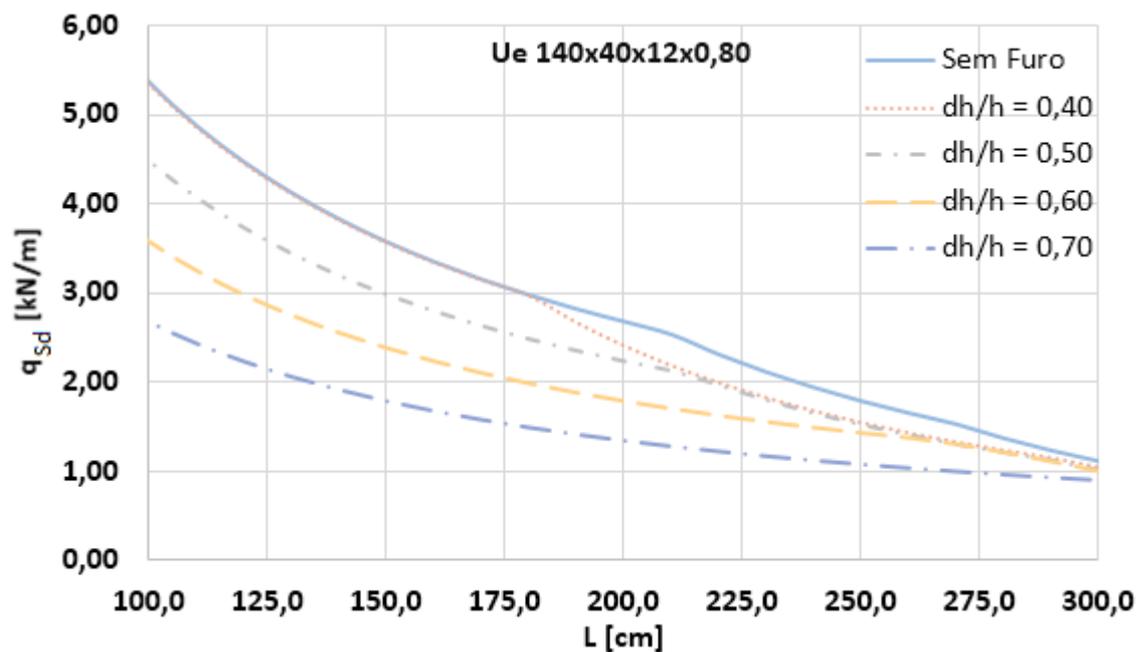


Figura 4.30 - Barras submetidas à flexão simples: Perfil Ue 140x40x12x0,80; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 2$

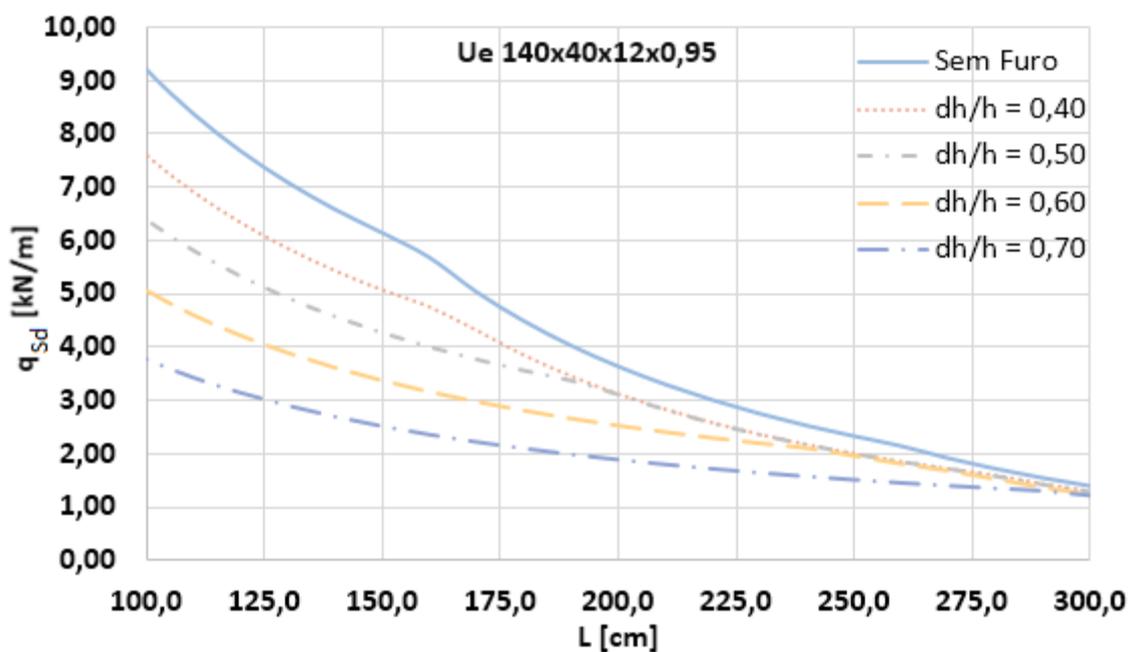


Figura 4.31 - Barras submetidas à flexão simples: Perfil Ue 140x40x12x0,95; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 2$

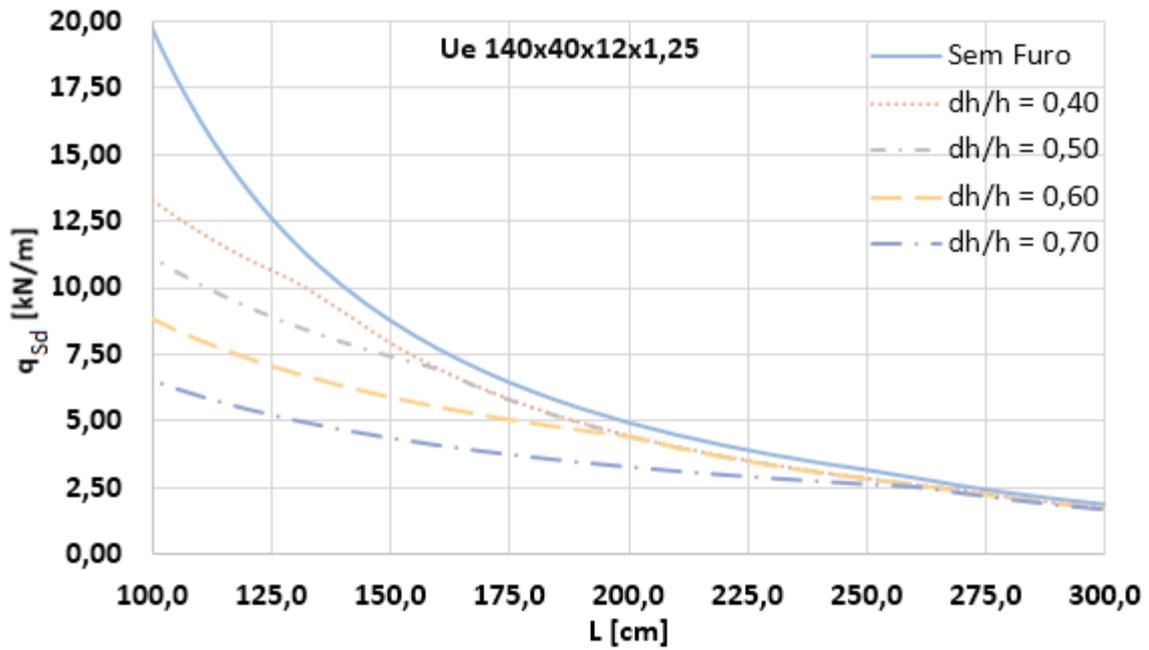


Figura 4.32 - Barras submetidas à flexão simples: Perfil Ue 140x40x12x1,25; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 2$

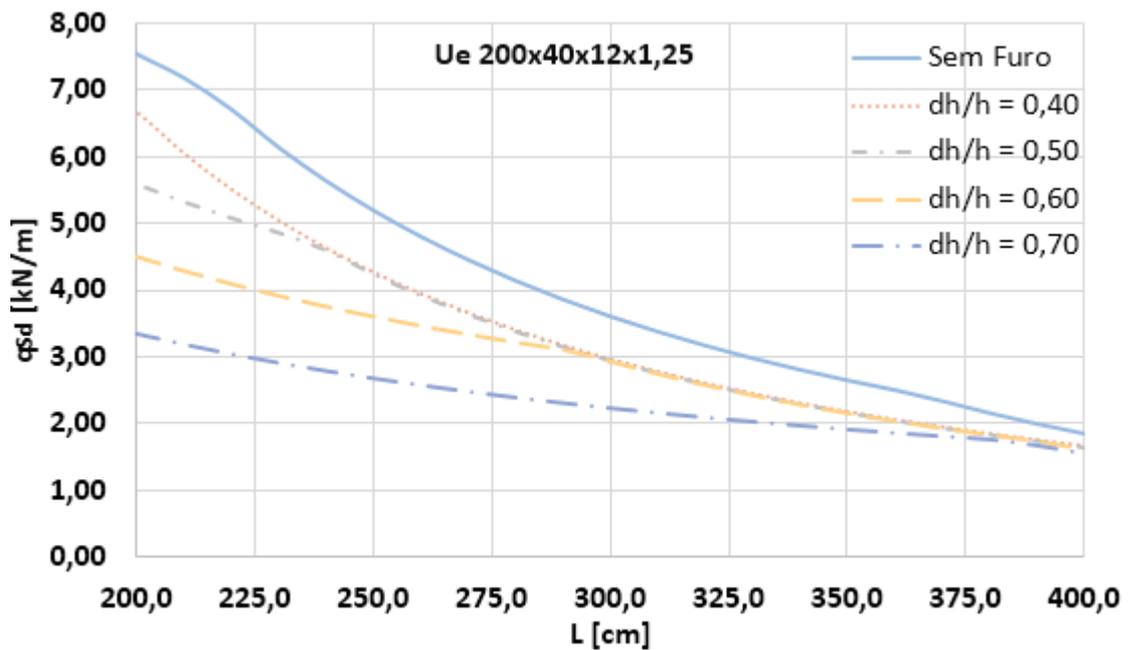


Figura 4.33 - Barras submetidas à flexão simples: Perfil Ue 200x40x12x1,25; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 2$

A seguir são apresentados os gráficos com as relações $L \times q_{sd}$ de pré-dimensionamento das barras submetidas à flexão simples com a presença de furos alongados e dois travamentos ao longo do comprimento, ou seja, $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 3$.

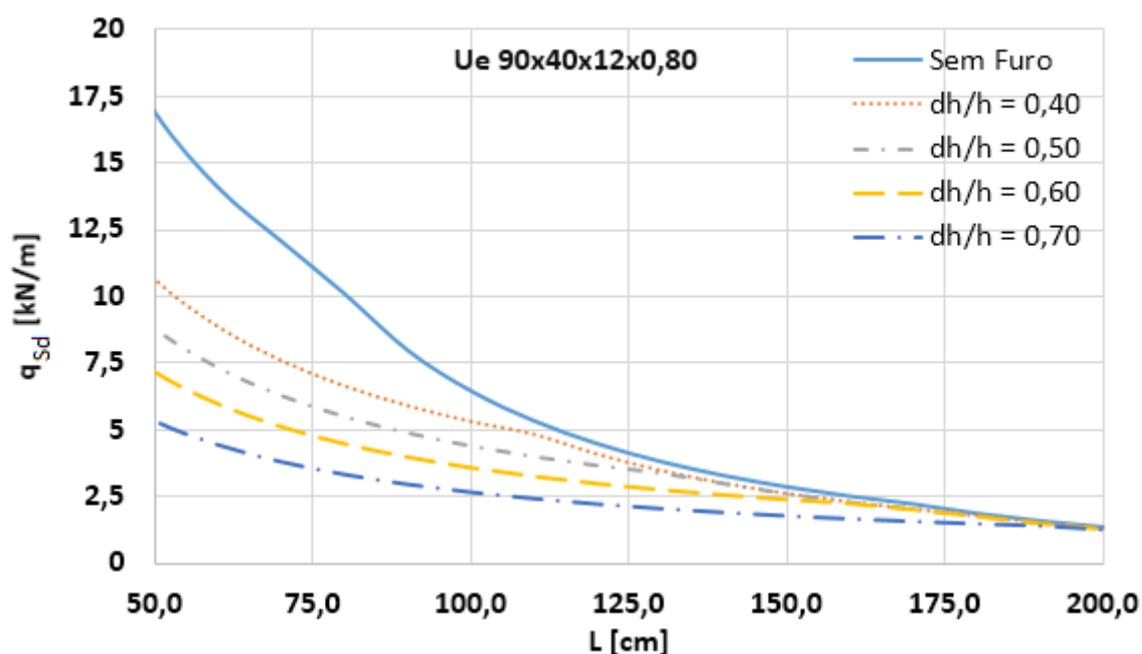


Figura 4.34 - Barras submetidas à flexão simples: Perfil Ue 90x40x12x0,80; $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 3$

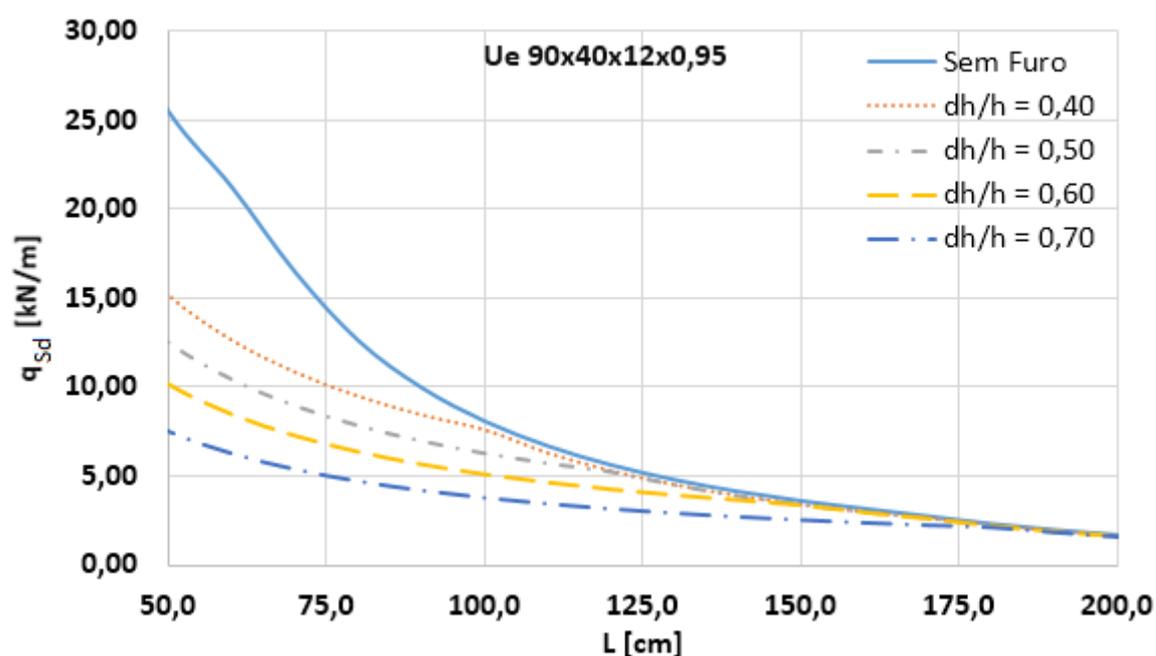


Figura 4.35 - Barras submetidas à flexão simples: Perfil Ue 90x40x12x0,95; $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 3$

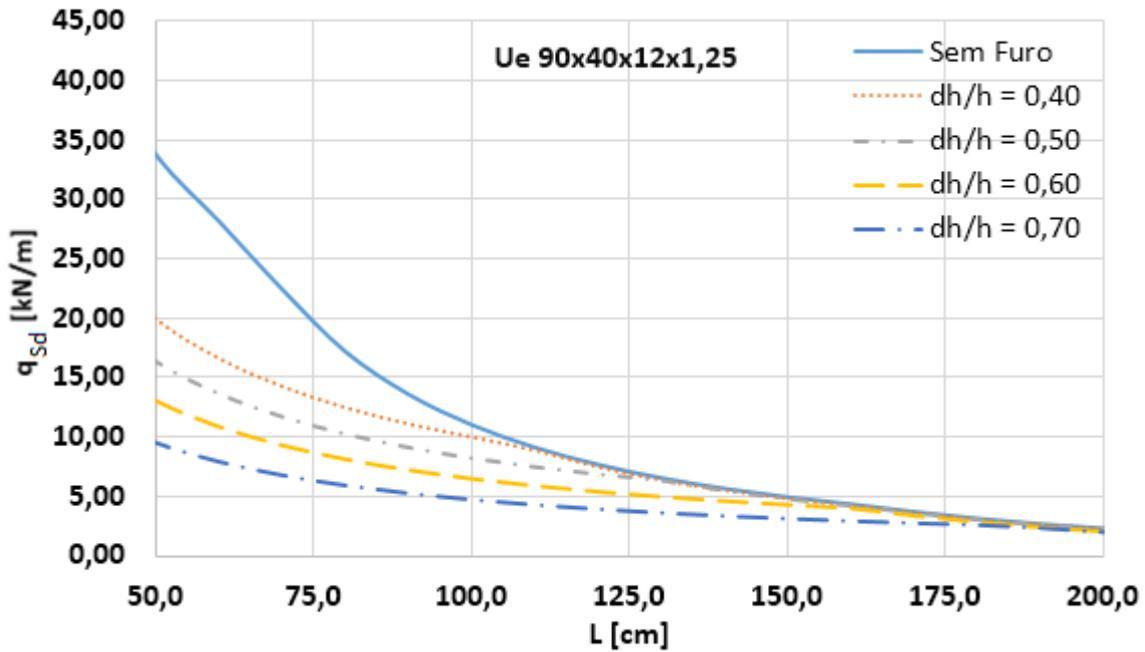


Figura 4.36 - Barras submetidas à flexão simples: Perfil Ue 90x40x12x1,25; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 3$

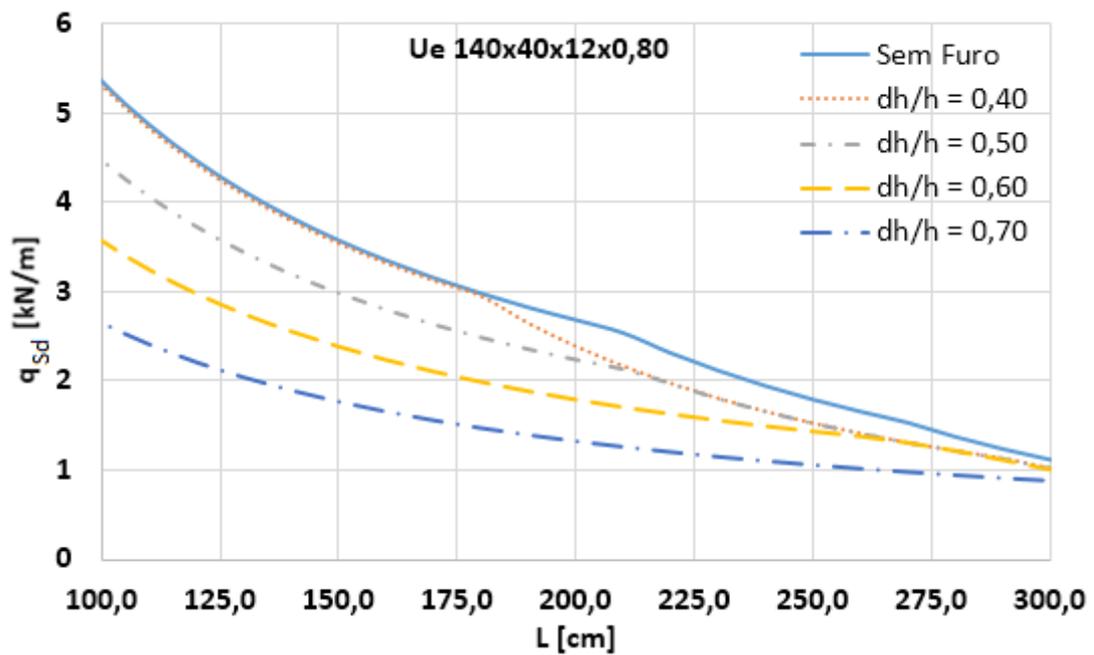


Figura 4.37 - Barras submetidas à flexão simples: Perfil Ue 140x40x12x0,80; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 3$

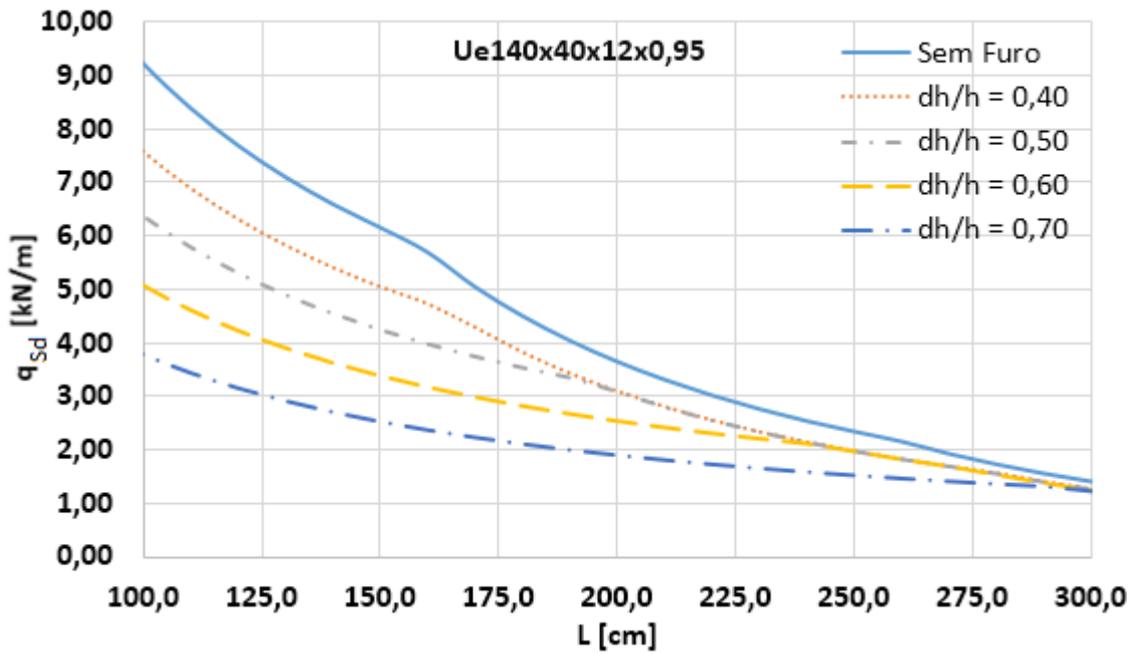


Figura 4.38 - Barras submetidas à flexão simples: Perfil Ue 140x40x12x0,95; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 3$

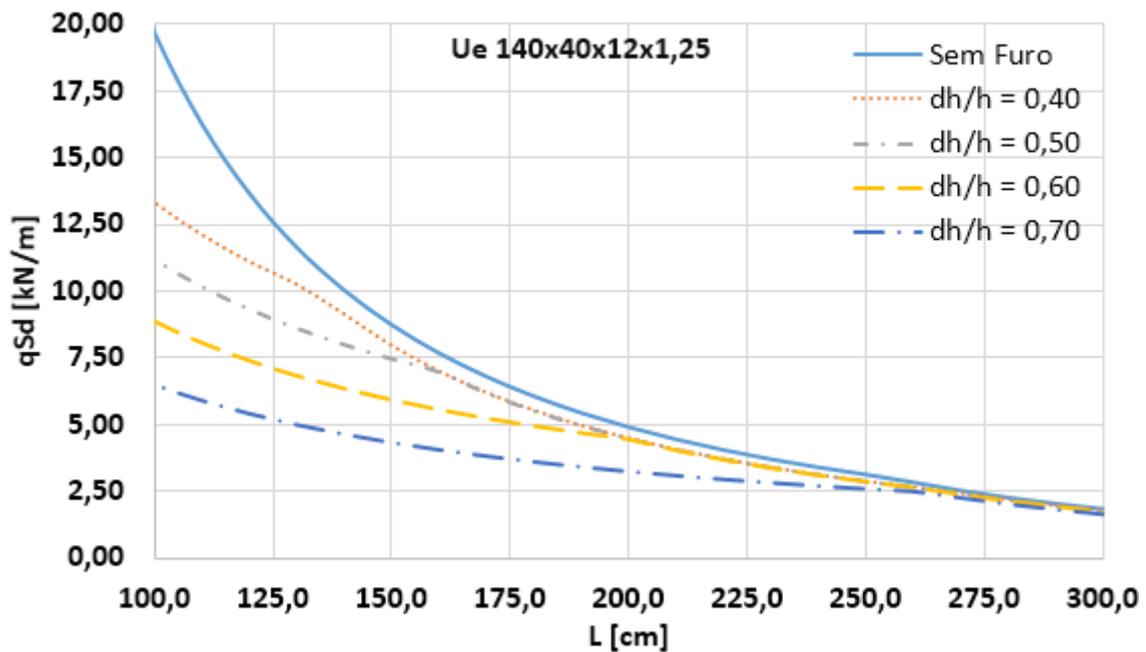


Figura 4.39 - Barras submetidas à flexão simples: Perfil Ue 140x40x12x1,25; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 3$

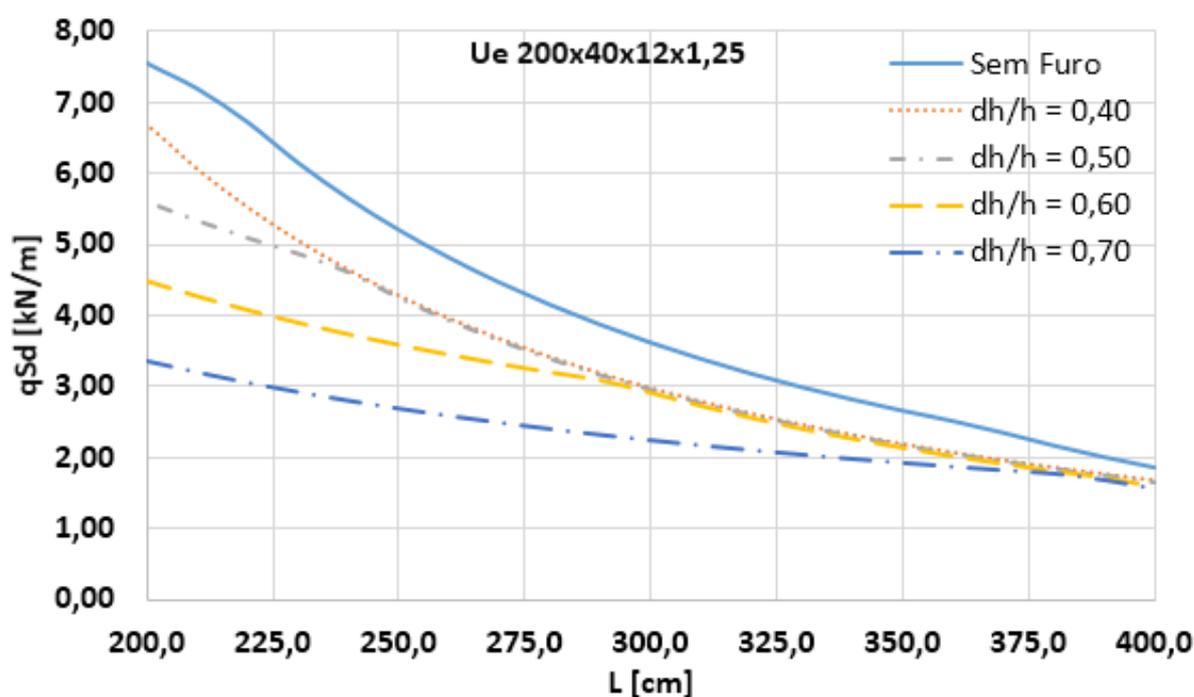


Figura 4.40 - Barras submetidas à flexão simples: Perfil Ue 200x40x12x1,25; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 3$

4.3.3 Gráficos q_{sd} x N_{sd} – Barras submetidas à flexo-compressão

Nesta seção são apresentados gráficos de pré-dimensionamento de barras submetidas à flexo-compressão com a presença de furos, de maneira semelhante ao que apresentado por Rodrigues e Caldas (2016) na seção 7.2.3 do Manual de *Light Steel Framing: Engenharia do CBCA*, para perfis sem furos.

Foram desenvolvidos gráficos para os casos em que $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 2$ e $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 3$ para perfis com furos. A largura efetiva usada para determinação da força axial de compressão resistente de cálculo e do momento fletor resistente de cálculo foi obtida conforme apresentado na norma AISI S100-16.

A flambagem distorcional não foi considerada. Para o pré-dimensionamento adotou-se o aço ZAR 230.

Para os perfis Ue 90x40x12x0,80, Ue 90x40x12x0,95 e Ue 90x40x12x1,25 foram desenvolvidos gráficos para o perfil sem furos e para os casos em que $d_h/h = 0,25$ e $d_h/h = 0,50$. Para os perfis Ue 140x40x12x0,80, Ue 140x40x12x0,95 e Ue 140x40x12x1,25 foram desenvolvidos gráficos para o perfil sem furos e para os casos em que $d_h/h = 0,25$ e

$d_h/h = 0,45$. E para o perfil Ue 200x40x12x1,25 foram desenvolvidos gráficos para o perfil sem furos e para os casos em que $d_h/h = 0,15$ e $d_h/h = 0,30$.

Conforme citado anteriormente, segundo a AISI S100-16, os perfis Ue 200x40x12x0,80 e Ue 200x40x12x0,95 sujeitos à flexo-compressão, não podem receber furos na alma, uma vez que apresentam relação h/t maior que 200.

A carga distribuída solicitante de cálculo, q_{sd} , é igual a máxima carga distribuída que pode ser aplicada na barra. Esta foi tomada como a menor entre os estados-limites de:

- i)* flexo compressão da barra;
- ii)* força cortante resistente de cálculo, e
- iii)* deslocamento máximo para vigas biapoiadas.

Conforme apresentado na equação 4.3:

$$q_{sd} \leq \begin{cases} \left(\frac{8M_{Rd}}{B_1 L_x^2} \right) \left(1 - \frac{N_{sd}}{N_{Rd}} \right) \\ \frac{2V_{Rd}}{L} \\ 1,4 \left(\frac{384}{5} \right) \frac{EI_{ef}}{350L^3} \end{cases} \quad (4.3)$$

O momento fletor resistente de cálculo foi calculado como o menor dos estados-limites de início de escoamento da seção efetiva e flambagem lateral com torção. A flambagem distorcional não foi verificada. Foi adotada a formulação apresentada na AISI S100-16 para o cálculo da largura efetiva de elementos com furos sob gradiente de tensões.

O momento fletor solicitante de cálculo, M_{sd} , considera os efeitos de segunda ordem ao longo da barra por meio do coeficiente $B_1 = 1 / (1 - N_{sd}/N_e)$. A flambagem distorcional não foi considerada. O coeficiente C_b foi tomado como 1.

A força cortante resistente de cálculo, V_{Rd} , foi obtida conforme apresentado na NBR 14762:2010, considerando a alma sem enrijecedores transversais, sendo $k_v=5$. Para o cálculo da força cortante resistente de cálculo de perfis com furo, foram aplicados os coeficientes de redução apresentados na norma AISI S100-16.

Para cálculo do deslocamento máximo de $L/350$ para vigas, o momento de inércia efetivo foi obtido conforme formulação do MLE da AISI S100-16. Considerou-se que q_{sd} é 1,4 vezes a carga distribuída característica.

A seguir, são apresentados os gráficos com as relações $q_{sd} \times N_{sd}$ de pré-dimensionamento das barras submetidas à flexo-compressão com a presença de furos alongados, e um travamento ao longo do vão, ou seja, $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 2$. O comprimento das barras é dado em centímetros.

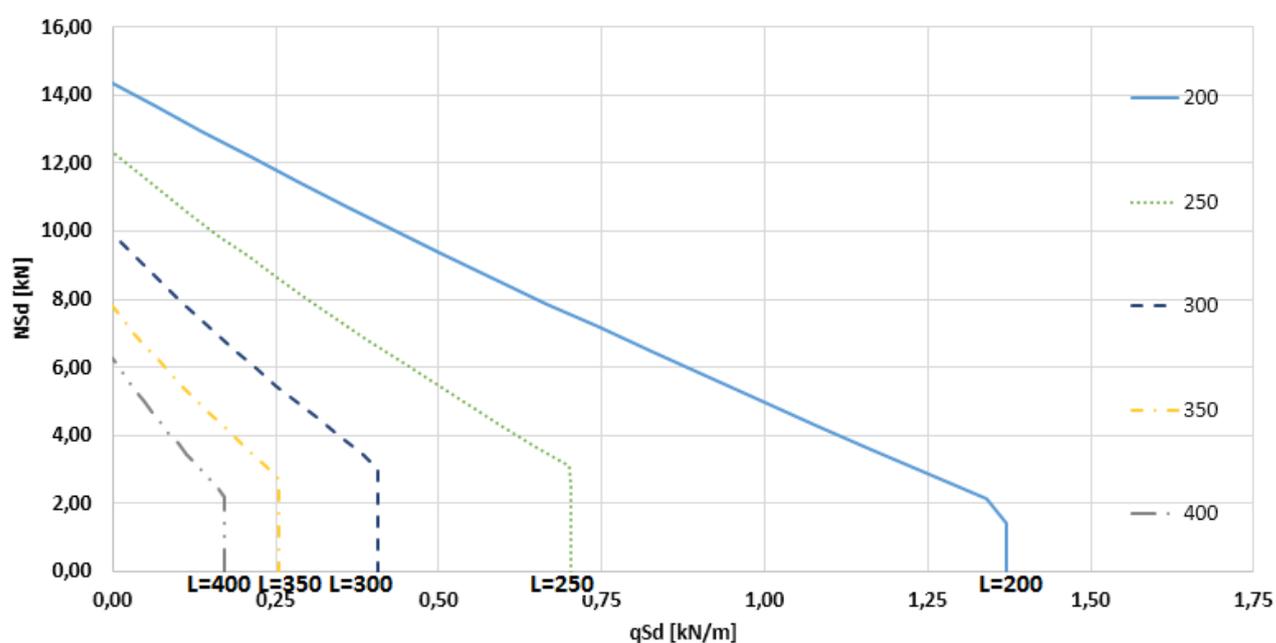


Figura 4.41 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 90x40x12x0,80; $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 2$ - Sem furos

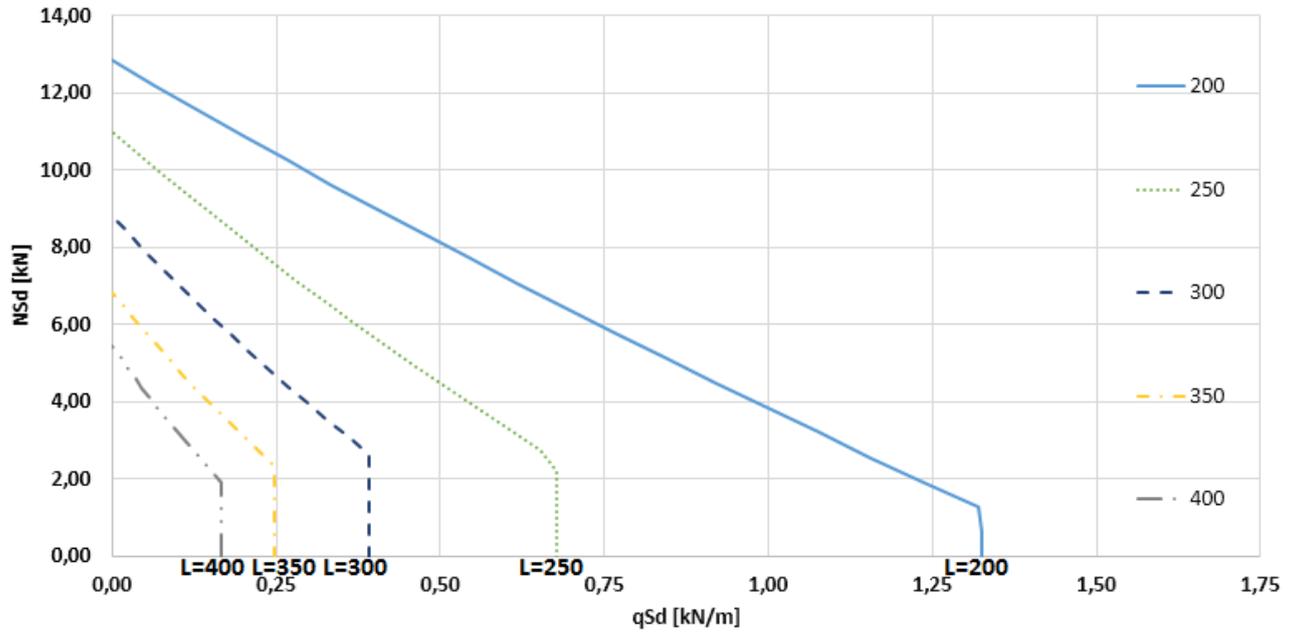


Figura 4.42 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 90x40x12x0,80; $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 2 - d_i/h=0,25$

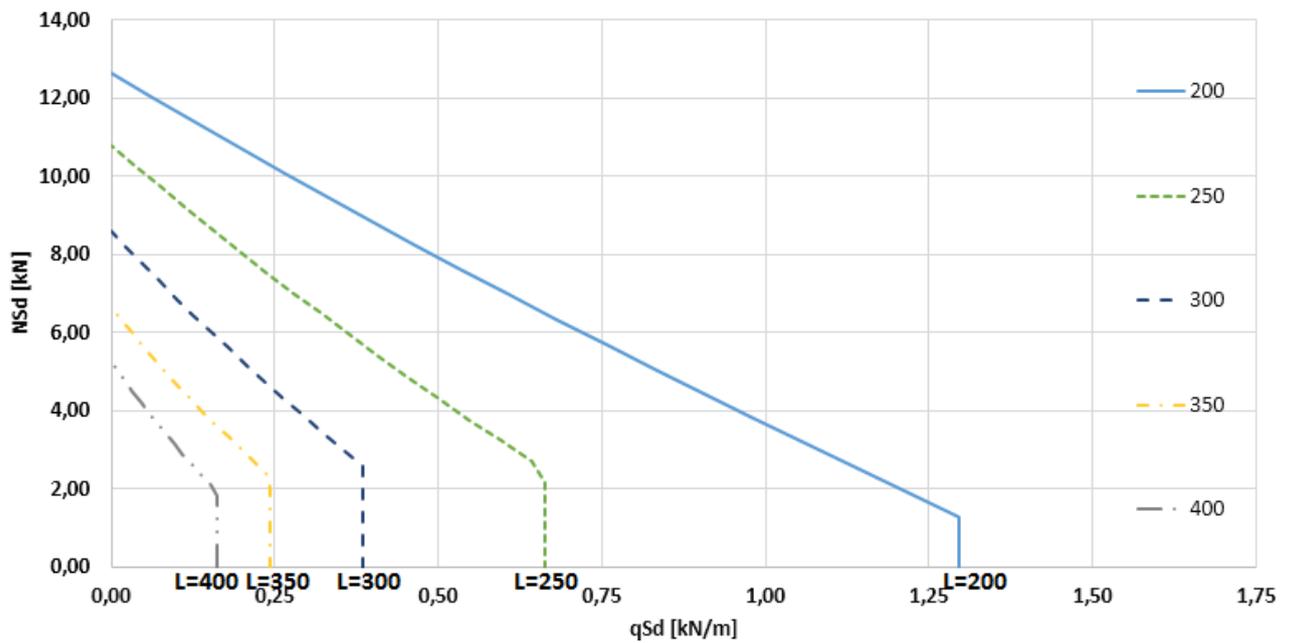


Figura 4.43 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 90x40x12x0,80; $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 2 - d_i/h=0,50$

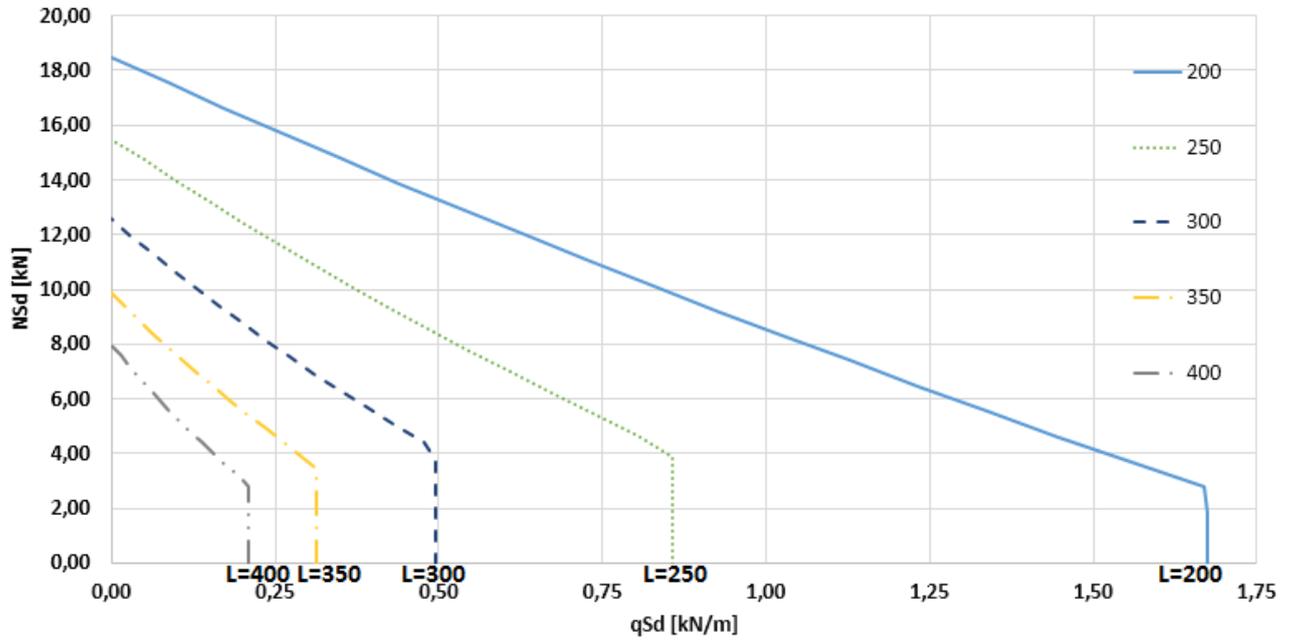


Figura 4.44 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 90x40x12x0,95; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 2$ - Sem furos

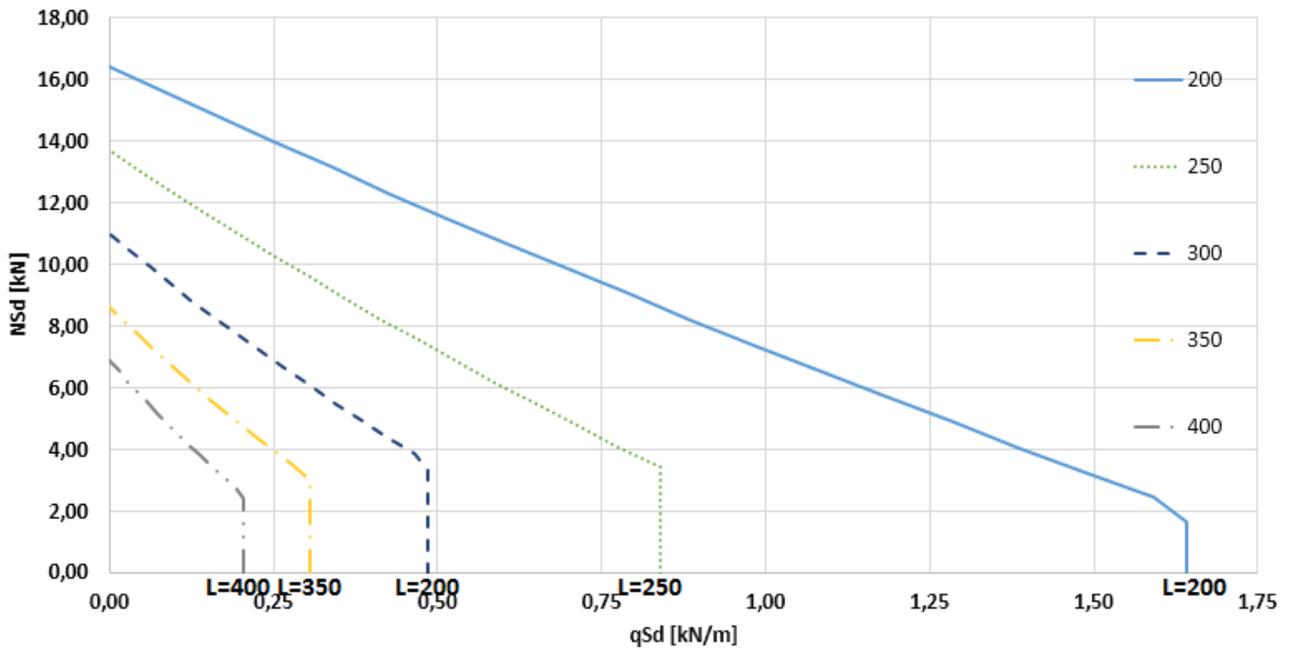


Figura 4.45 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 90x40x12x0,95; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 2$ - $d_h/h=0,25$

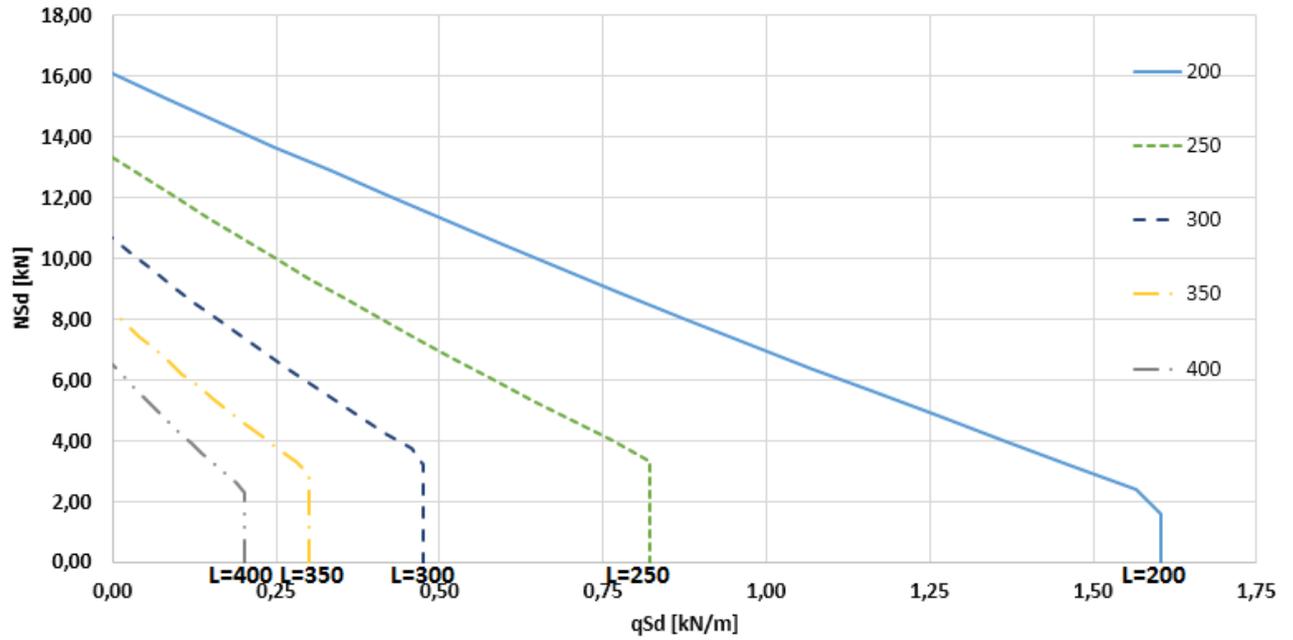


Figura 4.46 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 90x40x12x0,95; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 2$ - $d_h/h=0,50$

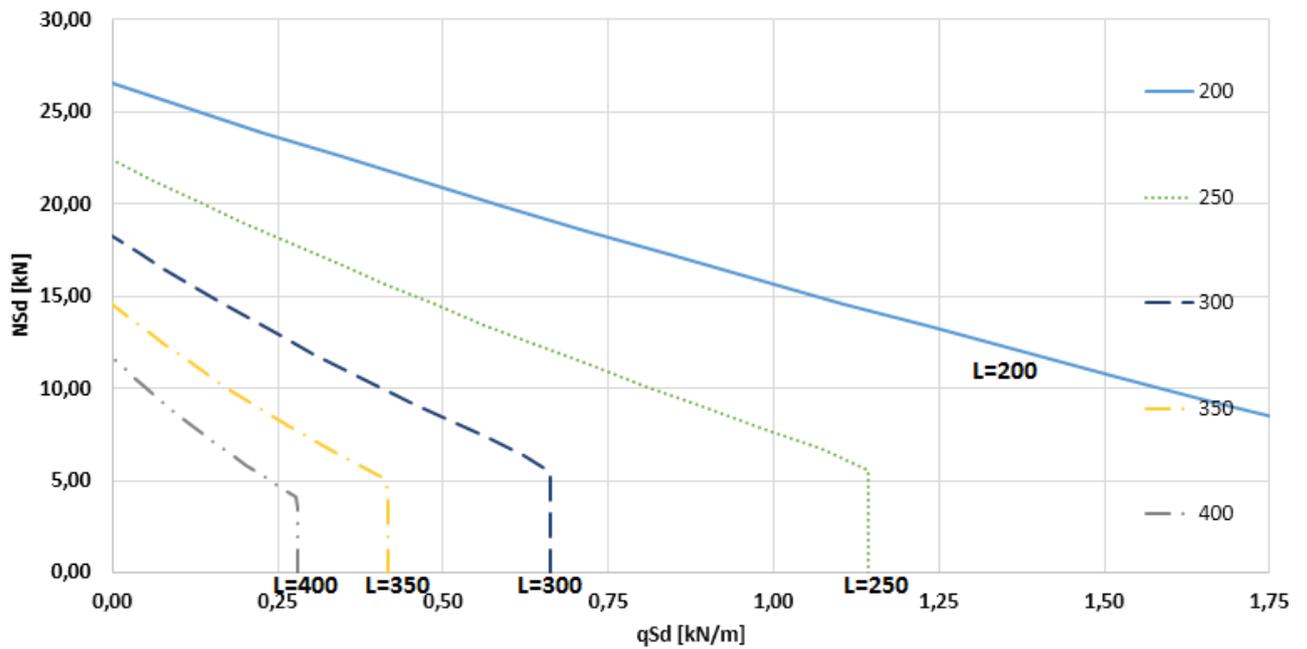


Figura 4.47 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 90x40x12x1,25; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 2$ - Sem furos

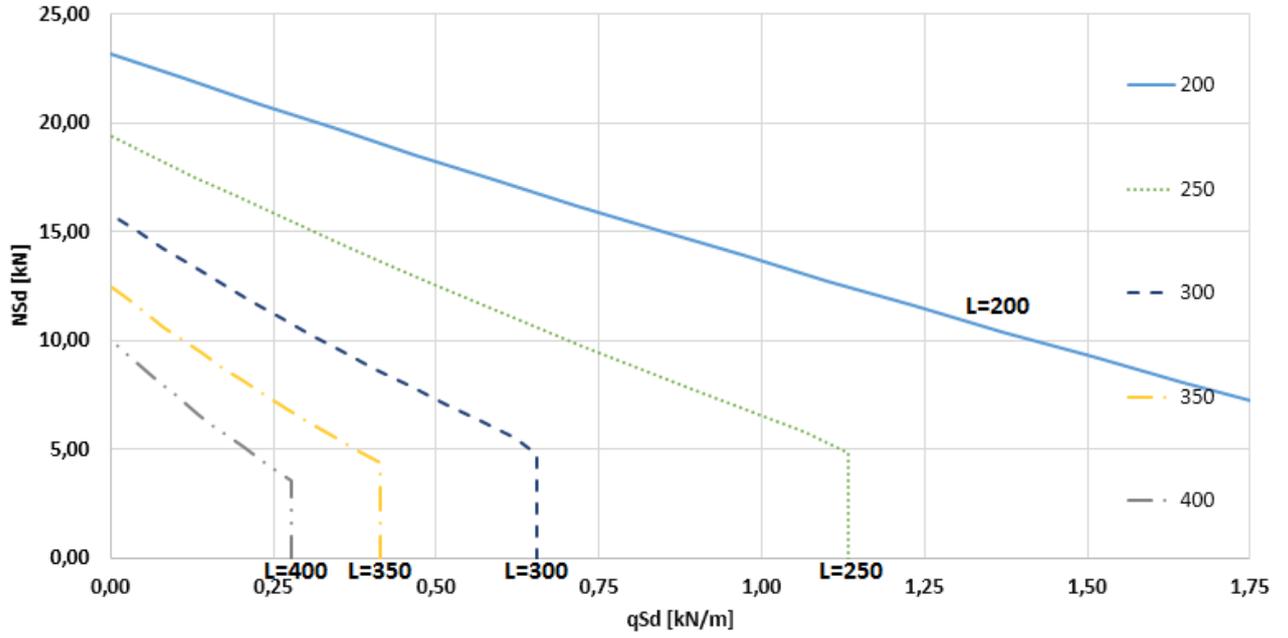


Figura 4.48 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 90x40x12x1,25; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 2 - d_h/h=0,25$

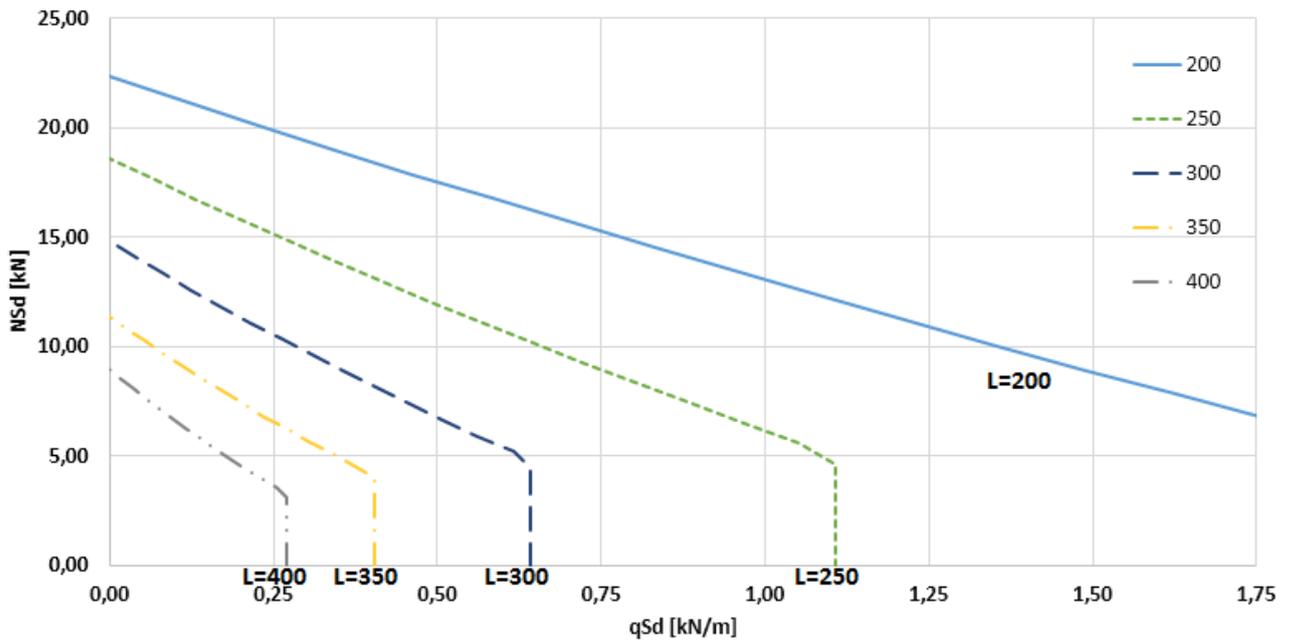


Figura 4.49 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 90x40x12x1,25; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 2 - d_h/h=0,50$

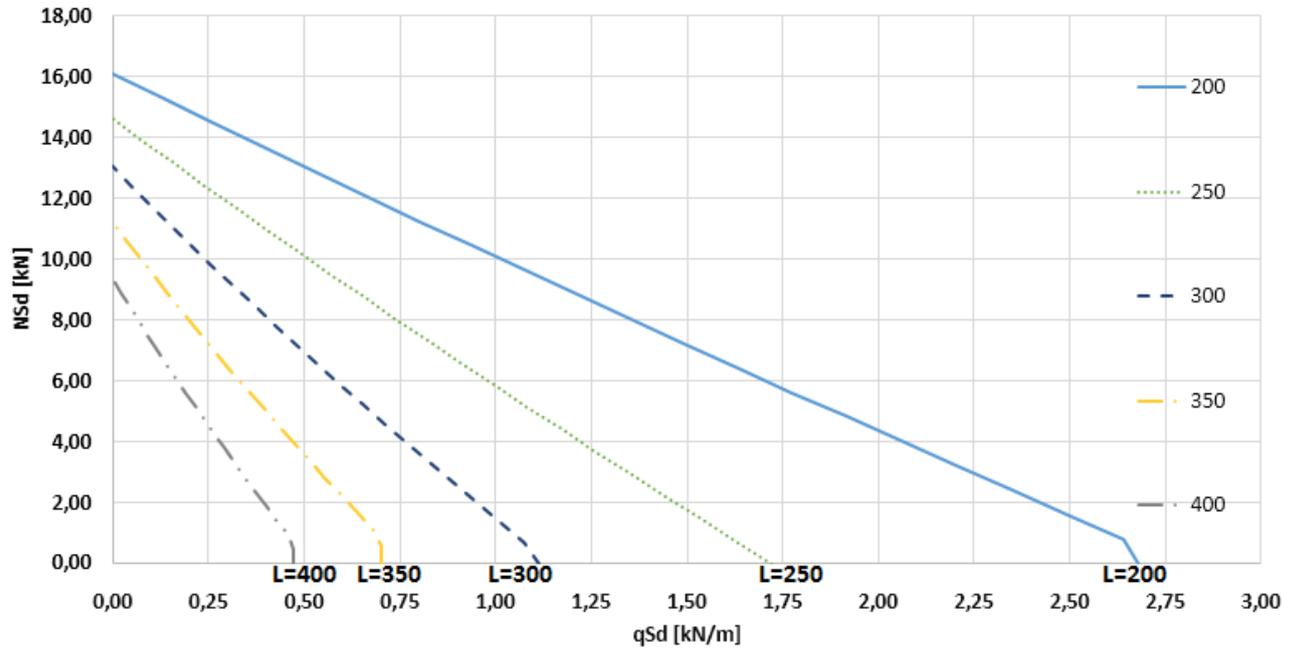


Figura 4.50 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 140x40x12x0,80; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 2$ - Sem furos

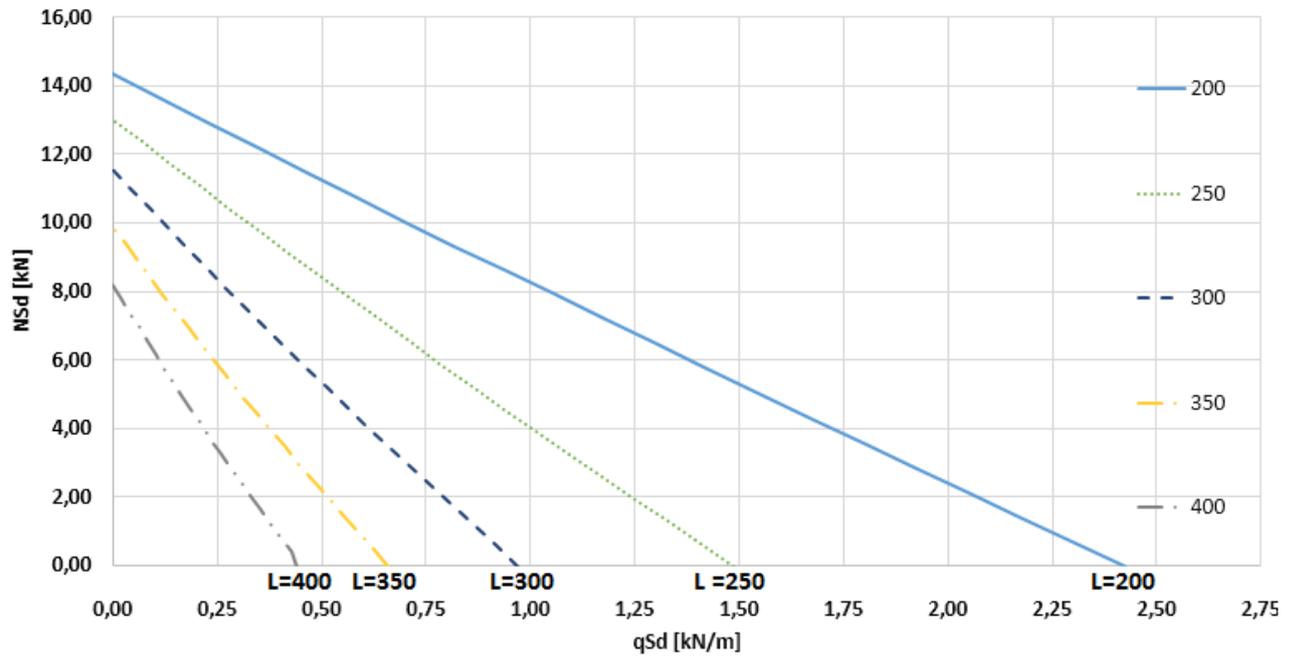


Figura 4.51 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 140x40x12x0,80; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 2$ - $d_h/h=0,225$

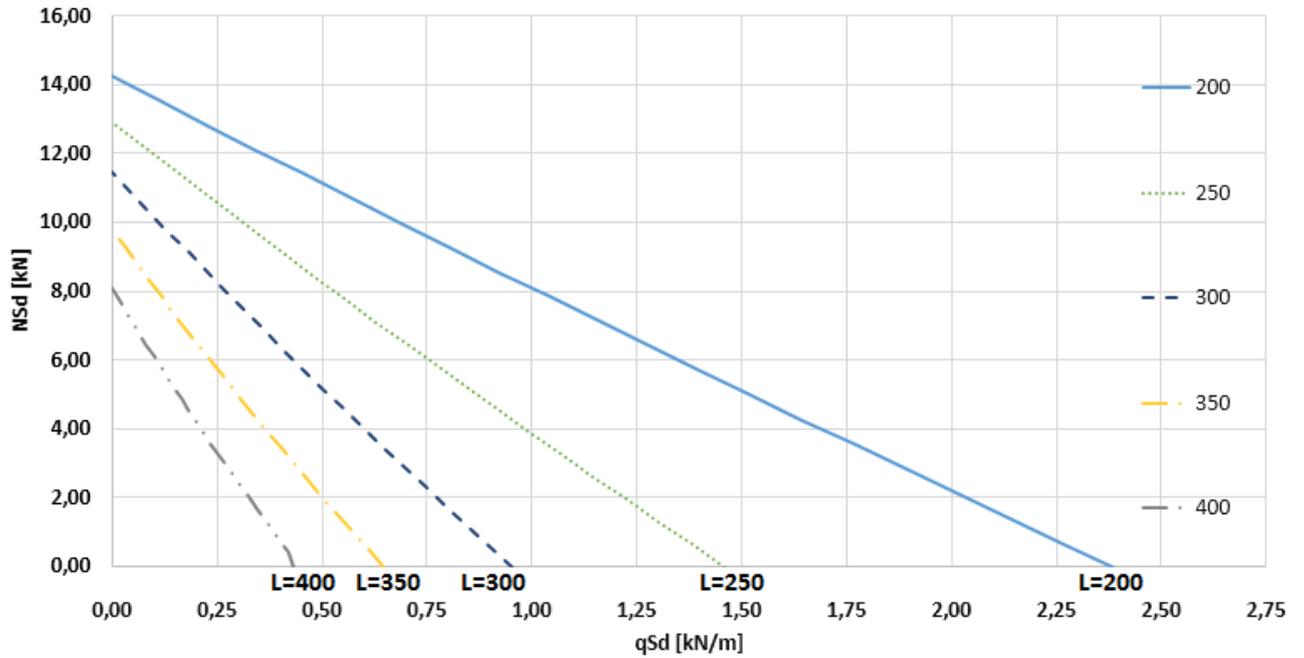


Figura 4.52 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 140x40x12x0,80; $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 2$ - $d_h/h=0,45$

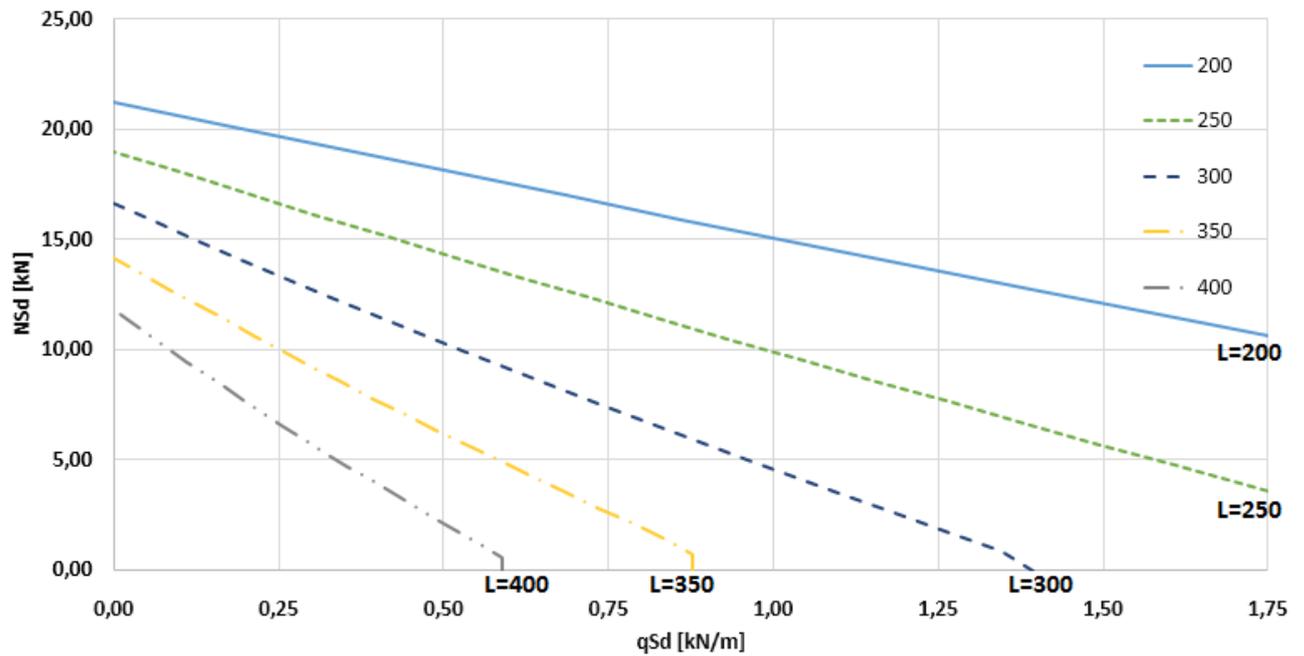


Figura 4.53 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 140x40x12x0,95; $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 2$ - Sem furos

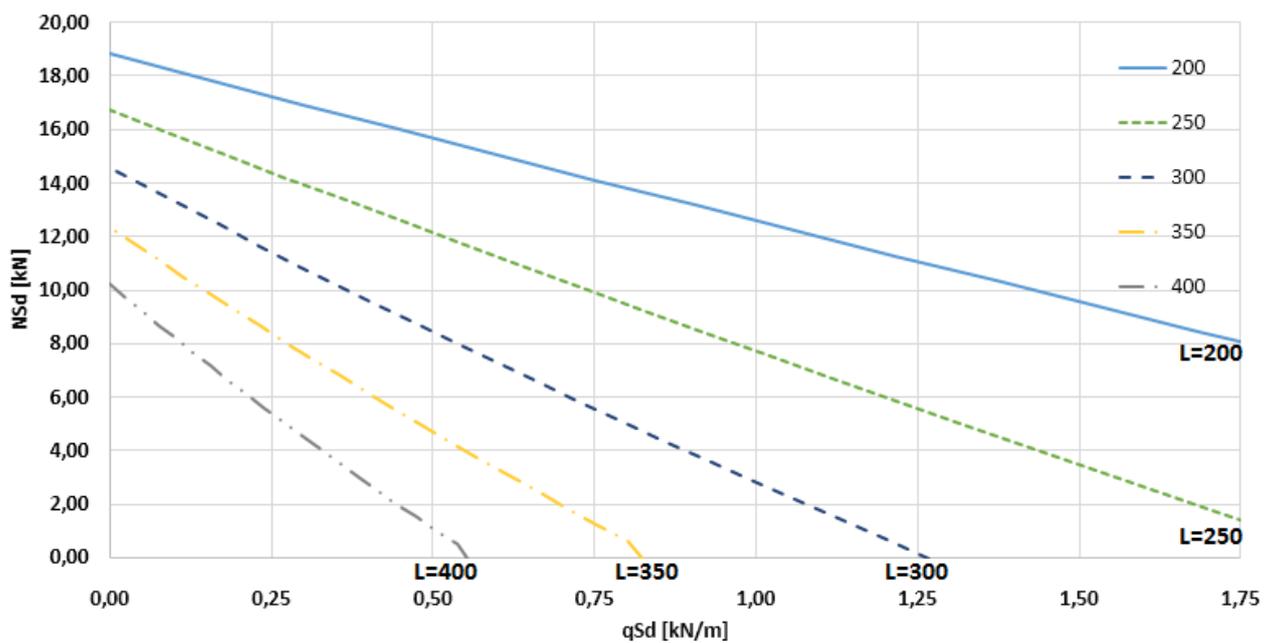


Figura 4.54 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 140x40x12x0,95; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 2$ - $d_h/h=0,225$

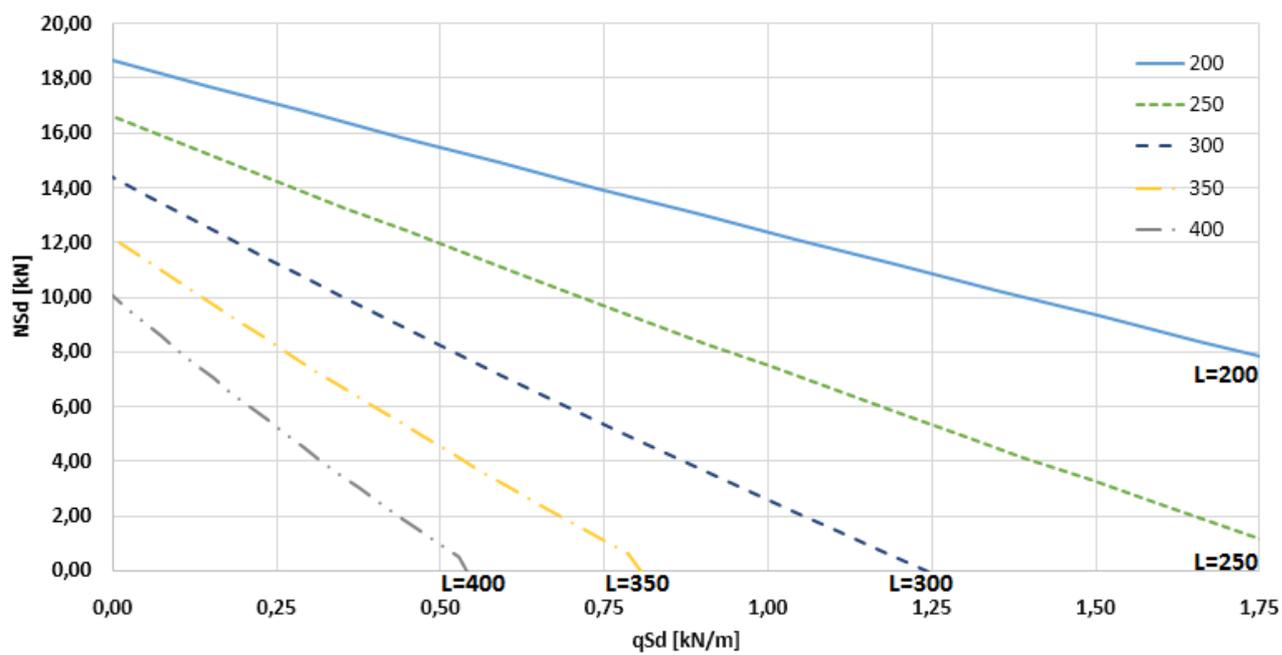


Figura 4.55 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 140x40x12x0,95; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 2$ - $d_h/h=0,45$

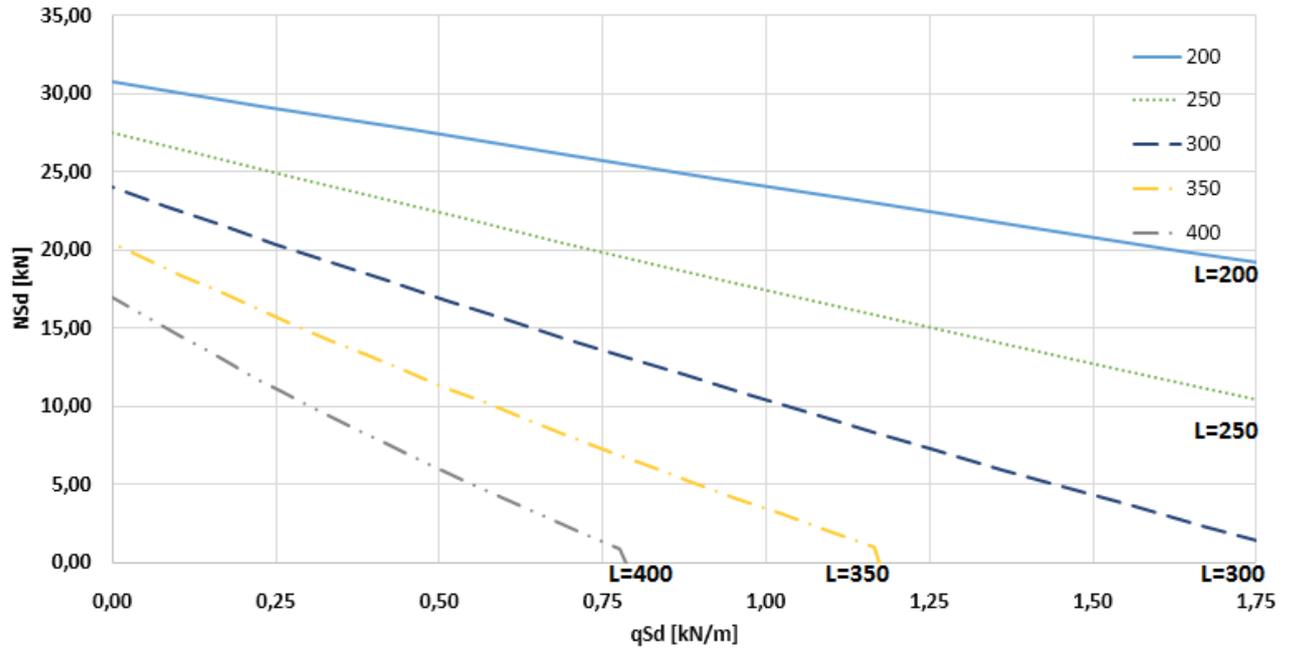


Figura 4.56 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 140x40x12x1,25; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 2$ - Sem furos

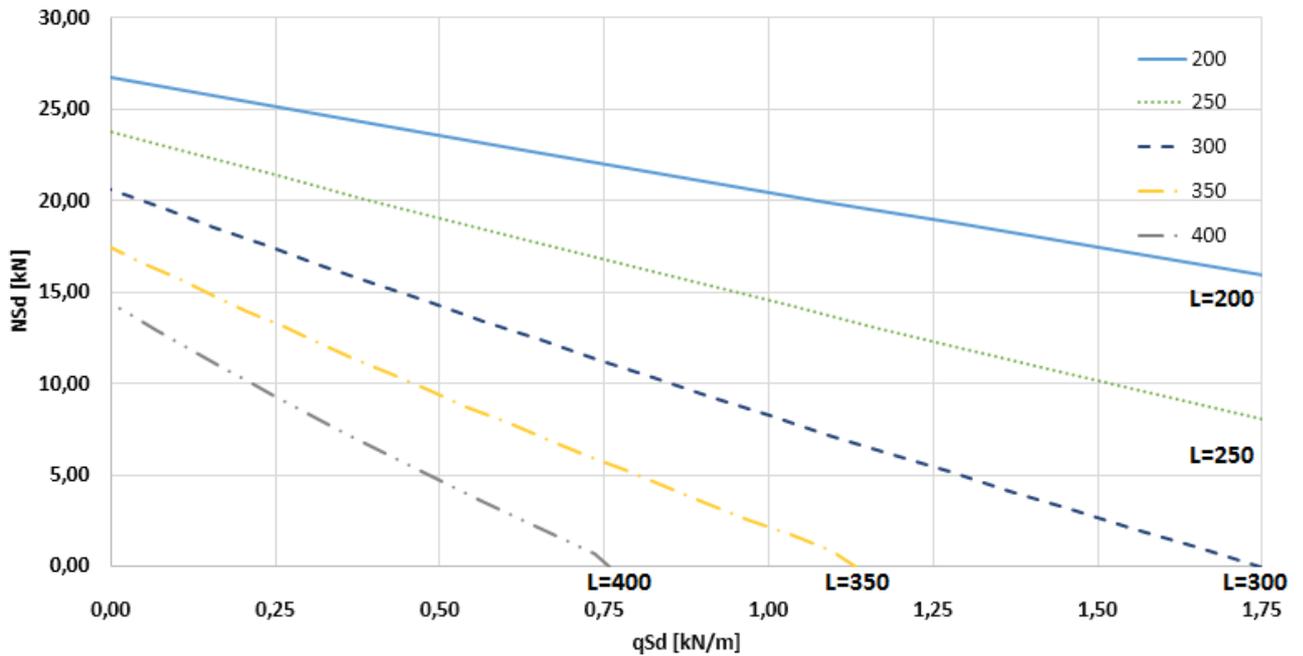


Figura 4.57 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 140x40x12x1,25; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 2$ - $d_h/h=0,225$

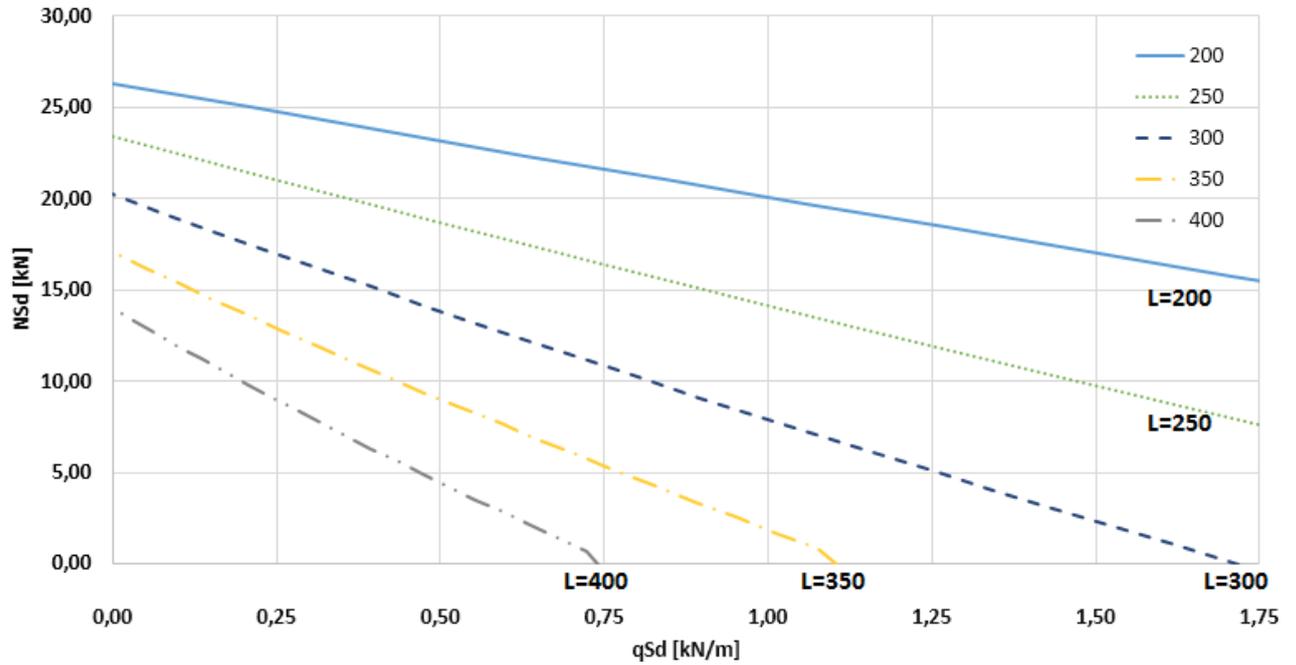


Figura 4.58 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 140x40x12x1,25; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 2 - d_h/h=0,45$

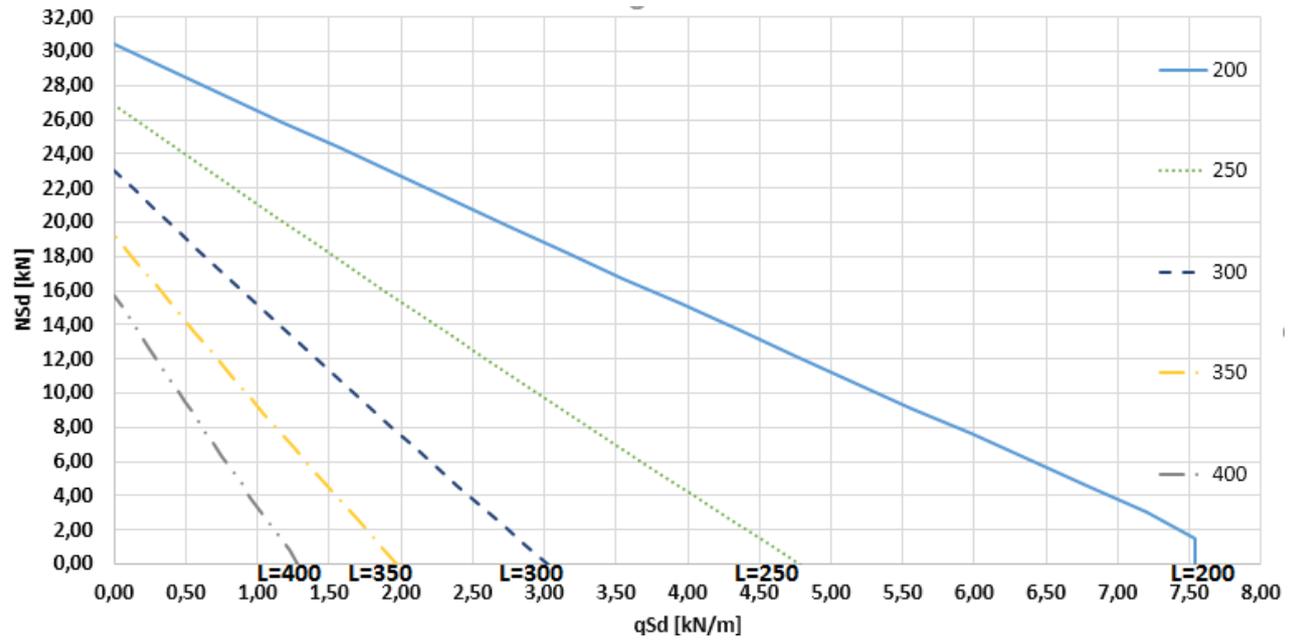


Figura 4.59 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 200x40x12x1,25; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 2 -$ Sem furos

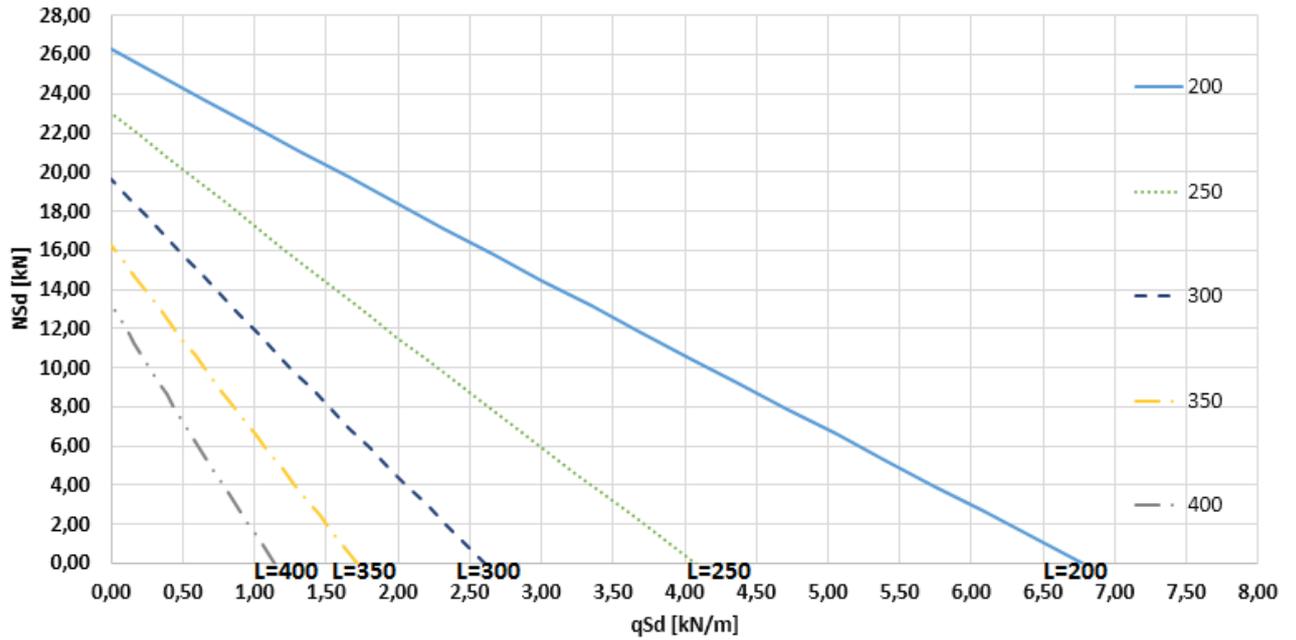


Figura 4.60 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 200x40x12x1,25; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 2$ – $d_h/h=0,15$

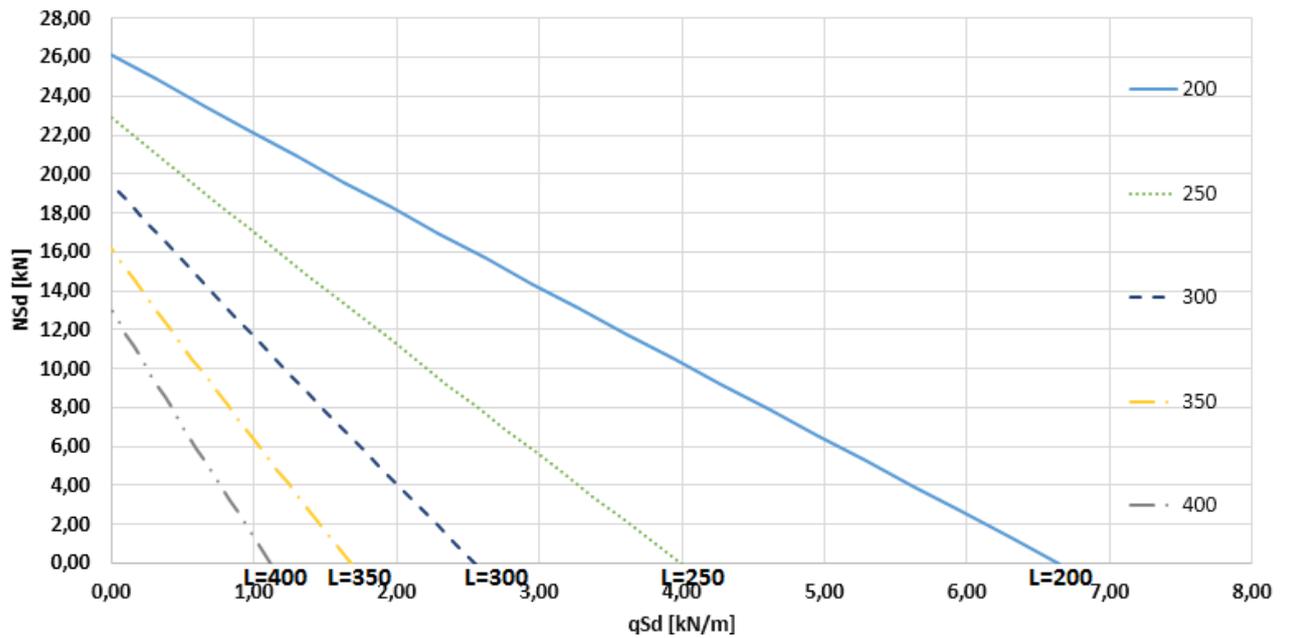


Figura 4.61 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 200x40x12x1,25; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 2$ – $d_h/h=0,30$

A seguir são apresentados os gráficos com as relações $q_{sd} \times N_{sd}$ de pré-dimensionamento das barras submetidas à flexo-compressão com a presença de furos alongados, e dois travamentos ao longo do comprimento, ou seja, $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 3$. O comprimento das barras é dado em centímetros.

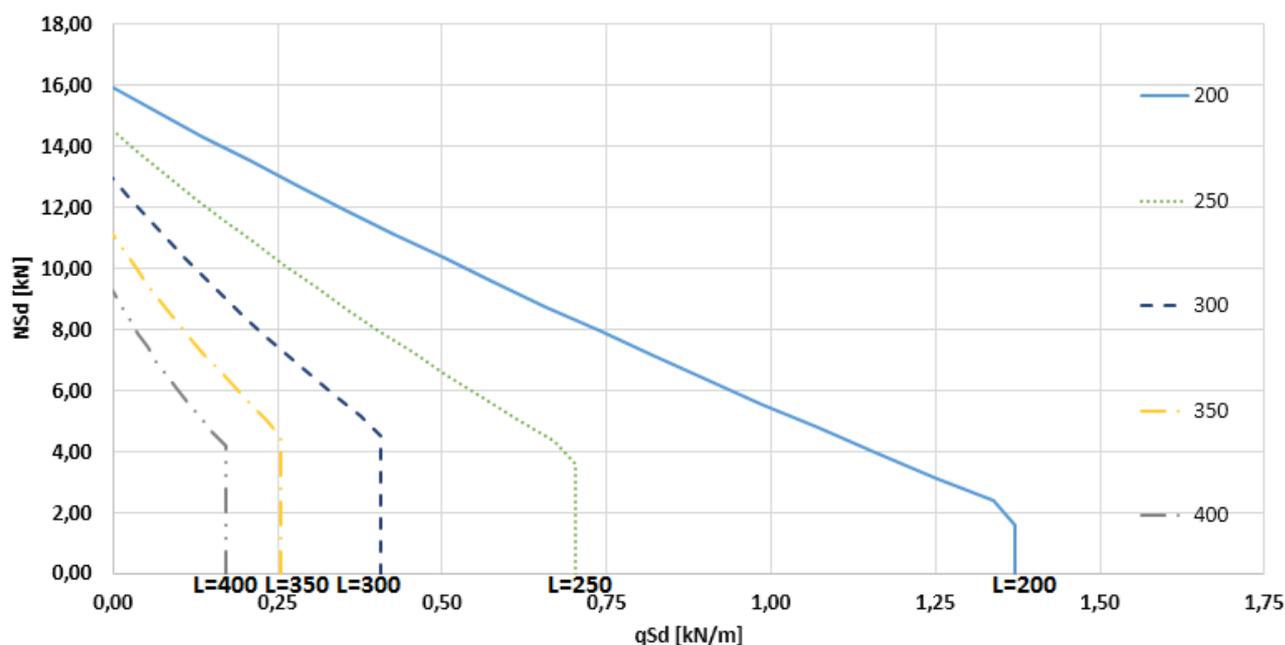


Figura 4.62 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 90x40x12x0,80; $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 3$ – Sem furos

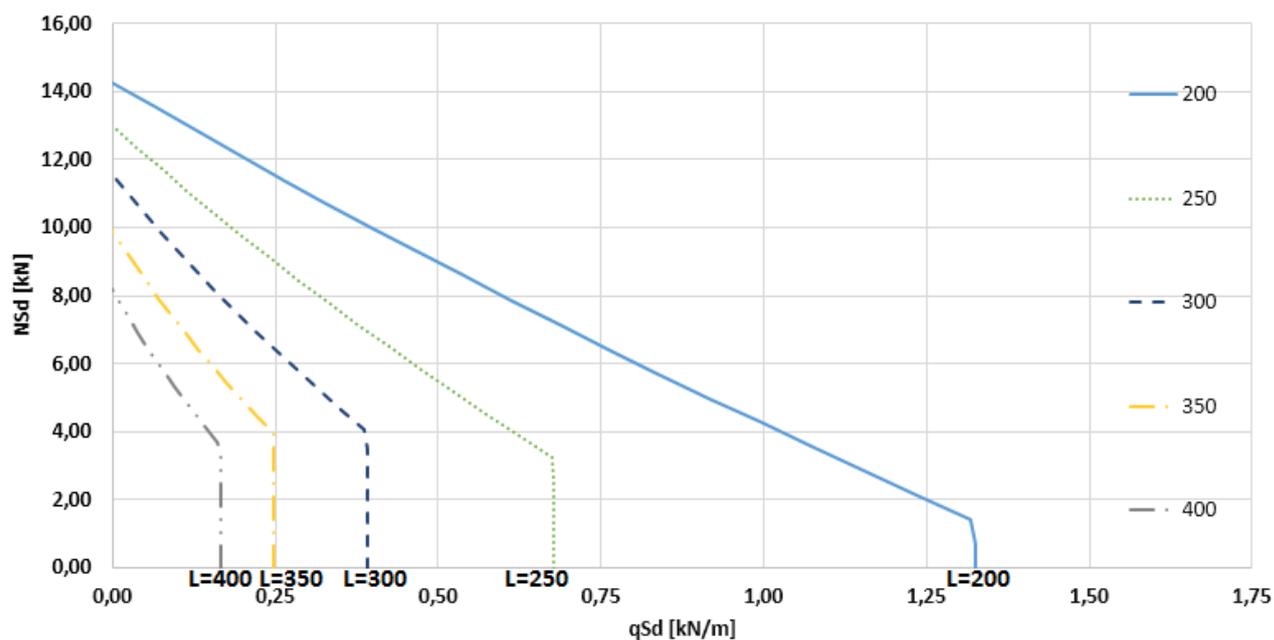


Figura 4.63 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 90x40x12x0,80; $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 3$ – $d_i/h=0,25$

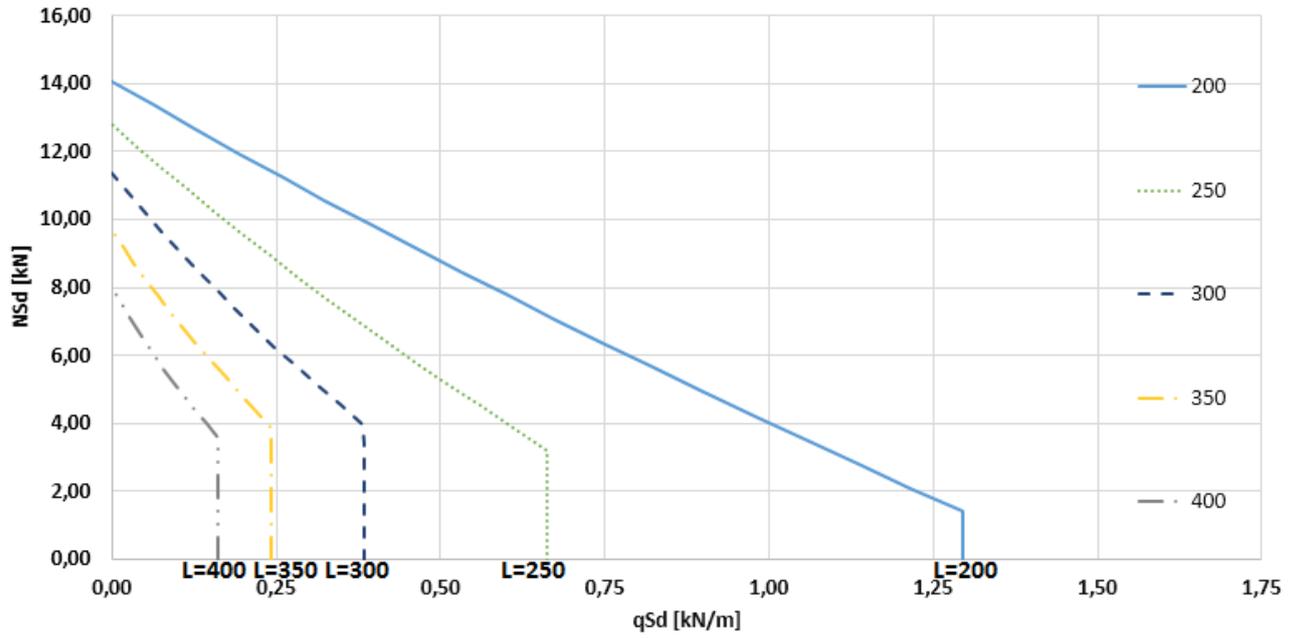


Figura 4.64 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 90x40x12x0,80; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 3 - d_i/h=0,50$

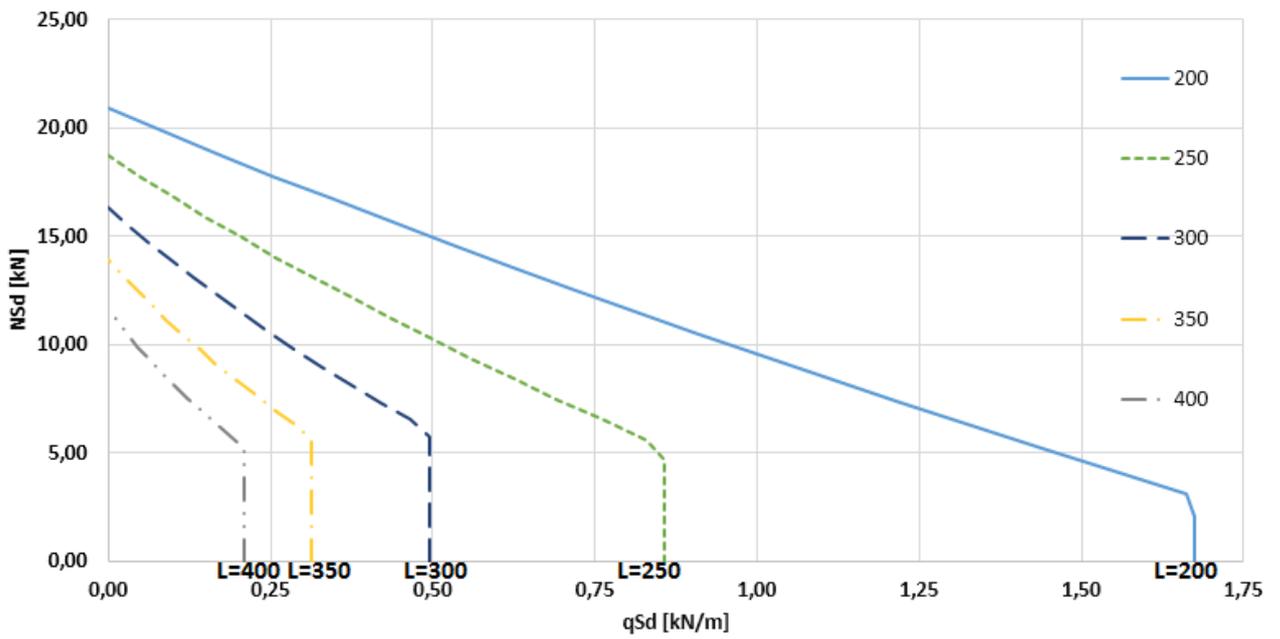


Figura 4.65 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 90x40x12x0,95; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 3 -$ Sem furo

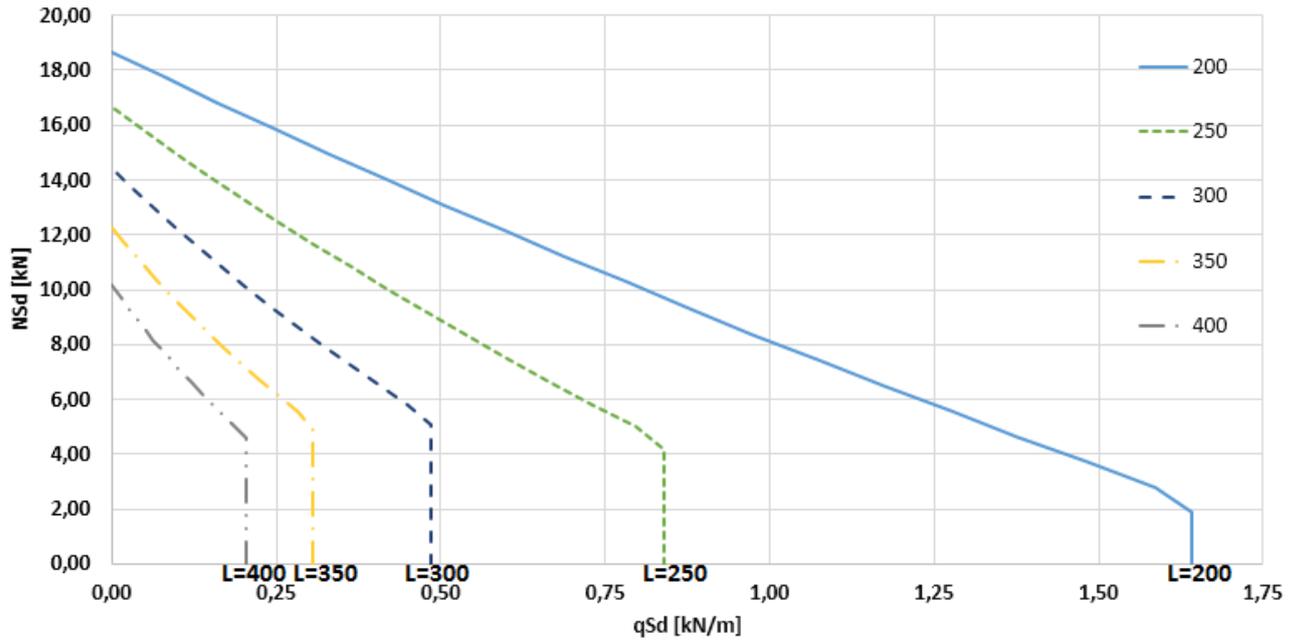


Figura 4.66 - Barras submetidas à flexão compressão: Perfil Ue 90x40x12x0,95; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 3 - d_i/h=0,25$

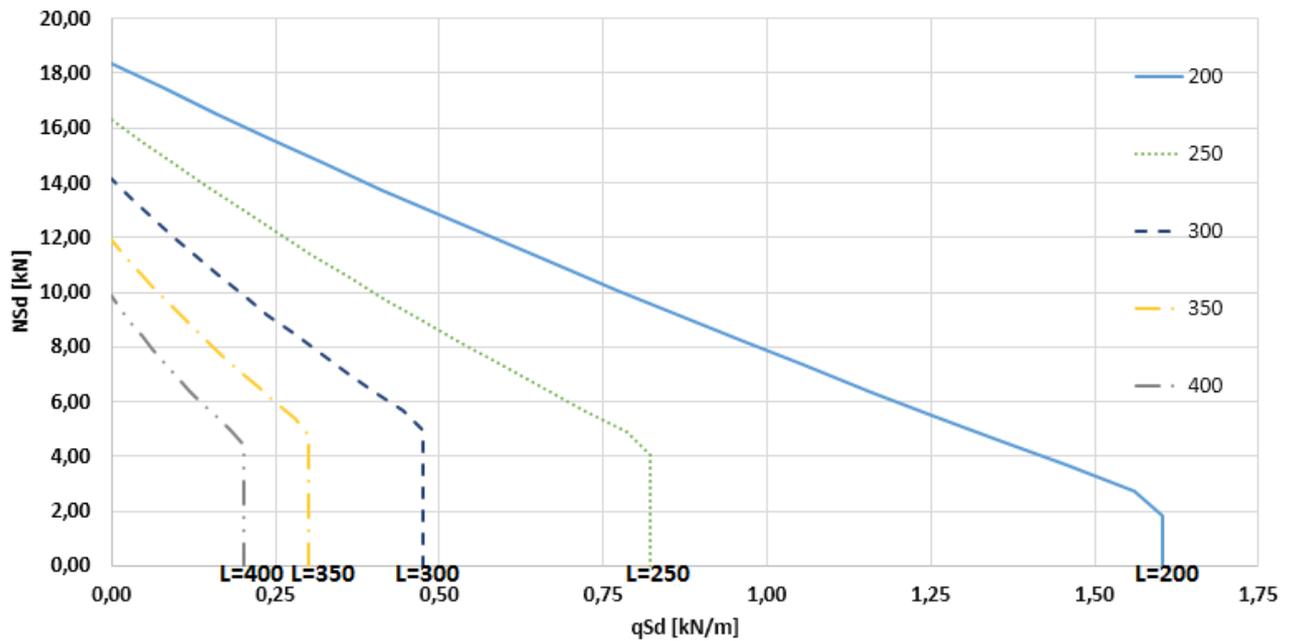


Figura 4.67 - Barras submetidas à flexão compressão: Perfil Ue 90x40x12x0,95; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 3 - d_i/h=0,50$

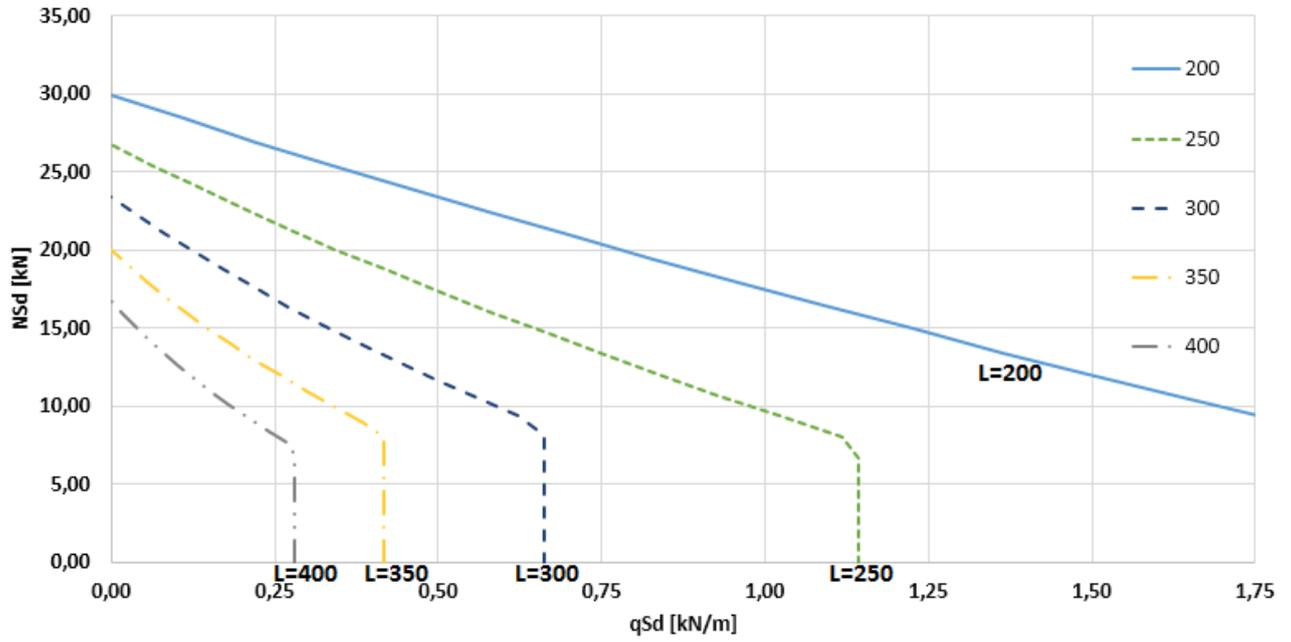


Figura 4.68 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 90x40x12x1,25; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 3$ - Sem furos

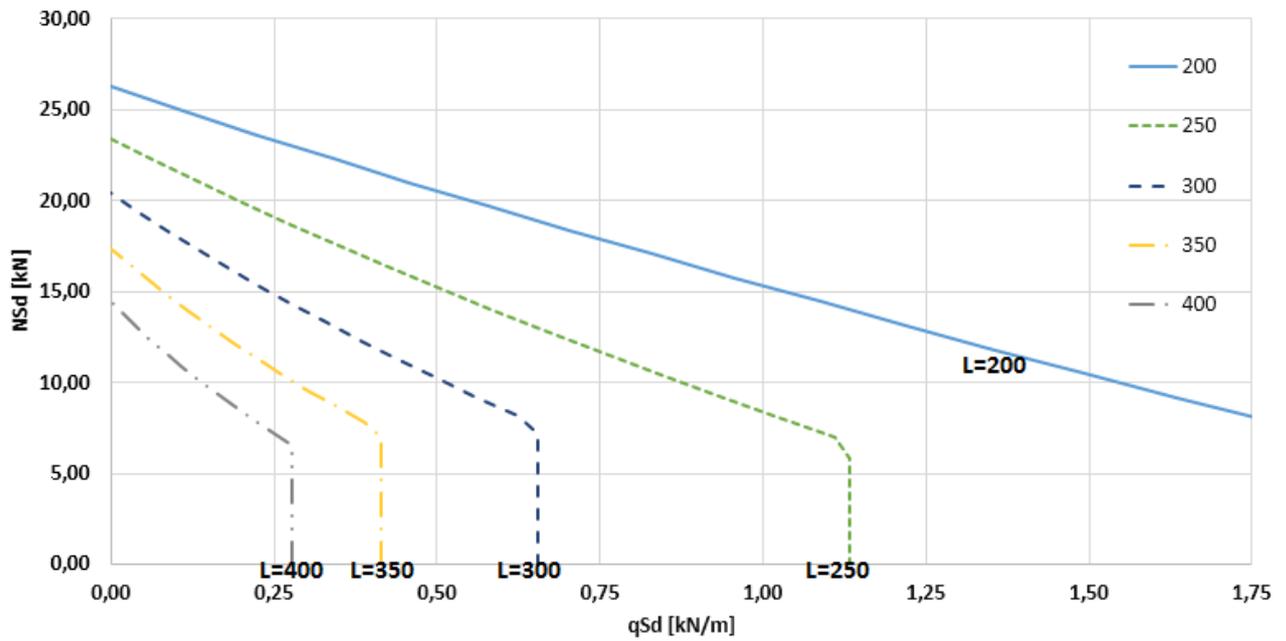


Figura 4.69 - Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 90x40x12x1,25; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 3$ - $d_h/h=0,25$

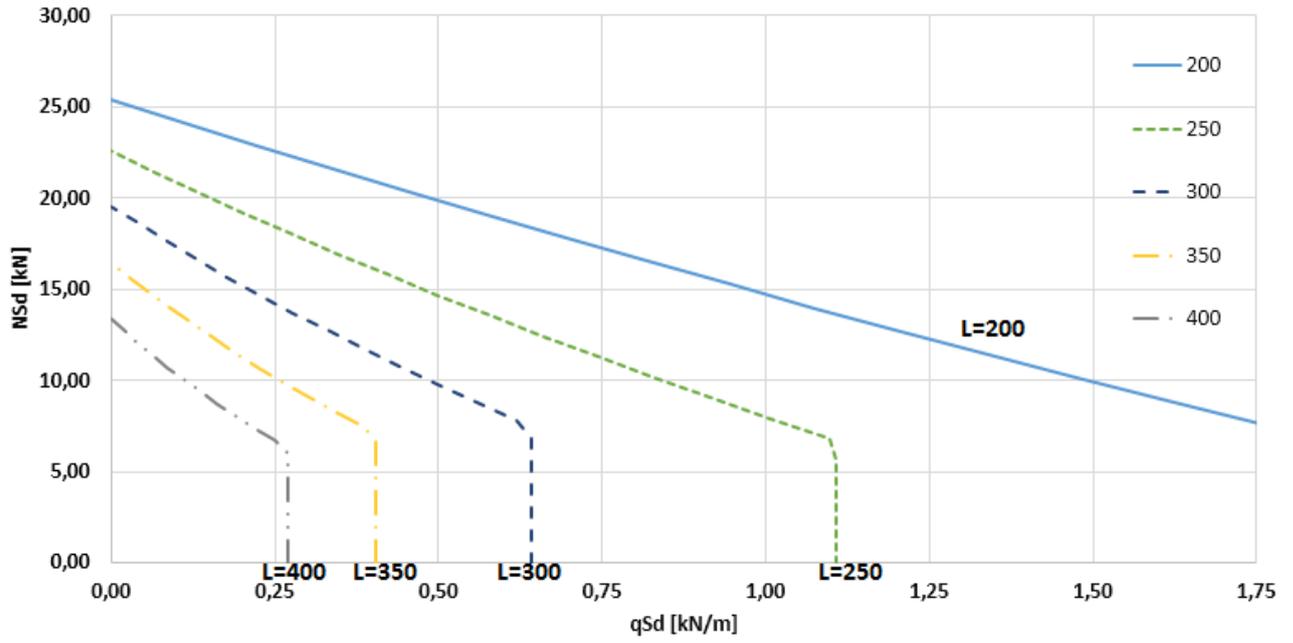


Figura 4.70–Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 90x40x12x1,25; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 3$ –
 $d_i/h=0,50$

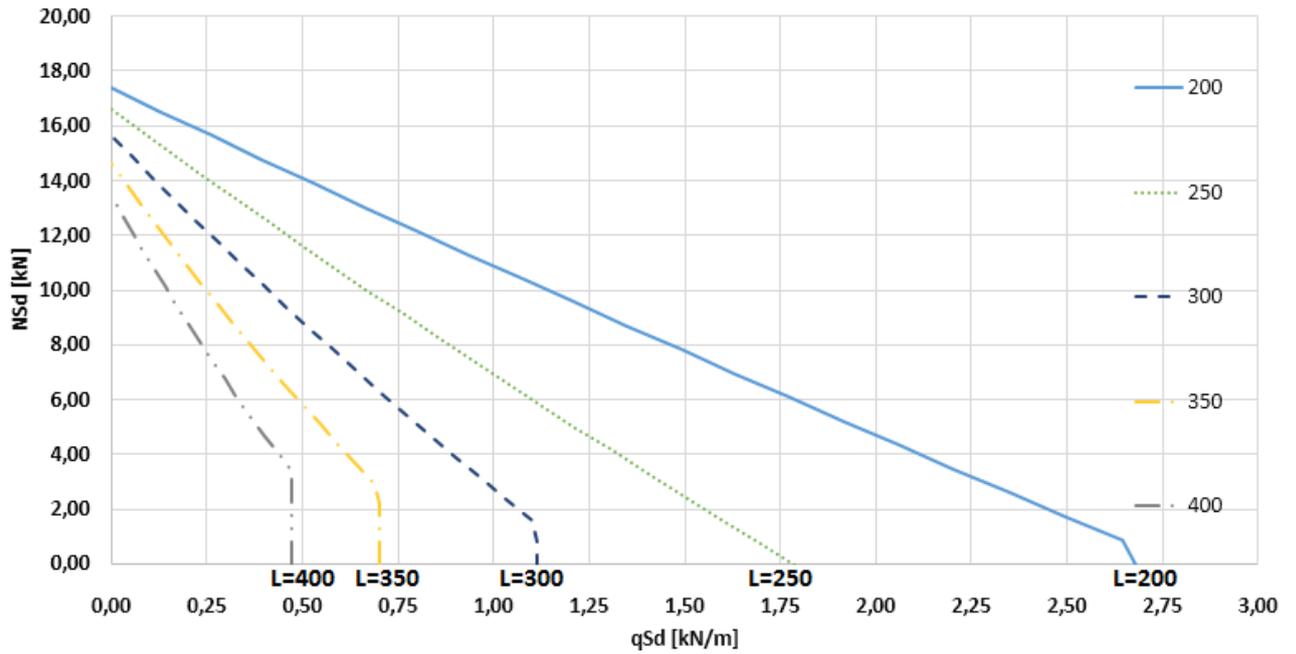


Figura 4.71–Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 140x40x12x0,80; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 3$ –
Sem furos

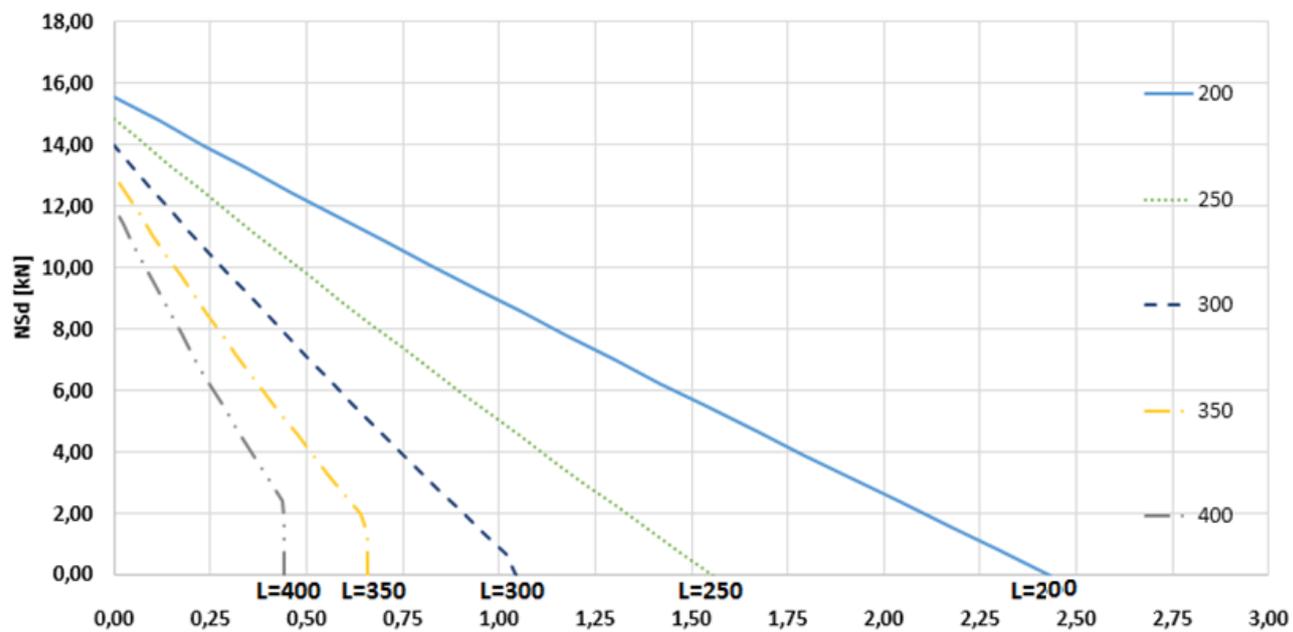


Figura 4.72–Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 140x40x12x0,80; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 3$ –
 $d_b/h=0,225$

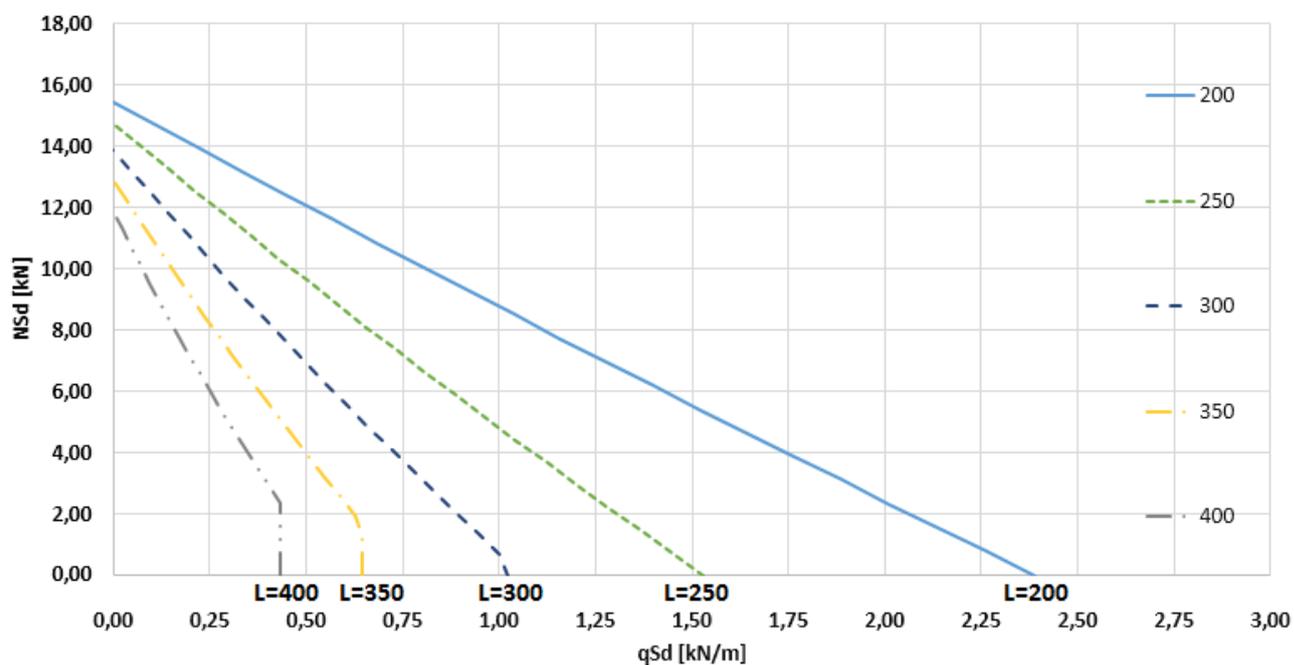


Figura 4.73–Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 140x40x12x0,80; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 3$ –
 $d_b/h=0,45$

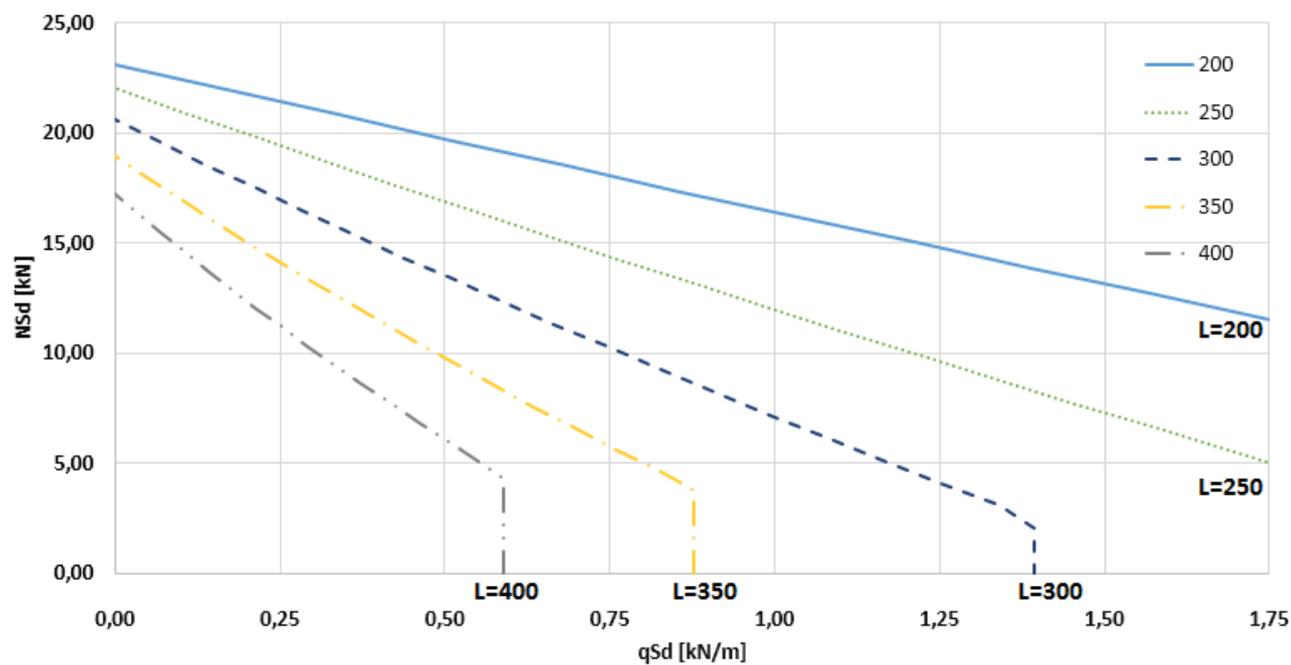


Figura 4.74–Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 140x40x12x0,95; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 3$ – Sem furos

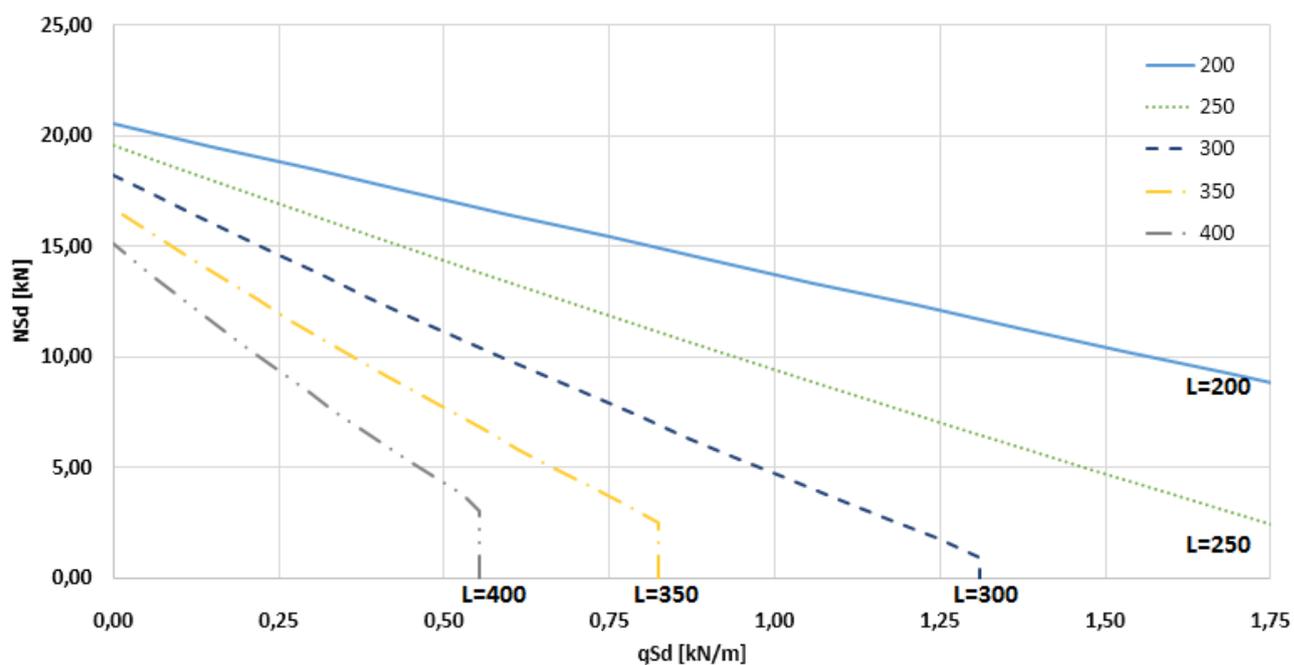


Figura 4.75–Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 140x40x12x0,95; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 3$ – $d_h/h=0,225$

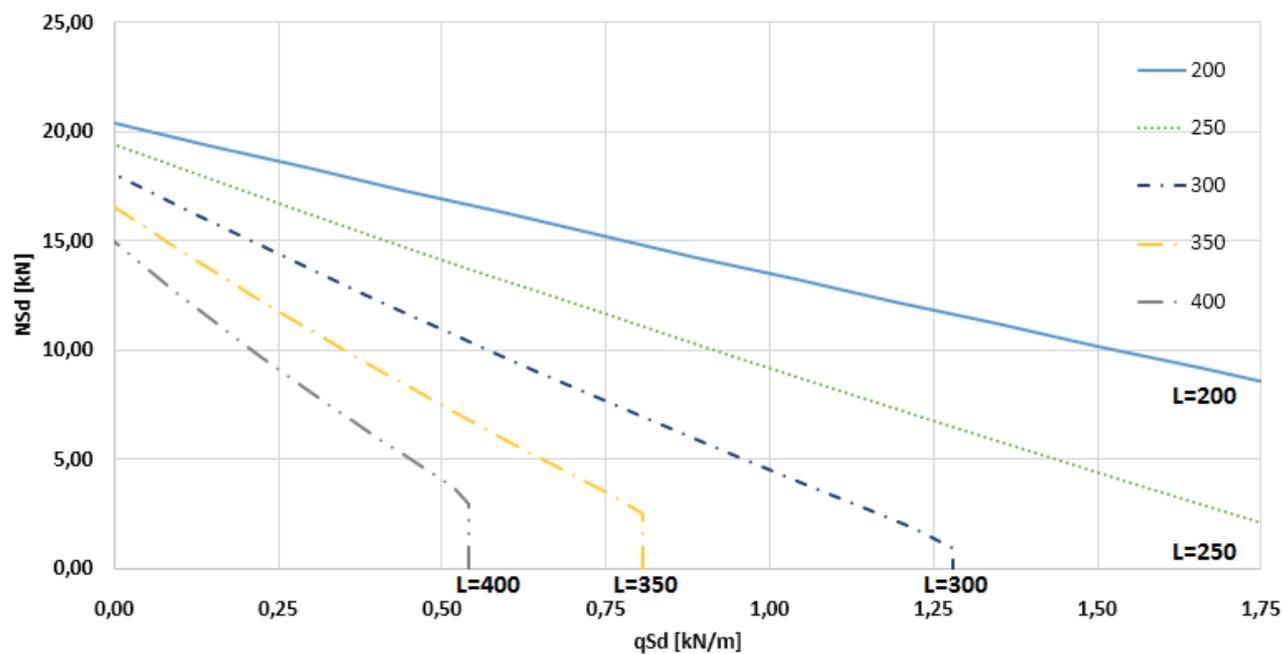


Figura 4.76–Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 140x40x12x0,95; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 3$ - $d_t/h=0,45$

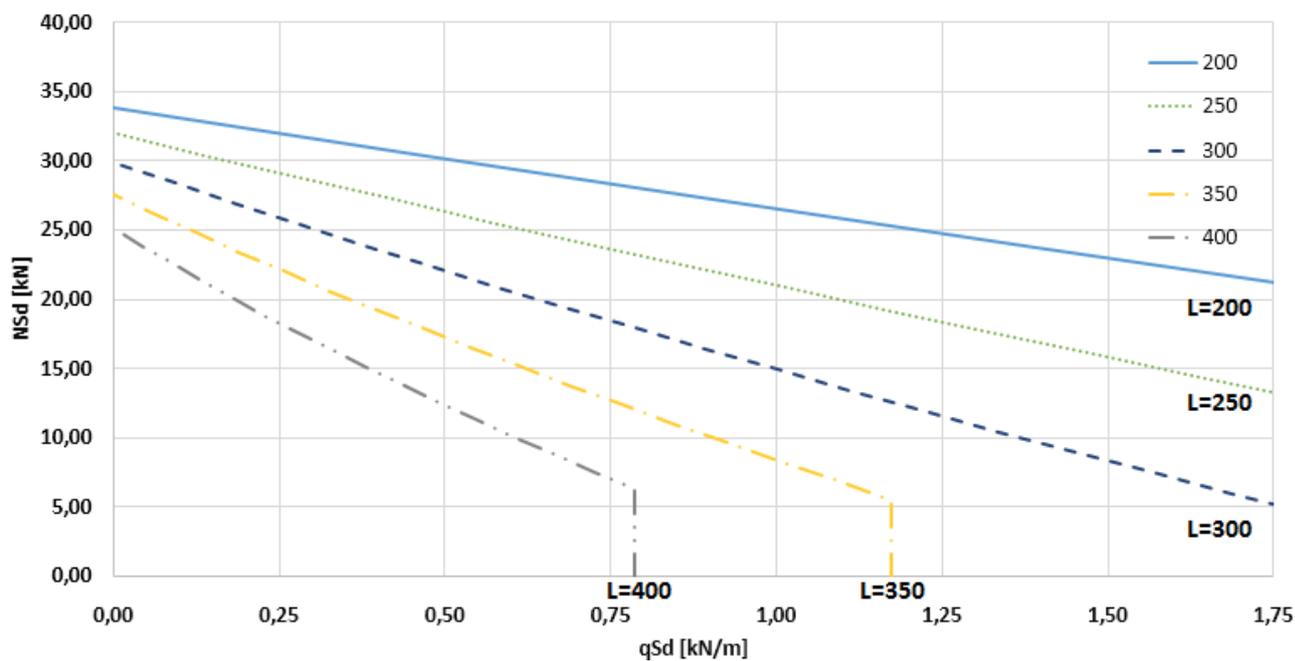


Figura 4.77–Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 140x40x12x1,25; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 3$ - Sem furos

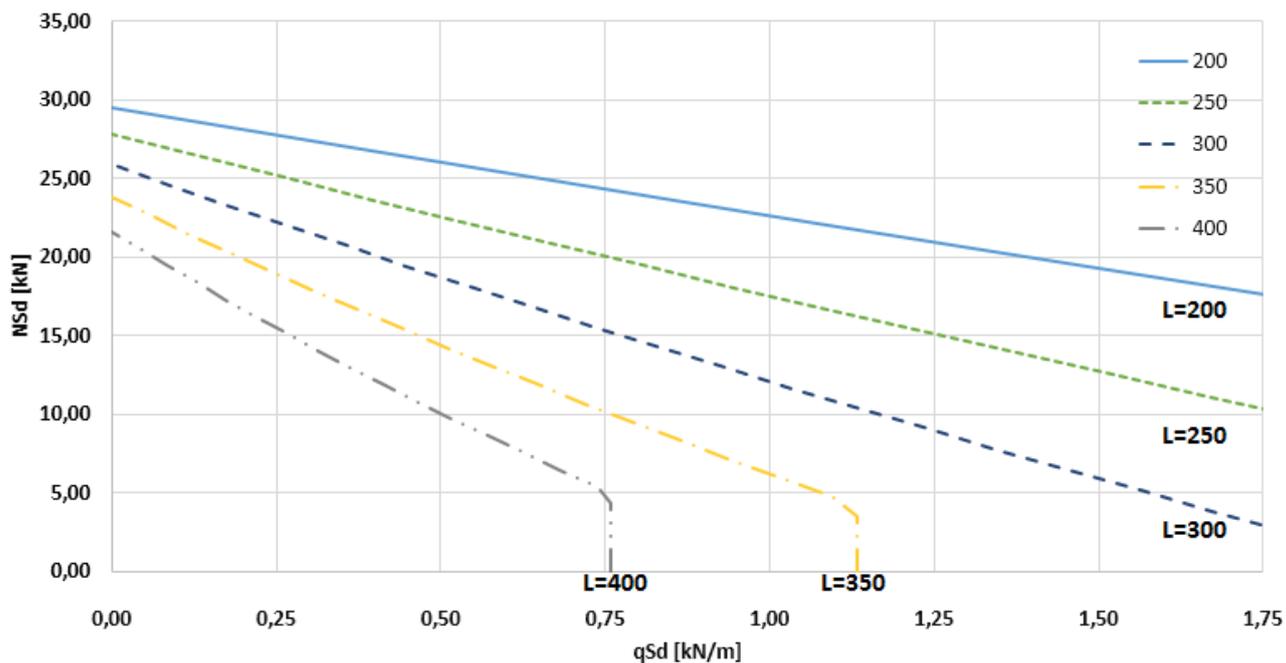


Figura 4.78–Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 140x40x12x1,25; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 3$ – $d_h/h=0,225$

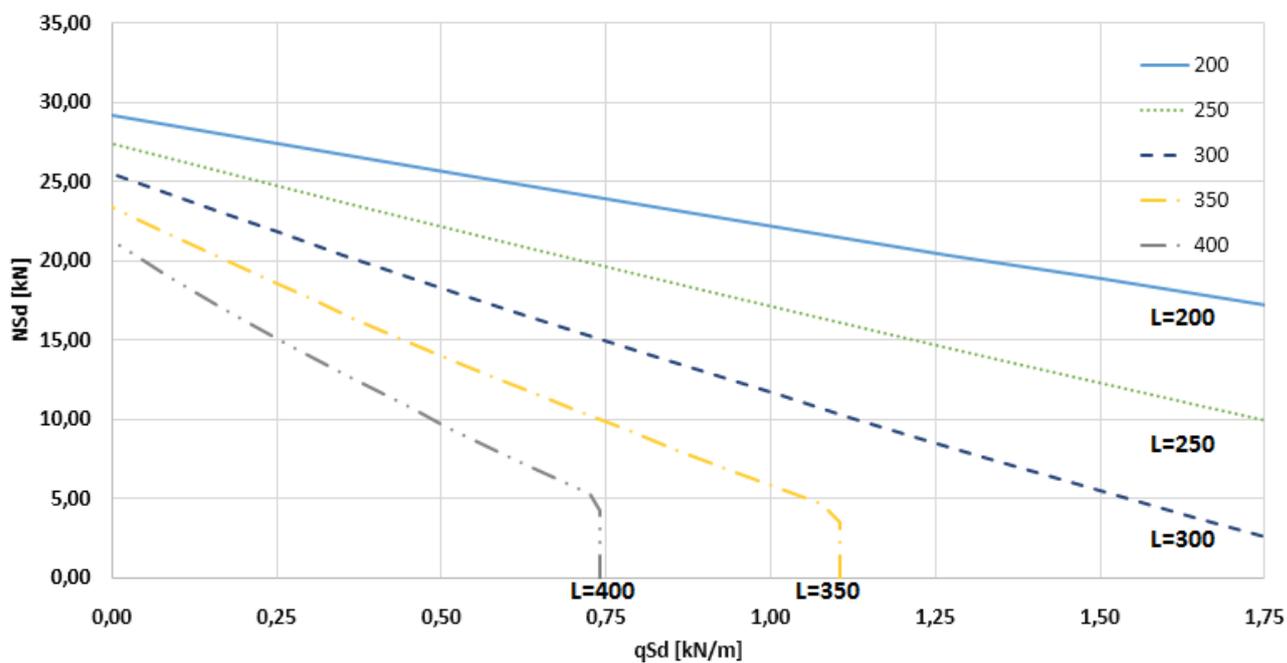


Figura 4.79–Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 140x40x12x1,25; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 3$ – $d_h/h=0,45$

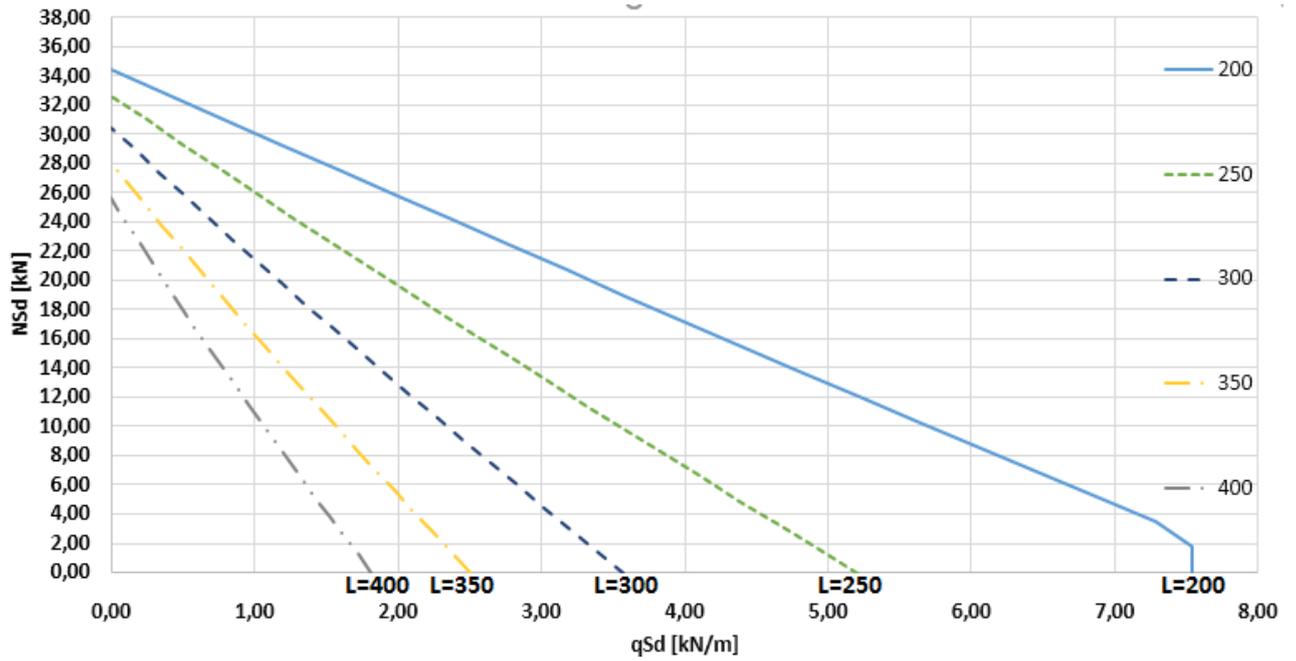


Figura 4.80–Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 200x40x12x1,25; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 3$ – Sem furos

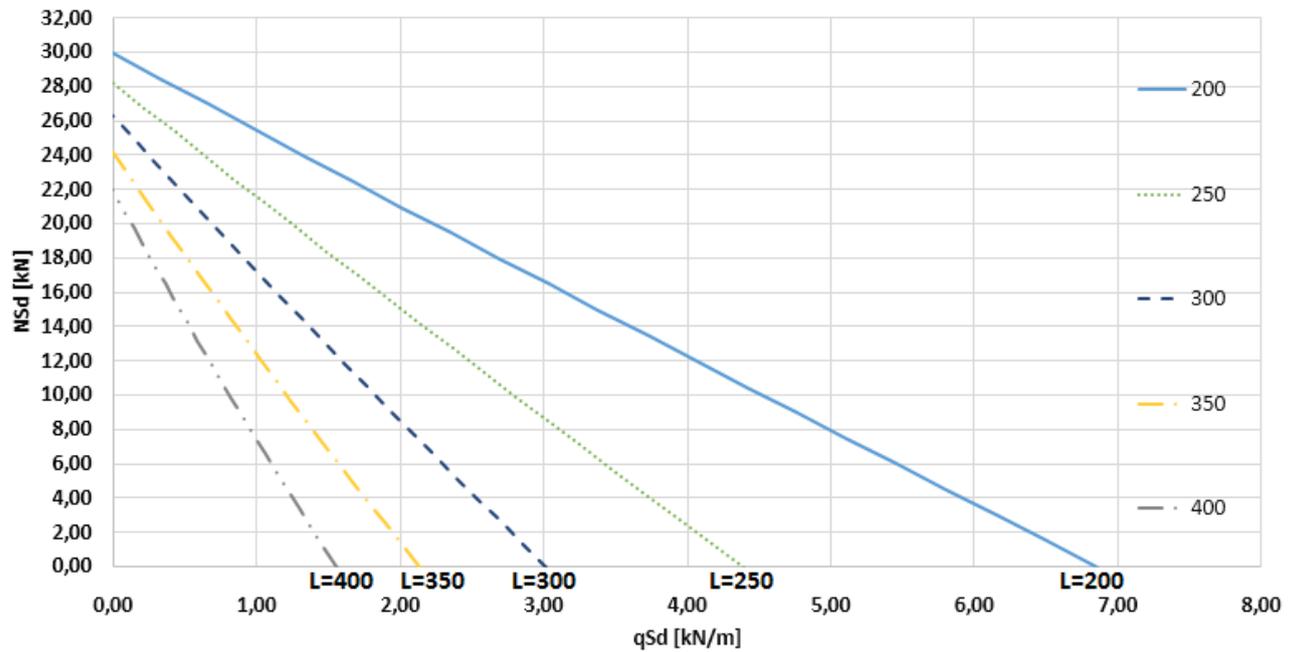


Figura 4.81–Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 200x40x12x1,25; $K_zL_z = K_yL_y = K_xL_x / 3$ – $d_i/h=0,15$

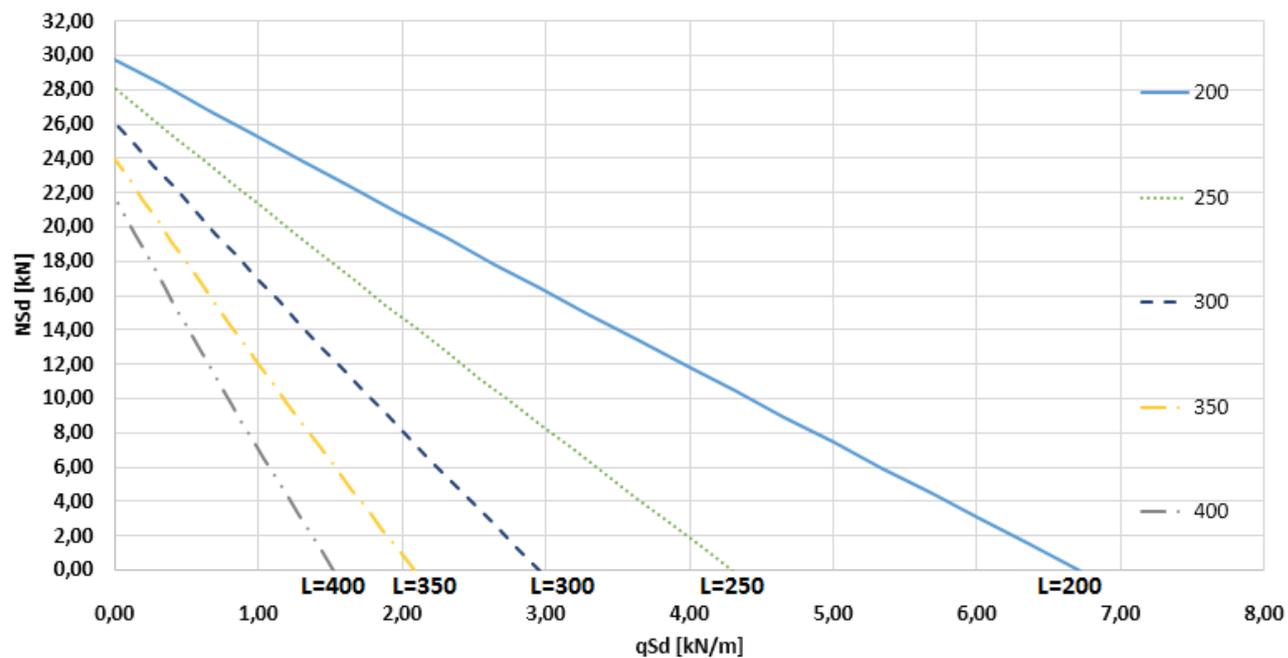


Figura 4.82–Barras submetidas à flexo compressão: Perfil Ue 200x40x12x1,25; $K_z L_z = K_y L_y = K_x L_x / 3$ – $d_t/h=0,30$

5

5. Discussões e Conclusões

5.1 Considerações Finais

5.1.1 Dimensionamento de perfis formados a frio com a presença de furos

Conforme exposto ao longo deste trabalho, os perfis formados a frio adotados no sistema estrutural *Light Steel Framing* usualmente recebem furos para passagem e acomodação de tubulações elétricas, hidráulicas e afins.

A presença dos furos reduz as forças resistentes dos perfis e podem induzir os mesmos ao modo de falha distorcional, uma vez que a rigidez fornecida pela alma à mesa é reduzida. Entretanto, a norma brasileira que trata do dimensionamento de perfis formados a frio, a NBR 14762:2010, somente contempla em seu escopo as formulações para o dimensionamento em tal situação nos capítulos de barras submetidas à força axial de tração e de ligações parafusadas.

A ABNT NBR 15253:2014 apresenta as dimensões máximas de furos que podem ser realizadas em perfis formados a frio, além das disposições construtivas dos furos. Entretanto, ela também não apresenta o procedimento de dimensionamento. Deste modo, o engenheiro que se encontra em tal situação precisa lançar mão da norma norte americana AISI S100-16, que apresenta formulação para o cálculo da largura efetiva de elementos uniformemente comprimidos e de elementos submetidos a gradiente de tensões com a presença de furos.

A norma AISI S100-16 também apresenta métodos para o cálculo da força cortante resistente e da força resistente ao enrugamento da alma (*web crippling*) de perfis com a presença de furos. Para estes casos, deve-se calcular a força resistente considerando que não existem furos nos perfis, e em seguida aplica-se um fator de redução sobre esta força.

A AISI S100-16 apresenta ainda uma adaptação do método da resistência direta (MRD) para o dimensionamento de barras em flexão e barras em compressão com a presença de furos. A

adaptação da AISI S100-16 é semelhante à proposta por Moen e Schafer (2011) e Moen et al (2013). Durante o processo de dimensionamento via MRD é necessário adotar as forças axiais de compressão e os momentos fletores de flambagem elástica local, distorcional e global calculados considerando a existência de furos nos perfis. A norma AISI S100-16 apresenta adicionalmente como obter estes valores. Moen e Schafer (2009) também apresentam este procedimento de maneira mais detalhada.

Observou-se que quando furos oblongos são realizados na alma de um perfil submetido à compressão, esta deixa de ser tratada como um elemento vinculado-vinculado com coeficiente de flambagem $k=4$, e passa a ser considerada como dois elementos vinculado-livre não enrijecidos adjacentes ao furo, ambos com $k=0,43$. A largura efetiva de cada elemento deve ser calculada separadamente e resulta em um valor menor do que no elemento vinculado-vinculado. O diâmetro do furo e o comprimento do perfil tem influência relativamente baixa, quando comparado à modificação da condição de contorno da alma do perfil, na determinação da força axial de compressão resistente.

Ressalta-se as observações de Moen et al (2009) sobre a redução da rigidez rotacional fornecida pela alma à mesa, quando furos são feitos na alma de perfis formados a frio, de modo que força axial de flambagem distorcional elástica e momento fletor de flambagem distorcional elástica diminuam. Ressalta-se também os estudos de Moen e Schafer (2008), onde estes concluíram que a presença de furos oblongos discretos na alma de perfis U_e sujeitos à força axial de compressão provoca uma redução na força axial de compressão resistente do mesmo, acompanhada da alteração da resposta pós-estável e a ductilidade da barra.

Quando furos oblongos são realizados na alma de um perfil submetido à flexão, esta deixa de ser tratada como um elemento vinculado-vinculado com coeficiente de flambagem k na ordem de 24, e passa a ser considerada como dois elementos vinculado-livre não enrijecidos, adjacentes ao furo. O elemento tracionado não está sujeito a flambagem local, entretanto para o elemento comprimido deve-se adotar $k=0,43$. As propriedades efetivas da seção resultam em valores menores do que no elemento vinculado-vinculado. A variação da condição de contorno da alma pode provocar redução significativa do momento fletor resistente do perfil.

Conforme preconizado na norma AISI S100-16 no cálculo das propriedades efetivas de perfis com furos, a presença dos mesmos pode ser desconsiderada na verificação dos deslocamentos.

A presença de furos na alma de perfis Ue pode causar redução de até 72,6 % na força cortante resistente de cálculo, como observado para o perfil Ue 90x40x12x1,25. A redução na força cortante resistente de cálculo é maior para furos não circulares.

Com base no exposto, é possível observar a importância de se levar em consideração a presença dos furos no processo de dimensionamento de perfis formados a frio. Os gráficos de pré-dimensionamento podem auxiliar os engenheiros durante o processo de cálculo estrutural. Além disso, é importante ressaltar que a flambagem distorcional ainda deve ser verificada.

5.1.2 Desenvolvimento de um *software* para dimensionamento de perfis formados a frio

Ao longo deste trabalho, foi desenvolvido um *software* para dimensionamento de perfis formados a frio. O aplicativo foi programado com base na ABNT NBR 14762:2010 e para o cálculo dos perfis com a presença de furos adotou-se a norma norte americana AISI S100-16.

O *software* foi desenvolvido em Java, uma linguagem computacional de programação orientada a objetos.

No programa foram adotados nove pacotes, sendo eles: *i) Geometria; ii) Sections; iii) Modelo; iv) Esforço Resistente; v) Verificações; vi) Library; vii) GIG e viii) App; ix) Útil.* Dentro de cada um desses pacotes, existem classes responsáveis por representar as seções transversais, as barras, os materiais e por realizar os cálculos durante o processo de dimensionamento.

Ao longo do capítulo 3 desta dissertação foi apresentada a metodologia adotada para o desenvolvimento do *software*. Também foram apresentados os princípios básicos da linguagem Java e da programação orientada a objetos e a estruturação básica do aplicativo desenvolvido.

Para validação do *software* criado, foram apresentados alguns exemplos. Para validação do dimensionamento de perfis submetidos à flexão, foram realizadas no item 3.4.1 comparações entre os momentos fletores resistentes obtidos no *software*, via MRD e experimentalmente por Moen et al (2013). Para validação do dimensionamento de perfis submetidos a compressão axial, foram realizadas no item 3.4.2 comparações entre os momentos fletores resistentes obtidos no *software*, via MRD e experimentalmente por Moen e Schafer (2008).

Com base nos exemplos apresentados, observou-se que o *software* forneceu resultados compatíveis com os cálculos realizados com base no método da resistência direta e com os

resultados obtidos experimentalmente. Entretanto, para que o *software* seja validado, diversos testes ainda devem ser realizados.

Portanto, diversas melhorias ainda podem ser realizadas no *software*, visando melhor adequá-lo ao uso acadêmico e profissional. Algumas sugestões de melhoria são apresentadas na próxima seção.

5.2 Recomendações e Sugestões para Estudos Posteriores

5.2.1 Dimensionamento de perfis formados a frio com a presença de furos

Ao longo da dissertação, observou-se que diversos estudos ainda devem ser realizados quanto ao comportamento e ao dimensionamento de perfis formados a frio com a presença de furos.

Dentre estes, pode-se citar:

- a) Estudo sobre o comportamento e método de dimensionamento de perfis formado a frio com furos enrijecidos;
- b) Comportamento e método de dimensionamento de perfis formados a frio com furos em situação de incêndio;
- c) Comportamento e método de dimensionamento de perfis formados a frio com furos em mesas;
- d) Estudo sobre soluções arquitetônicas que podem ser adotadas no sistema *Light Steel Framing* visando reduzir a necessidade de execução de furos nos perfis;
- e) Estudo sobre as possíveis formas de execução de reforços para perfis nas regiões dos furos.

5.2.2 Futuras implementações do *software* CFD

Recomenda-se implementações para o aplicativo desenvolvido. Dentre elas, pode-se citar:

- a) Desenvolvimento de uma interface gráfica mais amigável com o usuário, indicando visualmente os elementos que sofrem flambagem local para cada caso estudado, tornando o *software* mais apto para uso didático;
- b) Implementação das normas AISI S100-16 e EN 1993-1-3:2006, visando facilitar aspectos didáticos inerentes ao estudo de tais normas;

- c) Implementação das demais prescrições da norma NBR 14323:2013, visando realizar o dimensionamento de estruturas de aço constituídas de perfis formados a frio;
- d) Implementação de outras seções comerciais, tal como a seção rack;
- e) Implementação do cálculo do momento fletor resistente de cálculo para flexão na menor inércia;
- f) Validação do dimensionamento de outras seções transversais implementadas por meio de diversos testes;
- g) Elaboração de um *software* para análise de estabilidade elástica de perfis formados a frio, semelhante ao CUFSM, visando facilitar estudos de relacionados à flambagem elástica e ao método da resistência direta;
- h) Compatibilização do *software* desenvolvido com o CUFSM, de forma que ambos possam se comunicar de maneira automática, carregando para o CUFSM as informações da seção transversal em estudo, obtendo suas as forças e momentos críticos de flambagem elástica e informando as mesmas ao CFD, para completo dimensionamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAQUS Standard version 6.9-2 [*Computer software*]. Providence, RI, Simulia

American Iron and Steel Institute - AISI S100 2007 – North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members. American Iron and Steel Institute, 2007.

American Iron and Steel Institute - AISI S100 2016 – North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members. American Iron and Steel Institute, 2016.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (2012). NBR 6355:2012. *Perfis estruturais de aço - Padronização*. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (2008). NBR 8800:2008. *Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios*. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (2013). NBR 14323:2013. *Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio*. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (2010). NBR 14762:2010. *Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio*. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (2014). NBR 15253:2014. Perfis de aço formados a frio, com revestimento metálico, para painéis estruturais reticulados em edificações – Requisitos gerais. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Australian/New Zealand Standard AS/NZS 4600:2005, Cold-formed Steel Structures, Sydney, Australia

Lue, D. M; Liu, J. Lin, C. H. (2007). Numerical Evaluation on Warping Constants of General Cold-Formed Steel Open Sections. *Steel Structures* 7 (2007) 297-309

EN 1993-1-3 (2006). Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-3: General rules. Supplementary rules for cold-formed members and sheeting.

EN 1993-1-5 (2006) Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-5: Plated structural elements

EN 1993-1-8 (2005) Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-8: Design of joints

Grey, C. N., e Moen, C. D. (2011). “Elastic buckling simplified methods for cold-formed steel columns and beams with edge-stiffened holes” 2011 annual stability Conf, Structural Stability Research Council, Pittsburgh.

Li, Z., & Schafer, B. W., 2010a. Buckling analysis of cold-formed steel members with general boundary conditions using CUFSM: conventional and constrained finite strip methods. Proceedings of the 20th Int. I. Spec. Conf. on Cold-Formed Steel Structures. St. Louis, MO. 2010

Li, Z., & Schafer, B. W., 2010b. Application of the finite strip method in cold-formed steel member design. *J. Constr. Steel Res.*,66(8-9), pp. 971-980

Moen, C. D., Schudlich, A. & Heyden, A., 2013. Experiments on Cold-Formed Steel C-Section Joists with Unstiffened Web Hole. *Journal of Structural Engineering*.139 (5) pp. 695-704.

Moen, C. D., & Schafer, B. W., 2008. Experiments on cold-formed steel columns with holes. *Thin-Walled Structures*, 46(2008), pp. 1164-1182

Moen, C. D., & Schafer, B. W., 2009. Elastic buckling of cold-formed steel columns and beams with holes. *Eng. Struct.*, 47(12), pp. 2812-2824

Moen, C. D., & Schafer, B. W., 2011. Direct Strength Method for Design of Cold-Formed Steel Columns with Holes. *J. Struct. Eng.*, 137(5), pp. 559-570

Moen, C. D., & Yu, C., 2010. Elastic Buckling of Thin-Walled Structural Components with Edge-Stiffened Holes. *51st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, 15 April 2010, Orlando, Florida

Rodrigues, F. C. (2016), Steel Framing: Engenharia. Manual de Construção em Aço – Rio de Janeiro: Aço Brasil/CBCA, 2016.

RODRIGUES, F.C. *Estudo Teórico-Experimental de Perfis de Chapa Dobrada Submetidos a Compressão*. COPPE – UFRJ, 1993. Tese de Doutorado.

Santiago, A. K.; Freitas, A. M. S; Crasto, R. C. M. (2012), Steel Framing: Arquitetura. Manual de Construção em Aço – Rio de Janeiro: IBS/CBCA, 2012.

Santos, Rafael. *Introdução à Programação Orientada a Objetos*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010. 366 p.

Schafer, B. W., & Ádány, S., 2006. Buckling analysis of cold-formed steel members using CUFSM: Conventional and constrained finite strip methods. *18th Int. Specialty Conf. on Cold Formed Steel Structures*, Wei-Wen Yu Center for Cold-Formed Steel Structures, Missouri Univ. of Science and Technology, Rolla, MO

Schafer, B. W., & Pekoz, T., 1998. Computational modeling of cold-formed steel: Characterizing geometric imperfections and residual stresses. *J. Constr. Steel Res.*, 47 (1998) pp. 193-210.

Uzzaman, A., Lim, G. B. P., Nash, D., Rhodes, J. & Young, B., 2013. Cold-formed steel sections with web openings subjected to web crippling under two-flange loading conditions – Part II: Parametric study and proposed design equations. *Thin-Walled Structures* 56 (2012) pp. 79-87.

von Kármán, T., Sechler, E.E., Donnell, L.H. (1932). "The Strength of Thin Plates In Compression". *Transactions of the ASME*, 54, pp. 53-57.

Web Crippling and Bending Interaction of Cold-Formed Steel Members RESEARCH REPORT RP02-2 MARCH 2002 REVISION 2006 Committee on Specifications for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members

Winter, G. (1947), Strength of thin steel compression flanges. *ASCE Trans*, 1947; 112: 527-54