\Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Faculdade de Engenharia

Gisele Ribeiro Affonso

Avaliação de ligações soldadas “T” entre vigas de perfil I ou H e colunas em perfis tubulares circulares

Rio de Janeiro
2014

Gisele Ribeiro Affonso

Avaliação de ligações soldadas “T” entre vigas de perfil I ou H e colunas em perfis tubulares circulares

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Orientadores: Prof. Dr. Luciano Rodrigues Ornelas de Lima
Prof. Dr. Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco

Rio de Janeiro

2014

CATALOGAÇÃO NA FONTE

UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

A257 Affonso, Gisele Ribeiro.

Avaliação de ligações soldadas “T” entre vigas de perfil I ou H e colunas em perfis tubulares circulares / Gisele Ribeiro Affonso. - 2014.

127 f.

Orientador: Luciano Rodrigues Ornelas de Lima.

Coorientador: Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco.

Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia Civil. 2. Método dos elementos finitos – Dissertações. 3. Ligações tubulares - Dissertações. I. Lima, Luciano Rodrigues Ornelas de. II. Vellasco, Pedro Colmar Gonçalves da Silva. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. IV. Título.

CDU 624:519.62

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Gisele Ribeiro Affonso

Avaliação de ligações soldadas “T” entre vigas de perfil I ou H e colunas em perfis tubulares circulares

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Aprovado em: 12 de março de 2014.

Banca Examinadora:

_____

Prof. Dr. Luciano Rodrigues Ornelas de Lima (Orientador)
Faculdade de Engenharia – UERJ

_____

Prof. Dr. Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco (Orientador)
Faculdade de Engenharia – UERJ

_____

Prof. Dr. Ricardo Rodrigues Araújo
Departamento de Engenharia Civil – CEFET-RJ

_____

Prof. Dra. Arlene Maria Sarmanho Freitas
Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP

Rio de Janeiro

2014

DEDICATÓRIA

A Deus, por me proporcionar a coragem, o entusiasmo, e a serenidade necessária para alcançar este objetivo. À toda minha família pela paciência, compreensão e o incentivo que me conduziram a mais uma meta alcançada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela força, entendimento e saúde.

Agradeço a toda minha família, minhas avós Maria e Alcilene (em memória), meu pai Vanderlei, ao meu irmão Lucas e em especial a minha mãe Patricia que foi, é e sempre será a minha maior incentivadora em toda a minha caminhada.

Aos meus amigos da UERJ, pela amizade, carinho e companheirismo durante esses anos.

Aos professores, em especial para meu querido professor e orientador Luciano Rodrigues Ornelas de Lima, por toda amizade e dedicação que serve como alicerce para a minha vida acadêmica e profissional.

Ao PGECIV e a UERJ, por proporcionar a realização deste feito.

A CAPES pelo apoio financeiro.

Gisele Ribeiro Affonso

RESUMO

AFFONSO, Gisele Ribeiro. *Avaliação de ligações entre vigas de perfil I ou H e colunas em perfis tubulares circulares*. 2014. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

Considerando uma nova realidade com o incremento do uso de perfis tubulares, este trabalho apresenta uma análise de ligações soldadas tipo “T” com perfis tubulares circulares (CHS) para a coluna e perfil I ou H para a viga com flexão no plano, efetuado com base nas normas EC3, CIDECT e a NBR 16239 comparando com o critério de deformação limite, proposto por Lu *et al.*, através de um modelo em elementos finitos desenvolvido no programa Ansys versão 12.0. A não-linearidade geométrica foi introduzida no modelo através da Formulação de Lagrange Atualizado. Com base nos resultados numéricos avaliados foram traçadas curvas momento-rotação para cada modelo com o objetivo de obter o momento resistente de cada ligação bem como a classificação da ligação quanto a capacidade de rotação, a influência dos parâmetros geométricos em cada modelo e o modo de falha que controlará o dimensionamento da ligação.

Palavras-chave: Ligações tubulares; Método dos elementos finitos; Análise numérica; Análise não linear; Momento-rotação.

ABSTRACT

AFFONSO, Gisele Ribeiro. *Evaluation of links between beams profile I or H columns and circular hollow sections*. 2014. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

Considering a new reality with the increased use of tubular profiles, this work presents an analysis of T welded connections with circular hollow sections (CHS) for the column profile and I or H for the beam subjected to in plane bending, this study was based on the EC3, CIDECT and the NBR 16239 standards and was also compared to the deformation limit criteria proposed by Lu *et al*.. The main aim was to develop through a finite element model in the Ansys program version 12.0. The geometric nonlinearity has been introduced into the model through a Updated Lagrangian Formulation. Based on the evaluated numerical results, moment-rotation curves were produced for each model in order to determine the moment resistance of each joint and their associated joint classification, rotation capacity, influence of the geometrical parameters for each model and the failure modes that will control the joint design.

Keywords: Hollow section joints; Finite element method; Numerical analysis; Nonlinear analysis; Moment-rotation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplos de estruturas em seções tubulares.....19

Figura 2 – Estádios da Copa 2014 com estruturas tubulares.....20

Figura 3 – Evolução das tensões de von Mises (MPa) [16]. 24

Figura 4 – Viga submetida a Torção [18]. 25

Figura 5 – Deformada da peça [18].....26

Figura 6 – Malha do modelo com concreto pré-moldado [21]. 27

Figura 7 – Correlação entre o modelo analítico e o experimental [22]. 27

Figura 8 – Ligação RHS viga – coluna [23]. 28

Figura 9 – Modos de ruína de ligações tubulares [26].....31

Figura 10 – Parâmetros geométricos: ligação T entre colunas com perfis circulares e vigas com seção I ou H. 32

Figura 11 – Parâmetros geométricos: ligação X entre colunas com perfis circulares e vigas com seção I ou H. 32

Figura 12 – Curva carga *versus* deslocamento do critério de deformação limite. 45

Figura 13 – Curva momento *versus* rotação do critério de deformação limite.....45

Figura 14 – Classificação das ligações [33]. 46

Figura 15 – Limites para a classificação das ligações [12].....47

Figura 16 – Método da inclinação inicial [16].....48

Figura 17 – Geometria do elemento finito SHELL181 [10]. 50

Figura 18 – Modelo de elementos finitos – Ligação T. 51

Figura 19 – Modelo de elementos finitos – ligação X. 52

Figura 20 – Comprimentos das Vigas (montante) e Colunas (banzo).....53

Figura 21 – Cargas aplicadas nas vigas. 54

Figura 22 – Gráfico da curva momento-rotação. 55

Figura 23 – Deslocamento da face da coluna. 56

Figura 24 – Modelo com 1 viga e 2 colunas – aplicação de carga unitária. 57

Figura 25 – Modelo com 1 viga e 2 colunas – Momento Fletor. 58

Figura 26 – Curva momento *versus* rotação com a classificação da ligação semirrígida.....59

Figura 27 – Gráfico da curva momento-rotação com a classificação da ligação semirrígida.....59

Figura 28 – Distribuição da tensão de von Mises – Viga IPE 240 [em MPa].....60

Figura 29 – Distribuição da tensão de von Mises – Coluna CHS 324,3x9,44 [em MPa]. 61

Figura 30 – Distribuição da tensão de von Mises – CHS324,3x9,44 com IPE 240 [em MPa]. 62

Figura 31 – Comparação entre a deformada da estrutura fornecida por Winkel [15] e obtida nesta trabalho 63

Figura 32 – Curvas momento *versus* rotação - grupo 1 - β=0,59 e η=0,88. 67

Figura 33 – Distribuição da tensão de von Mises – W 150 x 13,0 /φ168,3x6,3 [em MPa]. 68

Figura 34 – Deformada da estrutura – W 150 x 13,0 /φ168,3x6,3 [em MPa]. 69

Figura 35 – Curvas momento *versus* rotação - grupo 2 - β=0,59 e η=1,19. 71

Figura 36 – Gráfico da curva momento-rotação grupo 3 - β=0,46.....72

Figura 37 – Gráfico da curva momento-rotação grupo 4 - β=η=0,69.....73

Figura 38 – Gráfico da curva momento-rotação grupo 5 – 2γ=27,30. 75

Figura 39 – Gráfico da curva momento-rotação grupo 6 – 2γ=24,82. 76

Figura 40 – Gráfico da curva momento-rotação grupo 7 – 2γ=25,90. 78

Figura 41 – Gráfico da curva momento-rotação grupo 8 - β=0,41 e η=0,73.....79

Figura 42 – Gráfico da curva momento-rotação grupo 9 - β=0,47 e η=0,88.....80

Figura 43 – Gráfico da curva momento-rotação grupo 10 - β=0,48 e η=1,00.....82

Figura 44 – Gráficos da razão entre valores dos momentos. 85

Figura 45 – Gráficos da razão entre valores dos momentos com o fator de correção. 86

Figura 46 – Gráficos da razão entre a equação (53) e o método da inclinação. 89

Figura 47 – Gráficos da razão entre a equação (57) ou (58) e o método da inclinação – Fator de correção. 89

Figura A.1 – Curva momento rotação – Grupo 1.....99

Figura A.2 – Curva momento rotação – Grupo 2.....100

Figura A.3 – Curva momento rotação – Grupo 3.....101

Figura A.4 – Curva momento rotação – Grupo 4.....102

Figura A.5 – Curva momento rotação – Grupo 5.....103

Figura A.6 – Curva momento rotação – Grupo 6.....104

Figura A.7 – Curva momento rotação – Grupo 7.....107

Figura A.8 – Curva momento rotação – Grupo 8.....107

Figura A.9 – Curva momento rotação – Grupo 9.....108

Figura A.10 – Curva momento rotação – Grupo 10.....109

Figura B.1 – Distribuição da tensão de von Mises – W 200 x 15,0 / □168,3x6,3 [em MPa].– Grupo 2 110

Figura B.2 – Deformada da estrutura – W 200 x 15,0 / ϕ 168,3x6,3 [em MPa] – Grupo 2 111

Figura B.3 – Distribuição da tensão de von Mises – W310 x 23,8/φ219,1x10,0 [em MPa] – Grupo 3 112
Figura B.4 – Deformada da estrutura – W 310 x 23,8/ ϕ 219,1x10,0 [em MPa] – Grupo 3 113
Figura B.5 – Distribuição da tensão de von Mises – W 150 x 22,5 (H) / ϕ 219,1x8,8 [em MPa] – Grupo 4 114
Figura B.6 – Deformada da estrutura – W150 x 22,5 (H)/ϕ 219,1x8,8 [em MPa] – Grupo 4 115
Figura B.7 – Distribuição da tensão de von Mises – W200x35,9 (H) / ϕ 273,0x10 [em MPa] – Grupo 5 116
Figura B.8 – Deformada da estrutura – W200 x 35,9 (H) / ϕ 273,0x10 [em MPa] – Grupo 5 117
Figura B.9 – Distribuição da tensão de von Mises – W 200 x 35,9 (H) / ϕ 273,0x11 [em MPa] – Grupo 6 118
Figura B.10 – Deformada da estrutura – W200x35,9 (H) / ϕ 273,0x11 [em MPa] – Grupo 6 119
Figura B.11 – Distribuição da tensão de von Mises – HP 200 x 53,0 (H) / ϕ 323,8x12,5 [em MPa] – Grupo 7 120
Figura B.12 – Deformada da estrutura – HP 200 x 53,0 (H) / ϕ 323,8x12,5 [em MPa] – Grupo 7 121
Figura B.13 – Distribuição da tensão de von Mises – W 250 x 32,7 / ϕ 355,6x12,5 [em MPa] – Grupo 8 122
Figura B.14 – Deformada da estrutura – W 250 x 32,7 / ϕ 355,6x12,5 [em MPa] – Grupo 8 123

Figura B.15 – Distribuição da tensão de von Mises – W 310 x 44,5 / ϕ 355,6x14,2 [em MPa] – Grupo 9 124

Figura B.16 – Deformada da estrutura – W 310 x 44,5 / ϕ 355,6x14,2 [em MPa] – Grupo 9 125

Figura B.17 – Distribuição da tensão de von Mises – W 360 x 51,0 / ϕ 355,6x14,2 [em MPa] – Grupo 10 126

Figura B.18 – Deformada da estrutura – W360x51,0/ϕ 355,6x14,2 [em MPa] – Grupo 10 127

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades Mecânicas 52
Tabela 2 – Dimensões do perfil IPE240 53
Tabela 3 – Propriedades dos modelos numéricos analisados de ligações tipo T entre CHS (coluna) e seção I ou H (vigas) – parte 1 64
Tabela 4 – Propriedades dos modelos numéricos analisados de ligações tipo T entre CHS (coluna) e seção I ou H (vigas) – parte 2 65
Tabela 5 – Propriedades dos modelos numéricos analisados de ligações tipo T entre CHS (coluna) e seção I ou H (vigas) – parte 3 65
Tabela 6 – Propriedades dos modelos numéricos analisados de ligações tipo T entre CHS (coluna) e seção I ou H (vigas) – parte 4 66
Tabela 7 – Propriedades dos modelos numéricos analisados de ligações tipo T entre CHS (coluna) e seção I ou H (vigas) – parte 5 66
Tabela 8 – Propriedades dos modelos analisados de ligações tipo T grupo 1 67
Tabela 9 – Propriedades Modelos analisados de ligações tipo T grupo 2. 70
Tabela 10 – Propriedades Modelos analisados de ligações tipo T grupo 3. 72
Tabela 11 – Propriedades Modelos analisados de ligações tipo T grupo 4. 73
Tabela 12 – Propriedades Modelos analisados de ligações tipo T grupo 5. 74
Tabela 13 – Propriedades Modelos analisados de ligações tipo T grupo 6. 76
Tabela 14 – Propriedades Modelos analisados de ligações tipo T grupo 7. 77
Tabela 15 – Propriedades Modelos analisados de ligações tipo T grupo 8. 79
Tabela 16 – Propriedades Modelos analisados de ligações tipo T grupo 9. 80
Tabela 17 – Propriedades Modelos analisados de ligações tipo T grupo 10. 81
Tabela 18 – Comparação de resultados – Análise paramétrica. 83
Tabela 19 – Comparação de resultados – Rigidez da ligação. 87

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CFT	Concrete Filled Tubular
CHS	Circular Hollow Section
CIDECT	International Committee for the Development and Study of Tubular Structures
EC3	Eurocode 3 – European Committee for Standardisation – Design of Steel Structures
EC3 1-1	Eurocode 3 – Part 1-1: Design of Steel Structures – General rules and rules for buildings
EC3 1-8	Eurocode 3 – Part 1-8: Design of Steel Structures – Design of joints
ELS	Estado Limite de Serviço
ELU	Estado Limite Último
FEN	Faculdade de Engenharia
IIW	International Institute of Welding
MxΦ	Curva momento *versus* rotação
NBR 16239	Norma Brasileira NBR 16239:2013 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações com perfis tubulares.
RHS	Rectangular Hollow Section
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro
V	Vallourec do Brasil

LISTA DE SÍMBOLOS

b_1	Largura da mesa da viga
d_0	Diâmetro da seção transversal da coluna
$d_{1\%d0}$	Corresponde a 1% do diâmetro da coluna
$d_{3\%d0}$	Corresponde a 3% do diâmetro da coluna
f_y	Tensão de escoamento do aço
f_{y0}	Tensão de escoamento do aço do perfil da coluna
f_u	Tensão de ruptura do aço
h_1	Altura da seção transversal da viga
k_p	Parâmetro de cálculo
n	Parâmetro de cálculo
n_p	Parâmetro de cálculo
t_0	Espessura da coluna
t_1	Espessura da viga
$t_{1,f}$	Espessura da mesa da viga
$t_{1,w}$	Espessura da alma da viga
A_1	Área da seção transversal da viga
$C_{b,ip}$	Rigidez da ligação
$C^*_{b,ip}$	Rigidez da ligação com o fator de correção
C_1	Parâmetro de cálculo do CIDECT
E	Módulo de elasticidade
I_b	Momento de inércia da viga
K	Rigidez axial da mesa da viga
L_b	Comprimento da viga

$M_{b,ip}$	Momento fletor do plano da ligação
M_{ed}	Momento fletor solicitante
$M_{ip,1}$	Momento fletor no plano da ligação (CIDECT)
$M_{ip,1,Rd}$	Momento fletor resistente de cálculo no plano (EC3 e NBR: 16239)
$M_{op,1}$	Momento fletor fora do plano da ligação (CIDECT)
$M_{op,1,Rd}$	Momento fletor resistente de cálculo fora do plano (EC3 e NBR: 16239)
$M_{pl,0}$	Resistência à flexão da coluna (CIDECT)
M_S	Momento correspondente a rotação de 1% do diâmetro da coluna
M_u	Momento correspondente a rotação de 3% do diâmetro da coluna
M_0	Momento fletor aplicado na coluna (CIDECT)
M^*_1	Momento fletor resistente de cálculo no plano da ligação (CIDECT)
N	Carregamento axial
N_{ed}	Força normal solicitante
N_p	Carregamento axial de uma chapa
$N_{pl,0}$	Resistência axial da seção da coluna (CIDECT)
N_S	Carga correspondente ao deslocamento de 1% do diâmetro da coluna
N_u	Carga correspondente ao deslocamento de 3% do diâmetro da coluna
N_0	Força axial atuante na coluna (CIDECT)
$N_{1,Rd}$	Força axial resistente de cálculo (EC3 e NBR: 16239)
N^*_1	Força axial resistente de cálculo (CIDECT)
Q_{bu}	Parâmetro de cálculo do CIDECT
Q_f	Parâmetro de cálculo do CIDECT
Q_u	Parâmetro de cálculo do CIDECT
$S_{j,ini}$	Rigidez inicial da ligação
W_e	Módulo elástico

$W_{el,ip,1}$	Módulo elástico da seção no plano
$W_{el,op,1}$	Módulo elástico da seção fora do plano
β	Relação entre a largura da mesa da viga e o diâmetro da coluna
γ	Relação entre o diâmetro da coluna e duas vezes a sua espessura
γ_{a1}	Fator de segurança utilizado pela NBR:16239
γ_{M5}	Fator de segurança utilizado pelo EC3
η	Relação entre a altura da seção da viga e o diâmetro da coluna
θ_1	ângulo entre a viga e a coluna na ligação “T” ou entre a viga e a coluna na ligação “X”
$\Theta_{1\%}$	Rotação correspondente a 1% do diâmetro da coluna
$\Theta_{3\%}$	Rotação correspondente a 3% do diâmetro da coluna
$\sigma_{máx}$	Máxima tensão solicitante proveniente do elemento conectado
$\sigma_{p,Ed}$	Tensão axial solicitante na coluna
Δ	Deslocamento da viga
Δ_s	Deslocamento correspondente a 1% do diâmetro da coluna
Δ_u	Deslocamento correspondente a 3% do diâmetro da coluna
ϕ	Rotação da ligação

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO 18
1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 24
1.1 Generalidades 24
2 DIMENSIONAMENTO DE LIGAÇÕES ENTRE ELEMENTOS TUBULARES 30
2.1 Generalidades 30
2.2 Recomendações segundo EC3 31
2.2.1 Ligação T 32
2.2.2 Ligação X 35
2.3 Recomendações segundo CIDECT 36
2.3.1 Ligação T 37
2.3.2 Ligação X 39
2.4 Recomendações segundo a Norma Brasileira 41
2.4.1 Ligação T 41
2.4.2 Ligação X 43
2.5 Critérios de Deformação Limite 44
2.6 Classificação das ligações 46
2.7 Cálculo da rigidez nas ligações 48
3 DESCRIÇÃO E CALIBRAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO 50
3.1 Descrição do Modelo Numérico 50
3.2 Aplicação das normas e o critério de deformação limite 54
3.3 Classificação da ligação 57
4 ANÁLISE PARAMÉTRICA 64
5 CONCLUSÃO 91
5.1 Sugestões para trabalhos futuros. 93
REFERÊNCIAS 94
ANEXO A 99
ANEXO B 110