



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

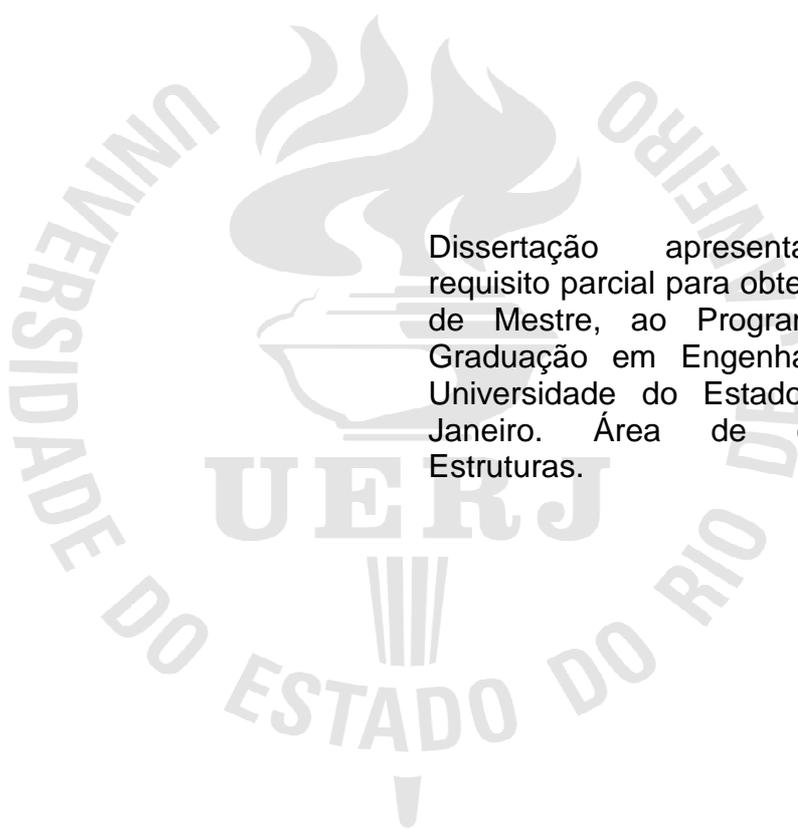
Flávio Ferreira Mendes

**Avaliação da influência de esforços normais no banzo no  
comportamento estrutural de ligações tubulares em aço**

Rio de Janeiro  
2015

Flávio Ferreira Mendes

**Avaliação da influência de esforços normais no banzo no comportamento  
estrutural de ligações tubulares em aço**



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. Luciano Rodrigues Ornelas de Lima  
Prof. Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco  
Prof. Evandro da Silveira Goulart

Rio de Janeiro

2015

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

M538 Mendes, Flávio Ferreira.

Avaliação da influência de esforços normais no banzo no comportamento estrutural de ligações tubulares em aço / Flávio Ferreira Mendes. - 2015.

82 f.

Orientadores: Luciano Rodrigues Ornelas de Lima, Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco, Evandro da Silveira Goulart.

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

1. Engenharia Civil. 2. Comportamento estrutural – Dissertações. 3. Perfis tubulares – Dissertações. 4. Aço tubular – Dissertações. I. Lima, Luciano Rodrigues Ornelas de. II. Vellasco, Pedro Colmar Gonçalves da Silva. III. Goulart, Evandro da Silveira. IV. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. V. Título.

CDU 624.07

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

---

Assinatura

---

Data

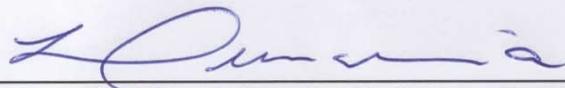
Flávio Ferreira Mendes

Avaliação da influência de esforços normais no banzo no comportamento estrutural de ligações tubulares em aço.

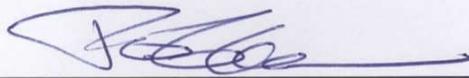
Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Aprovada em: 15 de dezembro de 2015.

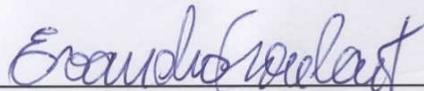
Banca Examinadora:



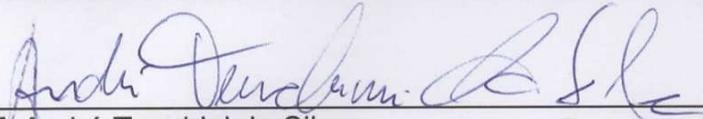
Prof. Luciano Rodrigues Ornelas de Lima - Presidente / Orientador  
Faculdade de Engenharia - UERJ



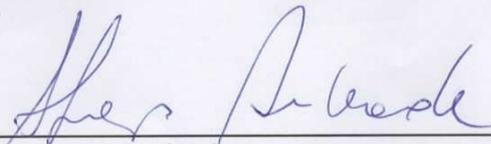
Prof. Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco - Orientador  
Faculdade de Engenharia - UERJ



Prof. Evandro da Silveira Goulart - Orientador  
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio



Prof. André Tenchini da Silva  
Faculdade de Engenharia - UERJ



Prof. Sebastião Arthur Lopes de Andrade  
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio

Rio de Janeiro  
2015

## DEDICATÓRIA

A minha Família pelo apoio e pela compreensão durante toda a realização deste trabalho.

## **AGRADECIMENTOS**

A todos os professores do PGECIV que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

A toda a minha família e amigos que me deram força e apoio nos momentos mais importantes deste curso.

Ao Prof. Luciano Rodrigues Ornelas de Lima pela atenção, dedicação e competência na condução desta orientação.

Ao Prof. Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco pelos conhecimentos transmitidos nas reuniões do projeto.

Ao Prof. Sebastião Arthur Lopes de Andrade pela ajuda na confecção e preparação das ligações e acessórios para a realização dos ensaios.

Ao Prof. Evandro da Silveira Goulart, pelo apoio na preparação e execução dos ensaios.

Ao Prof. Ricardo Rodrigues de Araújo, pelo apoio e transmissão dos conhecimentos valiosos para o desenvolvimento deste projeto.

Ao Engenheiro Antônio Inácio, do Laboratório de Engenharia Civil da UERJ – LEC, e sua equipe, pelo profissionalismo, dedicação e empenho no auxílio na realização dos ensaios utilizados neste trabalho.

A todos os colegas de curso pelo companheirismo e pelo apoio nas atividades desenvolvidas neste período.

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

## RESUMO

Mendes, Flávio Ferreira. *Avaliação da influência de esforços normais no banzo no comportamento estrutural de ligações tubulares em aço*. 2015. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

Com a difusão do uso de perfis tubulares metálicos no Brasil a partir da segunda metade do século XX, acompanhando uma tendência mundial e já há muito praticada em países como Alemanha, Inglaterra, Canadá, Japão e Estados Unidos, e ainda com o surgimento de novas tecnologias permitindo a criação de perfis tubulares com aço de alta resistência, com tensão de escoamento em torno de 1.000 MPa, torna-se necessário o aperfeiçoamento das técnicas de dimensionamento e de análise estrutural existentes. Se por um lado existem significativos avanços nas pesquisas e no desenvolvimento de novos métodos e tecnologias para utilização de perfis tubulares metálicos, por outro lado, é de extrema relevância e necessário o aperfeiçoamento e adequação das metodologias atuais de cálculo e dimensionamento, o que permitirá a utilização racional, segura e mais econômica destes materiais. Este trabalho tem por objetivo comparar os resultados das reações e/ou esforços resistentes obtidos pelas formulações das normas técnicas NBR 16.239 [3], EC3-1.8 [4] e ISO 14.346 [5] com os resultados de ensaios experimentais de ligações do tipo T formadas por perfis RHS no banzo e SHS no montante. Para tal foram ensaiados sete espécimes construídos com perfil RHS 100x80x6,3mm no banzo e SHS 60x60x6,3mm no montante submetidos a carga de compressão no montante e variando-se o nível de esforço normal no banzo. Com os resultados destes ensaios foram elaboradas análises detalhadas do comportamento estrutural desta amostra considerando os referidos parâmetros de cálculos. As análises do presente trabalho permitiram comparar os valores, de resistência última das ligações ensaiadas, obtidos por meio do critério de deformação limite proposto por diversos pesquisadores com os resultados teóricos determinados com base nas prescrições constantes nas normas técnicas mencionadas anteriormente. Conclui-se, considerando os parâmetros geométricos da ligação avaliada neste estudo, que os resultados teóricos obtidos pelas prescrições normativas quando comparados com os ensaios experimentais foram compatíveis para o caso da ligação sem aplicação de esforço normal no banzo e para os casos em que houve aplicação de esforço axial de compressão de até o limite de 70% da carga de plastificação para as normas NBR 16.239 [3] e EC3-1.8 [4] e se mostraram conservadores para a norma ISO 14.346 [5]. Nos casos em que houve aplicação de esforço axial de tração no banzo os resultados foram conservadores em todas as normas.

Palavras-chave: Ligações tubulares; Ligação estrutural do tipo T; Esforço normal de tração e de compressão no banzo; comportamento estrutural da Ligação tipo T.

## ABSTRACT

Mendes, Flávio Ferreira. *Assessment of the influence of axial forces over the chord structural behavior of tubular steel connections*. 2015. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

The second half of the twentieth century was associated to widespread use of structural hollow sections in Brazil following a worldwide trend observed in countries like Germany, England, Canada, Japan and the United States. In addition, new technologies have been allowing the development of high resistance tubes with yield stress around 1,000 MPa, made with materials such as stainless steel, and made possible the use of alternative cross-shaped hollow sections such as triangular and elliptical. All these aspects urged for an improvement of the procedures associated to structural design and analysis that could lead to a rational, safe and economical use of these materials. This work aims to experimentally investigate T joints formed by RHS and SHS structural sections and compare their response with the recommendations contained in NBR 16239 [3], EC3-1.8 [4] and ISO 14346 [5] design standards. Seven specimens were tested, made of RHS 100x80x6,3mm and SHS 60x60x6,3mm, subjected to compressive load in the brace and varying the level of normal force on the chord. The test results enable a comprehensive analysis of the structural performance where the ultimate capacity of the T joints could be evaluated and compared to the usual deformation limit criteria and to the theoretical results present in current design standards. One of the main conclusions of the present study, for the investigated T joints geometries, was that the NBR 16239 [3] and EC3-1.8 [4] forecasted ultimate load values were compatible to the results obtained in the experiments for cases without chord forces and for compressive chord forces up to 70% of the plastic cross section capacity. Alternatively, in these cases, the ISO 14346 [5] led to conservative predictions. The tests with tension chord axial forces also led to conservative predictions for the three investigated design standards.

Keywords: Chord axial forces; Tubular Joints, T Joint.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ligação tipo T (RHS de 100x80x6,3mm no banzo e SHS de 60x60x6,3mm no montante) – um dos espécimes utilizados neste estudo.....	16
Figura 2 – Museu do Amanhã (em construção) – Rio de Janeiro - Brasil. ....	18
Figura 3 – Sony Center – Berlin - Alemanha.....	18
Figura 4 – Hotel Myriad - Lisboa – Portugal. ....	19
Figura 5 – Ponte móvel – Barcelona – Espanha. ....	19
Figura 6 – Edifício da Biblioteca Pública - Newcastle – Reino Unido.....	20
Figura 7 – Roda Gigante London Eye – Londres - Inglaterra.....	20
Figura 8 – Estação de trem Berlin Hauptbahnhof – Berlin – Alemanha. ....	21
Figura 9 – Millennium Bridge – Londres – Inglaterra.....	21
Figura 10 – Definições dos tipos de ligações tubulares soldadas segundo a NBR 16239 [3]. ....	32
Figura 11 – Definições dos modos de falha das ligações, segundo a NBR 16239 [3]. ....	33
Figura 12 – Gráfico indicando a capacidade de carga da ligação em função do proporção da carga de plastificação do banzo aplicada no seu eixo axial.....	42
Figura 13 – Montagem do pórtico de reação utilizado nos ensaios das ligações.....	43
Figura 14 – Ponto e sentido de aplicação da força e posicionamento das rosetas e extensômetros lineares nas ligações ensaiadas.....	46
Figura 15 – Ponto e sentido de aplicação da força e posicionamento dos transdutores de deslocamento nas ligações ensaiadas.....	47
Figura 16 – Equipamentos e instrumentos utilizados na realização dos ensaios das ligações estudadas neste trabalho.....	48
Figura 17 – Gráfico tensão versus deformação do aço do perfil RHS do banzo.....	49
Figura 18 – Corpos de provas retirados dos perfis tubulares das ligações avaliadas. ....	50
Figura 19 – Ensaio à tração nos corpos de prova. ....	50
Figura 20 – Esquema estrutural, pontos de aplicação das cargas e condições de contorno das ligações ensaiadas.....	51

Figura 21 – Posição de instalação do macaco hidráulico permitindo a aplicação do esforço axial de compressão no banzo da ligação.....	52
Figura 22 – Posição de instalação do macaco hidráulico permitindo a aplicação do esforço axial de tração no banzo da ligação. ....	52
Figura 23 – Ciclo de carga de um dos sete ensaios realizados. ....	53
Figura 24 – Falha na solda no momento da realização do ensaio T50%TNB.....	56
Figura 25 – Indicação do reforço da solda nos demais espécimes ensaiados com esforço axial de tração no banzo. ....	56
Figura 26 – Gráficos com resultados comparativos da resistência obtida nos ensaios <i>versus</i> resistência teórica das ligações ensaiadas.....	57
Figura 27 – Curvas representativas da relação carga <i>versus</i> deslocamento de cada uma das ligações ensaiadas.....	58
Figura 28 – Curvas representativas da relação carga <i>versus</i> deslocamento para as ligações ensaiadas submetidas ao esforço axial de tração. ....	59
Figura 29 – Curvas representativas da relação carga <i>versus</i> deslocamento para as ligações ensaiadas submetidas ao esforço axial de compressão.....	59
Figura 30 – Vista geral deformada dos protótipos ensaiados. ....	62
Figura 31 – Tensões de <i>von Mises</i> medidas no banzo das ligações ensaiadas com aplicação de esforço axial de compressão neste elemento. ....	64
Figura 32 – Tensões de <i>von Mises</i> medidas no banzo das ligações ensaiadas com aplicação de esforço axial de tração neste elemento.....	65
Figura 33 – Tensões de <i>von Mises</i> no banzo da ligação ensaiada sem aplicação de esforço axial neste elemento. ....	66
Figura 34 – Curvas carga <i>versus</i> deformação dos banzos e dos montantes das ligações ensaiadas submetidas ao esforço axial de compressão no banzo. ....	67
Figura 35 – Curvas carga <i>versus</i> deformação dos banzos e dos montantes das ligações ensaiadas submetidas ao esforço axial de tração no banzo...	68
Figura 36 – Curva carga <i>versus</i> deformação dos banzo e do montante da ligação ensaiada sem esforço axial no banzo. ....	69
Figura 37 – Curva carga <i>versus</i> deformação dos banzos das ligações ensaiadas para posição de leitura número 1 dos extensômetros lineares (EXT1), inclusive com os ciclos de cargas realizados nos ensaios.....	71

Figura 38 – Valor de resistência de ligações submetidas a esforços axiais de compressão ou de tração segundo as prescrições previstas nas normas técnicas e de acordo com os ensaios experimentais realizados.....	73
Figura 39 – Valores teóricos obtidos pelas prescrições normativas comparados com os resultados experimentais. ....	74

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros geométricos (requisitos e verificações).....	35
Tabela 2 – Parâmetros de cálculo da capacidade de carga de ligações do tipo T (RHS-SHS / modo de falha A) – NBR 16239 [3]. .....	36
Tabela 3 – Parâmetros de cálculo da capacidade de carga de ligações do tipo T (RHS-SHS / plastificação da face superior do banzo) – EC3-1.8 [4].....	38
Tabela 4 – Parâmetros de cálculo da capacidade de carga de ligações do tipo T (RHS-SHS / plastificação da face superior do banzo) – ISO 14346 [5].	40
Tabela 5 – Dados geométricos dos espécimes ensaiados. ....	44
Tabela 6 – Propriedades mecânicas e geométricas do banzo das ligações avaliadas. .....	49
Tabela 7 – Sequência de realização dos ensaios experimentais.....	55
Tabela 8 – Comparação entre os resultados experimentais obtidos nos ensaios com os valores teóricos obtidos pelas normas técnicas. ....	61
Tabela 9 – Equações para obtenção da tensão de von <i>Mises</i> . ....	63
Tabela 10 – Quadro comparativo entre os resultados experimentais obtidos nos ensaios com os valores teóricos segundo as prescrições normativas. .	72

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Eurocode	European Committee for Standardisation
FEN	Faculdade de Engenharia
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro
LEC	Laboratório de Engenharia Civil
NBR	Norma Brasileira Registrada
ISSO	International Organization for Standardization
EC3	European Committee for Standardisation – Desing of Steel Structures (Eurocode 3)
CIDECT	Comité International pour le Développement et l'Etude de la Construction Tubulaire
HHS	Hollow Structural Section
CHS	Circular Hollow Section
RHS	Rectangular Hollow Section
SHS	Square Hollow Section
EHS	Elliptical Hollow Section
ELU	Estado Limite Último
ELS	Estado Limite de Serviço

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_0$	área da seção transversal do banzo
$G$	gap - afastamento entre os elementos soldados
$E$	módulo de elasticidade
$b_0$	largura da seção transversal do banzo
$h_0$	altura da seção transversal do banzo
$t_0$	espessura da parede do banzo
$d_1$	largura do montante
$t_1$	espessura da parede do montante
$\Theta$	ângulo entre o montante e o banzo
$f_y$	tensão de escoamento do aço
$f_u$	tensão de ruptura do aço
$f_w$	tensão de escoamento da solda
$n$	razão entre a largura da diagonal ou montante e a largura do banzo
$\gamma$	razão entre a largura do banzo e duas vezes a sua espessura
$N_{i,Rd}$	força axial resistente de cálculo de diagonal ou montante na ligação ( $i = 1, 2, 3$ )
$N_{i,Sd}$	força axial solicitante de cálculo de diagonal ou montante na ligação ( $i = 1, 2, 3$ )
$N_{pl}$	esforço normal de plastificação
$N_{i,Ed}$	força axial solicitante ( $i = 1, 2, 3$ )
$\Delta_s$	deslocamento correspondente a 1% da largura da seção transversal do banzo
$\Delta_u$	deslocamento correspondente a 3% da largura da seção transversal do banzo
$M_{0,Sd}$	momento fletor solicitante de cálculo na ligação
$N_S$	carga correspondente ao deslocamento de 1% da largura do banzo
$N_U$	carga correspondente ao deslocamento de 3% da largura do banzo
$N_{pico}$	carga de pico
$k_n$	parâmetro de cálculo
$\varepsilon$	Parâmetro definido pela equação $\sqrt{235} \cdot f_y$

$\gamma_{al}$	fator de segurança utilizado pela NBR 16239
$\gamma_{M5}$	fator de segurança utilizado pelo Eurocode
$\gamma_N$	coeficiente de ajustamento utilizado pela NBR 16239
$\gamma_{M0}$	coeficiente de ponderação utilizado pelo Eurocode
$M_{el}$	momento elástico da seção
$M_{pl}$	momento plástico da seção
$W_{0,PL}$	módulo plástico da seção
$W_{el,y}$	módulo elástico da seção
$I$	momento de inércia da seção transversal
$N_{EXP}$	resistência da ligação obtida experimentalmente
$N_{EC3}$	resistência da ligação obtida pelo Eurocode
$N_{NBR}$	resistência da ligação obtida pela NBR 16239
$N_{ISO}$	resistência da ligação obtida pela ISO 14346
$N_{def}$	resistência da ligação obtida pelo critério de deformação limite
$Q_u$	parâmetro de cálculo da ISO 14346
$Q_f$	parâmetro de cálculo da ISO 14346
$C_1$	parâmetro de cálculo da ISO 14346

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
<b>1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>25</b>
1.1 Principais estudos realizados .....	25
1.2 Critério de deformação limite .....	29
<b>2 DIMENSIONAMENTO DE LIGAÇÕES COM PERFIS TUBULARES (RHS-SHS)</b> .....	<b>31</b>
2.1 Generalidades e especificações .....	31
2.2 Dimensionamento de ligações do tipo T .....	35
<b>3 ENSAIOS EXPERIMENTAIS</b> .....	<b>43</b>
3.1 Introdução .....	43
3.2 Características dos protótipos de ligação e instrumentação dos ensaios ..	44
3.3 <i>Propriedades</i> mecânicas e geométricas dos protótipos ensaiados.....	49
3.4 Preparação dos ensaios e sistema de aplicação de carga.....	51
<b>4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS: CONSIDERAÇÕES E ANÁLISES</b> .....	<b>54</b>
4.1 Introdução .....	54
4.2 Sequência de Realização dos Ensaios.....	55
4.3 Análise dos Resultados .....	56
4.3.1 Análise das curvas carga <i>versus</i> deslocamento .....	56
4.3.2 Análise do comportamento do banzo das ligações estudadas por meio dos dados obtidos nas rosetas .....	63
4.3.3 Análise do comportamento do banzo e do montante das ligações estudadas por meio dos dados obtidos nos extensômetros lineares...	67
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>76</b>
5.1 Introdução .....	76
5.2 Principais conclusões.....	77
5.3 Sugestões para trabalhos futuros .....	78
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>79</b>

## INTRODUÇÃO

### Generalidades

Com a difusão do uso de perfis tubulares metálicos no Brasil, a partir da segunda metade do século XX, acompanhando uma tendência mundial e já há muito praticada em países mais desenvolvidos como Alemanha, Inglaterra, Canadá, Japão e Estados Unidos, e ainda com o surgimento de novas tecnologias permitindo a criação de perfis tubulares mais resistentes, de alta resistência, com tensão de escoamento em torno de 1.000 MPa, o consumo de perfis estruturais tem sido cada vez maior.

Este aumento de demanda de consumo, implica em uma produção industrializada e contínua com emprego permanente de novas tecnologias objetivando a redução de custos e a maior disponibilidade destes perfis tubulares para o mercado.

Atualmente no Brasil pode-se citar fabricantes de perfis tubulares estruturais: a Tuper S.A. [1] e Vallourec Tubos do Brasil e [2]

Ao considerar adequadamente as características mecânicas das seções tubulares em aço estrutural, como a resistência a compressão, flexão, resistência a flambagem e a capacidade de resistir à torção, é possível ao engenheiro estrutural elaborar e desenvolver estruturas mais leves e mais econômicas quando comparadas com o uso de perfis de seção aberta e com estruturas de concreto armado, apesar do custo inicial mais elevado dos perfis tubulares.

Em função da distribuição de massa mais distante do centro de gravidade das seções de perfis tubulares, resultando em um raio de giração bem maior em relação aos perfis de seção aberta, é possível a elaboração de projetos estruturais mais arrojados, com menor quantidade de pilares e de contraventamentos, com aumento de vãos e da capacidade de carga da estrutura como um todo.

Muitas outras vantagens podem ser observadas na utilização de perfis tubulares quando comparados com os perfis de seções abertas e com estruturas de concreto armado, entre elas: menor área superficial, menor coeficiente de arrasto,

melhor resistência a corrosão em função da ausência de cantos, além, é claro, de poderem ser preenchidos com concreto o que permite a obtenção de maior resistência. É possível destacar ainda como vantagem na utilização destes elementos, a rapidez na execução das obras, a possibilidade de projetar vãos maiores e a flexibilidade de formas e geometrias dos projetos em função de seu baixo peso e sua elevada resistência.

Apesar do aumento do emprego das mais variadas formas geométricas nas seções de perfis tubulares, como triangular e elíptica por exemplo, as formas de seções mais comumente utilizadas na construção civil são as seções retangulares - RHS (*retangular hollow sections*), as seções quadradas - SHS (*square hollow sections*) e as seções circulares - CHS (*circular hollow sections*).

Neste trabalho será investigado o comportamento de ligações tubulares do tipo T entre perfis RHS 100x80x6,3mm no banzo e perfis SHS 60x60x6,3mm no montante, conforme Figura 1, submetidas a esforços normais de tração e compressão no banzo e compressão no montante.



Figura 1 – Ligação tipo T (RHS de 100x80x6,3mm no banzo e SHS de 60x60x6,3mm no montante) – um dos espécimes utilizados neste estudo.

A seguir são apresentados alguns exemplos, do arquivo pessoal do autor, de estruturas construídas com perfis tubulares demonstrando a versatilidade e as diversas aplicações destes elementos.

Pode-se observar na Figura 2 a construção em estrutura metálica das futuras instalações do Museu do Amanhã, que está localizado na cidade do Rio de Janeiro (Brasil) sendo sua construção parte do projeto de revitalização da região portuária local.

Na Figura 3 observa-se a edificação do Sony Center construído na Potsdamer Platz, na cidade de Berlim (Alemanha). Trata-se de um importante complexo de entretenimento onde é possível encontrar cinemas, lojas, restaurantes, etc.

A Figura 4 apresenta o edifício do Hotel Myriad localizado no Parque das Nações, que dispõem de diversas opções de lazer como exposições de arte distribuídas ao longo das margens do rio Tejo, na cidade de Lisboa em Portugal.

Na Figura 5 tem-se a ponte móvel de Leça, situada no porto de Leixões na cidade de Barcelana (Espanha). Trata-se de uma ponte de estrutura metálica do tipo basculante que ao ser acionada permite a passagem de navios de grande porte para região do porto.

A Figura 6 apresenta o edifício Charles Avison Library, construído com perfis metálicos estruturais e revestido em vidro, onde está instalada a biblioteca pública da cidade de Newcastle (Reino Unido).

Apresenta-se ainda, na Figura 7, a roda gigante London Eye. Trata-se de uma roda de observação com 135 metros de altura, construída com perfis estruturais metálicos às margens do rio Tamisa, na cidade de Londres (Inglaterra).

A Figura 8, mostra um dos pilares da estação ferroviária Central de Berlim, localizada na cidade de Berlim (Alemanha). Trata-se também de uma construção com perfis estruturais metálicos e vidro. No local constata-se a existência de cinco pavimentos, dos quais dois deles são destinados ao tráfego de trens e os demais, destinados a lojas e circulação.

Finalmente, na Figura 9, tem-se a Ponte do Milênio, construída sobre o Rio Tamisa, na cidade de Londres (Inglaterra). Trata-se de uma ponte suspensa, construída em perfis estruturais metálicos e destinada exclusivamente a pedestres.



Figura 2 – Museu do Amanhã (em construção) – Rio de Janeiro - Brasil.



Figura 3 – Sony Center – Berlin - Alemanha.



Figura 4 – Hotel Myriad - Lisboa – Portugal.



Figura 5 – Ponte móvel – Barcelona – Espanha.



Figura 6 – Edifício da Biblioteca Pública - Newcastle – Reino Unido.



Figura 7 – Roda Gigante London Eye – Londres - Inglaterra.

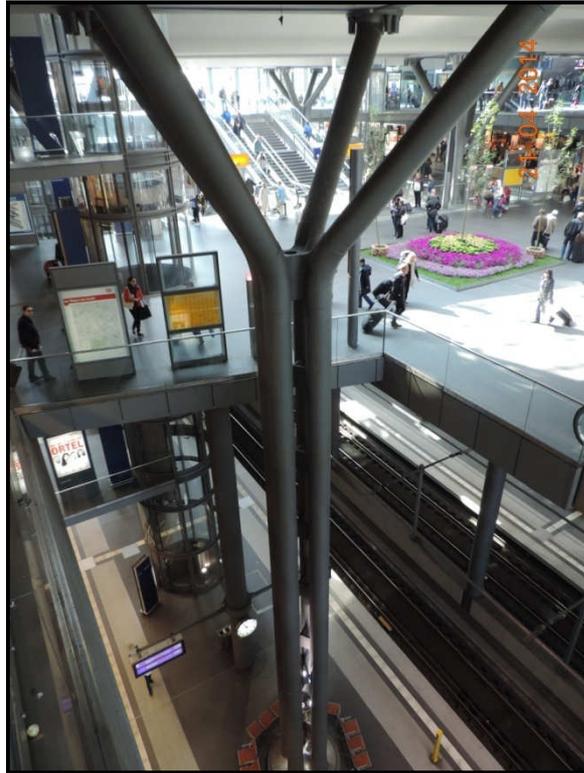


Figura 8 – Estação de trem Berlin Hauptbahnhof – Berlin – Alemanha.

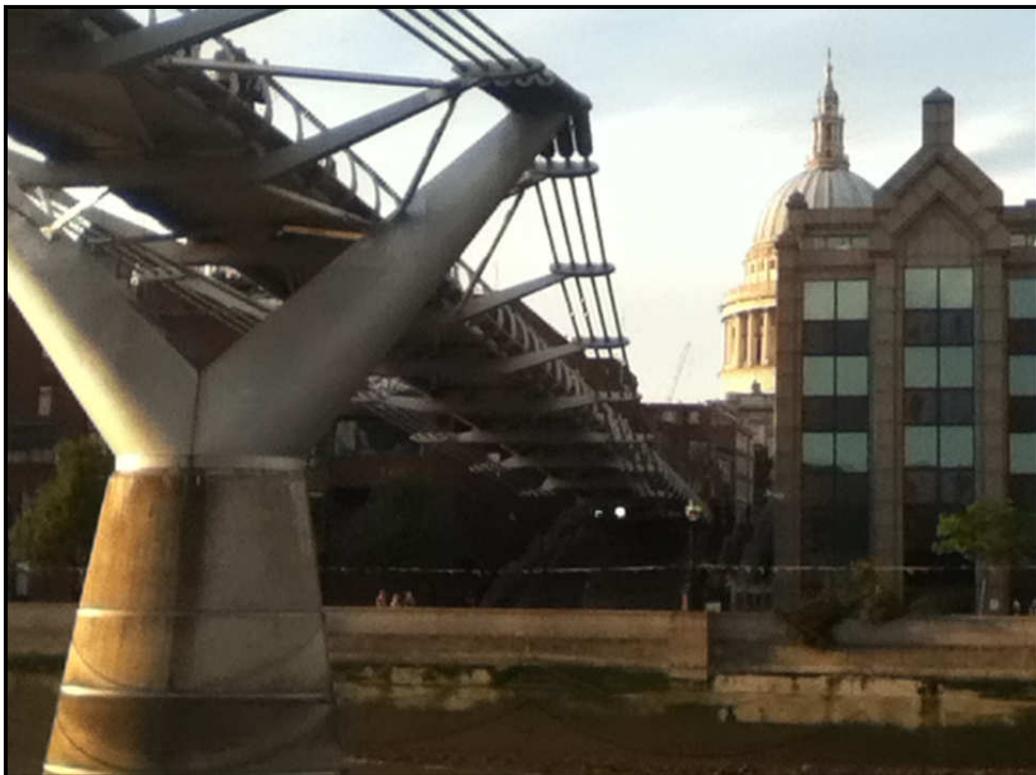


Figura 9 – Millennium Bridge – Londres – Inglaterra.

## Motivação

Obras de construção civil utilizando perfis tubulares em sua estrutura tem sido cada vez mais importantes ao redor do mundo, em especial nos países mais desenvolvidos, onde tal tecnologia é bastante avançada e difundida, inclusive com o desenvolvimento e a produção de aços de alta capacidade.

Toda esta tecnologia permite ao engenheiro estrutural desenvolver soluções cada vez mais arrojadas, no entanto, o aperfeiçoamento das metodologias de cálculos prescritas nas normas técnicas vigentes é imprescindível para que além de projetos arrojados, seja possível o desenvolvimento de estruturas mais econômicas sem, obviamente, abrir mão da qualidade e da segurança nestas construções.

O entendimento mais aprofundado do comportamento estrutural de ligações entre perfis tubulares é fundamental para o desenvolvimento de projetos mais arrojados e econômicos, haja vista estes elementos serem um ponto muito complexo e possivelmente vulnerável nestes projetos. Na medida em que as normas e suas prescrições sejam aperfeiçoadas e revisadas, será possível ao engenheiro estrutural otimizar e racionalizar os projetos de estruturas com perfis tubulares de forma mais segura e precisa, resultando em projetos mais eficazes e com menor custo.

As ligações entre perfis tubulares metálicos são tão relevantes no projeto estrutural que ao redor de todo o mundo são desenvolvidos diversos estudos abordando este tema, inclusive com a realização periódica de congressos tratando exclusivamente deste assunto, tendo o último congresso ocorrido recentemente no Rio de Janeiro, onde foram apresentados e discutidos diversos artigos sobre os vários tipos de ligações estruturais entre perfis tubulares.

Neste sentido, acompanhando uma tendência mundial, tem-se aqui no Brasil, diversas instituições empenhadas no desenvolvimento de novos estudos e pesquisas para o aperfeiçoamento das técnicas para dimensionamento e utilização racional de estruturas tubulares, entre elas, a Universidade do Estado do Rio de Janeiro, a Universidade Federal do Rio de Janeiro, a Universidade Federal de Ouro Preto, a Universidade Estadual de Campinas, etc., com a divulgação frequente de pesquisas sobre o tema. Estas instituições contam com o apoio de empresas privadas como a Tuper S.A. [1] e a Vallourec Tubos do Brasil [2].

## Objetivos

Atualmente estão disponíveis, entre outras referências literárias, como roteiro para os projetistas, as normas técnicas publicadas pelos comitês normatizadores nos seus respectivos países, como a ABNT no Brasil, o CEN para os países da Europa, a ISO utilizada mundialmente apesar de ser uma publicação suíça, etc.

Tendo em vista o grande número de possibilidades de arranjos e os tipos de ligações quanto a sua configuração, para estruturas projetadas com perfis tubulares, o presente trabalho limita-se ao estudo do comportamento de uma ligação soldada do tipo T em perfis tubulares retangulares (RHS) no banzo e quadrados (SHS) no montante, submetida a esforços de compressão no montante e esforços axiais de compressão e tração no banzo, permitindo assim, a simulação do comportamento real desta ligação como parte integrante de uma treliça convencional plana em perfis tubulares.

Os resultados obtidos por meio das formulações analíticas disponíveis como critérios de dimensionamento de ligações rígidas do tipo T adotados pelas normas NBR 16239 [3] publicada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Eurocode EC3-1.8 [4] publicada pelo *European Committee for Standardisation* (CEN), e ISO 14346 [5] publicada pela *International Organization for Standardization* serão analisados e comparados com resultados de ensaios experimentais realizados no Laboratório de Engenharia Civil da UERJ – LEC.

Concluídas as análises foi possível indicar as semelhanças e/ou diferenças entre os valores teóricos e os valores experimentais de tal forma que estes resultados sejam utilizados posteriormente para o aprofundamento das avaliações realizadas e a sugestão de ajustes nas prescrições normativas em trabalhos futuros.

## Estrutura da dissertação

Este capítulo é composto basicamente por uma breve introdução indicando generalidades, a motivação e os objetivos para o desenvolvimento deste trabalho, bem como, sua composição sumarizada.

No capítulo um é realizada uma breve revisão bibliográfica do assunto, obtida por meio de trabalhos mais recentes existentes na literatura técnica e de alguns artigos relevantes para as análises desta dissertação.

O capítulo dois apresenta as formulações analíticas disponíveis como critérios de dimensionamento de ligações tubulares do tipo T adotadas pelas normas NBR 16239 [3], Eurocode EC3-1.8 [4] e ISO 14346 [5], e ainda o critério de deformação limite proposto por Lu *et al.* [6].

No capítulo três são apresentados os ensaios experimentais realizados no Laboratório de Engenharia Civil da UERJ – LEC, onde são descritas a metodologia e os procedimentos adotados na realização dos mesmos e ainda, os equipamentos mais relevantes empregados na realização dos experimentos.

No capítulo quatro são apresentados os resultados obtidos por meio da instrumentação utilizada nos experimentos, com as devidas considerações e análises dos resultados sobre o comportamento de cada um dos espécimes avaliados neste trabalho.

Por fim, no capítulo cinco são apresentadas as principais conclusões deste trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

## 1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma breve revisão bibliográfica do assunto, obtida por meio de trabalhos existentes na literatura técnica relevantes para a presente dissertação.

### 1.1 Principais estudos realizados

Lu *et al.* [6], em 1994, redefiniram a formulação para o critério de deformação limite para a razão  $N_u/N_s$ , sendo  $N_u$  a carga correspondente ao deslocamento de 3% da largura do banzo para o estado limite último e  $N_s$  a carga para o deslocamento de 1% da largura do banzo para o estado limite de serviço. Caso esta relação seja menor que 1,50, a ligação é controlada pelo estado limite último, caracterizado pelo esforço que causa uma deformação de 3% da face superior do banzo, sendo  $b_0$  a largura da seção transversal do banzo, e caso de a razão  $N_u/N_s$  seja menor que 1,50, a resistência limite de serviço passa a controlar a ligação, caracterizada pelo esforço capaz de provocar uma deformação de 1% na face superior do banzo.

Kosteski e Packer [7], em 2003, apresentaram estudo indicando que uma ligação convencional placa - perfil tubular tende a provocar uma distorção excessiva ou plastificação na face de ligação do perfil tubular e em uma tentativa para reduzir a flexibilidade inerente deste tipo de ligação, placas de reforço tipo T estruturais são, por vezes, soldadas à face de ligação do perfil tubular. Os autores apresentam os resultados de um programa de teste experimental e um correspondente estudo numérico, utilizando o método dos elementos finitos, com o objetivo de determinar a espessura mínima da chapa de reforço por meio de uma fórmula empírica desenvolvida para prever a espessura da chapa de reforço necessária, satisfazendo a condição de estado limite último, a ser utilizada como metodologia para o projeto de ligações deste tipo.

Kosteski e Packer [8], em 2003, apresentaram estudo indicando que a ligação entre uma placa e um perfil tubular retangular estrutural tende a causar excessiva distorção na face do perfil resultando em uma reduzida resistência da ligação considerando o estado limite de deformação. Os autores consideram que uma placa de ligação que se estende através de ambas as paredes do perfil tubular estrutural pode ser utilizada para aumentar a sua resistência. Foram apresentados os resultados indicando que a capacidade de carga da ligação praticamente dobra quando comparada com uma ligação do mesmo tipo em uma única face do perfil estrutural tubular, porém isto se aplica apenas para cargas estáticas, não devendo ser considerado para cargas dinâmicas.

Mendanha [9], em 2006, apresentou um estudo numérico de ligações soldadas do tipo K e KT com afastamento e T, formadas por perfis tubulares estruturais de aço sem costura, RHS no banzo e CHS no montante e nas diagonais. Foram desenvolvidos modelos numéricos baseados e calibrados por dados experimentais de ensaios realizados nestes tipos de ligações. A análise de diversos modelos com elementos de casca avaliando a influência do raio de dobramento dos perfis do banzo, concluindo com a obtenção de um modelo numérico efetivamente representativo das ligações ensaiadas em laboratório.

Wardenier *et al.* [10], em 2009, apresentam estudo indicando que a Subcomissão IIW-XV-E elaborou novas recomendações de projeto de ligações entre perfis tubulares e que estas novas recomendações foram exaustivamente discutidas nas análises apresentadas no 12º Simpósio Internacional de Estruturas Tubulares e que todas as alterações propostas consideraram apenas as ligações entre perfis tubulares circulares (CHS). No entanto, não foram feitas considerações sobre os perfis tubulares retangulares (RHS) e para corrigir tal omissão, os autores apresentaram novas equações revisadas para determinação da capacidade de resistência de ligações do tipo T, X, K com afastamento e K com sobreposição, entre perfis tubulares retangulares (RHS).

Zhao *et al.* [11], em 2010, apresentaram um estudo resumido das recomendações de dimensionamento de ligações soldadas entre perfis tubulares prescritas na terceira edição do Instituto Internacional de Solda (IIW) [12] e descrevem de forma sussinta as principais mudanças feitas em relação à edição anterior [13], considerando as investigações pertinentes em termos de intervalos de

validade, extensão das recomendações, carregamentos axiais no banzo, ligações com sobreposição e ligações placa – perfil tubular.

Nunes [14], em 2012, apresentou um estudo numérico de ligações soldadas do tipo K e KT com afastamento e tipo T, formadas por perfis tubulares estruturais de aço sem costura, RHS no banzo e CHS no montante e nas diagonais. Foram desenvolvidos modelos numéricos com o devido refinamento de malha e das condições de contorno, com uma ótima correlação quando comparados com os modelos experimentais em função da calibração realizada, validando o estudo paramétrico das ligações. Na conclusão do trabalho foi observado que o modo de falha dominante para todos os modelos foi a plastificação da face superior do banzo, indicando uma boa correlação entre o comportamento dos modelos numéricos e as prescrições das normas estudadas tanto nos casos em que houve carga no banzo quanto nos casos sem carga no banzo.

Xiao *et al.* [15], em 2014, relataram os desenvolvimentos na fabricação de perfis em aço inoxidável e de aço carbono de alta resistência utilizados na construção de ligações tubulares, incluindo perfis de aço carbono com tensão de escoamento de até 1350 MPa. Os estudos descreveram o comportamento dos tubos de alta resistência em termos de tensões residuais, as suas propriedades sob temperaturas elevadas e o comportamento das ligações soldadas sob carga estática, fadiga e sua resistência quando fabricadas com perfis tubulares de aço de alta resistência e com perfis de aço inoxidável.

Elghazouli e Packer [16], em 2014, apresentaram uma revisão das soluções de projetos estruturais contra abalos sísmicos para ligações em geral, com foco especial nos métodos que são "pré-aprovados" ou "aceitáveis como norma" para o dimensionamento de perfis tubulares e utilizados por engenheiros de estruturas. Esta revisão ilustrou as opções disponíveis para projetistas e o levantamento abrange principalmente, as soluções europeias e norte-americanas de projeto, sendo que os projetistas americanos são fortemente influenciados pelas práticas japonesas. O escopo inclui a análise de ligações de perfis tubulares para estruturas contraventadas e não contraventadas, inclusive ligações rígidas e semirrígidas do tipo viga-coluna em perfis tubulares. A revisão é concluída fazendo recomendações para mais investigações e desenvolvimento de novos tipos específicos de ligações entre perfis tubulares submetidas a cargas sísmicas.

Wardenier *et al.* [17], em 2014, apresentaram um resumo das recomendações de projeto desenvolvidas recentemente para ligações do tipo X e T formadas por perfis tubulares de seção elíptica (EHS). As recomendações foram baseadas em testes experimentais, modelagens de elementos finitos (FE) e de estudos realizados em um programa de pesquisa colaborativa entre as universidades de Singapura, Toronto e Delft. As equações de resistência são apresentadas de um modo semelhante aos atualmente adotados para ligações formadas por perfis tubulares de seção circular (CHS) e retangular (RHS) prescritas na norma ISO 14346 [5]. As recomendações da norma ISO 14346 [5] são baseadas nas recomendações do Instituto Internacional de Solda, IIW-XV-E, que também foram publicadas pelo Comité International pour le Développement et l'Etude de la Construction tubulaire (CIDECT) em edições recentes dos seus Guias de Projeto.

Vegte e Wardenier [18], em 2014, apresentaram comparações detalhadas entre as equações de resistência de ligações tipo K com afastamento e os dados experimentais disponíveis pelas extensas análises numéricas realizadas na década anterior de ligações uniplanares do tipo K, T e X feitas de perfis tubulares circulares (CHS) considerando uma vasta gama de parâmetros geométricos e diferentes tipos de carga no banzo. Estas equações foram discutidas e aprovadas pela subcomissão XV-E do Instituto Internacional de Solda (IIW), publicadas posteriormente no guia de projeto de ligações entre perfis tubulares circulares (CHS) do CIDECT [19] e adotadas na terceira edição do IIW [12], que formaram a base para a ISO 14346 [5] recomendações, publicada recentemente.

Ritakallio e Björk [20], em 2014, apresentaram estudo confirmando que perfis tubulares formados a frio conforme EN 10219 [21], fabricados de forma adequada com aços de grão fino, tem resistência semelhante na face plana e no canto e que, mesmo com a variação de temperatura, a capacidade de carga e de deformação das ligações X e K cumpriram as exigências prescritas nas normas de dimensionamento. Os autores concluíram que os avanços na produção de aço e laminação a quente, com processos fabris confiáveis e versáteis, permitirão a fabricação de perfis tubulares para estruturas soldadas com boa ductilidade a baixa temperatura mesmo na área de canto formado a frio.

Lipp e Ummenhofer [22], em 2014, apresentaram estudo indicando que a versão atual do Eurocode para a projeto de ligações soldadas entre perfis tubulares circulares (CHS) não considera qualquer tipo de redução da capacidade de carga destas ligações para o caso de carga de tração no banzo. No entanto, a 2ª edição do CIDECT [19] e a norma ISO 14346 [5], neste tipo de ligação, consideram uma redução da capacidade da ligação devido ao carregamento de tração no banzo. Os autores apresentam os resultados de investigações experimentais e numéricas em ligações com banzos submetidos a esforços de tração indicando que este carregamento influencia na capacidade das ligações soldadas do tipo X entre perfis tubulares circulares (CHS) e apresentara uma nova proposta de cálculo da capacidade de carga destas ligações.

Nizer *et al.* [23], em 2015, apresentaram análises numéricas e experimentais de ligações do tipo T entre perfis tubulares submetidas a esforços axiais de compressão e de tração no banzo, cujos resultados foram comparados com as prescrições previstas nas normas NBR 16239 [3], Eurocode EC3-1.8 [4], Design Guide 3, 2ªEd - CIDECT [19] e ISO 14346 [5], e ainda com o critério de deformação limite [6].

Nizer [24], Silva [25], Lima [26], Nobre [27] e Lopes [28] apresentaram trabalhos de tese de mestrado pesquisando o comportamento de ligações tubulares em geral, nas diversas configurações e modos de falha, com análises por meio de simulações em modelos números de FE, ensaios experimentais, análises matemáticas e paramétricas, apresentando conclusões detalhadas sobre o comportamento da ligações estudadas comparados com as prescrições normativas e, em alguns casos, propondo recomendações de ajustes nestas formulações.

## **1.2 Critério de deformação limite**

Os critérios de deformação limite propostos por Lu *et al.* [6] consistem na verificação da deformação que ocorre na face do perfil estrutural tubular solicitada pela ligação. Tais parâmetros são necessários porque em muitos casos a curva carga *versus* deslocamento não define claramente a resistência da ligação. Deve-se ressaltar que este fenômeno ocorre em função da capacidade de deformação da ligação permitir que ocorra ganho de resistência devido ao efeito de membrana que

ocorre na área da ligação no membro principal e o encruamento do aço provocado pela própria deformação induzida. Este fenômeno é perfeitamente perceptível nos ensaios realizados nos espécimes deste trabalho.

O critério limite de deformação, foi amplamente estudado no meio acadêmico, e utilizado para avaliação da resistência de uma ligação submetida a esforços axiais de compressão ou de tração e/ou de flexão e é fundamentado pela comparação de dois níveis de carga que provocam deformações na face do perfil estrutural tubular que forma o banzo, sendo a resistência última (Estado Limite Último)  $N_u$  definida como a força que produz uma deformação na face do banzo correspondente a 3% ( $\Delta_u = 0,03b_0$ ) da largura do referido perfil e a resistência limite de serviço (Estado Limite de Serviço) -  $N_s$  definida com a que produz uma deformação correspondente a 1% ( $\Delta_u = 0,01b_0$ ) da largura do banzo. Os autores definiram também que a capacidade de resistência da ligação será correspondente a carga que provoca o deslocamento de 1%  $b_0$  caso a razão  $N_u/N_s$  seja maior que 1,5 e correspondente a carga que provoca o deslocamento de 3%  $b_0$  caso a razão  $N_u/N_s$  seja menor que 1,5, ou seja, caso a relação  $N_u/N_s$  seja maior que 1,5 a capacidade da ligação será  $N_s$  e caso a relação  $N_u/N_s$  seja menor que 1,5 a capacidade da ligação será  $N_u$ .

Recentemente, conforme concluído por Zhao *et al.* [11], passou-se a adotar como valor de resistência da ligação a resistência última (Estado Limite Último -  $N_u$ ) definida como a força que produz uma deformação na face superior do banzo correspondente a 3% ( $\Delta_u = 0,03b_0$ ) da sua largura.

Para os casos em que a análise do gráfico carga *versus* deslocamento indica a ocorrência de um valor de resistência da ligação maior do que o valor correspondente ao limite de 3% $b_0$ , antes da ocorrência deste limite, esta resistência é definida como resistência de pico ( $N_{pico}$ ) e deve ser adotada como valor de resistência da ligação.

## 2 DIMENSIONAMENTO DE LIGAÇÕES COM PERFIS TUBULARES (RHS-SHS)

### 2.1 Generalidades e especificações

Perfis tubulares estruturais estão se tornando cada vez mais importantes na construção civil em função do desempenho mecânico, da sua facilidade no atendimento às exigências estéticas, além da agilidade na montagem, alta trabalhabilidade e do seu baixo custo de execução.

Neste contexto, o dimensionamento de ligações entre perfis tubulares previsto nas normas técnicas, de uma maneira geral, é baseado em uma análise plástica e de critérios de deformação na determinação da capacidade da ligação onde a solução encontrada depende diretamente da análise detalhada do projeto e do processo de dimensionamento.

O dimensionamento de uma ligação, para ser preciso e otimizado, deve considerar também os efeitos dos esforços de flexão, de cisalhamento, de punção e comportamento de membrana, o que permite ao projetista definir e especificar sua geometria com segurança.

Vale destacar que a norma NBR 16239 [3] é baseada na norma europeia EC3-1.8 [4] e que a norma internacional ISO 14346 [5] substituiu a norma Design Guide 3, 2ªEd - CIDECT [19] e, portanto, grande parte das especificações das ligações quanto a sua geometria, como os parâmetros  $\beta$ ,  $\gamma$  e  $\eta$ , por exemplo, que serão detalhados mais adiante, são determinados pela mesma formulação nas referidas normas, assim como as descrições dos tipos de ligações (T, K, X, Y, KK, KT, etc.) e dos modos de falha (A, B, C, D, E e F) possuem a mesma descrição, o que será demonstrado no decorrer do desenvolvimento deste trabalho.

As normas técnicas analisadas neste trabalho, consideram que a definição do tipo de ligação é estabelecida por meio do método de transferência de forças entre os elementos da ligação, o que é demonstrado na Figura 10.

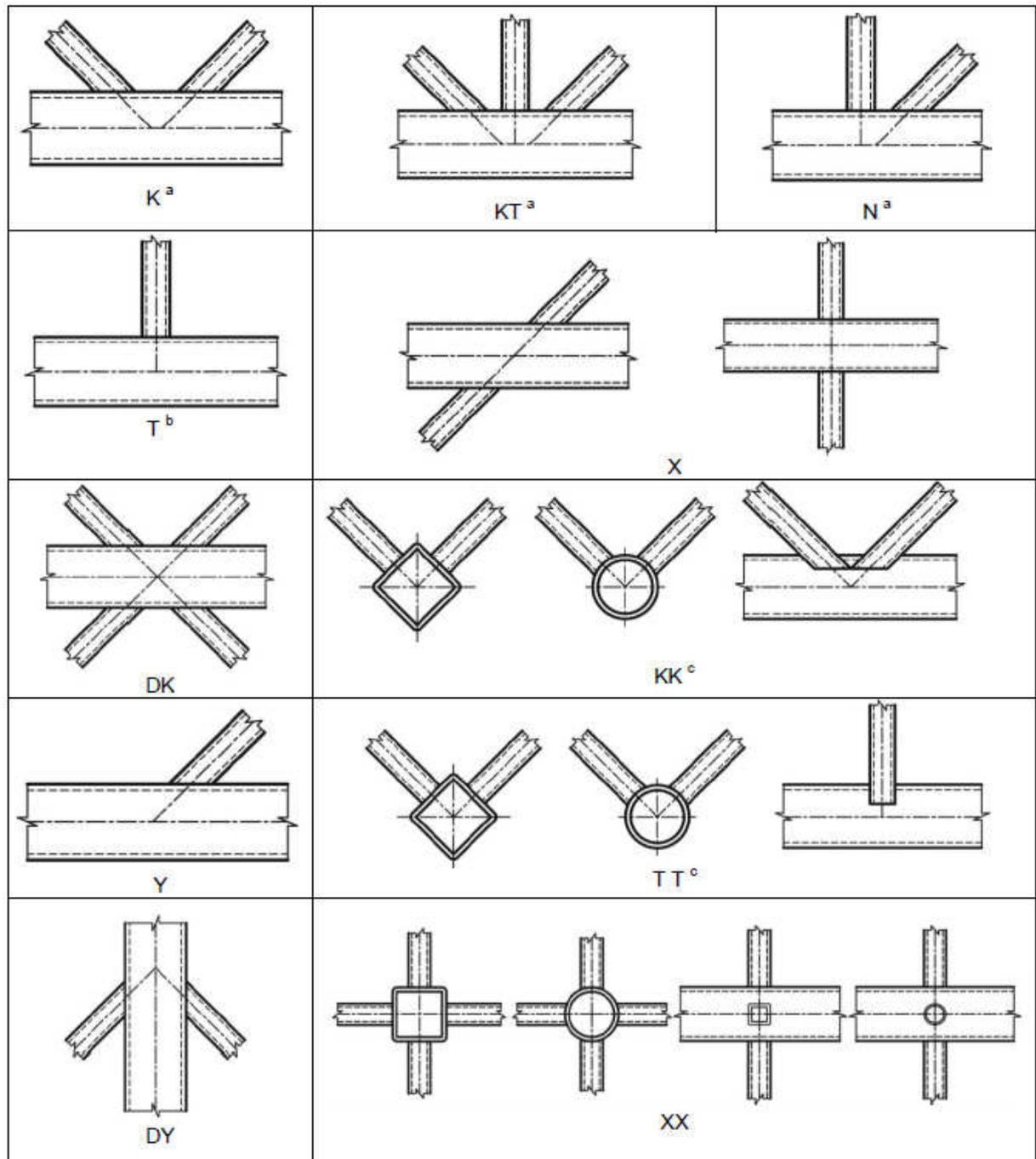


Figura 10 – Definições dos tipos de ligações tubulares soldadas segundo a NBR 16239 [3].

Ainda de acordo com as normas analisadas neste estudo, as condições de geometria, as dimensões dos elementos que compõem o nó e o próprio carregamento são determinantes na identificação do modo de falha que governará o dimensionamento da ligação, conforme Figura 11:

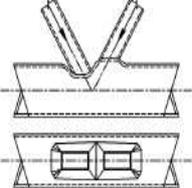
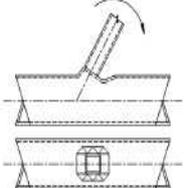
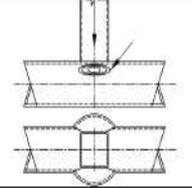
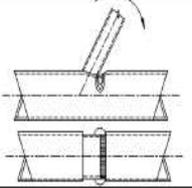
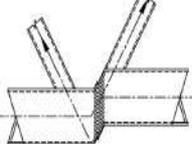
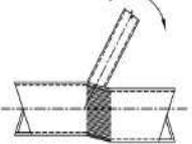
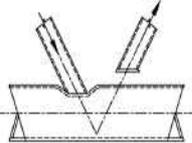
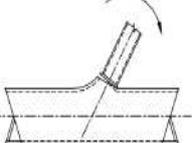
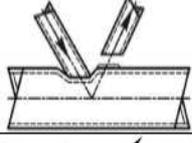
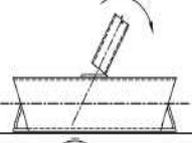
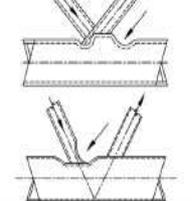
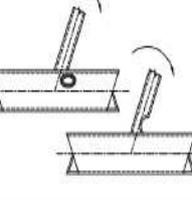
Modo	Força Axial	Momento Fletor	Descrição da FALHA
A			Plastificação da face ou de toda a seção transversal do banzo, junto as diagonais ou montantes.
B			Plastificação, amassamento ou instabilidade da face lateral da seção transversal do banzo junto a diagonais ou montantes sob compressão.
C			Plastificação ou instabilidade por cisalhamento do banzo, junto a diagonais ou montantes;
D			Ruptura por punção da parede do banzo na área de contato com diagonais ou montantes.
E			Ruptura ou plastificação na região da solda ou flambagem localizada de diagonais ou montantes devido a distribuição não uniforme de tensão.
F			Flambagem localizada de diagonais ou montantes comprimidos ou do banzo, na região da ligação.

Figura 11 – Definições dos modos de falha das ligações, segundo a NBR 16239 [3].

Destaca-se a seguir, os principais critérios gerais estabelecidos pelas normas técnicas vigentes para o dimensionamento de ligações soldadas do tipo T entre perfis tubulares estruturais:

- a) A espessura mínima das paredes do perfil para o banzo e montante deve ser de 1,5 mm (ISO 14346 [5]) ou de 2,5 mm (NBR 16239 [3] / EC3-1.8 [4]). No entanto, a espessura do banzo não deve ultrapassar o máximo de 25 mm (NBR 16239 [3] / EC3-1.8 [4]), caso contrário deve ser realizado um estudo específico para validar a eficácia da ligação;
- b) As extremidades dos tubos devem ser preparadas de tal forma que não ocorra alteração na seção dos mesmos. A utilização de tubos com extremidades amassadas não é permitida, para todas as normas;
- c) Elementos constituintes da ligação deverão ser de classe 1 ou 2 para efeito de compressão (EC3-1.8 [4] / ISO 14346 [5]) e seção compacta (NBR 16239 [3]);
- d) A tensão de escoamento nominal do aço máxima é de 460 MPa (EC3-1.8 [4]), sendo que para materiais com tensão de escoamento acima de 350 MPa (NBR 16239 [3]) / 355 MPa (ISO 14346 [5]), a resistência de projeto da ligação deverá ser multiplicada pelo fator de redução 0,9;
- e) O ângulo  $\theta$  formado entre o banzo e as diagonais deverá estar sempre entre 30° e 90° para todas as normas.

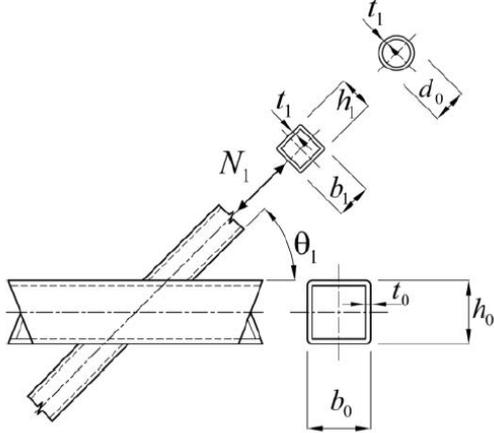
Obviamente cada norma possui suas especificidades e para o caso de elaboração de projetos de ligações, o seu dimensionamento deverá ser baseado em uma única norma e de acordo com os critérios estabelecidos no documento adotado, devendo ser consideradas atentamente as suas prescrições, os seus parâmetros, as suas especificações, os seus detalhes e as suas exceções para garantir o adequado dimensionamento dos respectivos elementos estruturais.

## 2.2 Dimensionamento de ligações do tipo T

Em linhas gerais, as três normas analisadas neste trabalho utilizam os mesmos critérios geométricos para a caracterização e o dimensionamento de ligações tipo T formadas por perfis do tipo RHS para o banzo e SHS para o montante, variando pequenos parâmetros de cálculo e os valores dos coeficientes de uma prescrição para outra.

Neste trabalho será analisado o comportamento de uma ligação do tipo T entre perfis RHS de 100x80x6,3mm no banzo e SHS de 60x60x6,3mm no montante, para falha pelo Modo A, cujos principais parâmetros geométricos e as respectivas verificações no dimensionamento dos espécimes ensaiados são listados a seguir:

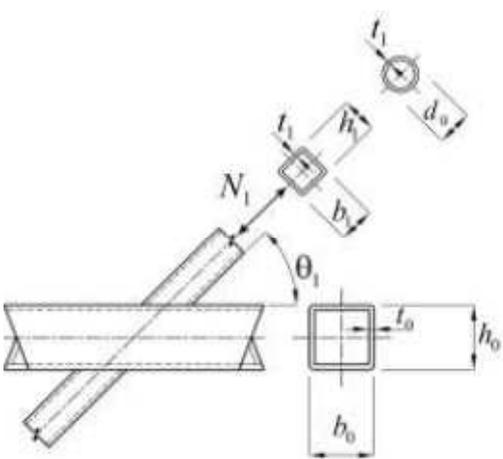
Tabela 1 – Parâmetros geométricos (requisitos e verificações).

Definições (Ligação T)	Parâmetros Geométricos	Ligação Analisada
 <p>Onde:  <math>b_0</math> = largura do banzo  <math>h_0</math> = altura do banzo  <math>t_0</math> = espessura da parede do banzo  <math>\theta_1</math> = ângulo entre banzo e o montante (90°)  <math>b_i</math> = largura do montante  <math>h_i</math> = altura do montante  <math>t_i</math> = espessura da parede do montante  <math>N_1</math> = esforço no montante</p>	$0,25 \leq \beta = \frac{b_1}{b_0} \leq 0,85$	$0,25 \leq \beta = \frac{60}{100} = 0,6 \leq 0,85$
	$\gamma = \frac{b_0}{2t_0} \leq 35$	$\gamma = \frac{100}{2 \times 6,3} = 7,94 \leq 35$
	$\frac{b_i}{t_i} \leq 35$	$\frac{b_i}{t_i} = \frac{60}{6,3} = 9,5 \leq 35$
	$\frac{h_i}{t_i} \leq 35$	$\frac{h_i}{t_i} = \frac{60}{6,3} = 9,5 \leq 35$
	$2,0 \geq \frac{h_i}{b_i} \geq 0,5$	$2,0 \geq \frac{h_i}{b_i} = \frac{60}{60} = 1,0 \geq 0,5$

### 2.2.1.1 Recomendações da NBR 16239 [3] para ligações do tipo T

As recomendações constantes na norma brasileira da ABNT a respeito de ligações do tipo T, banzo (RHS), montante (SHS) e modo de falha tipo A, seguem em linhas gerais, as mesmas recomendações contidas na norma Europeia (EC3-1.8 [4]), somente com algumas alterações na forma de apresentação das formulações e de alguns coeficientes, conforme Tabela 2, tendo em vista que na NBR 16239 [3] o coeficiente de segurança  $\gamma_{a1}$  é igual a 1,1 e na norma europeia,  $\gamma_{M5}$  é igual a 1,0.

Tabela 2 – Parâmetros de cálculo da capacidade de carga de ligações do tipo T (RHS-SHS / modo de falha A) – NBR 16239 [3].

Modo de Falha A (face superior do Banzo) – Ligações T, X e Y – $0,25 \leq \beta \leq 0,85$			
		$N_{1,Rd} = \frac{k_n f_{y0} t_0^2}{(1 - \beta) \text{sen} \theta_1} \left( \frac{2,2\eta}{\text{sen} \theta_1} + 4,4\sqrt{1 - \beta} \right) / \gamma_{a1}$ <p style="text-align: center;">(2.1)</p>	
Para $n < 0 \Rightarrow k_n = 1,3 + \frac{0,4n}{\beta}$ Para $n \geq 0 \Rightarrow k_n = 1,0$	$\eta = h_1 / b_0$	$\sigma_{0,sd} = \frac{N_{0,sd}}{A_0} + \frac{M_{0,sd}}{W_0}$	$n = \frac{\sigma_{0,Ed}}{f_{y0}}$

onde:

$N_{1,Rd}$  é a capacidade de carga da ligação;

$k_n$  é parâmetro de cálculo para determinação de  $N_{1,Rd}$  e  $k_n \leq 1$ ;

$f_{y0}$  é a tensão limite de escoamento do aço do perfil do banzo;

$n$  é a relação entre  $\sigma_{0,sd}$  e  $f_{y0}$  ( $n < 0$  (compressão) e  $n \geq 0$  (tração) );

$t_0$  é a espessura do perfil do banzo;

$\eta$  é a relação entre  $h_1$  e  $b_0$ ;

$\theta_1$  é o ângulo formado entre o montante e o banzo;

$b_1$  corresponde a largura da seção transversal do montante;

$b_0$  corresponde a largura da seção transversal do banzo;

$h_1$  corresponde a altura da seção transversal do montante;

$\beta$  é o coeficiente obtido pela equação é a relação  $b_1$  e  $b_0$ ;

$\gamma_{a1}$  é o coeficiente de segurança que para este caso deve ser igual a 1,1.

$\sigma_{0,sd}$  é a tensão máxima de cálculo de compressão no banzo na face da ligação;

$N_{0,sd}$  é o valor do esforço normal no banzo;

$A_0$  corresponde a área da seção transversal do banzo;

$M_{0,sd}$  corresponde ao momento fletor que atua no banzo;

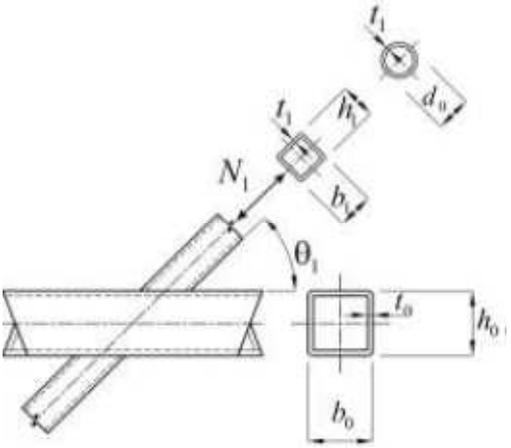
$w_0$  é o valor correspondente ao módulo plástico resistente da seção do perfil do banzo.

É importante ressaltar que esta norma recomenda que para perfis de aço com resistência ao escoamento superior a 350 MPa, a resistência de cálculo deverá ser dividida por um coeficiente de ajustamento  $\gamma_n$  igual a 1,1.

### 2.2.1.2 Recomendações do EC3-1.8 [4] para ligações do tipo T

As recomendações constantes na norma europeia EC3-1.8 [4] a respeito de ligações do tipo T, banzo(RHS)-montante(SHS) e modo de falha tipo A são as seguintes:

Tabela 3 – Parâmetros de cálculo da capacidade de carga de ligações do tipo T (RHS-SHS / plastificação da face superior do banzo) – EC3-1.8 [4].

Plastificação da Face superior do Banzo – Ligações T, X e Y – $0,25 \leq \beta \leq 0,85$			
		$N_{1,Rd} = \frac{k_n f_{y0} t_0^2}{(1-\beta) \text{sen} \theta_1} \left( \frac{2\eta}{\text{sen} \theta_1} + 4\sqrt{1-\beta} \right) / \gamma_{M5}$ <p style="text-align: center;">(2.2)</p>	
Para $n > 0 \Rightarrow k_n = 1,3 - \frac{0,4n}{\beta}$ Para $n \leq 0 \Rightarrow k_n = 1$	$\eta = h_1 / b_0$	$\sigma_{0,Ed} = \frac{N_{0,Ed}}{A_0} + \frac{M_{0,Ed}}{W_{el,0}}$	$n = \left( \frac{\sigma_{0,Ed}}{f_{y0}} \right) / \gamma_{a1}$

onde:

$N_{1,Rd}$  é a capacidade de carga da ligação;

$k_n$  é parâmetro de cálculo para determinação de  $N_{1,Rd}$  e  $k_n \leq 1$ ;

$f_{y0}$  é a tensão limite de escoamento do aço do perfil do banzo;

$n$  é a relação entre  $\sigma_{0,Ed}$  e  $f_{y0}$  ( $n > 0$  (compressão) e  $n \leq 0$  (tração));

$t_0$  é a espessura do perfil do banzo;

$\eta$  é a relação entre  $h_1$  e  $b_0$ ;

$\theta_1$  é o ângulo formado entre o montante e o banzo;

$b_1$  corresponde a largura da seção transversal do montante;

$b_0$  corresponde a largura da seção transversal do banzo;

$h_i$  corresponde a altura da seção transversal do montante;

$\beta$  é o coeficiente obtido pela equação é a relação  $b_1$  e  $b_0$ ;

$\gamma_{M5}$  é o coeficiente de resistência que neste caso deve ser igual a 1,0.

$\sigma_{0,Ed}$  é a tensão máxima de cálculo de compressão no banzo na face da ligação;

$N_{0,Ed}$  é o valor do esforço normal no banzo;

$A_0$  corresponde a área da seção transversal do banzo;

$M_{o,Ed}$  corresponde ao momento fletor que atua no banzo;

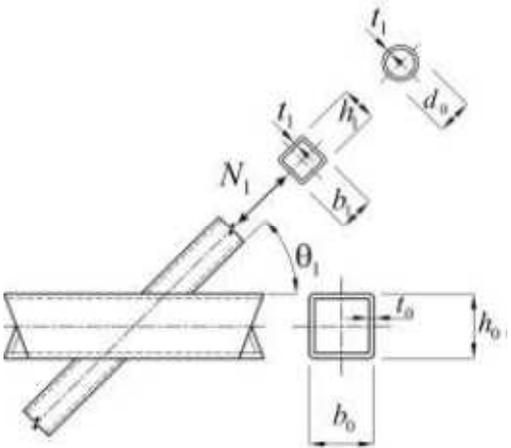
$W_{el0}$  é o valor correspondente ao módulo plástico resistente da seção do perfil do banzo.

É importante ressaltar que esta norma recomenda que sejam utilizados perfis tubulares estruturais em aço com resistência ao escoamento de até 460 MPa e que considera as cargas de compressão como positivas e as cargas de tração como negativas  $n > 0$  (compressão) e  $n \leq 0$  (tração), contrariando a convenção padrão de Resistência dos Materiais.

### 2.2.1.3 Recomendações da norma ISO 14346 [5] para ligações do tipo T

As recomendações constantes na norma ISO 14346 [5] a respeito de ligações do tipo T, banzo(RHS)-montante(SHS) e modo de falha tipo A seguem as mesmas recomendações contidas na norma CIDECT [19], somente com algumas alterações na forma de apresentação das formulações, conforme abaixo:

Tabela 4 – Parâmetros de cálculo da capacidade de carga de ligações do tipo T (RHS-SHS / plastificação da face superior do banzo) – ISO 14346 [5].

Plastificação da Face superior do Banzo – Ligações T, X e Y – $0,25 \leq \beta \leq 0,85$		
	$F_i^* = Q_u Q_f \frac{f_{y0} t_0^2}{\sin \theta_1}$ <p>(2.3)</p>	
$Q_u = \frac{2\eta}{(1-\beta)\sin\theta_1} + \frac{4}{\sqrt{1-\beta}}$	$Q_f = (1 +  n )^{C_1}$	$n = \frac{F_0}{F_{pl,0}} + \frac{M_0}{M_{pl,0}}$
$\eta = h_1 / b_0$	<p><b>Compressão no banzo</b> <b>(n &lt; 0)</b> <math>C_1 = 0,6 - 0,5\beta</math></p>	<p><b>Tração no banzo</b> <b>(n ≥ 0)</b> <math>C_1 = 0,1</math></p>

onde:

$F_i^*$  é a capacidade de carga da ligação;

$Q_u$  é obtido por meio dos parâmetro geométricos dos perfis que compõem a ligação;

$Q_f$  é obtido em função da tensão resultante no banzo;

$n$  é somatório das relações a relação entre  $F_0$  e  $F_{pl,0}$  e,  $M_0$  e  $M_{pl,0}$  ( $n < 0$  (compressão) e  $n \geq 0$  (tração));

$\sigma_{y0}$  é a tensão limite de escoamento do aço do perfil do banzo;

$t_0$  é a espessura do perfil do banzo;

$\theta_1$  é o ângulo formado entre o montante e o banzo;

$\eta$  é a relação entre  $h_1$  e  $b_0$ ;

$b_1$  corresponde a largura da seção transversal do montante;

$b_0$  corresponde a largura da seção transversal do banzo;

$h_i$  corresponde a altura da seção transversal do montante;

$\beta$  é o coeficiente obtido pela equação é a relação  $b_1$  e  $b_0$ ;

$C_1$  é parâmetro de cálculo para determinação de  $Q_f$  ;

$F_0$  é o valor do esforço normal que atua no banzo;

$F_{pl,0}$  é a resistência axial da seção do banzo -  $F_{pl,0} = A_0 \cdot \sigma_{y0}$ ;

$M_0$  é o valor do momento fletor aplicado no banzo;

$M_{pl,0}$  é a resistência a flexão da seção do banzo  $M_{pl,0} = W_{pl,0} \cdot \sigma_{y0}$ .

Mais uma vez, é importante ressaltar que esta norma também recomenda que para perfis de aço com resistência ao escoamento superior a 355 MPa, a resistência de cálculo deverá ser multiplicada por 0,9.

Considerando as prescrições descritas anteriormente neste tópico, conforme Tabelas de 2 a 4, os valores teóricos de resistência das ligações ensaiadas, obtidos pelas referidas formulações, estão listados na Figura 12, e indicam de forma clara que os valores teóricos definidos pelas normas NBR 16239 [3] e EC3-1.8 [4] são exatamente os mesmos quando comparados entre si e, distintos dos valores definidos pela norma ISO 14346 [5].

As variações inerentes aos parâmetros que consideram a carga aplicada axialmente no banzo como percentuais da carga de plastificação do banzo estão listados no gráfico a seguir.

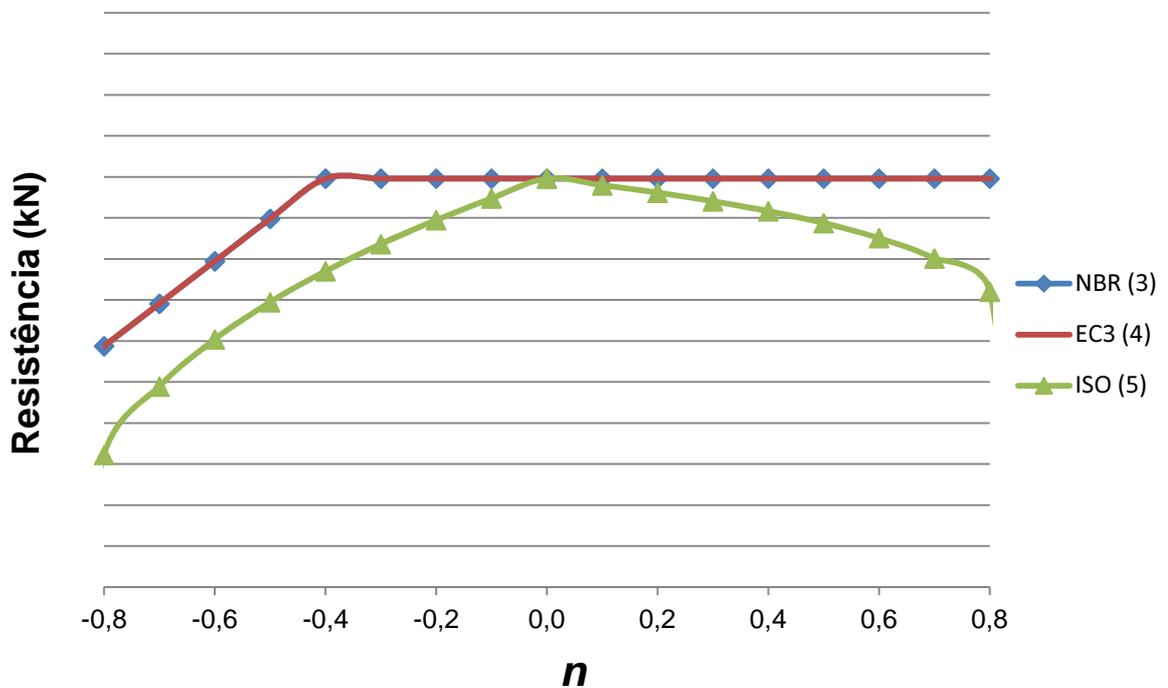


Figura 12 – Gráfico indicando a capacidade de carga da ligação em função do proporção da carga de plastificação do banzo aplicada no seu eixo axial.

O gráfico indicado na Figura 12 acima, demonstra claramente que nas normas NBR 16239 [3] e EC3-1.8 [4] há perda de resistência da ligação quando esta é submetida ao esforço axial de compressão no banzo a partir do percentual correspondente a 50% da carga plástica do elemento e, para os demais casos, não há ganho e/ou perda no valor da resistência da ligação, que se mantém uniforme e constante.

A norma ISO 14346 [5], por sua vez, indica que tanto para os casos de aplicação de esforço normal de tração quanto para os casos de aplicação do esforço normal de compressão no banzo, há perda imediata da resistência da ligação.

### 3 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

#### 3.1 Introdução

Para fundamentar a pesquisa apresentada neste trabalho, foram realizados ensaios experimentais no Laboratório de Engenharia Civil da UERJ (LEC) de sete espécimes de ligações tipo T, que foram instalados em um pórtico de reação, retangular, com capacidade de carga de até 1000 kN, formado por vigas do tipo I, dimensionado e detalhado por Nizer [24], apresentado na Figura 13.

A realização dos ensaios permitiu a avaliação do comportamento, mais próximo possível da realidade, de ligações tipo T, e posterior análise dos resultados com a devida comparação com as recomendações da normas utilizadas no desenvolvimento deste trabalho.



Figura 13 – Montagem do pórtico de reação utilizado nos ensaios das ligações.

### 3.2 Características dos protótipos de ligação e instrumentação dos ensaios

Os ensaios foram realizados por meio de testes de desempenho de sete espécimes de ligação tipo T formadas por perfis tipo RHS no banzo com dimensões de 100x80x6,3mm e por perfis tipo SHS no montante com dimensões de 60x60x6,3mm, e parâmetros geométricos  $\beta = 0,60$ ,  $\gamma = 7,94$  e  $\eta = 0,60$ , configuradas para falhar pelo Modo A.

Os perfis, conformados a frio com costura, utilizados na fabricação dos espécimes avaliados neste estudo foram fornecidos pela empresa Tuper S.A. [1] e montados pela empresa Metalfenas Indústria da Construção Ltda.[29], tratando-se de aço 1012 classificado e fabricado de acordo com as normas ASTM A36 [30] e NBR 8261 [31].

A denominação, a configuração, e os parâmetros geométricos, o tipo de carga aplicada no montante e a proporção da carga de plastificação aplicada no banzo dos protótipos testados estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Dados geométricos dos espécimes ensaiados.

ESPÉCIME	CARGA MONTANTE	TENSÃO BANZO (%N <sub>pl</sub> )	BANZO			MONTANTE			$\beta$	$\gamma$	$\theta$	$\eta$
			b <sub>0</sub> (mm)	h <sub>0</sub> (mm)	t <sub>0</sub> (mm)	b <sub>1</sub> (mm)	h <sub>1</sub> (mm)	t <sub>1</sub> (mm)				
T0%NB	(-)	0	100	100	6,3	60	60	6,3	0,60	7,94	90 <sup>0</sup>	0,60
T50%TNB	(-)	+ 50	100	100	6,3	60	60	6,3	0,60	7,94	90 <sup>0</sup>	0,60
T60%TNB	(-)	+ 60	100	100	6,3	60	60	6,3	0,60	7,94	90 <sup>0</sup>	0,60
T70%TNB	(-)	+ 70	100	100	6,3	60	60	6,3	0,60	7,94	90 <sup>0</sup>	0,60
T50%CNB	(-)	- 50	100	100	6,3	60	60	6,3	0,60	7,94	90 <sup>0</sup>	0,60
T60%CNB	(-)	- 60	100	100	6,3	60	60	6,3	0,60	7,94	90 <sup>0</sup>	0,60
T70%CNB	(-)	- 70	100	100	6,3	60	60	6,3	0,60	7,94	90 <sup>0</sup>	0,60

Objetivando a identificação e a interpretação adequada do comportamento das ligações ensaiadas, de forma mais próxima possível da realidade, foram instaladas quatro rosetas, seis extensômetros lineares, cinco transdutores de deslocamento linear e dois transdutores de pressão para aplicação de esforço normal de tração e de compressão no banzo, e esforço de compressão no montante, em pontos específicos e na mesma posição de cada um dos espécimes.

A instrumentação descrita acima permitiu a captação informações relevantes para as análises, tais como as deformações na região dos apoios, o esforço normal atuante no montante e no banzo, a distribuição de tensões na faces laterais e superior dos banzos, e não menos importante, as deformações que em função da intensidade do carregamento aplicado na ligação poderiam caracterizar algum nível de flambagem local que pudesse comprometer o resultado dos ensaios.

O posicionamento da instrumentação das ligações T ensaiadas pode ser observado na Figura 14 e na Figura 15, ressaltando que para o caso do banzo, a instrumentação foi posicionada de forma simétrica possibilitando redundância na obtenção das informações, trazendo segurança na realização dos ensaios e que todos os transdutores de deslocamento foram instalados de forma independente em relação a estrutura das ligações ensaiadas.

Ainda no processo de instrumentação foi utilizada uma célula de carga modelo CT-D-KN1.5M com capacidade de 1500 kN fabricada pela empresa GEFTRAN S.A. da qual era obtida a leitura direta da carga aplicada no eixo axial do banzo (proporcional a carga de plastificação do perfil RHS 100x80x6,3mm).

Para aplicação da carga axial no banzo foi utilizado um macaco hidráulico modelo MFC-1006 com curso de 153 mm e capacidade de 1000 kN, e ainda uma bomba manual modelo BPM-70, ambos fabricados pela empresa Farex Indústria e Comércio de Máquinas Ltda.

Além da instrumentação descrita acima, foi utilizado um sistema de aquisição de dados fabricado pela empresa National Instruments que captou todas as informações transmitidas pelas rosetas, extensômetros lineares, transdutores de deslocamento linear, célula de carga e pela máquina de ensaio através de um transdutor de pressão, possibilitando a posterior análise destas informações.





Os equipamentos utilizados na instrumentação estão detalhados na Figura 16.

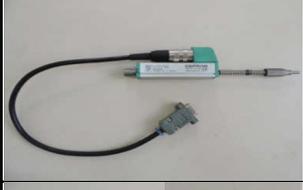
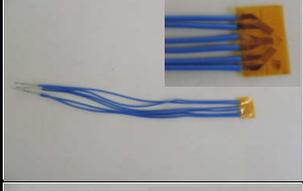
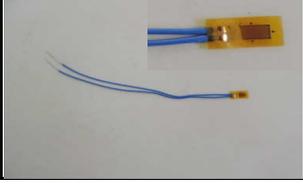
	<p>Cilindro hidráulico modelo MFC-1006 com curso de 153 mm e capacidade de 100 toneladas, e ainda uma bomba manual modelo BPM-70, ambos fabricados pela empresa Farex Indústria e Comércio de Máquinas Ltda.</p>
	<p>Célula de carga modelo CT-D-KN1.5M com capacidade de 1500 kN fabricada pela empresa GEFRAN S.p.A.</p>
	<p>Sistema de compressão (cilindro hidráulico, pórtico e carrinho) com capacidade de 300 toneladas força de fabricação alemã .</p>
	<p>Pórtico de reação com capacidade de suporte de 100 toneladas formado por perfis HP 310 X 117.</p>
	<p>Sistema de aquisição de dados fabricados pela empresa National Instruments.</p>
	<p>Transdutor de deslocamento modelo PY-2-C-050 com curso de 10 mm até 50 mm fabricado pela empresa GEFRAN S.p.A.</p>
	<p>Rosetas (extensômetros lineares distribuídos em três direções) modelo PA-06-125BA-120L fabricadas pela empresa Excel Sensores Ind. Com. Exp. Ltda.</p>
	<p>Extensômetros lineares modelo PA-06-250BA-120L fabricadas pelas empresa Excel Sensores Ind. Com. Exp. Ltda.</p>

Figura 16 – Equipamentos e instrumentos utilizados na realização dos ensaios das ligações estudadas neste trabalho.

### 3.3 Propriedades mecânicas e geométricas dos protótipos ensaiados

As propriedades mecânicas reais do perfil RHS utilizado no banzo dos espécimes avaliados neste estudo foram determinadas por meio de ensaios específicos com a extração de corpos de prova rompidos de acordo com as prescrições das normas técnicas vigentes cuja média dos resultados está listada na Tabela 6 a seguir. Ressalta-se que apesar da realização destes mesmos ensaios também no perfil utilizado como montante na ligação, estas informações não serão listadas porque o foco deste trabalho está na falha pelo Modo A (plastificação da face do banzo) de tal forma que não há interferência deste elemento no comportamento da ligação nos resultados dos ensaios.

Tabela 6 – Propriedades mecânicas e geométricas do banzo das ligações avaliadas.

Elemento	$f_y$ [MPa]	$f_u$ [MPa]	E [MPa]	L [mm]	$A_o$ [mm <sup>2</sup> ]	$N_{pl}$ [kN]
Banzo (RHS 100 X 80 X 6,3)	419	469	205000	1000	2109	884

Os ensaios de tração dos corpos de prova foram realizados e apresentaram resultados gráficos como a curva tensão versus deformação onde se destacam os pontos de identificação das informações de tensão de escoamento e tensão última do material ensaiado conforme Figura 17.

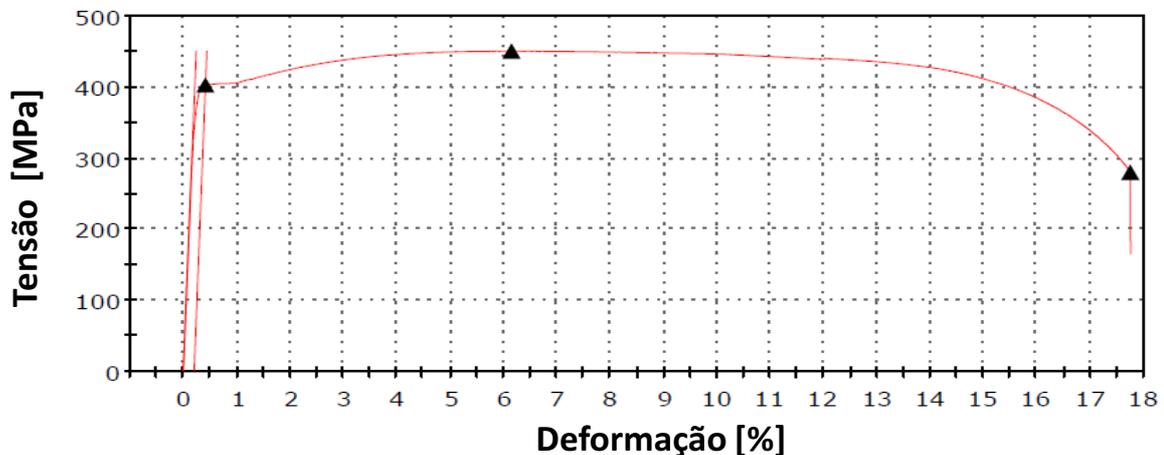


Figura 17 – Gráfico tensão versus deformação do aço do perfil RHS do banzo

Na Figura 18 abaixo é possível observar os corpos de prova e na Figura 19, o momento da realização de um dos ensaios de tração para determinação da tensão de escoamento do aço do perfil RHS que formou o banzo das ligações ensaiadas neste trabalho .



Figura 18 – Corpos de provas retirados dos perfis tubulares das ligações avaliadas.



Figura 19 – Ensaio à tração nos corpos de prova.

### 3.4 Preparação dos ensaios e sistema de aplicação de carga

Os ensaios foram realizados inicialmente com a aplicação do esforço normal de tração ou de compressão no banzo e posteriormente, a aplicação da carga de compressão no montante.

A carga axial aplicada no banzo foi controlada com a utilização de uma célula de carga e uma bomba manual acoplada em um macaco hidráulico que reagia com a estrutura de reação simulando os esforços tanto de compressão quanto de tração.

Tanto os valores das cargas aplicadas no banzo e no montante quanto os valores das deformações e/ou deslocamentos eram gráfica e numericamente monitoradas pelas informações de leitura direta do sistema de aquisição de dados, o que permitiu também a execução dos ensaios com a segurança necessária.

Os espécimes ensaiados foram conectados ao pórtico de reação de tal forma a simular a condição de contorno correspondente ao engaste nas duas extremidades da ligação, ou seja, sem possibilidade de rotação das extremidades e apoiado em dois pontos da na máquina de ensaios, conforme esquema genérico da Figura 20.

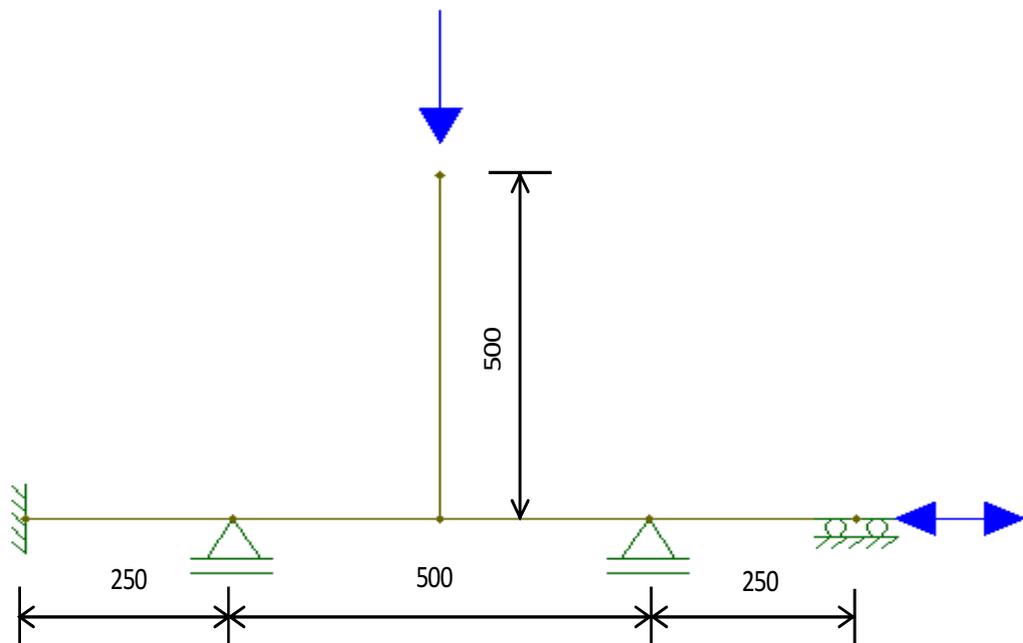


Figura 20 – Esquema estrutural, pontos de aplicação das cargas e condições de contorno das ligações ensaiadas.

A posição de instalação do macaco hidráulico no pórtico de reação permitiu a aplicação de esforços axiais, ora de compressão, ora de tração no banzo de acordo com a necessidade de cada ensaio, conforme Figura 21 e Figura 22.



Figura 21 – Posição de instalação do macaco hidráulico permitindo a aplicação do esforço axial de compressão no banzo da ligação.



Figura 22 – Posição de instalação do macaco hidráulico permitindo a aplicação do esforço axial de tração no banzo da ligação.

Todos os espécimes ensaiados passaram por ciclos de carregamento restritos à fase elástica dos mesmos, antes da conclusão do ensaio, permitindo uma visão prévia do comportamento de cada uma das ligações analisadas e garantindo a precisão e confiabilidade dos ensaios realizados.

Cada um dos espécimes foi submetido ao ciclo de carga de compressão aplicada no montante, conforme indicado a seguir. Ressalta-se que para os casos em que houve aplicação de esforço axial no banzo, esta carga foi aplicada primeiro para posterior execução das etapas do ciclo de carga de compressão no montante.:

- 1ª etapa: de 0 até 30 kN;
- 2ª etapa: de 30 kN até 20 kN;
- 3ª etapa: de 20 kN até 60 kN;
- 4ª etapa o: de 60 kN até 20 kN;
- 5ª etapa: de 20 kN até o final do ensaio.

Na Figura 23 é possível observar o gráfico de um dos ensaios realizados com a configuração da curva carga *versus* deslocamento indicando os ciclos de carga padrão aplicados nos espécimes e o seu comportamento até o final do ensaio.

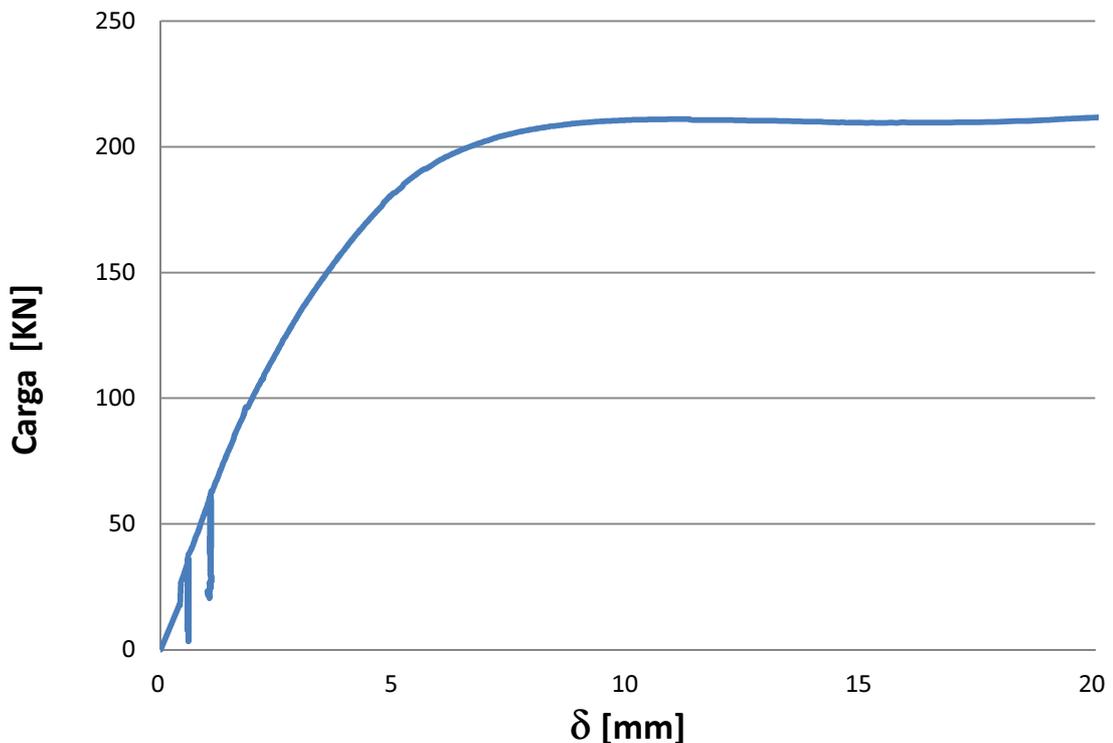


Figura 23 – Ciclo de carga de um dos sete ensaios realizados.

## 4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS: CONSIDERAÇÕES E ANÁLISES

### 4.1 Introdução

Os ensaios experimentais descritos no capítulo anterior são de fundamental importância para validação deste trabalho de tal forma que serão analisados os dados capturados pelo sistema de aquisição de dados com o objetivo principal de entender o real comportamento de cada um dos espécimes submetidos aos esforços solicitantes aplicados nas respectivas ligações.

Os pontos relevantes a serem avaliados serão principalmente as curvas carga *versus* deslocamento que exprimem a resistência das ligações, em especial, aplicando-se o critério de deformação limite proposto por Lu *et al.* [6] de 3% de  $b_0$  para o estado limite último e as deformações ocorridas nos membros das ligações que remetem às tensões desenvolvidas nas peças, em particular as tensões de *von Mises* que indicarão se a falha da ligação se deu efetivamente pelo Modo A correspondente à plastificação da face superior do banzo das ligações.

Os resultados serão apresentados considerando as tensões normais de compressão como negativas e as tensões normais de tração como positivas, ressaltando que das normas referenciadas neste estudo, o EC3-1.8 [4] é a única que considera as tensões de tração como negativas e as tensões de compressão como positivas, em desacordo com a convenção padrão da Resistência dos Materiais.

## 4.2 Sequência de Realização dos Ensaios

Os ensaios foram realizados obedecendo a ordem cronológica conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Sequência de realização dos ensaios experimentais.

<b>Sequência de Realização</b>	<b>Espécime</b>	<b>Carga no Montante</b>	<b>Carga no Banzo (%N<sub>pl</sub>)</b>
1	T0%NB	(-)	0
2	T50%TNB	(-)	+ 50
3	T50%CNB	(-)	- 50
4	T60%CNB	(-)	- 60
5	T70%CNB	(-)	- 70
6	T70%TNB	(-)	+ 70
7	T60%TNB	(-)	+ 60

É importante destacar que na realização do ensaio T50%TNB, pouco antes do final do mesmo, a solda de ligação entre o banzo RHS e a chapa de extremidade da ligação ensaiada rompeu, conforme indicado na Figura 24 a seguir. Este fato implicou na alteração da sequência de ensaios e no reforço da solda para os demais espécimes que foram ensaiados com esforço axial de tração no banzo de acordo com a Figura 25, ressaltando que tal ocorrência não prejudicou o resultado final do referido ensaio, pois ocorreu para um nível elevado de carregamento, depois de ultrapassado o ponto de aplicação do critério de deformação limite [6].



Figura 24 – Falha na solda no momento da realização do ensaio T50%TNB.

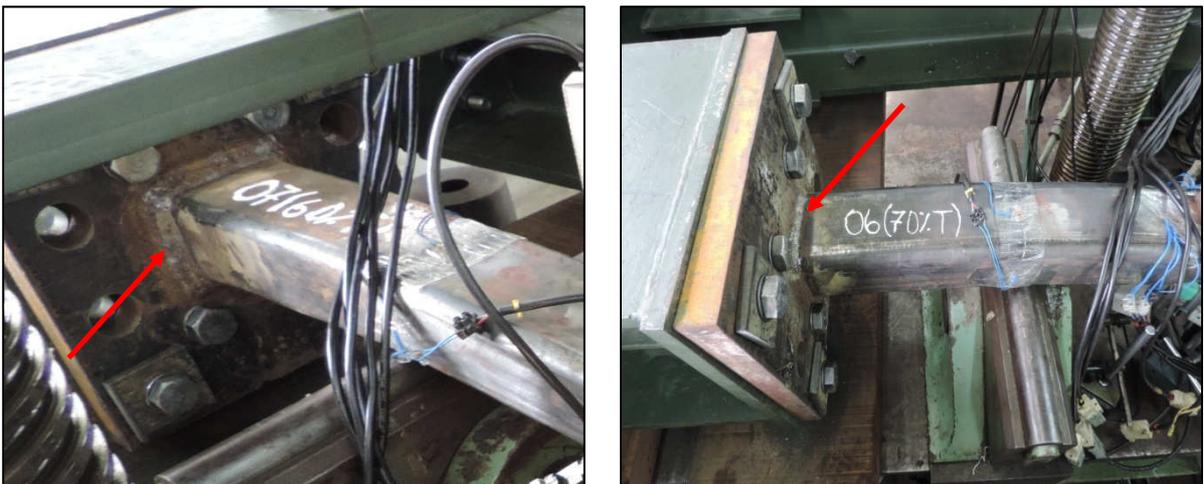


Figura 25 – Indicação do reforço da solda nos demais espécimes ensaiados com esforço axial de tração no banzo.

### 4.3 Análise dos Resultados

#### 4.3.1 Análise das curvas carga *versus* deslocamento

Os resultados experimentais apresentam boa correlação com os valores teóricos obtidos pelas prescrições das normas técnicas avaliadas neste trabalho, conforme apresentado na Figura 26 a seguir:

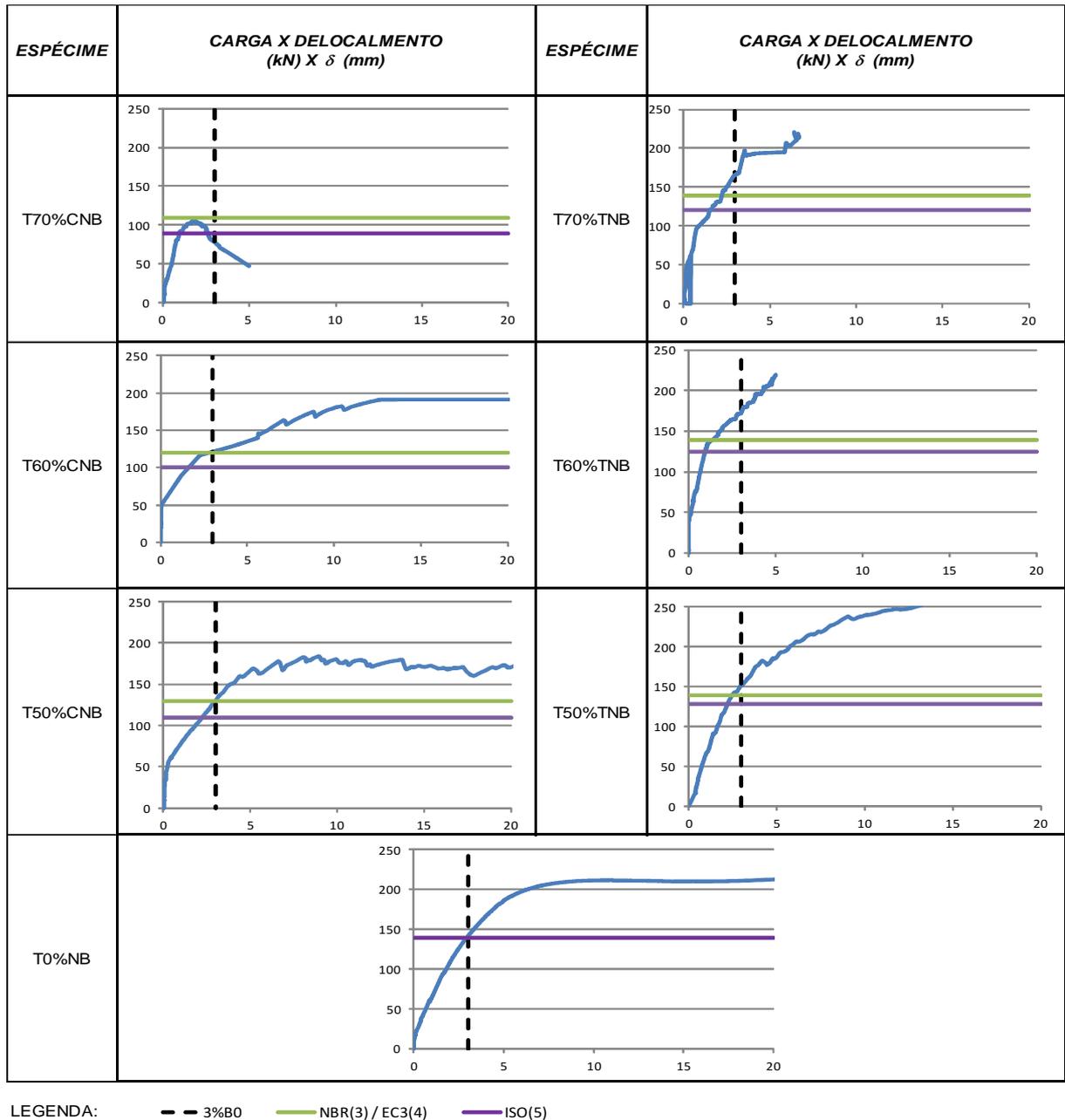


Figura 26 – Gráficos com resultados comparativos da resistência obtida nos ensaios *versus* resistência teórica das ligações ensaiadas.

Os dados anteriores, demonstram que quando comparados os valores obtidos pelas prescrições das normas técnicas utilizadas como referência neste trabalho com os resultados dos ensaios experimentais, percebe-se claramente que para os casos em que o banzo das ligações é submetido a esforços axiais de compressão, até o limite de 70% da carga de plastificação deste componente, os valores obtidos pelas prescrições das normas NBR 16239 [3] / EC3-1.8 [4] estão compatíveis com os resultados experimentais, o que não ocorre no caso da norma ISO 14346 [5],

cujos valores se mostram conservadores para estes casos, indicando uma relação conservadora e antieconômica no dimensionamento.

Por outro lado, quando o esforço axial no banzo da ligação é de tração, há um ganho de resistência até o limite da proporção de 70% da carga de plastificação do elemento da ligação, quando os valores obtidos por meio das prescrições normativas são todos conservadores, principalmente no caso da norma ISO 14346 [5].

Para o caso em que não há esforço axial no banzo da ligação, os valores normativos estão compatíveis com os resultados experimentais.

Abaixo, na Figura 27, estão indicadas as curvas carga *versus* deslocamento obtidas nos ensaios experimentais de cada uma das ligações avaliadas, além, é claro, da curva referente ao critério de deformação limite proposto por Lu *et al.*[6] correspondente a 3% de  $b_0$  para o estado limite último:

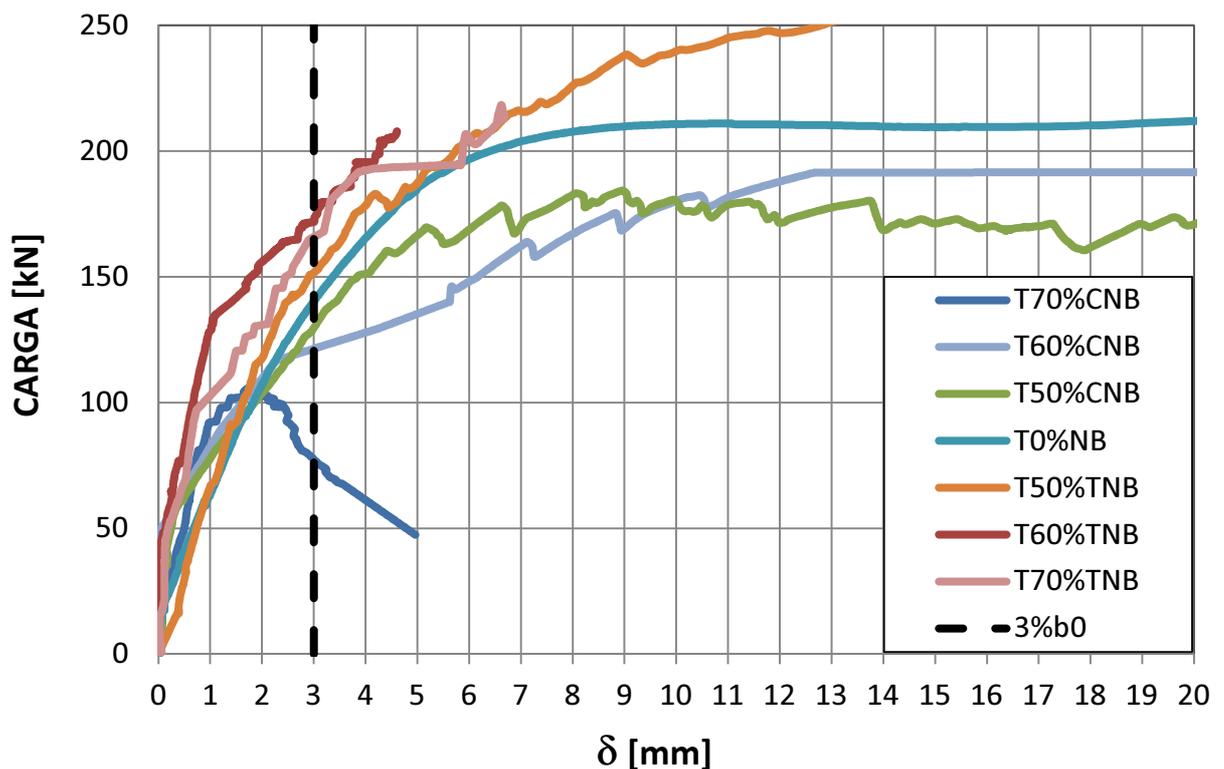


Figura 27 – Curvas representativas da relação carga *versus* deslocamento de cada uma das ligações ensaiadas.

Para facilitar a identificação e análise das informações apresentadas anteriormente, a seguir, na Figura 28 e na Figura 29, estão separados os gráficos com as curvas considerando o ensaio sem esforço axial no banzo comparado,

respectivamente, com as curvas dos ensaios com esforço axial de tração e de compressão no banzo.

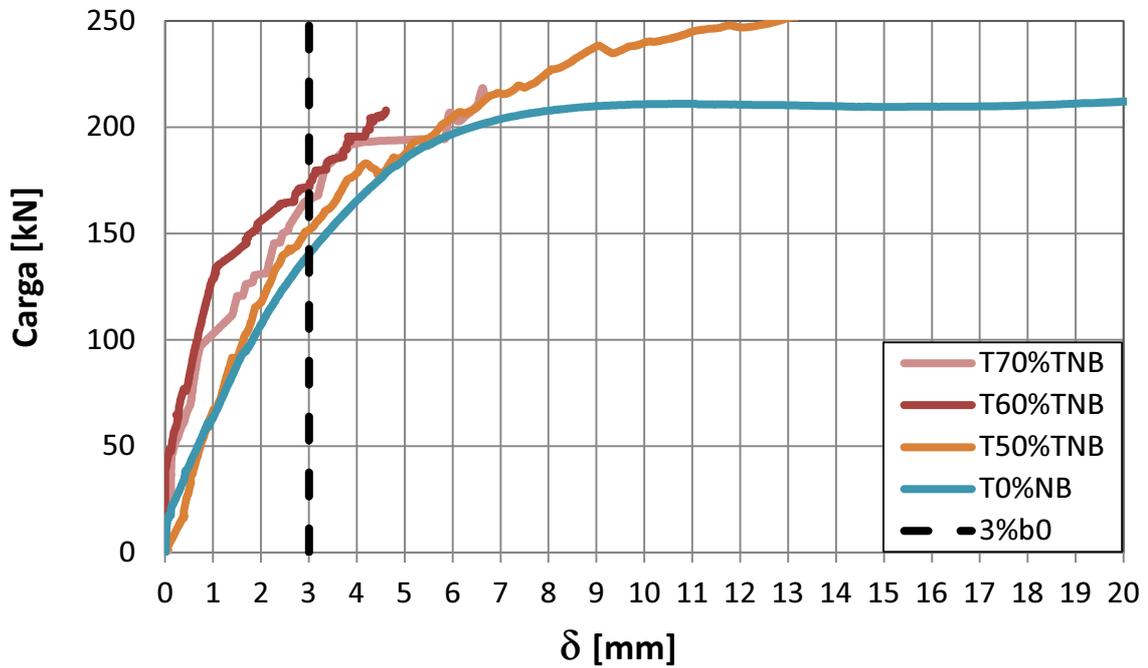


Figura 28 – Curvas representativas da relação carga versus deslocamento para as ligações ensaiadas submetidas ao esforço axial de tração no banzo.

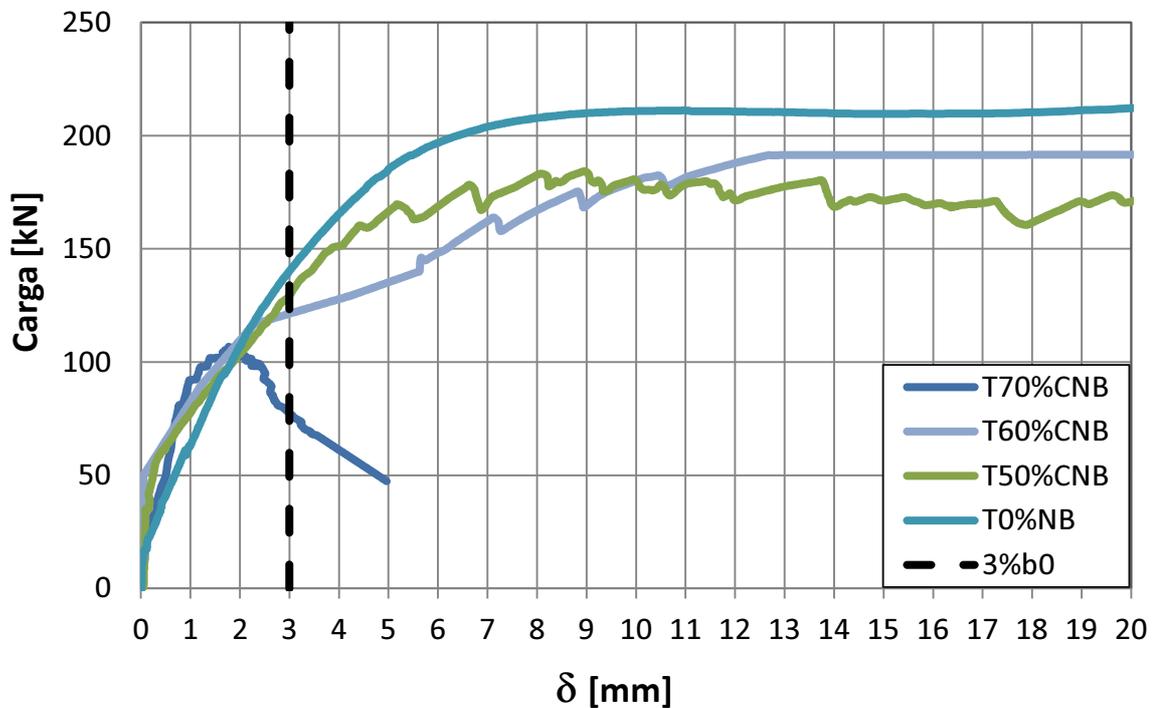


Figura 29 – Curvas representativas da relação carga versus deslocamento para as ligações ensaiadas submetidas ao esforço axial de compressão no banzo.

Observando-se os gráficos é perfeitamente possível perceber o efeito do esforço normal aplicado no banzo na resistência final da ligação, destacando que a perda de resistência é praticamente imediata para os casos de esforços de compressão. Para os casos de esforços de tração observa-se que há inicialmente um ganho de resistência com posterior perda, na medida em que o percentual da carga de plastificação do banzo ultrapassa a relação de 60%.

Conforme demonstrado nos gráficos das curvas carga versus deslocamento, a capacidade da resistência da ligação também está diretamente relacionada com o percentual da carga de plastificação do banzo aplicada axialmente sobre o referido elemento.

Para todos os ensaios, com exceção do ensaio T70%TNB cujo critério de valor da resistência da ligação consistiu na adoção da carga de pico ( $N_{pico}$ ) em função da perda de resistência da ligação antes do limite de  $3\%b_0$ , foi adotado o critério de deformação limite para determinação da resistência de cada um dos espécimes avaliados que consiste na deformação correspondente a 3% da dimensão da base do perfil RHS que compõe o banzo.

É importante destacar que o comportamento das ligações avaliadas nos ensaios realizados, bem como, o valor de resistência obtido para cada um dos espécimes analisados está diretamente relacionado com as condições de contorno utilizadas nos experimentos, caracterizadas principalmente pela disposição dos apoios e pela impossibilidade de rotação das extremidades dos espécimes, além é claro, dos efeitos da flambagem local para os casos em que há a aplicação de esforço axial de compressão no banzo.

Efetivamente para cada alteração na posição dos apoios ou no tipo de fixação do espécime no pórtico de reação, implicará num resultado de resistência diferente, em função da modificação do comportamento estrutural da ligação causada pelas citadas alterações.

As condições de contorno utilizadas nas avaliações deste estudo foram detalhadas na Figura 20.

Na Tabela 8 estão listados os valores de resistência obtidos nos ensaios experimentais e os valores teóricos obtidos pelas prescrições normativas (NBR 16239 [3], Eurocode EC3-1.8 [4] e ISO 14346 [5]).

Tabela 8 – Comparação entre os resultados experimentais obtidos nos ensaios com os valores teóricos obtidos pelas normas técnicas.

Espécime	Banzo %N <sub>PL</sub> (kN)		Resistência da Ligação N (kN)			
			NBR (3)	EC3 (4)	ISO (5)	EXP
T70%CNB	-70	-618,64	109,06	109,06	88,88	106,78
T60%CNB	-60	-530,26	119,40	119,40	100,38	121,55
T50%CNB	-50	-441,89	129,74	129,74	109,42	130,14
T0%NB	0	0,00	139,56	139,56	139,56	140,47
T50%TNB	50	441,89	139,56	139,56	128,69	151,39
T60%TNB	60	530,26	139,56	139,56	125,04	171,81
T70%TNB	70	618,64	139,56	139,56	120,07	165,73

Todos os protótipos ensaiados apresentaram comportamento dentro do esperado, caracterizando modo de falha que consiste na plastificação da face superior do banzo, ou seja, Modo A, conforme é possível observar na Figura 30 que apresenta as deformadas após a realização dos ensaios.

<i>ESPÉCIME</i>	<i>DEFORMADA</i>	<i>ESPÉCIME</i>	<i>DEFORMADA</i>
T70%CNB		T70%TNB	
T60%CNB		T60%TNB	
T50%CNB		T50%TNB	
T0%NB			

Figura 30 – Vista geral deformada dos protótipos ensaiados.

### 4.3.2 Análise do comportamento do banzo das ligações estudadas por meio dos dados obtidos nas rosetas

Para garantir que as ligações ensaiadas atendessem efetivamente a premissa de falha pelo Modo A, que consiste na plastificação da face superior do banzo, foram analisadas as tensões aplicadas nas ligações em cada um dos ensaios, por meio das informações captadas pelo sistema de aquisição de dados com a leitura das rosetas instaladas na face superior, uma de cada lado do montante, e nas faces laterais do banzo, ressaltando que a instalação de duas rosetas deu-se em função da necessidade de se garantir a obtenção dos dados, ou seja, medições redundantes por segurança na obtenção dos dados.

Com a análise dos dados capturados foi possível determinar a tensão de *von Mises*, de acordo com as equações apresentadas na Tabela 9, para entender de forma objetiva o comportamento dos componentes das ligações, em especial o banzo, e sua correlação com os resultados obtidos pelas rosetas instaladas nas faces superior e lateral do banzo.

Considerando a geometria das ligações por meio dos parâmetros  $\beta$  (0,60),  $\gamma$  (7,94) e  $\eta$  (0,60) e ainda, a avaliação das informações obtidas nas leituras das rosetas que permitiram a determinação da tensão de *von Mises*, foi possível identificar, em cada um dos ensaios, qual das faces do banzo plastificou primeiro, a face superior, caracterizando a falha pelo Modo A, ou a face lateral, caracterizando outro modo de falha que não é objeto deste estudo.

Tabela 9 – Equações para obtenção da tensão de *von Mises*.

Equações da tensão de <i>von Mises</i>	
	$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2}$
	$\sigma_1 = E \left[ \frac{\varepsilon_A + \varepsilon_C}{2(1-\nu)} + \frac{1}{2(1+\nu)} \sqrt{(\varepsilon_A + \varepsilon_C)^2 + (2\varepsilon_B - \varepsilon_A - \varepsilon_C)^2} \right]$
	$\sigma_2 = E \left[ \frac{\varepsilon_A + \varepsilon_C}{2(1-\nu)} - \frac{1}{2(1+\nu)} \sqrt{(\varepsilon_A + \varepsilon_C)^2 + (2\varepsilon_B - \varepsilon_A - \varepsilon_C)^2} \right]$

Nos gráficos apresentados da Figura 31 a Figura 33 é possível verificar a ocorrência da plastificação da face superior do banzo antes da plastificação da face lateral em cada ensaio realizado, o que confirma a ocorrência da falha pelo Modo A.

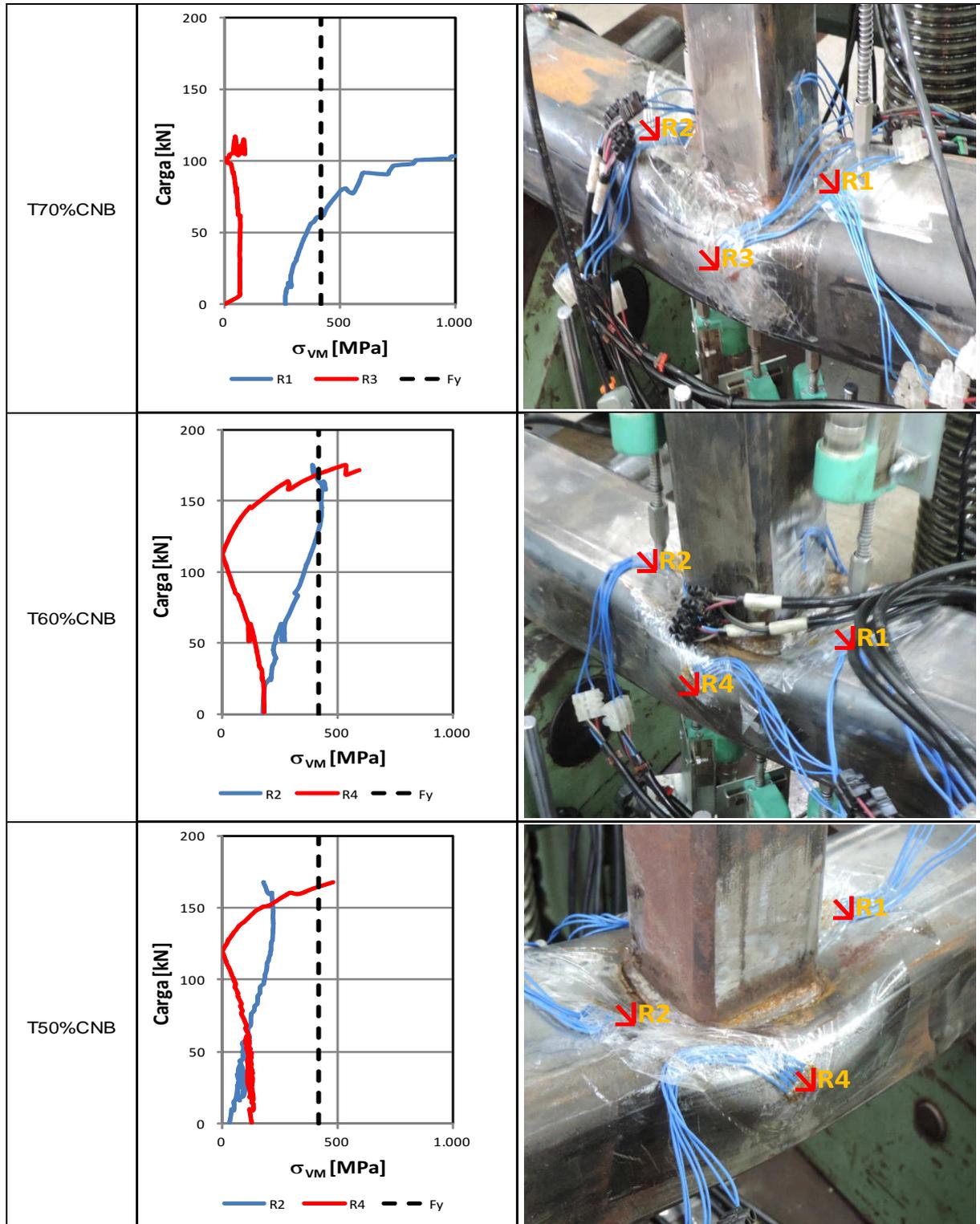


Figura 31 – Tensões de *von Mises* medidas no banzo das ligações ensaiadas com aplicação de esforço axial de compressão neste elemento.

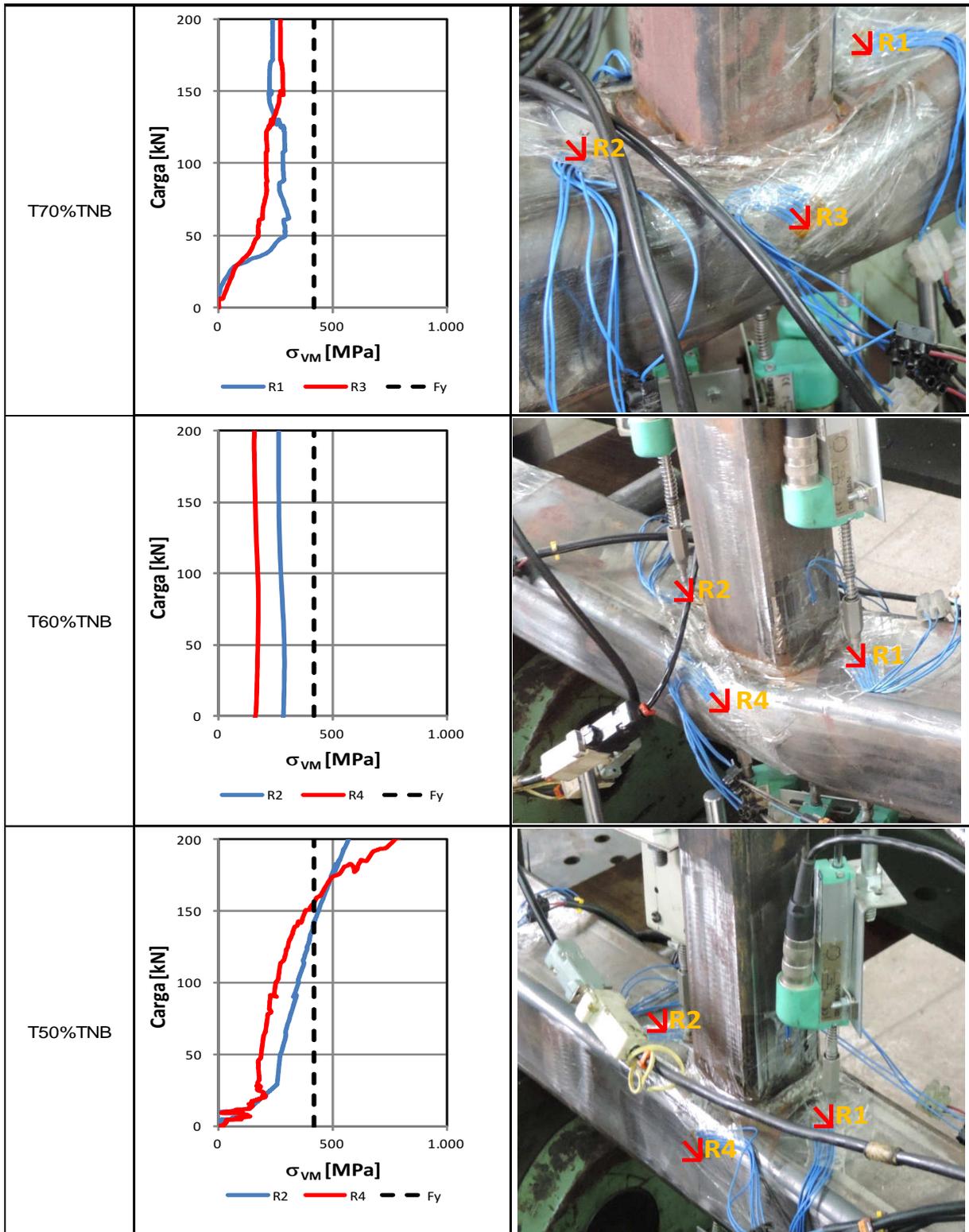


Figura 32 – Tensões de *von Mises* medidas no banzo das ligações ensaiadas com aplicação de esforço axial de tração neste elemento.

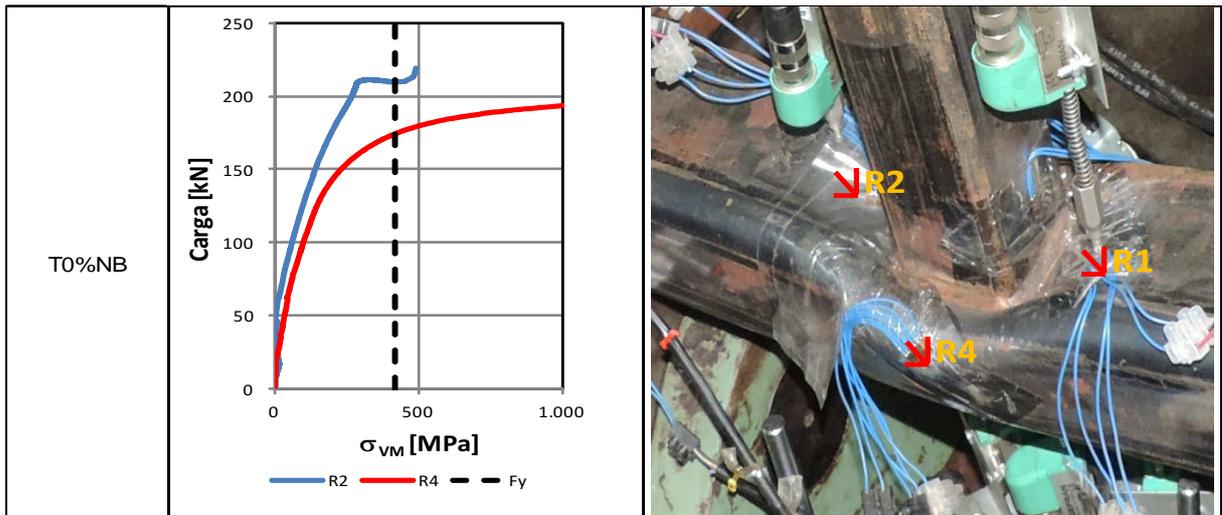


Figura 33 – Tensões de *von Mises* no banzo da ligação ensaiada sem aplicação de esforço axial neste elemento.

Analisando os gráficos e as imagens anteriores, bem como os dados obtidos nos ensaios, é possível constatar que efetivamente os espécimes ensaiados falharam primeiro pelo Modo A, ou seja, pela plastificação da face superior do banzo.

Ressalta-se que para os casos em que os gráficos apresentam plastificação da face lateral, tal fenômeno ocorreu depois da carga limite de resistência da ligação ensaiada ter atingido o valor necessário para falhar pelo Modo A, quando as informações relevantes para o ensaio já tinham sido captadas pelo sistema de aquisição de dados.

As análises acima também foram confirmadas pela avaliação numérica dos resultados captados nos ensaios experimentais de onde foram obtidos os valores de resistência de cada uma das ligações estudadas definidos pelo critério de deformação limite proposto por Lu *et al.* [6] de 3% de  $b_0$  para o estado limite último e comparados com a tensão de *von Mises* cujos dados para sua determinação foram oriundos da leitura das rosetas instaladas nas faces superiores e laterais de cada uma destas ligações. Estes dados confirmaram que todos os espécimes efetivamente tiveram a face superior do banzo plastificada, ou seja, falharam pelo Modo A.

### 4.3.3 Análise do comportamento do banzo e do montante das ligações estudadas por meio dos dados obtidos nos extensômetros lineares

Além das análises realizadas no item anterior, foi avaliado também o comportamento tanto do banzo quanto do montante das ligações por meio dos dados obtidos na leitura dos extensômetros lineares instalados nas faces superior e laterais dos banzos e nas faces laterais dos montantes, conforme apresentado na Figura 34 a Figura 36.

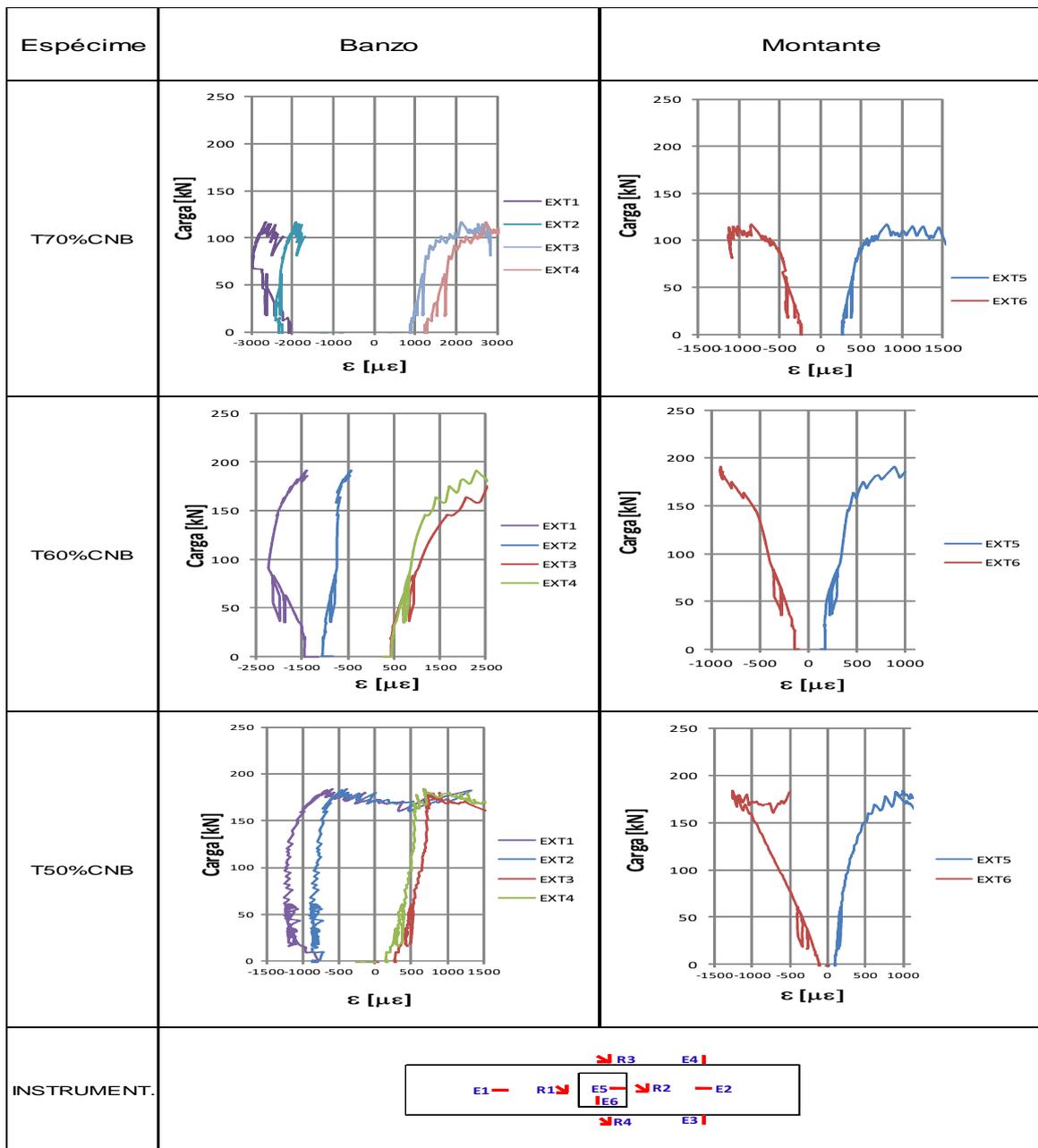


Figura 34 – Curvas carga *versus* deformação dos banzos e dos montantes das ligações ensaiadas submetidas ao esforço axial de compressão no banzo.

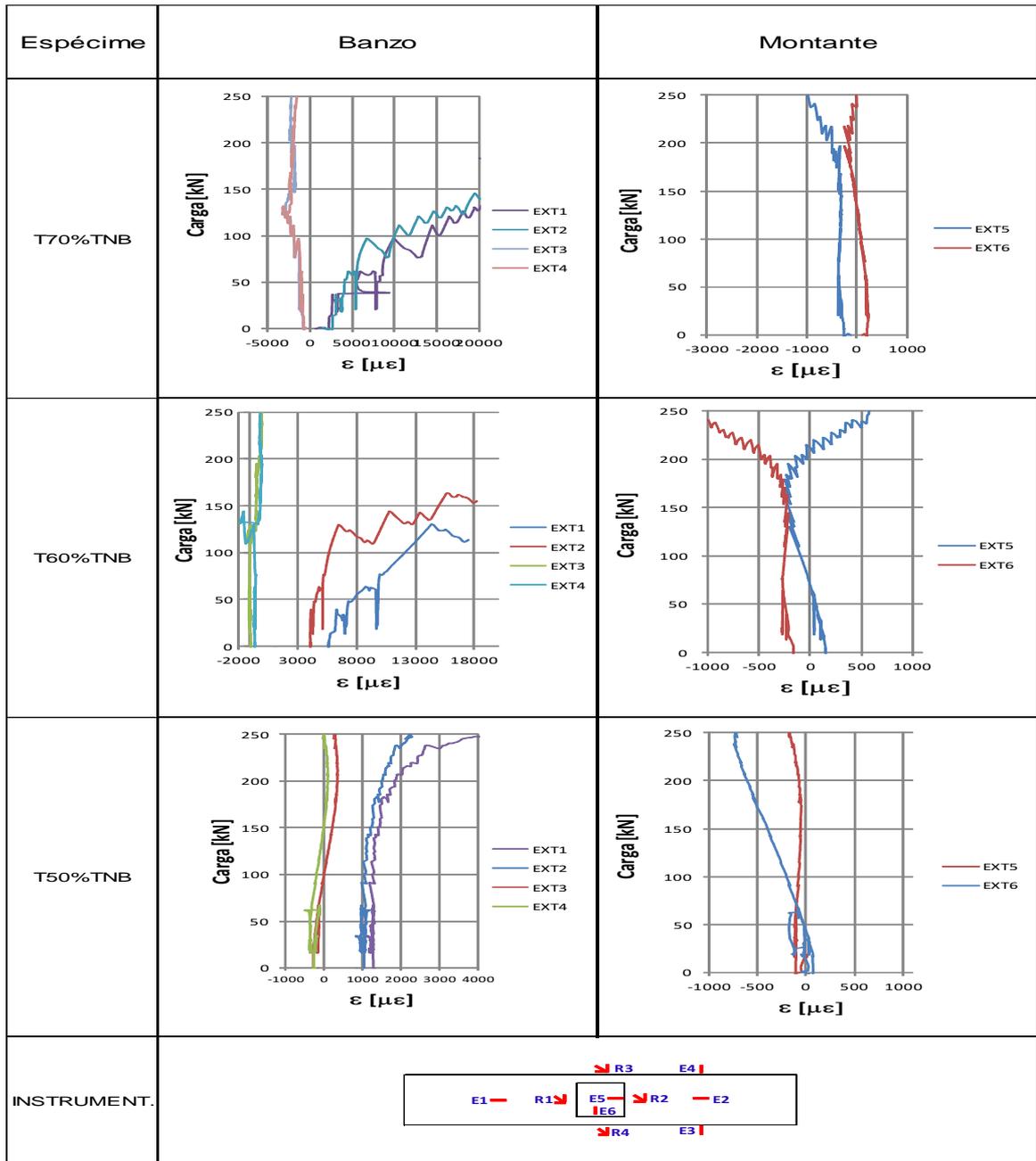


Figura 35 – Curvas carga *versus* deformação dos banzos e dos montantes das ligações ensaiadas submetidas ao esforço axial de tração no banzo.

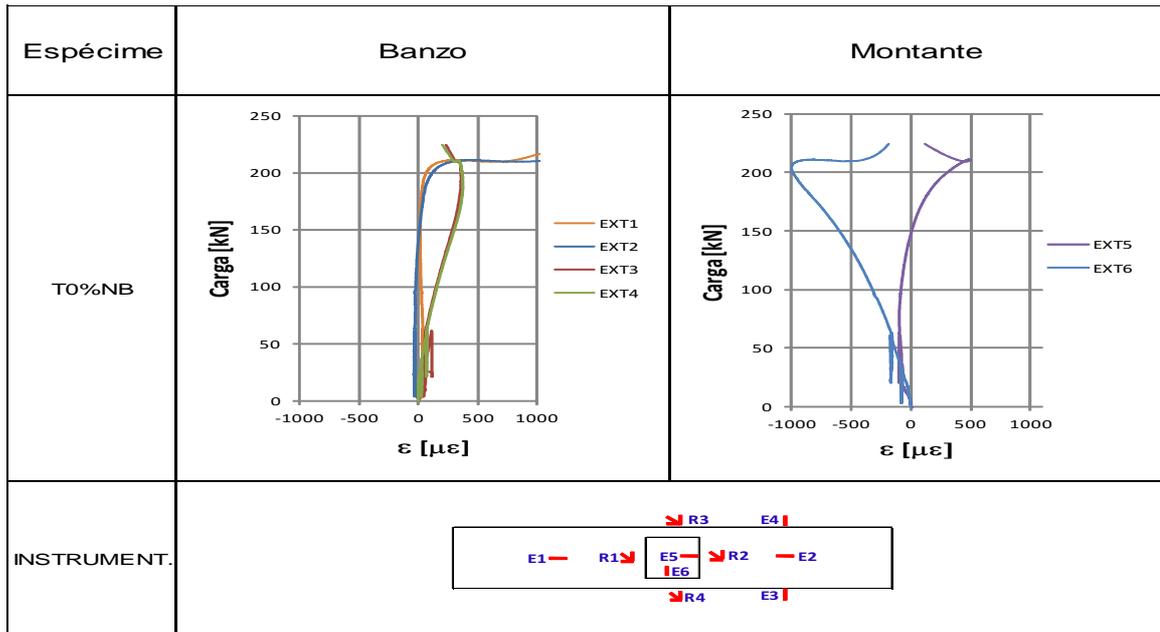


Figura 36 – Curva carga *versus* deformação dos banzo e do montante da ligação ensaiada sem esforço axial no banzo.

A partir dos gráficos de carga *versus* deformação do banzo das ligações ensaiadas apresentados, é possível observar que não há disparidade significativa do nível de deformação no banzo e que as deformações ocorridas estão compatíveis com o nível de carregamento axial destes elementos em cada um dos espécimes ensaiados. Destaca-se mais uma vez, os casos em que o nível de carregamento corresponde a 70% carga plástica do banzo, seja de tração ou de compressão.

A configuração das curvas indica a consistência nos experimentos realizados e a coerência nos resultados obtidos, que são compatíveis com os resultados observados nas leituras das rosetas, e com a configuração de carregamento de cada um dos ensaios.

É importante destacar também que há consistência entre as curvas cargas *versus* deslocamento e carga *versus* deformação caracterizando uma forte e coerente correlação entre estes fenômenos haja vista a configuração de cada uma das curvas, ressaltando ainda a uniformidade na distribuição das tensões ao longo dos banzos das ligações ensaiadas.

Os extensômetros lineares 1 e 2, e 3 e 4 são simétricos entre si e as suas leituras indicam claramente o seu comportamento similar e compatível com o nível de carregamento em todos os ensaios, destacando que o primeiro par corresponde ao comportamento da face superior dos banzos e o segundo par corresponde às deformações das faces laterais nos apoios destes perfis.

A análise do par de extensômetros lineares 1 e 2 de cada uma das ligações ensaiadas indica claramente o comportamento compatível da curva carga *versus* deformação com o nível de tensão aplicado em cada ensaio. Este fato corrobora com as análises dos dados capturados pelas rosetas que indicam, para o respectivo nível de carregamento, a plastificação da face superior antes das faces laterais dos banzos.

Este resultado também indica que o nível de deformação aumenta proporcionalmente com a intensidade da carga e isto ocorre em especial para os casos em que houve a aplicação de esforço axial de compressão no banzo onde os efeitos de flambagem local e de momentos causados pela excentricidade e pelos efeitos de segunda ordem oriundos destes carregamentos contribuem para o incremento das deformações, ressaltando também que a distribuição das tensões foi uniforme em todos os ensaios realizados.

O par de extensômetros lineares 3 e 4 instalados a meia altura nas faces laterais dos banzos no trecho sobre um dos apoios em cada uma das ligações ensaiadas indica claramente também que a plastificação das faces laterais ocorreu depois da plastificação da face superior dos banzos, sendo compatível com os dados lidos pelas rosetas.

Os resultados indicam ainda que o nível de distribuição de tensões foi uniforme em todos os ensaios, e que o nível de tensão aumenta proporcionalmente com o carregamento aplicado. Também observou-se que não houve variação e/ou alteração das condições de contornos durante a execução dos ensaios, ou seja, as ligações ensaiadas estavam apoiadas e/ou engastadas durante os procedimentos experimentais.

As análises dos extensômetros lineares 3 e 4, da mesma maneira que os extensômetros 1 e 2, indicam o níveis de deformações compatíveis da curva carga *versus* deformação com o carregamento aplicado em cada ensaio.

Os extensômetros lineares 5 e 6 foram instalados nas faces dos montantes e os dados obtidos em suas leituras indicam consistência e equivalência quando comparados entre si e. Além disso, não há grandes níveis de deformação destes elementos, o que também é compatível com as características geométricas das ligações cujo modo de falha esperado para estes espécimes é o Modo A, que consiste na plastificação da face superior do banzo, e não o modo E, caracterizado pela ruptura ou plastificação da região da solda ou flambagem localizada em função da distribuição irregular de tensões. Ressalta-se que as deformações ocorridas nos montantes não são significativas e não influenciaram nos resultados dos ensaios.

Corroborando com as análises descritas anteriormente, na Figura 37 estão indicados os resultados das leituras dos extensômetros lineares instalados na posição 1 (EXT1) de todos os espécimes ensaiados.

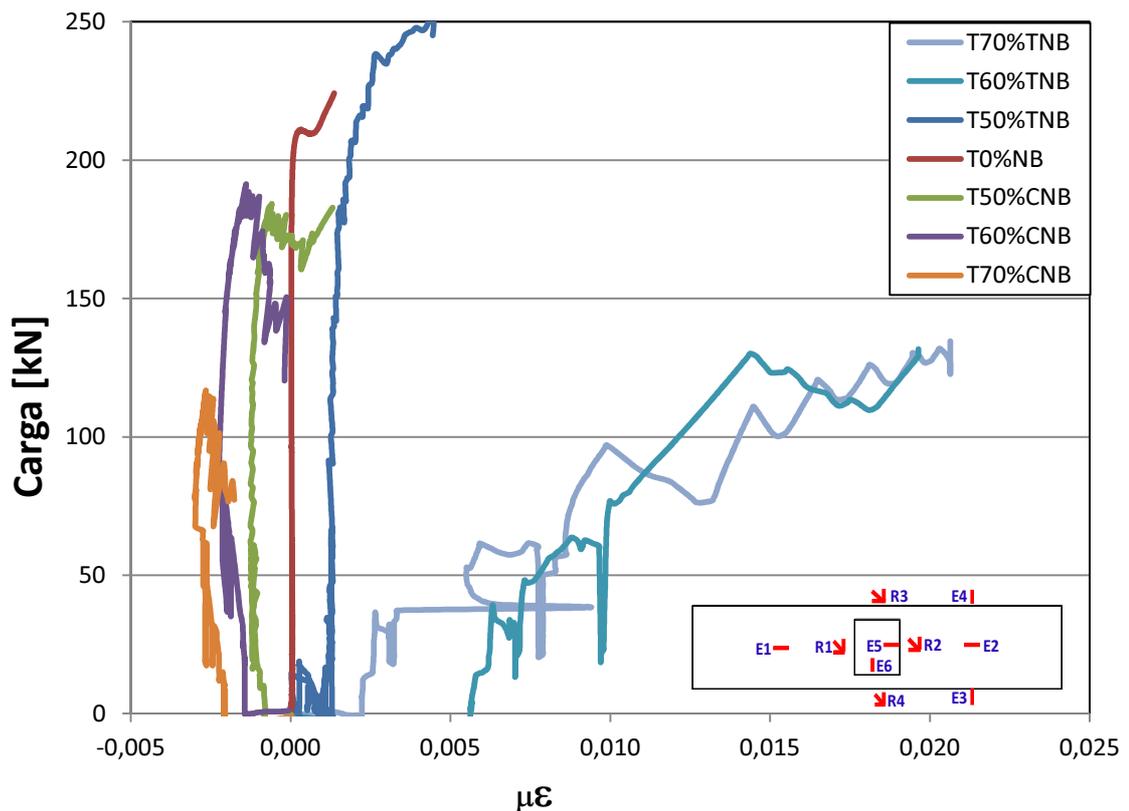


Figura 37 – Curva carga versus deformação dos banzos das ligações ensaiadas para posição de leitura número 1 dos extensômetros lineares (EXT1), inclusive com os ciclos de cargas realizados nos ensaios.

As curvas apresentadas acima demonstram o comportamento da face superior do banzo de cada uma das ligações ensaiadas e indicam uma forte consistência com os resultados avaliados. Os casos em que há a aplicação de esforço axial de compressão no banzo são claros os efeitos da flambagem local e efeitos dos momentos causados pelos efeitos de segunda ordem que ocorreram nestes elementos, reduzindo de forma imediata a resistência final das ligações submetidas a estes esforços.

Por outro lado, há uma distribuição mais alongada das tensões e das deformações para os casos em que houve a aplicação do esforço normal de tração, gerando inicialmente um ganho importante na resistência. Em seguida houve uma perda abrupta da capacidade de resistência das ligações submetidas a estes esforços, corroborando com as conclusões e análises elaboradas para os resultados experimentais realizados neste estudo.

As resistências dos sete espécimes de ligações do tipo T ensaiadas, entre perfis RHS de 100x80x6,3mm no banzo e perfis SHS de 60x60x6,3mm no montante, para a falha pelo Modo A, foram obtidos por meio do critério de deformação limite de  $3\%b_0$ . A exceção foi para o ensaio T70%TNB cujo critério de valor da resistência da ligação consistiu na adoção da carga de pico ( $N_{pico}$ ), e estão listadas na Tabela 10, inclusive com os valores teóricos obtidos por meio das normas técnicas utilizadas neste estudo, e apresentadas graficamente na Figura 38.

Tabela 10 – Quadro comparativo entre os resultados experimentais obtidos nos ensaios com os valores teóricos segundo as prescrições normativas.

Espécime	Banzo %N <sub>PL</sub> (kN)		Resistência da Ligação N (kN)			$\frac{N_{EXP}}{N_{NBR/EC3}}$	$\frac{N_{EXP}}{N_{ISO}}$
			NBR(3) EC3(4)	ISO(5)	EXP		
T70%CNB	-70	-618,64	109,06	88,88	106,78	98%	120%
T60%CNB	-60	-530,26	119,40	100,38	121,55	102%	121%
T50%CNB	-50	-441,89	129,74	109,42	130,14	100%	119%
T0%NB	0	0,00	139,56	139,56	140,47	101%	101%
T50%TNB	50	441,89	139,56	128,69	151,39	108%	118%
T60%TNB	60	530,26	139,56	125,04	171,81	123%	137%
T70%TNB	70	618,64	139,56	120,07	165,73	119%	138%

Os dados da tabela anterior demonstram que apenas para o caso do ensaio T70%TNB há uma pequena variação para mais em torno de 2% do valor da resistência teórica em relação ao valor de resistência obtida no referido ensaio. Vale ressaltar que esta variação pode ter ocorrido em função da metodologia e dos procedimentos adotados na realização do ensaio e que os referidos valores apresentam forte correlação, sendo portanto, compatíveis.

Na Figura 38 tem-se os dados do valor da resistência dos espécimes investigados obtidos nos ensaios experimentais comparados com os valores obtidos pelas prescrições normativas. Destacam-se as diferenças significativas entre estes valores para os casos em que há a aplicação de esforço normal de tração no banco das ligações, o que pode ser melhor observado na Figura 39.

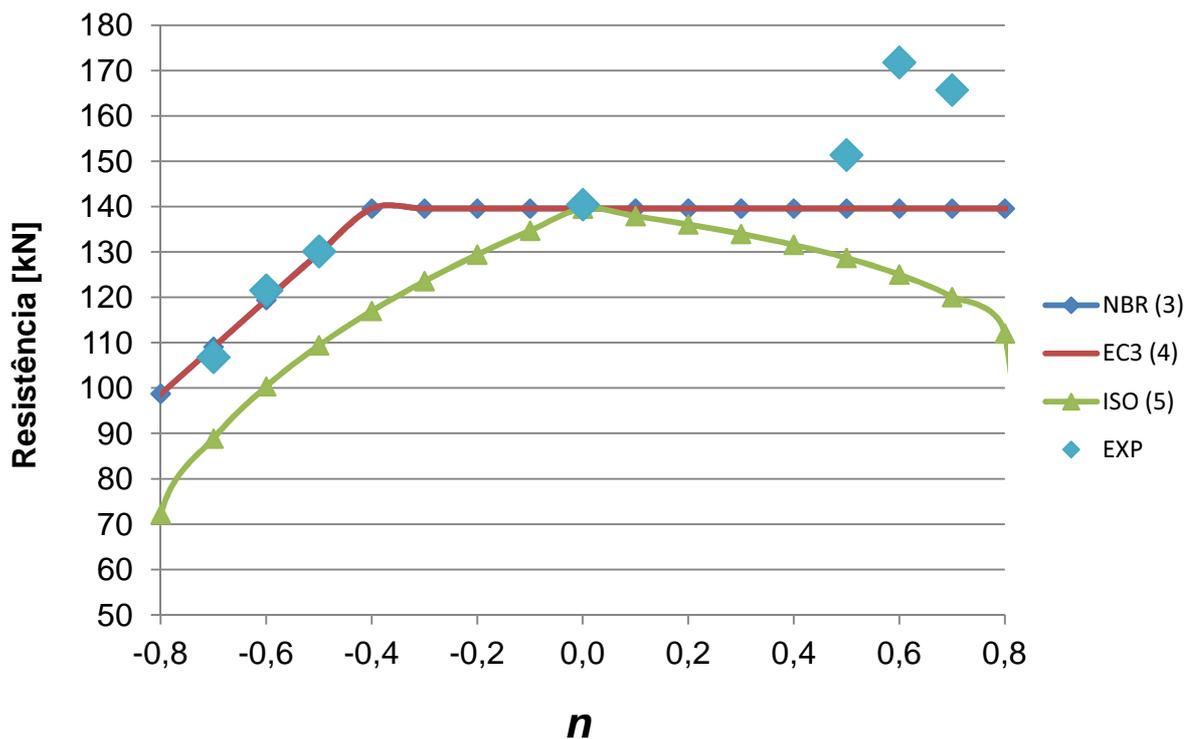


Figura 38 – Valor de resistência de ligações submetidas a esforços axiais de compressão ou de tração segundo as prescrições previstas nas normas técnicas e de acordo com os ensaios experimentais realizados.

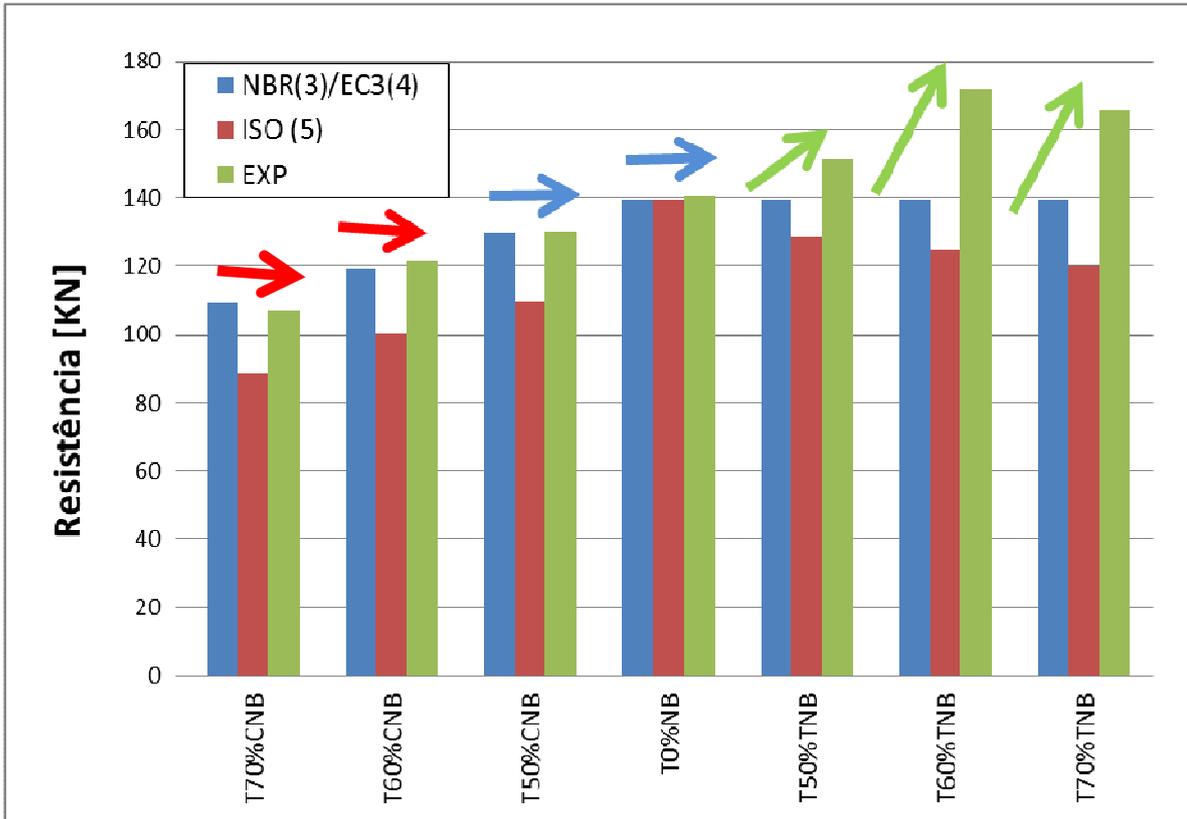


Figura 39 – Valores teóricos obtidos pelas prescrições normativas comparados com os resultados experimentais.

Analisando as informações listadas é possível concluir que para o caso em que não há aplicação de esforço normal no banzo da ligação há forte correlação entre os valores teóricos obtidos pelas normas técnicas e os resultados dos ensaios experimentais. Desta forma o valor da resistência da ligação é praticamente o mesmo considerando todas as normas e os resultados experimentais, logo o dimensionamento está a favor a segurança.

Os valores teóricos também foram compatíveis com as prescrições das normas NBR 16239 [3] e EC3-1.8 [4] para os casos de aplicação de esforço axial de compressão no banzo da ligação até o limite de 70% da carga plástica, a favor da segurança no dimensionamento. Nesta mesma situação, a norma ISO 14346 [5] apresenta valores teóricos de resistência da ligação abaixo dos valores obtidos no ensaios experimentais, ou seja, os valores conservadores e antieconômicos.

Para os casos em que há aplicação de esforço axial de tração no banzo da ligação, os valores teóricos obtidos pelas prescrições das normas NBR 16239 [3], EC3-1.8 [4], ISO 14346 [5] são conservadores. Pode-se constatar o ganho de resistência da ligação até o limite de 60% da carga plástica do banzo quando comparados com os resultados experimentais.

Nestes casos as normas são conservadores e antieconômicas. A partir do limite de 60% da carga plástica do banzo, o valor experimental de resistência começa a diminuir gradativamente. No entanto, as prescrições normativas determinaram valores abaixo dos valores obtidos no ensaios experimentais, ou seja, os valores também são conservadores e antieconômicos.

Considerando as ligações formadas por perfis RHS no banzo com dimensões de 100x80x6,3mm e por perfis SHS no montante com dimensões de 60x60x6,3mm, projetadas para falhar pelo Modo A, cujos principais parâmetros geométricos são  $\beta = 0,60$ ,  $\gamma = 7,94$  e  $\eta = 0,60$ , analisadas neste estudo, conclui-se que os resultados obtidos nos ensaios experimentais foram compatíveis com os valores teóricos para o caso das ligações sem aplicação de esforço normal no banzo para todas as normas avaliadas.

Os resultados experimentais também foram compatíveis, quando comparados com as normas NBR 16239 [3] e EC3-1.8 [4], para os casos em que houve aplicação de esforço normal de compressão de até o limite de 70% da carga de plastificação do banzo. No entanto, para esta mesma situação, os valores teóricos obtidos pela norma ISO 14346 [5] se mostraram conservadores e antieconômicos.

Nos casos em que houve aplicação de esforço axial de tração no banzo até o limite de 70% da carga de plastificação, as normas NBR 16239 [3], EC3-1.8 [4] e ISO 14346 [5] foram conservadoras, com valores teóricos de resistência da ligação com valores muito abaixo dos valores de resistência obtidos nos ensaios experimentais.

As conclusões anteriores, na medida em que forem corroboradas por outras pesquisas na mesma linha, podem contribuir para futuras revisões das normas técnicas estudadas haja vista a necessidade de aperfeiçoamento das metodologias de cálculos objetivando projetos estruturais mais econômicos sem abrir mão da segurança.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 Introdução

O uso de perfis tubulares metálicos no Brasil nas obras de construção civil, acompanhando uma tendência mundial e já há muito praticada em países mais desenvolvidos, tem sido cada vez maior gerando o aumento da sua demanda, isto vem fomentando o desenvolvimento de uma produção industrializada e contínua com emprego permanente de novas tecnologias objetivando a redução custos e a maior disponibilidade destes perfis tubulares para o mercado.

Ao considerar adequadamente as características mecânicas das seções (CHS, RHS, SHS e mais recentemente EHS, etc.), tubulares em aço estrutural, como a resistência a compressão, flexão, resistência a flambagem e a capacidade de resistir à torção, é possível ao engenheiro estrutural elaborar e desenvolver estrutura mais leves e mais econômicas quando comparadas com o uso de perfis de seção aberta e com estruturas de concreto armado. Isto ocorre apesar do custo inicial mais elevado dos perfis tubulares, sem contar, é claro, as vantagens da versatilidade deste material.

As pesquisas sobre ligações entre perfis tubulares é de fundamental importância para o adequado entendimento de seu comportamento, favorecendo desta maneira a otimização das construções com projetos mais seguros e econômicos.

A pesquisa desenvolvida neste trabalho teve como objetivo principal a avaliação da influência do esforço axial de compressão e de tração no banzo no comportamento de ligações em perfis tubulares. Neste trabalho foram consideradas as prescrições das Normas Técnicas NBR 16239 [3], Eurocode EC3-1.8 [4] e ISO 14346 [5], que preveem comportamentos diversos em função do tipo de esforço axial sob o qual se encontra o banzo da ligação.

Como é possível observar, as prescrições das normas NBR 16239 [3] e EC3-1.8 [4] são exatamente as mesmas e consideram que a ligação perde resistência para os casos em que o seu banzo está submetido ao esforço axial de compressão. Pode-se concluir que a ligação mantém a sua capacidade de resistência constante quando o seu banzo está submetido ao esforço axial de tração.

Por outro lado, na norma ISO 14346 [5], as prescrições consideram que a ligação perde resistência para ambos os casos em que o seu banzo está submetido tanto ao esforço axial de compressão quanto ao esforço axial de tração.

Foram realizados ensaios experimentais em sete ligações tipo T formadas por perfis RHS no banzo e SHS no montante, cujos dados captados permitiram uma análise detalhada do comportamento das ligações estudadas. Isto possibilitou a comparação destes resultados com os valores teóricos obtidos pelas prescrições normativas.

## 5.2 Principais conclusões

O valor de resistência dos sete espécimes da ligação do tipo T, entre perfis RHS de 100x80x6,3mm no banzo e perfis SHS de 60x60x6,3mm no montante, para a falha pelo Modo A, foi obtido por meio do critério de deformação limite de  $3\%b_0$ . A exceção foi o ensaio T70%TNB, cujo valor de resistência foi obtido pelo critério de carga de pico.

Analisando as informações anteriores é possível concluir que para o caso em que não há aplicação de esforço normal no banzo da ligação há forte correlação entre os valores teóricos obtidos pelas normas técnicas e os resultados dos ensaios experimentais. Desta forma o valor da resistência da ligação é praticamente o mesmo considerando todas as normas e os resultados experimentais, logo o dimensionamento está a favor da segurança.

Os valores teóricos também foram compatíveis com as prescrições das normas NBR 16239 [3] e EC3-1.8 [4] para os casos de aplicação de esforço axial de compressão no banzo da ligação. Nesta mesma situação, a norma ISO 14346 [5] apresenta valores teóricos de resistência da ligação abaixo dos valores obtidos no

ensaios experimentais, ou seja, trata-se de um dimensionamento conservador e antieconômico.

Para os casos em que há aplicação de esforço axial de tração no banzo da ligação, os valores teóricos obtidos pelas prescrições das normas NBR 16239 [3], EC3-1.8 [4] e ISO 14346 [5] são conservadores. É claramente observado o ganho de resistência da ligação até o limite de 60% da carga plástica do banzo, quando a resistência da ligação começa a cair. No entanto, as normas estudadas consideram valores de resistência muito abaixo dos valores de resistência obtidos experimentalmente, tratando-se também de um dimensionamento conservador e antieconômico.

### 5.3 Sugestões para trabalhos futuros

Para sugestões de trabalhos futuros, pode-se citar:

- Análise numérica de ligações com os mesmos parâmetros geométricos das ligações ensaiadas e comparar com os resultados apresentados neste trabalho.
- Consideração de outros tipos de ligações utilizando outros perfis tubulares estruturais com diferentes parâmetros geométricos.
- Realização de ensaios experimentais de outros tipos de ligações, bem como a consideração de aplicação de esforços axiais de tração e de compressão no banzo.
- Realização de ensaios experimentais de treliças globais de forma a obter dados relativos ao comportamento das ligações inseridas nesta treliça.
- Realização de ensaios experimentais com a aplicação de esforço de tração no montante, assim como a consideração de esforço axial no banzo.
- Análise dimensional e dos parâmetros geométricos do montante de ligações sob o aspecto estrutural e econômico.

## REFERÊNCIAS

- [1] Tubos Estruturais e Mecânicos. Tuper S.A. 2015. <http://www.tuper.com.br/produtos-e-servicos/sistemas-construtivos/tubos-para-sistemas-construtivos/> (15/11/2015).
- [2] Vallourec Tubos do Braisl S.A. 2015. <http://www.vallourec.com/COUNTRIES/BRAZIL/PT/Products-and-services/Paginas/default.aspx> (15/11/2015).
- [3] NBR 16.239: 2013. Projetos de Estrutura de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edificações com Perfis Tubulares, Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT.
- [4] EUROCODE 3, prEN 1993-1-8: 2005. Design of steel structures: Part 1-8: Design of joints. CEN, European Committee for Standardisation, Brussels.
- [5] ISO 14.346: 2013. Static design procedure for welded hollow-section joints – Recommendations.
- [6] Lu, L. H., Winkel, G. D. de, Yu Y., Wardenier, J. 1994. Deformation Limit for the Ultimate Strength of Hollow Section Joints, Proceedings of the 6th. International Symposium on Tubular Structures, Rotterdam, Balkema, 1994: 341-347.
- [7] Kosteski, N., Packer, J. A.. 2003. Welded Tee-to-HSS Connections. Journal of Structural Engineering. February 2003. pp 151-159.
- [8] Kosteski, N., Packer, J. A., F.ASCE. 2003. Longitudinal Plate and Through Plate-to-Hollow Structural Section Welded Connections. Journal of Structural Engineering. April 2003. pp 478-486.

- [9] Mendanha, Fabiano Olibveira. Análise de Ligações de Perfis Tubulares em Aço do tipo T e KT. Ouro Preto. 2006. Dissertação (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Faculdade de Engenharia.
- [10] Wardenier, J., Vegte, G. J., Packer, J. A., Zhao, X- L. 2014. Background of the new RHS joint strength equations in the IIW (2009) recommendations. 13th. International Symposium on Tubular Structures, Hong Kong, China.
- [11] Zhao, X-L., Wardenier, J., Packer, J. A., Vegte, G. J. 2010. Current static design guidance for hollow-section joints. Structures and Buildings 163 Issue SB6. pp. 361-373.
- [12] IIW 2009. Static design procedure for welded hollow section joints Recommendations, 3rd Edition, Intern. Institute of Welding, Sub-commission VX-E, Annual Assembly, Singapore, IIW Doc. XV-1329-09.
- [13] International Institute of Welding (IIW), 1989. Design recommendation for hollow section joints – Predominantly statically loaded, 2nd Ed., IIW Document XV-701-89, Cambridge, U.K.
- [14] Nunes, Gabriel Vieira. Estudo paramétrico de ligações tipo “T”, “K” e “KT” compostas por perfis tubulares de seção retangular e circular. Ouro Preto. 2012. Dissertação (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Faculdade de Engenharia.
- [15] Zhao, Xiao-Ling, Heidarpour, A., Gardner, L. 2014. Recent developments in high-strength and stainless steel tubular members and connections. Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin · Steel Construction 7 (2014), No. 2. pp. 65-72.
- [16] Elghazouli, A. Y., Packer, J. A. 2014. Seismic Design solutions for connections to tubular members. Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin · Steel Construction 7 (2014), No. 2. pp. 73-83.

- [17] Wardenier, J., Choo, Y. S., Packer, J. A., Vegte, G. J., Shen, W. 2014. Design recommendations for axially loaded elliptical hollow section X and T joints. Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin · Steel Construction 7 (2014), No. 2. pp. 89-96.
- [18] Vegte, G. J., Wardenier, J. 2014. Evaluation of the recent IIW (2012) and ISO (2013) strength equations for axially loaded CHS K gap joints. Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin · Steel Construction 7 (2014), No. 2. pp. 97-106.
- [19] CIDECT - 2<sup>a</sup>Ed: 2009. Design Guide For Rectangular Hollow Section (RHS) Joints Under Predominantly Static Loading [ed. by: Comité International pour le Developpement et L'Étude de la Construction Tubulaire] Jeffrey A. Packer.
- [20] Ritakallio, P., Björk, T. 2014. Low-temperature ductility and structural behaviour of cold-formed hollow section structures – progress during the past two decades. Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin · Steel Construction 7 (2014), No. 2. pp. 107-115.
- [21] EN 10219: 2006. Cold-formed welded structural hollow sections of non-alloy and fine grain steels - Part 1: Technical delivery conditions & Part 2: Tolerances, dimensions and sectional properties.
- [22] Lipp, A., Ummenhofer, T. 2014. Influence of tensile chord stresses on the strength of circular hollow section joints. Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin · Steel Construction 7 (2014), No. 2. pp. 126-132.
- [23] Nizer, A. Lima, L. R. O de, Neves., L.F. da C. 2015. Structural behaviour of T RHS joints subjected to chord axial force. 2015. Tubular Structures XV – Batista, Vellasco & Lima (eds). pp. 371-378.
- [24] Nizer, Adriano. Avaliação da Influência do esforço normal no banzo no comportamento de ligações tubulares em aço. Rio de Janeiro. 2014.

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

- [25] Silva, Raphael Santos da. Avaliação de ligações K e T entre perfis estruturais tubulares circulares. 2012. Dissertação (Engenharia Civil) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.
  
- [26] Lima, Nívia dos Santos. Comportamento estrutural de ligações tubulares T e KT. Rio de Janeiro. 2012. Dissertação (Engenharia Civil) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.
  
- [27] Nobre. David Silva. Avaliação de Ligações Duplo K Entre Perfis Tubulares em Aço. Rio de Janeiro. 2014. Dissertação (Engenharia Civil) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.
  
- [28] Lopes. Monteiro Marcela. Avaliação de ligações entre perfis tubulares em aço submetidas a esforços de flexão. Rio de Janeiro. 2014. Dissertação (Engenharia Civil) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.
  
- [29] Metalfenas Indústria da Construção Ltda. 2015. <http://www.metalfenas.com.br/>.
  
- [30] ASTM A36-A36M:2008 Standard Specification for Carbon Structural Steel.
  
- [31] NBR 8261: 2010. Tubos de aço-carbono, formado a frio, com e sem solda, de seção circular, quadrada ou retangular para usos estruturais.