



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

Universidade Federal de Ouro Preto - Escola de Minas

Departamento de Engenharia Civil

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil



**ANÁLISE TEÓRICA-EXPERIMENTAL DE LIGAÇÕES COM PERFIS
METÁLICOS TUBULARES (RETANGULARES E CIRCULARES)
CONSIDERANDO O EFEITO DO CARREGAMENTO DO BANZO**

GABRIEL VIEIRA NUNES

Ouro Preto, setembro 2017

N972a

Nunes, Gabriel Vieira.

Análise teórica-experimental de ligações com perfis metálicos tubulares (retangulares e circulares) considerando o efeito do carregamento do banzo [manuscrito] / Gabriel Vieira Nunes. - 2017.

113f.: il.: color; grafs; tabs.

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

Tese (Doutorado) - 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. Estruturas metálicas. 2. Perfis tubulares. 3. Ligações metálicas. I. Sarmanho, Arlene Maria Cunha . II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 624.014.2

**ANÁLISE TEÓRICA-EXPERIMENTAL DE LIGAÇÕES COM PERFIS
METÁLICOS TUBULARES (RETANGULARES E CIRCULARES)
CONSIDERANDO O EFEITO DO CARREGAMENTO DO BANZO**

AUTOR: GABRIEL VIEIRA NUNES

Esta tese foi apresentada em sessão pública e aprovada em 28 de setembro de 2017, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:


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


Prof. Francisco Antônio Romero Gesualdo, D. Sc. – UFU


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


Prof. Ana Amélia Mazon, D. Sc. – UFSJ


Prof. Joel Donizete Martins, D. Sc. - IFMG

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

**ANÁLISE TEÓRICA-EXPERIMENTAL DE LIGAÇÕES COM PERFIS
METÁLICOS TUBULARES (RETANGULARES E CIRCULARES)
CONSIDERANDO O EFEITO DO CARREGAMENTO DO BANZO**

Gabriel Vieira Nunes

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

Tese de Doutorado 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 Doutor em Engenharia Civil, área de concentração: Construção Metálica.

Ouro Preto, setembro 2017

Aos meus pais Vavá e Iêda

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, simplesmente, por tudo.

À professora e amiga Arlene pela amizade, pelos ensinamentos e pela paciência

Ao amigo e parceiro de pesquisa Messias.

Ao amigo Luiz Antônio Barbieri.

Aos amigos do laboratório, especialmente ao Flávio, Juliano, Ana Amélia, Letícia, Lucas Roquete, Messias, Daniel, Lucas Escânio, JB, Luiz, Ellen e Vinicius.

Ao JB pela força nas figuras.

Ao Celso pela disponibilidade e apoio na fabricação dos protótipos e do aparato de ensaio.

Aos funcionários do laboratório: Dekinha, João, Gilney e “Seu” Osvaldo (in memorian).

Ao Professor Rodrigo Porcaro pela ajuda na determinação do tipo de aço dos perfis utilizados neste trabalho.

Ao Professor Luciano e ao Laboratório de Engenharia Civil da UERJ pelos ensaios de caracterização.

A todos os ex-alunos e moradores da Boemia pela amizade.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo experimental, teórico e numérico de ligações tubulares de sistemas treliçados do tipo “T” compostas por perfis tubulares retangulares no banzo e perfis tubulares circulares no montante. As análises foram realizadas considerando carregamento axial de compressão no montante e de tração ou compressão no banzo. Com o carregamento no banzo foi possível avaliar sua influência na capacidade resistente da ligação. Foram realizados 23 ensaios sendo divididos em três séries distintas segundo os parâmetros geométricos β e 2γ . As séries contemplam ensaios com sete níveis diferentes de carregamento, sendo três níveis de carregamento de compressão, três de tração e sem carregamento no banzo. Os resultados experimentais indicaram a eficiência do aparato de ensaio desenvolvido e o modo de falha de plastificação no banzo (Modo A). O deslocamento relativo da face do banzo foi medido experimentalmente e seus valores utilizados para determinação da força resistente da ligação segundo o critério de deformação limite. Foi desenvolvido modelo numérico em elementos finitos utilizando o programa Ansys. O elemento utilizado foi de casca e os resultados foram comparados com os resultados experimentais. O modelo numérico foi calibrado com os testes experimentais para cada protótipo e diferentes condições de carregamento. Os resultados indicam uma boa correlação que permite o seu uso para determinar a resistência das ligações. Os resultados numéricos e experimentais foram comparados às prescrições da NBR 16239: 2013 e ISO 14346: 2013. Os resultados indicaram boa correlação quando não há carregamento no banzo. Por outro lado, com força de compressão ou tração, não houve boa correlação. Observou-se uma redução na resistência das ligações associada à compressão axial no banzo. No entanto, um aumento na resistência das ligações foi verificado para os testes em que carregamento de tração foi aplicado no banzo. Foram propostas novas equações para compressão e tração no banzo. Os resultados obtidos mostraram boa correlação das equações propostas quando comparadas com resultados experimentais e numéricos.

Palavras-chave: Estruturas metálicas, perfis tubulares, ligações

ABSTRACT

This work presents an experimental, theoretical and numerical study of welded T-joints, formed by structural hollow sections, with rectangular cross-sections for the chords and circular for the braces. The study considered the application of axial compression loads to the braces and tension or compression loads to the chords, in order to analyze the influence of these loads in the joint's bearing capacity. Twenty-three tests were conducted, which were divided into three distinct series, according to the geometric parameters β and 2γ . The test series contemplate seven different levels of axial loads applied to the chords: three levels of compression loads, three of tension loads and one without any load applied to the braces. The experimental results indicated the efficiency of the developed apparatus for tests, and showed that the chord plastification (Mode A) was the predominant failure mode. The displacement of the chord's face was measured experimentally and the brace load bearing capacity was determined by the deformation limit criteria. A numerical model was developed in finite elements using the program Ansys, and the numerical results were compared with the experimental ones. The numerical model was calibrated with the experimental tests for each prototype and different conditions of loads. The results indicated a good correlation, allowing the use of these methods to predict the joints' resistance. The numerical and experimental results were compared to the prescriptions of NBR 16239:2013 (*Design of steel and composite structures for buildings using hollow sections*) and ISO 14346:2013 (*Static design procedure for welded hollow-section joints - Recommendations*). The results indicated a good correlation for the case without axial loads applied to the chord. On the other hand, to the cases with compression or tension loads applied to the chord, a worse correlation was observed. A reduction in the joint's resistance was observed when axial compression loads were applied to the brace. However, an increase of the joint's resistance was verified for the tests where tension loads were applied to the chord. New equations for the cases where compression and tension loads are applied to the chord were proposed. The results obtained showed good correlation of the proposed equations with the experimental and numerical results.

Keywords: Steel structures, hollow sections, joints

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO.....	iii
ABSTRACT	iv
1 INTRODUÇÃO	7
1.1 Considerações Iniciais	7
1.2 Estruturas Treliçadas Planas em Perfis Tubulares – Ligações	9
1.3 Objetivos.....	12
1.4 Justificativa.....	13
1.5 Metodologia.....	14
1.6 Pesquisas Realizadas	15
1.7 Tipologia e Geometria de Ligações em Perfis Tubulares.....	19
1.8 Modos de Falha	20
1.9 Modo de Falha A – Plastificação da face do banzo.....	22
1.10 Nomenclatura e Parâmetros Geométricos	24
1.11 Condições de Validade das Relações Geométricas para Ligações Soldadas	25
1.12 Verificação da Ligação “T”	27
1.12.1 Fator de Redução k_n - NBR 16239:2013	31
1.12.2 Fator de Redução Q_f - ISO 14346:2013	31
2 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	33
2.1 Descrição dos Protótipos	33
2.2 Propriedades Mecânicas dos Materiais	37
2.3 Protótipos.....	37
2.4 Sistema de Apoio e Carregamento	38
2.5 Instrumentação e Aquisição de Dados.....	45
2.5.1 Extensômetros	45
2.5.2 LVDT (Load Variacional Displacement Transducer)	46

2.5.3	Atuadores e Células de Carga.....	48
2.5.4	Sistema de Aquisição de Dados	50
2.5.5	Metodologia de Ensaio	51
3	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS	57
3.1	Deformação Específica.....	58
3.2	Série 1- SE1	64
3.3	Serie 2 - SE2	67
3.4	Serie 3 - SE3	69
3.5	Comparações entre as Séries	70
4	MODELO NUMÉRICO	72
4.1	Deformação Limite.....	72
4.2	Propriedades Mecânicas dos Materiais Utilizados	73
4.3	Características do Modelo	74
4.3.1	Elemento Finito Utilizado	74
4.3.2	CrITÉRIOS de Análise	75
4.3.3	Modelo.....	75
4.3.4	Condições de Apoio	76
4.3.5	Calibração dos Modelos Numéricos.....	77
4.3.6	Tensões e Deformações	83
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS	87
5.1	Carga no Montante <i>versus</i> Deslocamento Relativo da Face Superior do Banzo	87
5.2	Coeficiente de Redução	96
5.3	Equação Proposta	99
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	104
7	BIBLIOGRAFIA	109