



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto - Escola de Minas
Departamento de Engenharia Civil
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil



ESTUDO DE LIGAÇÕES TIPO “T” COM PERFIS TUBULARES DE SEÇÃO COMPOSTA DE PAREDES ESBELTAS

Messias Júnio Lopes Guerra

Ouro Preto, março 2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS - GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**ESTUDO DE LIGAÇÕES TIPO “T” COM PERFIS TUBULARES
DE SEÇÃO COMPOSTA DE PAREDES ESBELTAS**

AUTOR: MESSIAS JÚNIO LOPES GUERRA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração: Construções Metálicas.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Arlene Maria Cunha Sarmanho

Ouro Preto, março de 2017

G934e Guerra, Messias Júnio Lopes.
Estudo de ligações tipo "T" com perfis tubulares de seção composta de paredes esbeltas [manuscrito] / Messias Júnio Lopes Guerra. - 2017.
123f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof^ª. Dr^ª. Arlene Maria Cunha Sarmanho.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
Área de Concentração: Construção Metálica.

1. Perfis tubulares. 2. Seções esbeltas. 3. Ligação tipo "T". 4. Análise experimental. 5. Análise numérica. I. Sarmanho, Arlene Maria Cunha. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 624.014

**ESTUDO DE LIGAÇÕES TIPO “T” COM PERFIS TUBULARES DE SEÇÃO
COMPOSTA DE PAREDES ESBELTAS**

AUTOR: MESSIAS JÚNIO LOPES GUERRA

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 14 de março de 2017, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:



Prof. Arlene Maria Cunha Sarmento, D. Sc. – UFOP (Presidente)



Prof. Eduardo de Miranda Batista, D. Sc. – COPPE/UFRJ



Prof. Luciano Rodrigues Ornelas de Lima, D. Sc. – UERJ

Aos meus pais

Agradecimentos

A Deus, que tanto me deu força para conquistar mais essa etapa profissional.

Aos professores Arlene e Gabriel, pela amizade, motivação, incentivo e orientação ao longo dos anos de convivência.

Ao meu pai, Messias, pelo voto de confiança e incentivo dado a mim.

A minha mãe, Hermelinda (in memoriam), por ser minha fonte de inspiração, dedicação e sempre guiar-me em tudo que tenho feito na vida.

Aos meus irmãos, Livia e Guilherme, pelo apoio e carinho.

A minha namorada, Karen, pelo incentivo e por acreditar em mim.

A todos os amigos do laboratório de estruturas pela amizade e colaboração nas pesquisas ao longo dos anos.

Aos amigos da república pela amizade e companheirismo.

Aos alunos do Jiu-jitsu de Ouro Preto pela amizade.

A CAPES pelo apoio financeiro.

Resumo

Os perfis tubulares de aço têm grande aplicabilidade na construção metálica e as ligações entre esses tipos de perfis possuem características particulares que devem ser consideradas na análise estrutural. Em função dessas características, as ligações são objeto de diversas pesquisas possuindo prescrições normativas específicas para o seu dimensionamento. As pesquisas, em geral, têm principalmente seus estudos, em perfis de seção compacta, em função do uso de cargas elevadas de projeto e de evitar modos locais de instabilidade. Para o caso de seções tubulares semi-compactas ou esbeltas as pesquisas são reduzidas e o comportamento e resistência das ligações pouco estudados. Assim, neste trabalho é apresentado um estudo teórico, numérico e experimental de ligações soldadas do tipo “T” formadas por perfis tubulares de aço de seções esbeltas, com seção transversal retangular no banzo e circular no montante da ligação. Os estudos realizados avaliam o comportamento, os modos de falha da ligação e a carga última pelo critério da deformação limite. Foram realizados ensaios em 12 modelos com variação dos parâmetros 2γ (razão entre a largura e a espessura do banzo) e β (razão entre o diâmetro do montante e a largura banzo). Os modelos experimentais foram ensaiados no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto com carregamento axial de compressão no montante. Os resultados experimentais foram comparados com as prescrições internacionais e nacional mais recentes devidamente adaptadas para perfis de paredes esbeltas e utilizando o critério de deformação limite. Os resultados indicaram o modo de falha A. A comparação entre os modelos experimentais e teóricos indicaram, em geral, boa correlação entre os resultados. Foi observado o valor do parâmetro 2γ , quanto menor o valor desse parâmetro maior a resistência da ligação. E quanto ao parâmetro β , quanto menor o seu valor tem-se maior proximidade entre os valores experimentais e teóricos, comparados com os valores de β maiores. Com relação ao modelo numérico, não houve boa correlação com os resultados experimentais, indicando a necessidade de ajustes e posterior calibração de resultados.

Palavras-chave: Perfis tubulares, seções esbeltas, ligação tipo “T”, análise experimental, análise numérica.

Abstract

The steel hollow sections have great applicability in the steel construction and the joints between these types of sections have particular characteristics that must be considered in the structural analysis. Because of these characteristics, the joints are the subject of several researches having specific normative prescriptions for their design. The researches, in general, mainly have their studies in compact section due to the use of high design loads and to avoid local modes of instability. For the case of semi-compact or slender hollow sections, the researches are not vast and the behavior and resistance of the joints little studied. Thus, in this work a theoretical, numerical and experimental study of welded joints of type "T" formed by hollow steel sections of slender sections, with rectangular hollow sections for the chord and circular hollow sections for the braces of the joint. The studies evaluate the behavior, the joint failure modes and the ultimate strength by the deformation limit criterion. Tests were carried out in 12 models with variation of the parameters 2γ (ratio between the width and thickness of the chord) and β (ratio between the diameter of the brace and width of the chord). The experimental models, tested in the Structures Laboratory of the Department of Civil Engineering at the Federal University of Ouro Preto, were subjected to axial loading of compression in brace. The experimental results were compared with the latest international and national prescriptions adapted for slender walls sections and using the deformation limit criterion. The results indicated the failure mode A. The comparison between the experimental and theoretical models indicated, in general, a good correlation between the results. It was observed that considering the value of parameter 2γ , the lower the value of this parameter, the greater the resistance of the joints. As for the parameter β , the lower its value, the greater the proximity between the experimental and theoretical values compared to the larger β values. Regarding the numerical model, there was not good correlation with the experimental results, indicating the necessity for adjustments and subsequent calibration of results.

Keywords: hollow sections, slender sections, "T" joints, experimental analysis, numerical analysis.

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1. Considerações iniciais	12
1.2. Treliças espaciais e multiplanares	15
1.3. Estruturas treliçadas planas – ligações	17
1.3.1. Composição das ligações de treliças planas	18
1.4. Objetivo	19
1.5. Justificativa.....	20
1.6. Metodologia.....	21
1.7. Pesquisas bibliográficas realizadas.....	22
2. DIMENSIONAMENTO DE LIGAÇÕES TUBULARES.....	35
2.1. Tipologia e geometria de ligações em perfis tubulares	35
2.2. Modos de falha	36
2.3. Nomenclatura e parâmetros geométricos	39
2.4. Condições de validade das relações geométricas	40
2.5. Deformação limite	42
2.6. Força axial resistente de cálculo para o montante para ligações tipo “T”	43
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	47
3.1. Nomenclatura dos modelos	47
3.2. Propriedades mecânicas.....	48
3.3. Definição dos modelos	50
3.4. Fabricação dos modelos.....	52
3.5. Imperfeições iniciais.....	55
3.6. Sistemas de apoio e carregamento dos ensaios	56
3.6.1. Sistema de apoios dos modelos	58
3.6.2. Sistema de carregamento	59
3.7. Instrumentação dos ensaios	61
3.7.1. Medição dos deslocamentos	61
3.7.2. Aplicação e medição do carregamento.....	63
3.7.3. Sistema de aquisição de dados experimentais	63
3.8. Metodologia de ensaio.....	64
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS	67
4.1. Modelos da série SE1	68
4.2. Modelos da série SE2	72
4.3. Modelos da série SE3	74
5. ANÁLISE NUMÉRICA.....	79
5.1. Introdução.....	79

5.2. Nomenclatura dos modelos	79
5.3. Elemento finito	80
5.4. Propriedades mecânicas dos materiais	81
5.5. Malha em elementos finitos.....	82
5.6. Condições de contorno	85
5.7. Critério de análise.....	88
5.8. Apresentação e análise dos resultados.....	88
6. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS	94
6.1. Comparação dos resultados experimentais com as prescrições.....	94
6.2. Comparação dos resultados experimentais, numéricos e teóricos.....	97
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	101
7.1. Trabalhos futuros.....	103
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104
APÊNDICE A	112
APÊNDICE B.....	119
APÊNDICE C.....	121

Lista de Símbolos

a) Letras romanas maiúsculas

A_0 - área da seção transversal do banzo

A_V - área efetiva de cisalhamento no banzo

E - módulo de Elasticidade

E_t - módulo Tangente

K_n - fator de redução da resistência devido a carga no banzo (PN:2011)

M_{Sd} - momento fletor solicitante de cálculo

$N_{0,Rd}$ - resistência da força axial devido ao cisalhamento na seção transversal do banzo na região do afastamento

$N_{0,Sd}$ - força axial solicitante de cálculo no banzo

$N_{0p,Sd}$ - valor de $N_{0,Sd}$ excluindo as forças de cálculo dadas pelas componentes das diagonais projetadas no eixo longitudinal do banzo da ligação

$N_{pl,0,Rd}$ - força axial de plastificação da seção do banzo

N_{Sd} - força normal solicitante na barra

Q_f - Fator de redução da resistência devido a carga no banzo (CIDECT, 2009)

$V_{pl,Rd}$ - resistência ao cisalhamento de uma seção

V_{Sd} - maior valor absoluto da força transversal atuante no banzo

W_0 - Módulo de resistência elástico do perfil do banzo

b) Letras romanas minúsculas

b_0 - largura do tubo retangular do banzo

b_{eff} - largura efetiva para o cálculo da resistência da barra

$b_{e,p}$ - largura efetiva para o cálculo da resistência do banzo ao cisalhamento

b_i - largura do tubo quadrado e retangular da barra i

d_i - diâmetro do tubo "i" de seção circular

e - excentricidade das ligações

f_u - tensão de ruptura à tração do aço

f_y - tensão de escoamento do aço

h_0 - altura do tubo retangular do banzo.

i - índice que indica o número da barra:

$i = 0$ – representa o banzo

$i = 1$ – representa a diagonal comprimida das ligações

$i = 2$ – representa a diagonal tracionada das ligações

$i = 3$ – representa o montante

n - resistência ao escoamento para banzos de seções quadradas ou retangulares

d_i - diâmetro externo da seção transversal do tubo “ i ”

t_i - espessura da parede do tubo “ i ”

c) Letras gregas minúsculas

α - coeficiente utilizado para determinar a área efetiva de cisalhamento da barra principal.

β - razão entre os diâmetros dos membros e a largura do banzo.

η - relação entre a altura da diagonal ou montante no plano da estrutura e a largura do banzo.

γ - relação entre o diâmetro ou largura da seção transversal da barra principal de uma ligação “ K ” e o dobro de sua espessura.

θ_i - ângulo entre as barras principais e secundárias.

ν - coeficiente de Poisson.

$\sigma_{0,Sd}$ - máxima tensão de compressão no banzo.

$\sigma_{p,Sd}$ - tensão de compressão no banzo descontando a contribuição dos membros.