

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

**ANÁLISE TEÓRICA-EXPERIMENTAL DE LIGAÇÕES TIPO  
“T”, “K” E “KT” COM PERFIS METÁLICOS TUBULARES.**

**AUTOR: FRANCISCO CANAZART MENDES**

ORIENTADORA: Profa. Dra. Arlene Maria Sarmanho Freitas

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

**Ouro Preto, Agosto de 2008.**

M538a Mendes, Francisco Canazart.  
Análise teórica-experimental de ligações tipo “T”, “K” e “KT” com perfis metálicos tubulares [manuscrito] / Francisco Canazart Mendes - 2008.

xv, 107f.: il. color., graf., tabs.

Orientadora: Profa. Dra. Arlene Maria Sarmanho Freitas

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

1. Ligações metálicas - Teses. 2. Análise numérica - Teses.  
3. Treliça (Construção civil) - Teses I. Universidade Federal de Ouro Preto.  
II. Título.

CDU: 624.014.2

Catálogo: [sisbin@sisbin.ufop.br](mailto:sisbin@sisbin.ufop.br)

## **AGRADECIMENTOS**

A meus pais, Helena e José Nonato, por minha formação e apoio em todas as horas; meu porto seguro.

A meus irmãos Gilberto, Gildete, Neto, Girlene, Marilene pela amizade, apoio e incentivo.

A todos os colegas de mestrado e da república OX pela amizade, companheirismo, pelas horas de estudo e pelos momentos de alegria que deixaram esta caminhada menos dura.

A todos os amigos de verdade que sempre me incentivam e apóiam incondicionalmente.

A todo pessoal do laboratório, Dequinha, João, Sr. Osvaldo e alunos da iniciação científica pela inestimável ajuda na realização dos ensaios e pela amizade construída.

À professora Arlene Maria Sarmanho Freitas, por acreditar em mim e na realização deste trabalho, pela amizade, orientação, pelos diversos ensinamentos, compreensão e apoio.

Aos professores do PROPEC pela contribuição na minha formação com valiosos ensinamentos.

À Universidade Federal de Ouro Preto.

À Capes e a Vallourec & Mannesmann do Brasil pelo apoio financeiro.

E, acima de tudo a Deus, que tanto me deu força para vencer mais esta etapa.

## RESUMO

Neste trabalho é apresentado um estudo de ligações soldadas do tipo “T”, “K” e “KT” com “gap”, formadas por perfis tubulares estruturais de aço sem costura, com seção transversal retangular no banzo e circular nos demais membros. Para este estudo foram desenvolvidas análise teórica e numérica dos nós das ligações, ensaios experimentais em protótipos em escala real, e ensaios de tensões residuais no perfil retangular do banzo. As análises teóricas foram realizadas a partir das prescrições de norma com a geometria das ligações do tipo “T”, “K” e “KT” definida a partir de sistema treliçado previamente avaliado e considerando a eficiência do mesmo. Os ensaios dos protótipos das ligações foram realizados no Laboratório de Estruturas “Prof. Altamiro Tibiriçá Dias” do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto e visaram a obtenção do comportamento, carga última e modo de colapso da ligação. Foi realizado ensaios para determinação da distribuição de tensões residuais no tubo retangular conformado a frio a partir de circular laminado visando avaliar sua influência no comportamento das ligações. A análise numérica em elementos finitos envolveu a geração, análise e calibração, a partir dos resultados obtidos nos ensaios experimentais. O modelo foi constituído de forma que representasse o comportamento e a capacidade de carga das ligações ensaiadas experimentalmente. Os resultados experimentais indicaram que a relação entre as cargas experimentais e as de projeto, obtidas pelo Eurocode, para a ligação “T”, possui boa correlação sendo que o mesmo não foi verificado para ligações “K” e “KT”. Os resultados numéricos seguiram a mesma tendência, com bons resultados para a ligação “T” e o mesmo não ocorrendo para as ligações “K” e “KT”.

## **ABSTRACT**

This work presents a study of welded "T", "K" and "KT" joints with a "gap", formed by a structural steel hot rolled hollow section, having rectangular hollow sections at the chords and circular hollow sections in the others members. The study developed theoretical and numerical analyses for the joints, experimental tests in full scale prototypes, and tests for residual stress in the rectangular hollow section. Theoretical analyses were performed using code standards for the geometry of the "T", "K" and "KT" joints as defined by the truss system's previously estimated efficiency. The experimental tests on the joints were performed at the Prof. Altamiro Tibiriçá Dias Structures Laboratory of the Civil Engineering Department in the School of Mines, at the Universidade Federal de Ouro Preto. Here, the results for behavior, ultimate load, and collapse mode were analyzed. Tests were made to determine residual stress distribution and its influence in the structural behavior of joints. The tests involved a rectangular hollow section formed by the cold formed process taken from a hot rolled circular hollow section. The numerical analysis using finite elements methods involved the generation, testing and calibration, of the experimental results. The model represents the behavior and load capacity of the tested joints. The results showed that the loads, using Eurocode, and the the ones from the experiment had good correlation for the "T" joint. This was not observed for the "K" and "KT" joints. The numerical result was the same as the theoretical one for the "T" joint, but the same did not occur for the "K" and "KT" joints.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1. Considerações gerais.....	1
1.2. Objetivos.....	6
1.3. Justificativa.....	6
1.4. Pesquisas em perfis tubulares.....	7
1.5. Descrição do trabalho.....	13
<b>2. AVALIAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>15</b>
2.1. Ligações do tipo “T”, “K” e “KT”.....	15
2.2. Excentricidade e “gap” nas ligações.....	18
2.3. Modos de falha.....	19
2.4. Procedimento de dimensionamento.....	20
2.4.1. Parâmetros de dimensionamento.....	21
2.4.2. Limitações.....	21
2.4.3. Obtenção das resistências últimas.....	23
2.5. Análise de sistemas treliçados.....	25
<b>3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>29</b>
3.1. Introdução.....	29
3.2. Experiência anterior.....	30
3.3. Características dos materiais e dimensões dos protótipos.....	31
3.4. Esquema de montagem dos ensaios.....	34
3.4.1. Sistema de apoio dos protótipos.....	35
3.4.2. Sistema de aplicação dos carregamentos.....	37
3.5. Instrumentação e sistema de aquisição de dados.....	44
3.6. Metodologia de ensaio.....	51
3.7. Ensaio de tensões residuais.....	52
<b>4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>58</b>
4.1. Introdução.....	58
4.2. Ligação “KT”.....	58
4.3. Ligação “K”.....	67
4.4. Ligação “T”.....	72
4.5. Análise dos resultados.....	77
<b>5. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>79</b>
5.1. Introdução.....	79
5.2. Comparação com as prescrições do Eurocode 3.....	79
5.3. Comparação com a análise numérica.....	81
5.3.1. Metodologia da análise numérica.....	81
5.3.2. Ligação “KT”.....	85
5.3.3. Ligação “T”.....	90
5.3.4. Ligação “K”.....	94
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>98</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>103</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
Figura 1.1 – Associação de perfis (Arquivo pessoal). ....	2
Figura 1.2 – Distribuição de tensões residuais em perfis retangulares (Vallourec & Mannesmann Tubes).....	3
Figura 1.3 – Passarela em perfil tubular (V&M do Brasil). ....	3
Figura 1.4 - Passarela em Amsterdam (Meyer, 2002). ....	4
Figura 1.5 – Treliça apresentando ligações do tipo “T”, “K” e “KT”. ....	4
Figura 1.6 - Nova sede da V & M do Brasil em Belo Horizonte (Mendanha, 2006)...	5
Figura 1.7 - Excentricidades analisadas por Saldani (1998).....	8
Figura 1.8 - Modelos analisados por Saldani (1998). ....	8
<b>2. AVALIAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>15</b>
Figura 2.1 – Ligação “K” com “gap”.....	15
Figura 2.2 - Ligação “K” com “overlap”. ....	16
Figura 2.3 - Parâmetros geométricos dos nós tipo “T”, “K” e “KT”.....	17
Figura 2.4 - Modos de falha (Coleção técnico-científica V & M do Brasil. Dimensionamento de ligações em barras tubulares de estruturas metálicas planas)..	20
Figura 2.5 - Tipologia das treliças analisadas. ....	26
<b>3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>29</b>
Figura 3.1 - Nomenclatura utilizada para as dimensões dos protótipos. ....	31
Figura 3.2 - Esquema geral dos protótipos produzidos. ....	33
Figura 3.3 – Esquema geral de montagem para a ligação “KT”.....	35
Figura 3.4 - Esquema de fixação do banzo à laje de reação. ....	36
Figura 3.5 - Detalhe de uma das extremidades do banzo. ....	37
Figura 3.6 - Detalhamento de projeto da chapa de extremidade.....	37
Figura 3.7 - Sistemas de aplicação de carregamento de compressão. ....	38
Figura 3.8 - Chapa com rolete e chapa de distribuição uniforme na diagonal comprimida. ....	39

Figura 3.9 - Desenho de projeto da chapa para regularização do carregamento de compressão na diagonal. ....	39
Figura 3.10 - Chapa para regularização do carregamento de compressão no montante. ....	40
Figura 3.11 - Rótula universal e chapa de distribuição para o montante. ....	40
Figura 3.12 – Sistema utilizado anteriormente para aplicação do carregamento de tração. ....	41
Figura 3.13 - Sistema para aplicação do carregamento de tração. ....	42
Figura 3.14 - Chapa de extremidade e sistema rotulado para a aplicação de tração às diagonais. ....	43
Figura 3.15 - Chapa de extremidade das diagonais tracionadas. ....	43
Figura 3.16 - Esquema de montagem de um protótipo do tipo “KT” ....	44
Figura 3.17 - Deflectômetros de haste. ....	45
Figura 3.18 – LVDT’s utilizados nos ensaios. ....	45
Figura 3.19 - Posicionamento dos defletômetros em um ensaio de ligação “KT”. ....	46
Figura 3.20 – Rosetas. ....	47
Figura 3.21 – Posicionamento dos extensômetros para a ligação do tipo “T”. ....	47
Figura 3.22 - Posicionamento dos extensômetros para a ligação do tipo “K” ....	48
Figura 3.23 - Posicionamento dos extensômetros para a ligação do tipo “KT”. ....	49
Figura 3.24 – Células de carga utilizadas nos ensaios. ....	50
Figura 3.25 - Sistema automático de aquisição de dados. ....	51
Figura 3.26 – Serra de fita. ....	53
Figura 3.27 - Corpo de prova instrumentado e algumas tiras após o corte longitudinal. ....	53
Figura 3.28 - Deformada da tira número 1 ....	54
Figura 3.29 - Deformada circular de uma tira. ....	55
Figura 3.30 - Diagrama de deformação de uma seção submetida à flexão composta. ....	56
Figura 3.31 - Distribuição das tensões residuais externas, médias e internas, ao longo da seção do tubo retangular. ....	57
<b>4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS. 58</b>	
Figura 4.1 – Imperfeições geométricas dos protótipos da ligação tipo “KT” ....	60

Figura 4.2 – Gráfico Carregamento x Tensão de von Mises para a ligação “KT” – Roseta 1.....	62
Figura 4.3 – Gráfico Carregamento x Tensão de von Mises para a ligação “KT” – Roseta 2.....	63
Figura 4.4 – Gráfico Carregamento x Tensão de von Mises para a ligação “KT” – Roseta 3.....	63
Figura 4.5 – Gráfico Carregamento x Tensão de von Mises para a ligação “KT” – Roseta 4.....	64
Figura 4.6 – Gráfico Carregamento x Tensão de von Mises para a ligação “KT” – Roseta 5.....	64
Figura 4.7 – Gráfico Carregamento X Tensão na diagonal tracionada para a ligação “KT” .....	65
Figura 4.8 – Gráfico Carregamento x Tensão na face inferior do banzo.....	66
Figura 4.9 – Gráfico Carregamento x Deslocamento por flexão do banzo e longitudinal do montante para a ligação “KT”. .....	67
Figura 4.10 - Imperfeições geométricas dos protótipos da ligação tipo “K” .....	69
Figura 4.11 – Gráfico Carregamento x Tensão de von Mises para a ligação “K” – Roseta 1.....	70
Figura 4.12 – Gráfico Carregamento x Tensão de von Mises para a ligação “K” – Roseta 2.....	70
Figura 4.13 – Gráfico Carregamento x Tensão de von Mises para a ligação “K” – Roseta 3.....	71
Figura 4.14 – Gráfico Carregamento x Tensão de von Mises para a ligação “K” – Roseta 4.....	71
Figura 4.15 – Gráfico Carregamento X Tensão na diagonal tracionada para a ligação “K” .....	72
Figura 4.16 - Imperfeições geométricas dos protótipos da ligação tipo “T”. .....	73
Figura 4.17 – Gráfico Carregamento x Tensão de von Mises para a ligação “T” – Roseta 1.....	74
Figura 4.18 – Gráfico Carregamento x Tensão de von Mises para a ligação “T” – Roseta 2.....	75

Figura 4.19 – Gráfico Carregamento x Tensão de von Mises para a ligação “T” – Roseta 3.....	75
Figura 4.20 – Gráfico Carregamento x Deslocamento por flexão do banzo e longitudinal do montante para a ligação “T”.....	76
Figura 4.21 – Afundamento do montante na face superior do banzo no protótipo T02. ....	77
Figura 4.22 –Gráfico Carregamento no montante x Tensão de von Mises para os protótipos KT02 e T02.....	78
<b>5. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>79</b>
Figura 5.1 - Esquema para cálculo das cargas teóricas de colapso para as ligações do tipo “KT” e “K”.....	79
Figura 5.2 - Elemento de casca Shell 181 (Programa ANSYS).....	82
Figura 5.3 - Modelagem da solda (Lee e Wilmshurst , 1995).....	83
Figura 5.4 - Modelo numérico de uma ligação “KT”.....	83
Figura 5.5 – Comparação entre os modelos numéricos e experimental para a ligação “KT” – Roseta 1.....	86
Figura 5.6 – Comparação entre os modelos numéricos e experimental para a ligação “KT” – Roseta 2.....	87
Figura 5.7 – Comparação entre os modelos numéricos e experimental para a ligação “KT” – Roseta 3.....	87
Figura 5.8 – Comparação entre os modelos numéricos e experimental para a ligação “KT” – Roseta 4.....	88
Figura 5.9 – Comparação entre os modelos numéricos e experimental para a ligação “KT” – Roseta 5.....	88
Figura 5.10 - Configuração deformada e distribuição da tensão de von Mises para o modelo NKT02.....	89
Figura 5.11 - Configuração deformada e distribuição da tensão de von Mises para o modelo NKT03.....	90
Figura 5.12 – Comparação entre os modelos numéricos e experimental para a ligação “T” – Roseta 1.....	91
Figura 5.13 – Comparação entre os modelos numéricos e experimental para a ligação “T” – Roseta 2.....	92

Figura 5.14 – Comparação entre os modelos numéricos e experimental para a ligação “T” – Roseta 3.....	92
Figura 5.15 - Configuração deformada e distribuição da tensão de von Mises para o modelo NT02. ....	93
Figura 5.16 - Configuração deformada e distribuição da tensão de von Mises para o modelo NT03. ....	94
Figura 5.17 – Comparação entre os modelos numéricos e experimental para a ligação “K” – Roseta 1. ....	95
Figura 5.18 – Comparação entre os modelos numéricos e experimental para a ligação “K” – Roseta 2. ....	95
Figura 5.19 – Comparação entre os modelos numéricos e experimental para a ligação “K” – Roseta 3. ....	96
Figura 5.20 – Comparação entre os modelos numéricos e experimental para a ligação “K” – Roseta 4. ....	96

## LISTA DE TABELAS

<b>2. AVALIAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>15</b>
Tabela 2.1- Altura, vão e ângulos das treliças analisadas.....	26
Tabela 2.2 - Dimensões e peso linear dos perfis utilizados.....	27
Tabela 2.3 - Peso, carga máxima e rendimento para a treliça de 10 m de vão e 550 mm de altura em alguns ângulos.....	28
<b>3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>29</b>
Tabela 3.1 - Ensaio realizado por Freitas et al. (2006).....	30
Tabela 3.2– Dimensões nominais e propriedades mecânicas dos perfis componentes dos protótipos das ligações. ....	32
<b>4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS. 58</b>	
Tabela 4.1- Cargas aplicadas e modos de colapso dos ensaios experimentais. ....	77
<b>5. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>79</b>
Tabela 5.1- Limites teóricos e cargas aplicadas nos ensaios experimentais.....	80

## LISTA DE SÍMBOLOS

### a) Letras romanas maiúsculas.

$A_0$  - área da seção transversal do banzo.

$A_V$  - área efetiva de cisalhamento no banzo.

$E$  - módulo de elasticidade.

$E_t$  - módulo tangente.

$I$  - momento de inércia.

$K$  - coeficiente de ponderação para flambagem.

$K_n$  - parâmetro de cálculo.

$L$  - comprimento do membro.

$M_{Rd}$  - momento fletor resistente de cálculo.

$M_{Sd}$  - momento fletor solicitante de cálculo.

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

$N_{i,Rd}$  - resistência última levando em conta a plastificação do banzo a partir da diagonal/montante “i”.

$N_{Rd}$  - força normal resistente de cálculo.

$N_{Sd}$  - força normal de compressão solicitante na barra.

$R$  - raio de curvatura.

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

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

### b) Letras romanas minúsculas

$b_0$  - largura do tubo retangular do banzo.

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

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

$b_i$  - largura do tubo quadrado e retangular da barra i.

$d_i$  - diâmetro do tubo “i” de seção circular.

$e$  - excentricidade das ligações.

$f$  - flecha.

$f_u$  - tensão de ruptura à tração do aço.

$f_y$  - tensão de escoamento do aço.

$g$  - afastamento entre as barras secundárias na face do banzo para ligações “K” e “KT” afastada.

$g_a$  - afastamento entre as barras secundárias na face do banzo menos duas vezes a espessura do pé da solda, para ligações “K” e “KT” afastada.

$h_0$  - altura do tubo retangular do banzo.

$i$  - índice que indica o número da barra:

$i = 0 \rightarrow$  representa o banzo

$i = 1 \rightarrow$  representa a diagonal tracionada das ligações

$i = 2 \rightarrow$  representa a diagonal comprimida das ligações

$i = 3 \rightarrow$  representa o montante

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

$n_p$  - resistência ao escoamento devido aos esforços  $N_{0p,Sd}$  e  $M_{0,Sd}$  para seções tubulares circulares

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

$t_i$  - espessura da parede do tubo “i”

### c) Letras gregas minúsculas

$\alpha$  - coeficiente utilizado para determinar a área efetiva de cisalhamento da barra principal.

$\beta$  - razão entre os diâmetros dos membros e a largura do banzo.

$\epsilon_{ex}$  = deformação resultante externa

$\epsilon_f$  = deformação devido ao efeito de flexão pura.

$\epsilon_m$  = deformação devido ao efeito membranar.

$\epsilon_{in}$  = deformação resultante interna.

$\epsilon_{rin}$  = deformação elástica na face interna do perfil.

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

$\gamma_M$  - coeficiente de ponderação utilizado pelo Eurocode3.

$\theta_i$  - ângulo entre as barras principais e secundárias.

$\phi$  - indicação de perfil tubular.

$\nu$  - coeficiente de Poisson.

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

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

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Considerações gerais

São inegáveis as inúmeras vantagens inerentes à construção metálica como, por exemplo, maior rapidez de execução devido à tendência de industrialização do sistema; canteiro de obras mais limpo e racionalizado; compatibilidade com inúmeros materiais de fechamento além do constante desenvolvimento de novas tecnologias específicas; permitir vencer grandes vãos com estruturas leves e esbeltas implicando em diversas vantagens tanto arquitetônicas quanto estruturais e econômicas. É por esses e outros fatores que é significativa a utilização da construção metálica em países como Estados Unidos, Canadá, Austrália e países da Europa, onde o uso da estrutura metálica também com perfis de seções tubulares é mais uma opção. Porém, no Brasil, o uso desses perfis na construção civil é recente, tendo seu crescimento estimulado em razão da maior oferta de perfis tubulares estruturais.

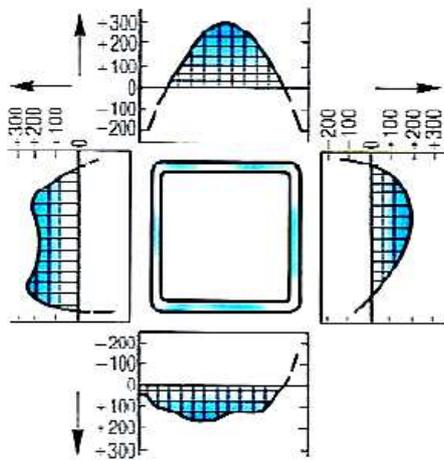
Dentre os diversos tipos de perfis de aço empregados na construção civil tem-se os perfis tubulares de seção transversal circular, quadrada e retangular. A eficiência estrutural destes perfis está relacionada à geometria de sua seção transversal, com capacidade de resistir às altas solicitações de esforços axiais, torção e efeitos combinados de maneira eficiente. Além dos aspectos estruturais, com a arquitetura contemporânea valorizando a estrutura aparente, a solução com perfis tubulares dá as construções uma aparência mais leve e dinâmica. Quando em associação com outros tipos de perfis, os tubulares permitem obter estruturas muito eficientes, sendo aproveitado de cada geometria o que de melhor ela pode oferecer, como pode ser visto na Figura 1.1, onde tem-se a coluna em perfil tubular, seção muito eficiente na resistência ao esforço de compressão, e a viga em perfil “I” muito eficiente para combater aos esforços de flexão a qual está submetida.



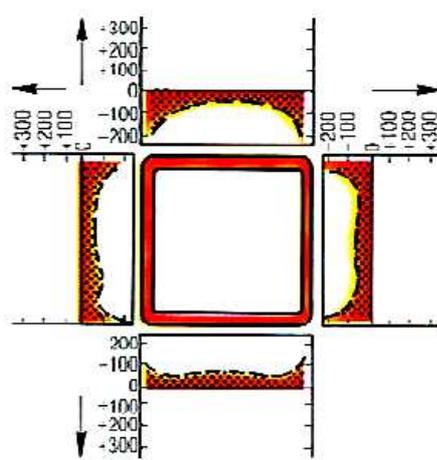
Figura 1.1 – Associação de perfis (Arquivo pessoal).

Em relação aos tubos de aço, esses podem ser classificados de acordo com o seu processo de fabricação em tubos com costura, produzidos a partir de chapas de aço dobradas e soldadas no encontro de suas extremidades. Já os tubos sem costura são produzidos por processo de laminação a quente, a partir de um bloco circular maciço de aço que é laminado e perfurado por um mandril, obtendo-se suas dimensões finais. Essa diferença nos processos de fabricação faz com que a distribuição de tensões residuais seja diferente nos tubos com e sem costura. Esta distribuição é uniforme nos tubos sem costura e apresentando nível de tensões residuais diferente na região da solda em relação às demais regiões da seção transversal no tubo com costura (Araújo et al., 2001).

Os tubos de seção retangular sem costura podem ser produzidos por processo de laminação a quente, ou a partir de tubo circular por conformação a frio, gerando diferentes espectros das tensões residuais dependendo do processo de obtenção deste tipo de seção tubular. Na Figura 1.2 temos a distribuição de tensões residuais, em MPa, para dois perfis quadrados, um conformado a frio e o outro laminado a quente, com dimensões de 160x160x6 mm e 180x180x6,3 mm, respectivamente.



(a) Perfil formado a frio



(b) Perfil laminado a quente

Figura 1.2 – Distribuição de tensões residuais em perfis retangulares (Vallourec & Mannesmann Tubes).

Com os diversos tipos de perfis tubulares pode-se confeccionar treliças, que são reconhecidas como uma excelente e uma das mais eficientes soluções para vencer grandes vãos. As treliças têm sido muito utilizadas em estádios, hangares, passarelas para pedestres entre outras estruturas, como mostrado nas Figuras 1.3 e 1.4. No Brasil é bastante difundido o uso de perfis tubulares em treliças espaciais como solução para coberturas de grandes vãos.

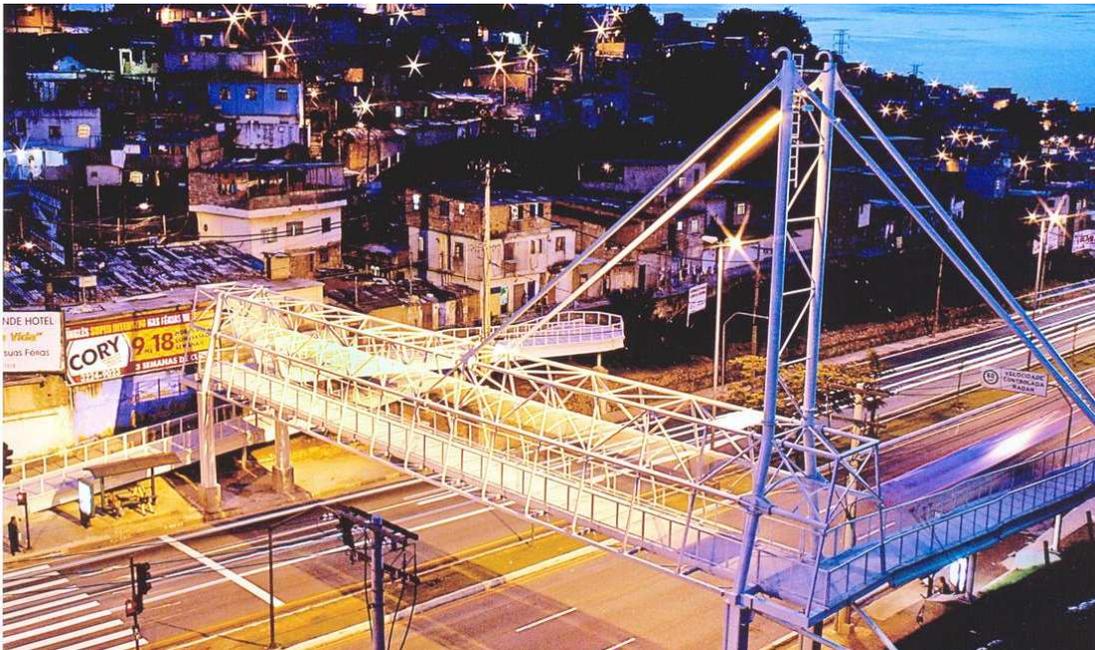


Figura 1.3 – Passarela em perfil tubular (V&M do Brasil).



Figura 1.4 - Passarela em Amsterdam (Meyer, 2002).

Dependendo da necessidade diferentes tipos de ligações (Figura 1.5), podem ser montados resultando em diferentes tipos de treliças. A escolha da configuração a ser usada depende de vários fatores, tais como os arquitetônicos, vão a ser vencido, facilidade de fabricação entre outros.

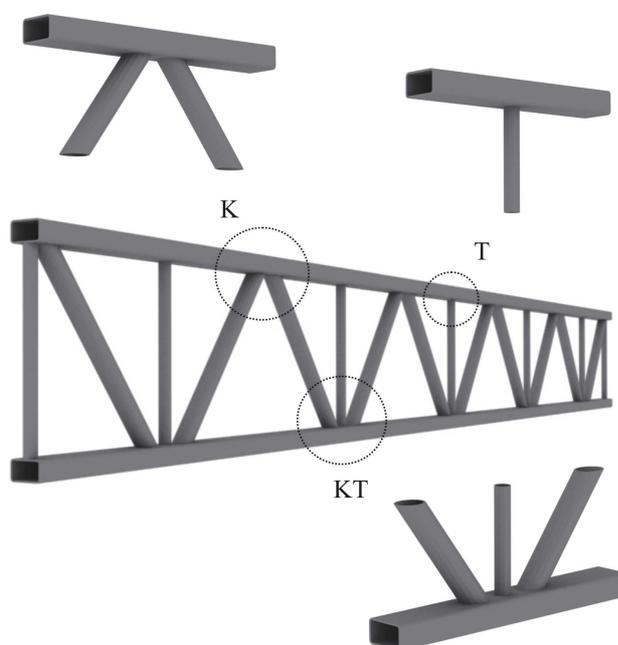


Figura 1.5 – Treliça apresentando ligações do tipo “T”, “K” e “KT”.

O sistema treliçado tem como característica principal a solicitação de suas barras predominantemente por esforços axiais. No caso de treliças fabricadas com perfis tubulares, estas ainda apresentam a capacidade de vencer vãos maiores com um menor número de nós, refletindo numa redução do custo de fabricação (Wardenier, 2000).

Uma aplicação mais recente no Brasil é a treliça de piso que aproveita a capacidade de resistência à compressão do concreto para vencer grandes vãos. Neste sistema misto é possível utilizar várias composições diferentes de perfis tubulares para formar a treliça. Neste trabalho será focado o sistema treliçado o qual utiliza perfis tubulares circulares para as diagonais e os montantes, sendo aproveitado o bom desempenho destes elementos quando submetidos a carregamentos axiais, e perfis tubulares retangulares no banzo devido à facilidade de execução da união das diagonais e montantes com os banzos e da colocação de conectores de cisalhamento na face superior da treliça. Este sistema misto é apresentado na Figura 1.6.



Figura 1.6 - Nova sede da V & M do Brasil em Belo Horizonte (Mendanha, 2006).

## **1.2. Objetivos**

O objetivo deste trabalho é a avaliação teórica e experimental de ligações planas formadas por perfis tubulares em aço. As ligações a serem analisadas são do tipo “T”, “K” e “KT”, sendo estas, parte integrante de um sistema treliçado plano de piso. Em ensaios precedentes aos deste trabalho, de ligações do tipo “K” e “KT”, as quais foram ensaiadas no laboratório de estruturas sob projeto de Pesquisa e Desenvolvimento com a empresa Vallourec & Mannesmann do Brasil, os resultados obtidos para algumas configurações de ligação não foram conclusivos e devem ser avaliados sob o foco das tensões residuais existentes e do modo de colapso previsto. Assim, este trabalho envolve estudo teórico a partir de prescrições de norma, ensaios em laboratório de ligações do tipo “T”, “K” e “KT”, ensaio para determinação da distribuição de tensões residuais no tubo retangular conformado a frio componente do banzo e a geração, análise e calibração a partir dos resultados obtidos nos ensaios experimentais de modelos numéricos em elementos finitos por meio do software ANSYS.

## **1.3. Justificativa**

O uso de perfis de seções tubulares na construção de estruturas metálicas possui muitas vantagens tais como alta resistência à compressão e à flambagem além da rigidez à torção entre outras, sendo utilizado no Brasil na execução de diversas estruturas.

A evolução constante da construção metálica propicia a introdução de novas tecnologias como sistemas treliçados de pisos e a introdução no mercado nacional de perfis tubulares de seção transversal retangular formados a frio. O processo de fabricação destes perfis propicia a introdução de tensões residuais que devem ser analisadas e posteriormente consideradas nas análises principalmente em seções em que o raio de curvatura é acentuado e de pequenas dimensões de parede. As ligações desses sistemas devem ser avaliadas experimentalmente com controle do nível de imperfeições, mecânicas e geométricas, análise da influência do “gap” (distância entre diagonais e destas com montantes) e do modo de colapso previsto. A partir dos resultados experimentais pode-se propor novas metodologias de avaliação da resistência destas ligações.

#### **1.4. Pesquisas em perfis tubulares**

A seguir são apresentados resumos de alguns trabalhos sobre perfis tubulares desenvolvidos nos últimos anos por diversos pesquisadores, com o objetivo de dar uma visão geral do estado atual e da evolução das pesquisas no Brasil e no mundo sobre ligações em perfis tubulares.

PACKER (1986) desenvolveu um trabalho no qual dá exemplos do método de dimensionamento de ligações do tipo “K” e “N” com “gap” formadas por perfis tubulares quadrados nos banzos e circulares e quadrados nas diagonais, nas quais a excentricidade estava dentro dos limites permissíveis para não se levar em consideração à influência do momento em tais ligações. Neste trabalho os dados foram obtidos por meio de ábacos de modo a simplificar a determinação da resistência última da ligação.

LEE e WILMSHURST (1994) apresentaram um trabalho sobre modelagem de ligações tubulares multiplanares do tipo duplo “K” por meio de um refinado modelo de elementos finitos no qual consideraram vários fatores tais como geometria da solda; condições de contorno das extremidades dos membros e do banzo; modos de carregamento; comprimento do banzo; propriedades do material. Para calibragem do modelo foram utilizados dados obtidos de modelos experimentais. Para a análise por meio do software ABAQUS foi usado elemento de casca de 4 e 6 nós com diferenças no carregamento último dos modelos.

O EUROCODE 3 (2005), CIDECT (1996) e RAUTARUUKI (1998) apresentam formulações para o dimensionamento de vários tipos de ligações em treliças formadas por perfis tubulares, baseando a resistência última em vários modos de falha das peças que compõem o nó e apresentando restrições quanto a parâmetros geométricos e físicos, restrições essas que devem ser atendidas para que se possa validar o uso de tais formulações.

LIU et al (1998) faz uma análise detalhada da resistência de ligações tipo “K” em função das cargas no banzo e condições de vínculo. A pesquisa mostrou a necessidade da verificação detalhada dos vínculos uma vez que estas podem afetar a resistência na ligação.

SAIDANI (1998) analisou os efeitos de excentricidades em ligações do tipo “K” em três modelos diferentes, Figuras 1.7 e 1.8. Um com a ligação totalmente enrijecida, um com as diagonais rotuladas entre si e enrijecidas em relação ao banzo e a terceira com as diagonais enrijecidas entre si e rotuladas em relação ao banzo. Foram utilizadas formulações teóricas, modelos de elementos finitos e análises experimentais. Após o estudo conclui-se que os esforços axiais gerados no banzo são pequenos ao serem comparados com os efeitos gerados nas diagonais, as quais apresentaram um acréscimo de carga considerável. Para o primeiro modelo que apresenta excentricidades simétricas em relação à linha neutra do banzo o momento gerado foi igual em módulo, além de ter sido verificado o menor esforço de momento na extensão do banzo. No caso da deflexão geral da treliça, esta pode apresentar reduções ou aumentos, dependendo se a excentricidade for positiva ou negativa.

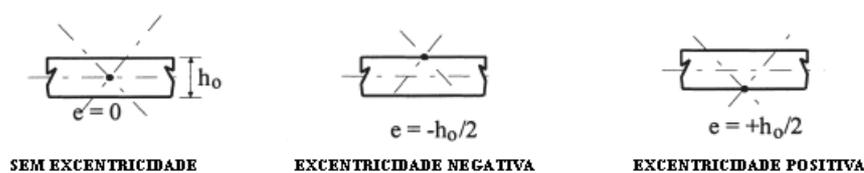


Figura 1.7 - Excentricidades analisadas por Saldani (1998).

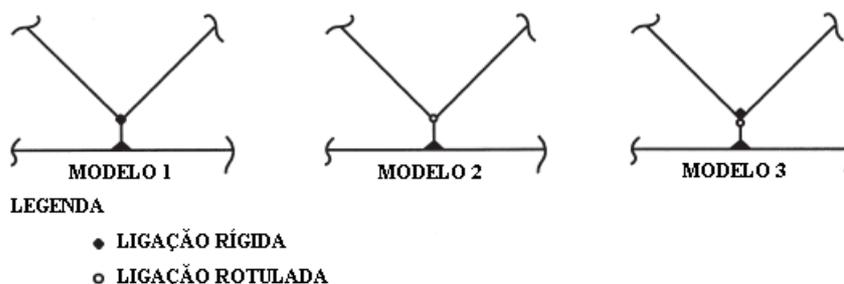


Figura 1.8 - Modelos analisados por Saldani (1998).

KOSTESKI, PACKER e PUTHLI (2002) discutem algumas maneiras de se obter a carga de escoamento para ligações entre perfis tubulares retangulares, quando não se tem um pico bem definido na curva carga-deslocamento. Sendo que esta carga de escoamento pode ser usada para definir o limite último de capacidade da ligação. Dentre os métodos citados podemos destacar o critério da deformação limite. Além disso, é proposta uma modelagem baseada no Método dos Elementos Finitos para determinação

da carga de escoamento por meio de uma curva carga-deformação em ligações tipo “T”. Tal método é desenvolvido tomando por base dados obtidos de ensaios experimentais e apresenta uma boa correlação com resultados encontrados por meio de métodos analíticos. Por fim, concluem que é viável a aplicação da técnica desenvolvida em um maior número de tipologias de ligações.

MASHIRI e ZHAO (2003) testaram uma ligação do tipo “T” formada por perfil tubular de paredes finas, circular no montante e quadrado no banzo. Nos ensaios, aplicou-se momento fletor na ligação até a plastificação da face do banzo e identificaram que para várias ligações são conservadas suas características de trabalhabilidade até a deformação de 1% de  $b_0$  (sendo  $b_0$  a largura do banzo), valor proposto como estado limite de serviço, e o limite último em torno de 3% de  $b_0$ . Também pode ser observado que os limites de deformação para plastificação da face do banzo obtiveram uma boa correlação com os valores teóricos obtidos por meio das formulações constantes do CIDECT e do EUROCODE, para valores de  $\beta$  (razão entre o diâmetro do montante e o diâmetro do banzo) entre 0,34 e 0,64.

SANTOS (2003) desenvolveu um trabalho, no qual são apresentadas análises das ligações em perfis tubulares de estruturas metálicas planas. O estudo baseia-se na avaliação do comportamento destas ligações por meio da análise das metodologias de cálculo utilizadas por normas e especificações nacionais e internacionais como: NBR 8800 (Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios), AISC - Hollow Structural Sections (Connections Manual), AISC - LRFD (Load and Resistance Factor Design) e EUROCODE 3. O dimensionamento das ligações utiliza o Método dos Estados Limites, no qual são verificadas as resistências de cálculo das barras, chapas de ligação e parafusos. Uma abordagem teórica é apresentada demonstrando o comportamento da distribuição de tensões nas ligações. Como resultado, foi desenvolvido um programa computacional para automatizar o dimensionamento e a verificação das ligações estudadas, visando a racionalização do sistema de cálculo. Exemplos numéricos são apresentados e comparados para avaliar as concepções das normas e procedimentos utilizados neste estudo.

GERKEN (2003) apresentou uma visão geral da utilização das estruturas tubulares no contexto da evolução das estruturas metálicas em geral, com destaque para o estudo de obras que mostram o estado da arte da construção tubular no Brasil.

CHOO, QIAN e WARDENIER (2005), desenvolveram um trabalho em que apresentam resultados de uma sistemática investigação sobre ligações tipo “K” em perfis tubulares circulares de parede espessa, submetidas a carregamentos estáticos com várias condições de contorno e tensões axiais no banzo. Para a investigação foi desenvolvida uma modelagem utilizando o Método dos Elementos finitos, sendo levado em conta diferentes condições de contorno e diferentes parâmetros geométricos das ligações. Os efeitos das condições de contorno parecem ser críticos se estes alteram o nível de tensão nos banzos. Uma definição em termos da máxima relação de tensão no banzo, para uma nova função de tensões, é encontrada para minimizar a dispersão com respeito a variações na geometria das ligações.

LIMA, et al (2005) apresentam uma revisão bibliográfica de diversos autores que abordam o tema de ligações entre perfis tubulares, seguida de uma análise numérica por meio do Método dos Elementos Finitos de ligações soldadas entre perfis tubulares retangulares do tipo “T”. Tendo como principal objetivo, investigar a formulação proposta no Eurocode 3 verificando assim a sua aplicabilidade. Os resultados obtidos mostraram que determinados limites considerados naquele regulamento podem fornecer valores contra a segurança para ligações soldadas de perfis retangulares.

VEGTE e MAKINO (2006) fizeram uma avaliação da resistência última de ligações “T” em perfis tubulares circulares. Neste estudo identificam os efeitos do pré-carregamento axial do banzo tanto de compressão quanto de tração na resistência última de ligações “T” com grande variação nos parâmetros geométricos  $\beta$  (relação entre os diâmetros do montante e do banzo) e  $2\gamma$  (relação entre o diâmetro do banzo e a espessura da parede do mesmo). A aproximação proposta de aplicação de um pré-carregamento por meio de carga concentrada axial e momento fletor, ambos aplicados à extremidade do banzo, visa excluir o efeito da flexão no banzo, causada pelo carregamento axial no montante, e derivar a resistência local de uma ligação “T”. De forma que o momento no banzo na seção transversal entre os montantes permaneça nulo

ao longo do histórico de carregamento. Uma análise não-linear física e geométrica via Método dos Elementos Finitos é conduzida por meio do programa ABAQUS/Standard (2003). Baseado nos dados da análise via elementos finitos, uma nova formulação da resistência última é estabelecida para ligações T submetidas a um pré-carregamento no banzo, apresentando a interação entre carregamento axial no montante e momentos fletores no banzo. O estudo é parte de um grande projeto que trata do efeito da tensão no banzo em ligações com perfis tubulares circulares, não somente envolvendo ligações tipo “T”, mas também ligações tipo “K” e “X”.

SOPHA, CHIEW e WARDENIER (2006) fizeram uma investigação experimental e ensaios em três protótipos de ligações “K” com “overlap” formadas com perfis tubulares retangulares tanto nas diagonais quanto no banzo, com os seguintes parâmetros:  $0,6 \leq \beta \leq 0,75$ ;  $30 \leq 2 \gamma \leq 35$  e “overlap” de 50% e 100%. Os resultados experimentais mostraram que para estas ligações o modo de falha foi a plastificação da face do banzo, sendo que em um dos casos específicos este modo foi combinado com uma falha por cisalhamento na diagonal sobreposta. Baseado neste estudo e em trabalhos numéricos anteriormente realizados é recomendado, para melhorar o cálculo de ligações “K” com “overlap”, em perfis tubulares retangulares, verificar também falhas devido ao cisalhamento da diagonal sobreposta.

SHAO (2006) escreveu um artigo no qual apresenta observações gerais sobre o efeito de alguns parâmetros geométricos na distribuição de tensões na região da solda para ligações tubulares do tipo “T” e “K” sujeitas a carregamento axial. Como a distribuição de tensão ao longo do “pé” da solda é muito crítico podendo levar a diminuição da vida útil da ligação devido à fadiga, a investigação de tais efeitos geométricos pode contribuir para aumentar a vida útil de tais ligações. Trabalhos anteriores eram principalmente focados no estudo dos valores máximos de tensão, mas ignoravam o princípio de distribuição de tensão. Contudo, a distribuição de tensão tem efeito crítico no modo de propagação da ruptura por fadiga. Sendo tal distribuição de tensão influenciada principalmente pelo tipo de carregando e geometria do nó. No seu trabalho Shao estudou o efeito geométrico na distribuição de tensões para ligações tubulares do tipo “T” e “K” submetidas a carregamento axial por meio de métodos numéricos e

experimentais. Realizou também um estudo paramétrico a fim de investigar o efeito de três parâmetros geométricos ( $\gamma$  relação entre o raio e a espessura do banzo;  $\beta$  relação entre os diâmetros do banzo e dos membros;  $\tau$  relação entre as espessuras dos membros e do banzo) que podem influenciar na distribuição de tensões. Com este estudo paramétrico, observou-se que a espessura da parede do banzo tem efeito notável na distribuição de tensão para ambos os tipos de ligações estudadas, enquanto que a espessura dos membros têm pouco efeito em tal distribuição de tensão. O último parâmetro geométrico, a relação entre os diâmetros dos membros e do banzo, tem efeitos diferentes na distribuição de tensão para as ligações “T” e “K”.

MENDANHA (2006) desenvolveu um trabalho no qual apresenta um estudo de ligações soldadas do tipo “K” e “KT” com barras afastadas, formadas por perfis tubulares de aço estrutural, de seção retangular no banzo e circular nas diagonais e montante. O trabalho envolveu estudo teórico a partir de prescrições normativas, e a geração, análise e calibração de modelos numéricos em elementos finitos, utilizando o software ANSYS, versão 9.0, a partir de resultados obtidos em ensaios experimentais. Foram analisados diversos modelos, os quais levaram em conta diversos parâmetros como modelagem da solda, influência do raio de dobramento, entre outros, de forma a representar bem as ligações experimentalmente ensaiadas.

LIU e WARDENIER (2006) apresentaram o trabalho desenvolvido pelo CIDECT para obtenção de novas formulações para algumas configurações de ligações em perfis tubulares. Nas normas atuais que tratam de ligações em perfis tubulares, as equações que levam em conta os efeitos das tensões no banzo de ligações em perfis tubulares circulares e retangulares são inconsistentes. Para ligações em perfis tubulares circulares, a função de tensão no banzo é baseada na pré-tensão no banzo, enquanto que para ligações em perfis tubulares retangulares a máxima tensão é utilizada. Em um programa de pesquisa prévio do CIDECT, 5BK, o efeito do carregamento no banzo para ligações tubulares circulares foi analisado a fim de se estabelecer uma função de tensão baseada na máxima tensão nesta peça, sendo consistente para ambos os tipos de configuração de ligação, com perfis circulares e retangulares. O segundo objetivo do programa do CIDECT foi reanalisar as funções de tensão no banzo existentes a fim de se estabelecer

uma formulação geral, a qual pudesse ser aplicada para diferentes tipos de ligações em perfis tubulares circulares e retangulares. Em um novo programa do CIDECT as funções de tensões para ligações tipo “K” com “gap” em perfis tubulares retangulares são analisadas. No trabalho, os resultados numéricos do estudo do efeito da carga no banzo para diferentes ligações tipo “K” com “gap” em perfis tubulares retangulares são apresentados e comparados com as equações do CIDECT.

FLEISCHER e PUTHLI (2006) desenvolvem um trabalho experimental no qual avaliam ligações “K” compostas por perfis tubulares retangulares formados a frio. Muitas seções com uma razão largura por espessura  $2\gamma > 35$  podem ser encontradas no Eurocode parte EN10219-2: 2004. Porém, devido as restrições presentes na parte EN1993-1-8, elas normalmente têm que ser excluídos de uso. Então, para ligações com estas seções esbeltas, investigações experimentais foram realizadas na Universidade de Karlsruhe para estender o alcance limitado da formulação. Os resultados destas investigações foram avaliados de acordo com o EN1990:2002 para os máximos carregamentos  $N_{i,max}$  obtidos nos ensaios bem como os carregamentos  $N_{i,u}$  obtidos aplicando um conceito de deformação limite (cargas últimas). Posteriormente, tamanhos de “gap” menores que os permitidos pelo EN1993-1-8:2005 também serão investigados. Os resultados apresentados neste trabalho são para prover informações suplementares para ajudar a estender as regras de cálculo para ligações tubulares compostas de perfis retangulares de seção esbelta e de pequenos “gaps”  $g < g_{min}$ .

### **1.5. Descrição do trabalho**

Este trabalho encontra-se dividido em seis capítulos. No capítulo 2 é feita uma abordagem geral a respeito das ligações tipo “T”, “K” e “KT”, apresentando sua classificação, seus componentes, parâmetros geométricos, modos de falha e um estudo sobre o procedimento de dimensionamento proposto por diferentes autores e normas de projeto. Além de um estudo em sistemas treliçados a fim de se obter a tipologia mais econômica entre as analisadas.

No capítulo três é descrita a metodologia empregada no trabalho, enfocando o programa experimental realizado tanto no ensaio dos protótipos das ligações como no ensaio para

levantamento da distribuição de tensões residuais no perfil retangular componente do banzo. Neste capítulo é descrito o esquema de montagem dos ensaios, com o sistema de fixação das ligações à laje de reação, o sistema de aplicação de carga, a instrumentação utilizada no monitoramento do ensaio, o sistema de aquisição de dados, as características geométricas e do material das ligações, metodologia e execução dos ensaios. Também é descrita a técnica utilizada para a obtenção das tensões residuais do perfil retangular do banzo.

No capítulo quatro tem-se a apresentação e análise dos resultados experimentais de cada tipologia de ligação ensaiada.

No capítulo cinco é apresentada a análise numérica via software ANSYS, com os modelos desenvolvidos calibrados por meio dos ensaios, sendo feita também uma comparação dos resultados experimentais com as prescrições do Eurocode 3 e com os resultados obtidos através dos modelos computacionais.

Por fim, no capítulo seis apresenta-se as considerações finais deste trabalho e sugestões para estudos futuros.

## 2. AVALIAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. Ligações do tipo “T”, “K” e “KT”

No caso das ligações “K” e “KT” essas podem ser classificadas em dois tipos, considerando o modo como as diagonais são soldadas ao banzo. Primeiramente tem-se a configuração na qual as diagonais são soldadas ao banzo com um determinado afastamento, sendo este denominado “gap”, tal tipologia de ligação está representada na Figura 2.1. Pode-se ter também uma segunda configuração na qual os membros são soldadas ao banzo de modo a se sobreporem. Sendo tal tipologia também conhecida como ligação com “overlap”, podendo ser parcial ou completo e representada na Figura 2.2.

Em ambas as configurações, ligações com “gap” ou “overlap”, pode-se ter a ocorrência de excentricidades. Dependendo do ponto onde ocorrerá a interseção da linha central das diagonais em relação ao centro do banzo, estas poderão ser classificadas como nulas; positivas (quando o cruzamento se dá abaixo da linha média do banzo) ou negativas (quando o cruzamento se dá acima da linha média do banzo).

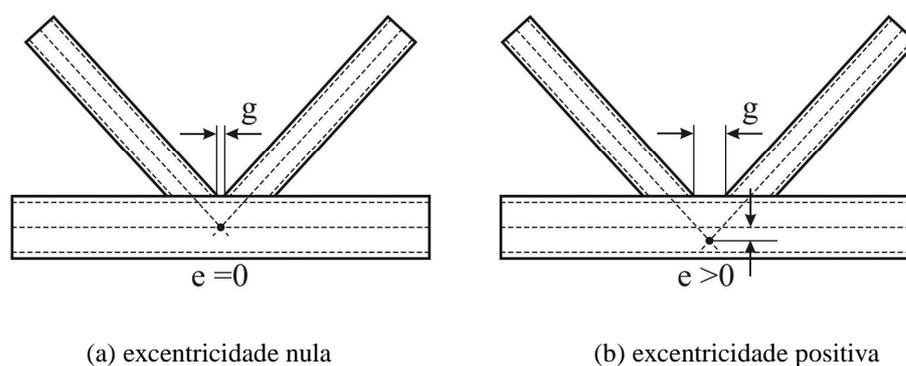


Figura 2.1 – Ligação “K” com “gap”.

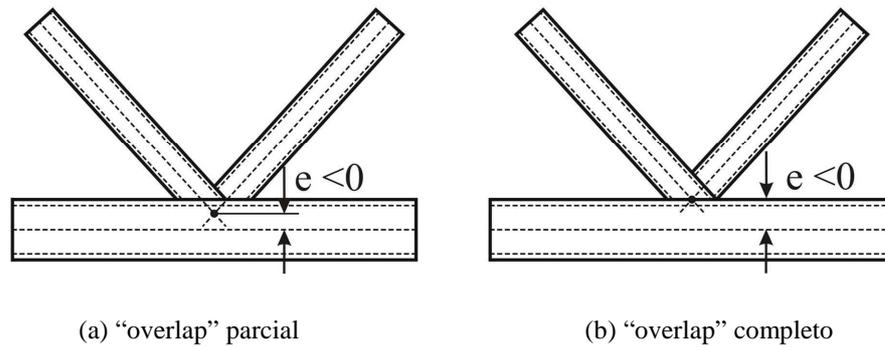


Figura 2.2 - Ligação "K" com "overlap".

As treliças formadas a partir de ligações tipo "overlap" apresentam um comportamento melhor do que ligações com "gap". As ligações com "gap" são de fácil fabricação em consequência da facilidade de corte, encaixe e soldagem da extremidade quando comparadas com as ligações com "overlap" parcial. Entretanto, as ligações com "overlap" completo apresentam uma melhor capacidade de carga, com a fabricação similar às com nós com "gap" (Coutie et al.,1989).

Em relação às ligações tipo "T" nenhuma nomenclatura especial existe, e devido a sua configuração de soldagem, neste tipo de ligação não temos excentricidade.

Neste trabalho será analisado apenas as ligações do tipo "K" e "KT" com "gap", além da ligação tipo "T". Os símbolos usados para os parâmetros geométricos nas formulações são apresentados na Figura 2.3.

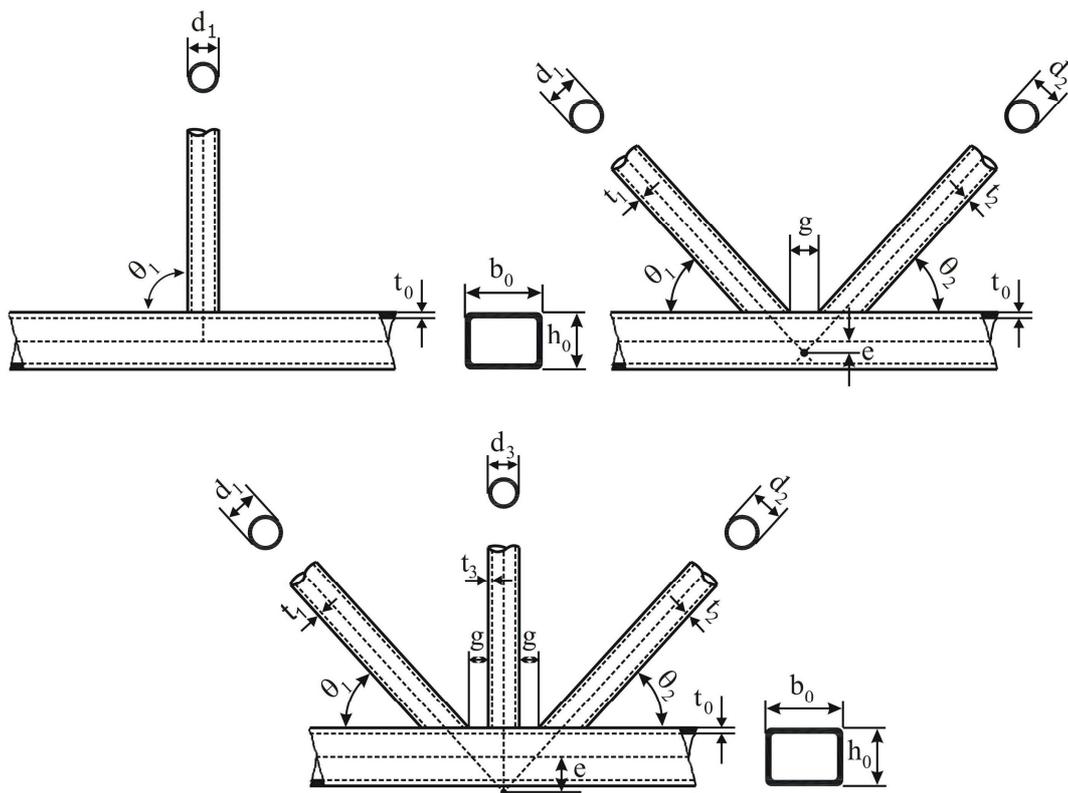


Figura 2.3 - Parâmetros geométricos dos nós tipo “T”, “K” e “KT”.

onde:

$b_0$  = largura do banzo

$h_0$  = altura do banzo

$t_0$  = espessura da chapa que constitui o banzo

$d_i$  = diâmetro das diagonais/montante

$t_i$  = espessura da chapa que constitui as diagonais/montante

$\theta_i$  = ângulo entre o banzo e as diagonais/montante

$g$  = “gap” – afastamento entre os elementos soldados

$e$  = excentricidade entre a linha de centro do banzo e o prolongamento da linha central das diagonais/montante.

## 2.2. Excentricidade e “gap” nas ligações

A geometria dos membros (diagonais/montante) pode ser disposta de forma que as linhas de centro dos perfis componentes dessas peças se cruzem justamente na linha central do perfil do banzo, dessa forma não gerando excentricidades nas ligações, neste caso é normal a análise considerando a ligação dos membros no banzo como rotuladas. No entanto, uma vez que se verifique excentricidade na ligação, constata-se o surgimento de momento fletor que é transmitido às peças que compõe o nó. Contudo, segundo o CIDECT (1996) e o EUROCODE 3 (2005) o momento fletor gerado pode ser desprezado desde que a excentricidade esteja dentro dos limites estabelecidos pela equação 2.1, para o caso de banzo circular, e pela equação 2.2 para o caso de banzo retangular.

$$-0,55d_0 \leq e \leq 0,25d_0 \quad (2.1)$$

$$-0,55h_0 \leq e \leq 0,25h_0 \quad (2.2)$$

Para valores fora destes limites é necessário que se faça a distribuição deste momento entre os perfis que compõem a ligação de acordo com seus respectivos coeficientes de rigidez  $I/L$ , sendo “ $I$ ” a inércia do perfil considerado e “ $L$ ” o comprimento do membro.

A excentricidade pode ser obtida por meio da seguinte equação:

$$e = \left( \frac{d_1}{2 \sin \theta_1} + \frac{d_2}{2 \sin \theta_2} + g \right) \frac{\sin \theta_1 \sin \theta_2}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} - \frac{h_0}{2} \quad (2.3)$$

O CIDECT (1996) apresenta uma formulação, dependente da excentricidade, para o cálculo do afastamento em ligações do tipo “K”, sendo que valores negativos do espaçamento “ $g$ ” correspondem a ligações com “overlap” e positivos a ligações com “gap”.

$$g = \left( e + \frac{h_0}{2} \right) \left( \frac{\sin(\theta_1 + \theta_2)}{\sin \theta_1 \sin \theta_2} \right) - \frac{d_1}{2 \sin \theta_1} - \frac{d_2}{2 \sin \theta_2} \quad (2.4)$$

Para validade das equações de cálculo da resistência última das ligações o EUROCODE 3 (2005) e o CIDECT (1996) apresentam limites para este afastamento, que são representados pelas seguintes equações:

$$0,5(1 - \beta) \leq \frac{g}{b_0} \leq 1,5(1 - \beta) \quad (2.5)$$

$$g \geq t_1 + t_2 \quad (2.6)$$

Onde  $\beta$  é a razão entre os diâmetros dos membros e a largura do banzo. Se o espaçamento “g” estiver fora dos limites apresentados acima, a ligação pode ser calculada como dois nós tipo “Y”.

RAUTARUUKI (1998) faz mais uma verificação que leva em conta não apenas o espaçamento “g”, mais também “g<sub>a</sub>” que é o espaçamento “g” menos duas vezes a espessura da solda.

$$\frac{g_a}{t_0} \geq 1,5 \quad (2.7)$$

### 2.3. Modos de falha

Diferentes modos de falha podem ocorrer nas ligações confeccionadas com perfis tubulares de aço, sendo estes dependentes da geometria da ligação, das dimensões das peças componentes do nó e das condições de carregamento. Esta falha pode ocorrer em diferentes partes componentes da ligação como solda, nos membros (diagonais e montantes) e no banzo. Estes mecanismos de colapso, representados pela Figura 2.4, são:

- TIPO A: plastificação da face do banzo pela carga de tração ou compressão nas diagonais/montante;
- TIPO B: ruptura por punção da face superior do banzo conectada às diagonais/montante;
- TIPO C: ruptura por tração da diagonal ou ruptura da solda;

- TIPO D: flambagem local da diagonal/montante;
- TIPO E: ruptura por cisalhamento do banzo;
- TIPO F: flambagem da parede lateral do banzo por escoamento, esmagamento ou instabilidade devido à carga axial de compressão no montante.

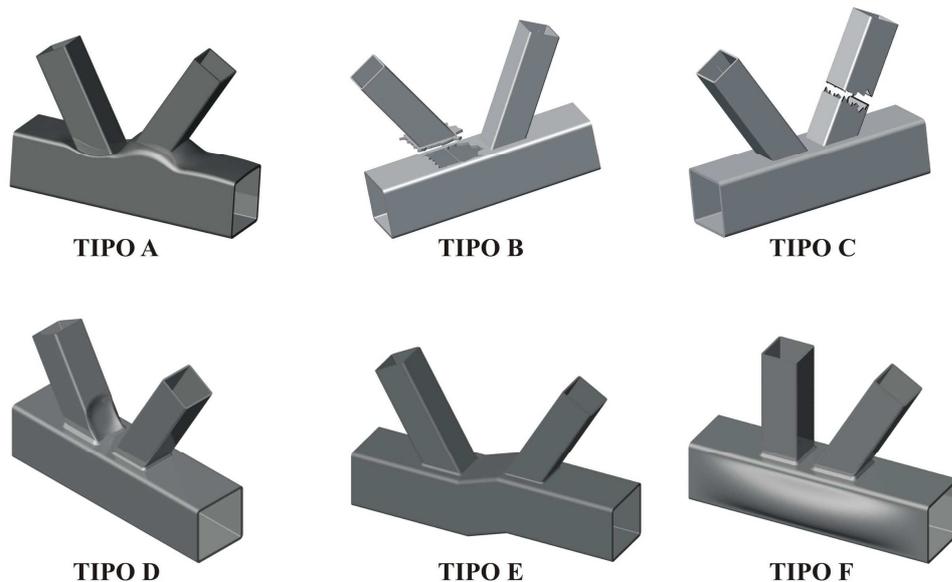


Figura 2.4 - Modos de falha (Coleção técnico-científica V & M do Brasil. Dimensionamento de ligações em barras tubulares de estruturas metálicas planas).

## 2.4. Procedimento de dimensionamento

A seguir será descrito o procedimento de dimensionamento das ligações compostas por perfis tubulares retangulares no banzo e circulares nas diagonais/montante constante do EUROCODE 3 (2005). Contudo, foi realizado um estudo bibliográfico de normas internacionais e de recomendações sugeridas por RAUTARUUKKI (1998), por PACKER (1997) e pelo CIDECT (1992). Pode-se perceber que as formulações constantes de tais referências são bem semelhantes, diferenciando-se em algumas relações de limitações. E no que se refere às normalizações, EUROCODE 3 (2005) e AISC (2005), diferem-se na utilização dos fatores de segurança. Enquanto o EUROCODE 3 (2005) apresenta um único método de dimensionamento, o AISC (2005) apresenta dois, um que apresenta o fator de segurança  $\phi$  para o dimensionamento por meio do Método dos Estados Limites (LRFD – Load and Resistance Factor Design )

e o outro  $\Omega$  coeficiente para o dimensionamento por meio do Método das Tensões admissíveis (ASD – Allowable Strength Design).

#### 2.4.1. Parâmetros de dimensionamento

Os seguintes parâmetros serão utilizados no procedimento de dimensionamento segundo o EUROCODE 3 (2005):

$$n = \frac{\sigma_{0,sd}}{f_y \gamma_M} \quad (2.8)$$

$$n_p = \frac{\sigma_{p,sd}}{f_y \gamma_M} \quad (2.9)$$

$$\gamma = \frac{b_0}{2t_0} \quad (2.10)$$

$$\eta = \frac{d_i}{b_0} \quad (2.11)$$

onde:

$f_y$  = tensão de escoamento do material;

$\gamma_M$  = coeficiente de resistência, normalmente igual a 1,1;

$\sigma_{0,sd}$  = Máxima tensão de compressão no banzo;

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

#### 2.4.2. Limitações

A formulação para a determinação da resistência última constante do EUROCODE 3 (2005), segundo cada modo de falha, são válidas desde que atendam, além das limitações relacionadas ao “gap” e excentricidades já citadas anteriormente, as seguintes exigências quanto a algumas características físicas e geométricas das ligações:

- A tensão de escoamento ( $f_y$ ) do aço usado na composição da peça não pode exceder 460 MPa;
- A espessura da chapa dos perfis não pode ser inferior a 2,5mm ou superior a 25mm;
- O ângulo entre o banzo e as diagonais não pode ser inferior a 30°;
- As peças que compõem a ligação não poderão ter inércia variável;

Considerando a geometria das peças componentes da ligação, as limitações são apresentadas através das seguintes relações:

$$0,4 \leq \frac{d_i}{b_0} \leq 0,8 \quad (2.12)$$

$$15 \leq \frac{d_i}{t_i} \leq 50 \quad (2.13)$$

$$0,5 \leq \frac{h_0}{b_0} \leq 2,0 \quad (2.14)$$

$$\frac{h_0}{t_0} \leq 35 \quad (2.15)$$

$$\frac{b_0}{t_0} \leq 35 \quad (2.16)$$

$$0,6 \leq \beta \leq 1,3 \quad (2.17)$$

RAUTARUUKKI (1998) apresenta um limite inferior igual a 10 para a relação entre o diâmetro e a espessura das diagonais. O CIDECT (1996) & RAUTARUUKKI (1998) apresentam ainda uma limitação quanto a esbeltez dada por:

$$\frac{d_i}{t_i} \leq 1,5 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (2.18)$$

### 2.4.3. Obtenção das resistências últimas

A resistência última e o modo de falha são encontrados, segundo o EUROCODE 3 (2005), ao se obter o menor dos resultados nas equações que se seguem:

#### a) Verificação da plastificação da face do banzo (Tipo A):

$$N_{i,Rd} = \frac{8,9\Pi K_n f_{y0} t_0^2 \sqrt{\gamma} \left( \frac{d_1 + d_2}{2b_0} \right)}{4 \sin \theta_i \gamma_{M5}}, \text{ para nós tipo "K"}, \quad (2.19)$$

$$N_{i,Rd} = \frac{8,9\Pi K_n f_{y0} t_0^2 \sqrt{\gamma} \left( \frac{d_1 + d_2 + d_3}{3b_0} \right)}{4 \sin \theta_i \gamma_{M5}}, \text{ para nós tipo "KT" e} \quad (2.20)$$

$$N_{i,Rd} = \frac{\Pi K_n f_{y0} t_0^2}{4(1-\beta) \sin \theta_i \gamma_{M5}} \left( \frac{2\beta}{\sin \theta_i} + 4\sqrt{1-\beta} \right), \text{ para nós tipo "T"} \quad (2.21)$$

sendo o parâmetro  $K_n = 1,3 - \frac{0,4n}{\beta}$  se  $n > 0$  e  $K_n = 1,0$  se  $n \leq 0$ , com os valores positivos e negativos de  $n$  relacionados, respectivamente, a compressão e tração no banzo.

#### b) Verificação da flambagem da parede lateral do banzo (Tipo F):

$$N_{i,Rd} = \frac{\Pi f_b t_0}{4 \sin \theta_i \gamma_{M5}} \left( \frac{2d_i}{\sin \theta_i} + 10t_0 \right), \text{ para nós tipo "T"} \quad (2.22)$$

onde:

- $f_b = f_{y0}$ , para o montante submetido a esforço de tração;
- $f_b = \chi f_{y0}$ , para o montante submetido a esforço de compressão. Onde  $\chi$  é o fator de redução para flambagem, obtido utilizando as curvas de flambagem encontradas no EUROCODE 3 prEN 1993 parte 1.1.

**c) Verificação do esforço cortante no banzo na região do “gap” (Tipo E):**

$$N_{i,Rd} = \frac{f_{y0} A_v}{\sqrt{3} \sin \theta_i} \quad (2.23)$$

$$N_{0,Rd} = \frac{\Pi}{4\gamma_{M5}} \left[ (A_0 - A_v) f_{y0} + A_v f_{y0} \sqrt{1 - \left( \frac{V_{sd}}{V_{pl,Rd}} \right)^2} \right], \text{ para nós tipo “K” e “KT”}. \quad (2.24)$$

onde:

- $A_v = (2h_0 + \alpha b_0)t_0$
- $\alpha = 0$  para diagonais/montante circulares
- $A_0 =$  Área da seção transversal do banzo
- $V_{sd} =$  Esforço cortante solicitante
- $V_{pl,Rd} =$  Resistência plástica ao cortante de cálculo

**d) Verificação do seccionamento da diagonal/montante (Tipo C):**

$$N_{i,Rd} = \frac{\Pi f_{yi} t_i}{4\gamma_{M5}} (2d_i - 4t_i + d_i + b_{eff}), \text{ para nós tipo “K” e “KT” e} \quad (2.25)$$

$$N_{i,Rd} = \frac{\Pi f_{yi} t_i}{4\gamma_{M5}} (2d_i - 4t_i + 2b_{eff}), \text{ para nós tipo “T”} \quad (2.26)$$

sendo o parâmetro  $b_{eff} = \frac{10 f_{y0} t_0^2 d_i}{b_0 f_{yi} t_i}$  e  $b_{eff} \leq d_i$

**e) Verificação do rompimento da face do banzo na ligação com a diagonal/montante (Tipo B):**

$$N_{i,Rd} = \frac{\Pi f_{y0} t_0}{4\sqrt{3} \sin \theta_i \gamma_{M5}} \left( \frac{2d_i}{\sin \theta_i} + d_i + b_{e,p} \right), \text{ para nós tipo “K” e “KT” e} \quad (2.27)$$

$$N_{i,Rd} = \frac{\Pi f_{y0} t_0}{4\sqrt{3} \sin \theta_i \gamma_{M5}} \left( \frac{2d_i}{\sin \theta_i} + 2b_{e,p} \right), \text{ para nós tipo T} \quad (2.28)$$

Para  $\beta \leq \left(1 - \frac{1}{\gamma}\right)$

sendo o parâmetro  $b_{e,p} = \frac{10t_0 d_i}{b_0}$  e  $b_{e,p} \leq d_i$

Para este último critério é importante ressaltar a importância de se ter uma solda bem feita, pois se a resistência do filete de solda for menor do que a resistência da parede onde a peça é soldada, a falha pode vir a ocorrer na solda. Se a plastificação ocorrer somente na solda, a resistência total da ligação estará vinculada apenas à capacidade de suporte da solda, que apresenta características elásticas do material inferiores se comparadas com as do aço, resultando em uma conexão com pouca capacidade de deformação, conseqüentemente é recomendado que as soldas sejam desenvolvidas com capacidade de carga superior a dos elementos conectados (Wardenier, 2000).

Soldas com dimensões fora do especificado podem ser consideradas como defeituosas uma vez que deixam de atender o nível de resistência mecânica adequada ou, no caso de soldas cujas dimensões ficam maiores que as especificadas levam ao desperdício de material ou aumentam a chance de outros problemas (Modenezi, 2001).

## 2.5. Análise de sistemas treliçados

Para obtenção das dimensões da treliça a qual pertence as ligações a serem analisadas neste trabalho, foi realizado o dimensionamento “otimizado” da mesma. Para a análise algumas premissas foram levadas em consideração. Inicialmente considera-se a treliça integrada a um sistema misto de piso, sendo utilizada como uma estrutura secundária com distanciamento entre elas relativamente pequeno. Há também a consideração do vão a ser vencido e de algumas limitações no que se refere à validade das formulações, como o ângulo mínimo formado entre diagonais e banzo. Levando-se em conta essas premissas diversas configurações de treliças foram criadas com perfis tubulares sem costura retangulares nos banzos e circulares nas diagonais e montantes. Então, fixado os vãos (L) a serem vencidos e a altura (H), variou-se o número de nós do tipo “KT” em

cada configuração, e portanto o ângulo ( $\theta$ ) formado entre diagonais e banzo como pode ser visto na Tabela 2.1.

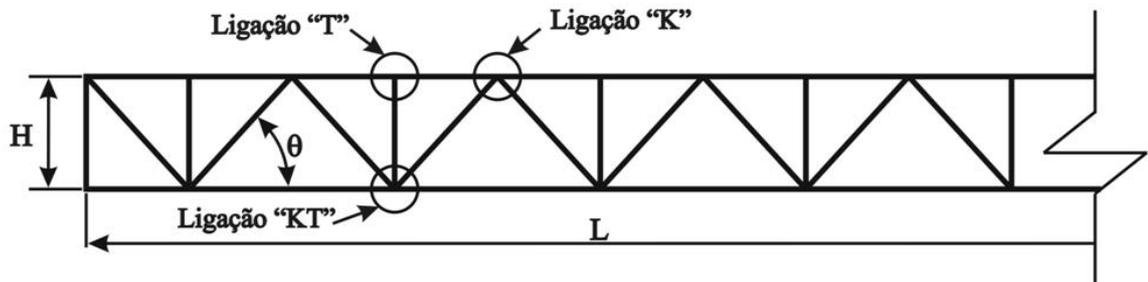


Figura 2.5 - Tipologia das treliças analisadas.

Tabela 2.1- Altura, vão e ângulos das treliças analisadas.

Vão/Altura (mm)	10000/ 500	10000/ 550	11000/ 550	13000/ 700	13000/ 750
Ângulos (°)	31,0	33,4	31,0	32,9	34,7
	35,0	37,6	35,0	37,0	38,9
	38,7	41,3	38,7	40,7	42,7
	42,0	44,7	42,0	44,1	46,1
	45,0	47,7	45,0	47,1	49,1
	47,7	50,4	47,7	49,8	51,8
	50,2	52,8	50,2	52,2	54,2
	52,4	-	-	-	-
	54,5	-	-	-	-
	56,3	-	-	-	-

Partindo de perfis previamente fixados para os banzos, diagonais e montantes, procedeu-se a análise por flexo-compressão (equação 2.29). Pois, como já estabelecidas as dimensões dos perfis das ligações (Tabela 2.2) e o “gap”, no caso 30 mm, tem-se em todas as treliças analisadas excentricidades nas ligações. E como essas excentricidades estão fora do limite anteriormente apresentado e estabelecido pelo EUROCODE 3, o momento fletor atuante deve ser considerado.

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + K \frac{M_{Sd}}{M_{Rd}} \leq 1,0 \quad (2.29)$$

onde:

- $N_{Sd}$  = força normal de compressão solicitante na barra;
- $N_{Rd}$  = força normal resistente de cálculo;
- $M_{Sd}$  = momento fletor solicitante de cálculo;
- $M_{Rd}$  = momento fletor resistente de cálculo;
- $K$  = coeficiente de ponderação para flambagem.

Tabela 2.2 - Dimensões e peso linear dos perfis utilizados.

Membros	Tipo de perfil	Largura (mm)	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Peso por metro (kN/m)
Banzo	Retangular	110	60	-	4,8	0,113
Diagonais	Circular	-	-	60,3	5,5	0,075
Montantes	Circular	-	-	38,1	3,2	0,026

Por se tratar de uma treliça de piso a carga aplicada à mesma foi distribuída em toda a extensão do banzo superior. A priori foi aplicado um carregamento unitário e encontrado os esforços a que cada barra estava submetida. De posse destes esforços multiplicamos seus valores por um valor equivalente ao carregamento distribuído desejado, e a cada valor fez-se a verificação por flexo-compressão tanto do banzo quanto das diagonais. Sendo que, para o banzo a análise foi realizada considerando-se a ligação “K”, pois no banzo comprimido, o superior, só ocorre este tipo de ligação. Para a análise das diagonais foi considerado as ligações “KT”, uma vez que neste tipo de ligação temos uma maior excentricidade que gera um momento fletor maior, sendo essa a situação mais crítica.

Dentre as treliças analisadas a que apresentou melhor rendimento foi a de 10 m de vão e 550 mm de altura, sendo aqui definido como rendimento a relação entre o carregamento máximo resistido pela treliça e o seu peso próprio. Dentre os ângulos analisados, para essa configuração os da faixa entre 44,7° e 52,8° apresentaram os melhores rendimentos, com o destaque para o ângulo de 47,7° da dita treliça “ótima”, como pode ser observado na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Peso, carga máxima e rendimento para a treliça de 10 m de vão e 550 mm de altura em alguns ângulos

Ângulos (°)	Peso Total da Treliça (kN)	Carga máxima (kN/m)	Rendimento
44,7	3,45	17,00	50,00
47,7	3,52	17,50	50,40
50,4	3,59	18,00	50,06
52,8	3,68	18,00	49,12

Com os valores dos esforços em cada barra para a treliça “ótima” fez-se a verificação dos modos de falha das ligações descritos anteriormente com o intuito de se determinar a resistência última para as ligações “T”, “K” e “KT”.

# CAPÍTULO 3

---

## 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 3.1. Introdução

Apresenta-se no decorrer deste capítulo o programa de ensaios experimentais realizados no Laboratório de estruturas “Professor Altamiro Tibiriçá Dias” do DECIV/EM/UFOP, com suas instalações localizadas no campus do Morro do Cruzeiro. Foram realizados oito ensaios, sendo que um não teve seus resultados considerados em função de diversos problemas que serão descritos no capítulo 4.

Os ensaios analisados são de ligações soldadas do tipo “T”, “K” e “KT” formadas por perfis tubulares sem costura fabricados pela V&M do Brasil. Todas essas ligações são integrantes de uma mesma treliça que compõe um sistema misto de piso descrito no capítulo 2. Para estes ensaios não se variou os perfis componentes do banzo, diagonais e montantes, nem o ângulo formado entre as diagonais e o banzo para as ligações do tipo “K” e “KT”.

Foram confeccionados nove protótipos em escala real, sendo três de cada tipo de ligação. A seguir temos a nomenclatura utilizada para identificar os mesmos:

- T01, T02 e T03, para os protótipos com ligação do tipo “T”;
- K01, K02 e K03, para os protótipos com ligação do tipo “K”;
- KT01, KT02 e KT03, para os protótipos com ligação do tipo “KT”.

Para os ensaios dos protótipos foi montado um esquema que considerou as condições de contorno e aplicação de carga, que permite simular uma ligação entre elementos de um sistema treliçado. A finalidade é avaliar a resistência última dos nós, com seus níveis de carregamentos determinados por prescrições normativas, os modos de colapso, os deslocamentos e as deformações.

No item seguinte é apresentada uma síntese de ensaios similares em ligações tubulares desenvolvidos por Freitas et al. (2006), que serviu como base para desenvolvimento dos experimentos. Em seguida tem-se a descrição das características mecânicas dos materiais dos perfis e dimensões dos protótipos de cada tipo de ligação; apresentação do esquema de montagem e procedimento de ensaio; descrição da instrumentação utilizada e a metodologia de ensaio utilizada para se determinar o nível de tensões residuais do perfil retangular componente do banzo.

### 3.2. Experiência anterior

Os ensaios apresentados neste trabalho foram baseados nas experiências de ensaios de tipologias de ligações semelhantes, desenvolvidos anteriormente no Laboratório de Estruturas da Escola de Minas em suas antigas instalações e no âmbito do convênio UFOP/V&M do BRASIL (Freitas et al., 2006). Os ensaios anteriormente realizados, chamados de “ensaios anteriores”, foram realizados em protótipos em escala real de ligações do tipo “K” e “KT” componentes de um sistema treliçado misto de piso, com variação das dimensões dos perfis, do ângulo formado entre as diagonais e o banzo e do “gap”. A identificação e tipologia das ligações dos ensaios, bem como as dimensões nominais dos perfis utilizados na composição dos protótipos, estão apresentadas na Tabela 3.1. A Figura 3.1 ilustra a geometria geral dos protótipos e a nomenclatura para suas dimensões.

Tabela 3.1 - Ensaios realizados por Freitas et al. (2006).

Ensaio	Tipo de ligação	Diagonais			Montante		Banzo			Gap
		d <sub>1</sub> d <sub>2</sub> (mm)	t <sub>1</sub> t <sub>2</sub> (mm)	θ (°)	d <sub>3</sub> (mm)	t <sub>3</sub> (mm)	h <sub>0</sub> (mm)	b <sub>0</sub> (mm)	t <sub>0</sub> (mm)	g (mm)
N1	KT	60,3	3,9	40,4	38,1	3,0	50	100	4,8	25,4
N2	K	101,6	6,4	37,5	-	-	120	150	6,4	56,0
N3	KT	60,3	3,9	40,8	38,1	3,0	50	100	4,8	25,4
N4	K	88,9	7,6	38,3	-	-	150	200	9,5	60,0
N5	KT	60,3	6,4	39,1	60,3	3,9	100	120	4,8	30,0
N6	KT	114,3	13,5	38,9	88,9	4,8	150	200	12,7	55,6
N7	KT	60,3	6,4	37,8	60,3	3,9	120	150	4,8	47,0
N8	K	88,9	7,6	40,1	88,9	4,8	150	200	9,5	55,6

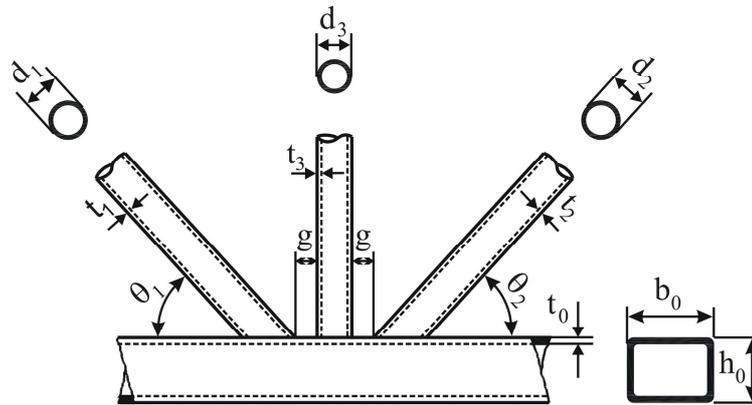


Figura 3.1 - Nomenclatura utilizada para as dimensões dos protótipos.

Dentre as ligações dos ensaios anteriores destacam-se a N1 e N3 do tipo “KT”, que têm as dimensões de seus perfis semelhantes aos dos nós analisados no presente trabalho. Foram realizados dois ensaios do tipo N1 e dois do tipo N3. Os resultados teóricos indicaram que o modo de colapso era o cisalhamento no banzo. A roseta da face lateral do banzo sofreu um descolamento prematuro em todos os ensaios, por isso suas medições indicaram tensões excessivas, induzindo a valores contra a segurança.

No entanto, foram observados grandes deslocamentos oriundos da flexão no banzo, além disso, os níveis de tensões residuais deveriam ser investigados. Com isso, estes ensaios levaram a redução do comprimento do banzo e a medição das tensões residuais dos protótipos analisados neste trabalho.

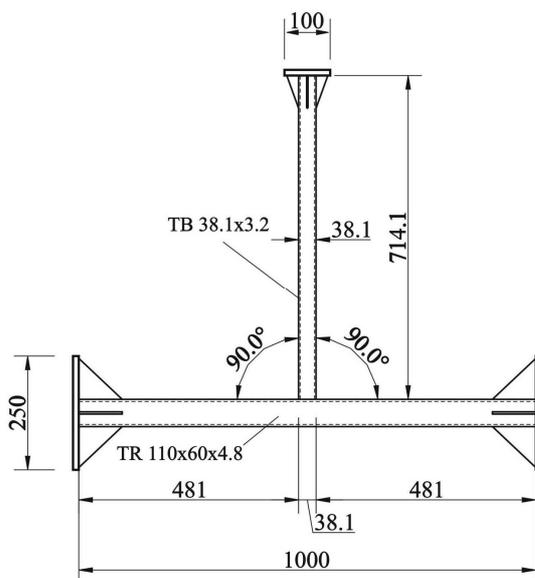
### 3.3. Características dos materiais e dimensões dos protótipos

Os tubos utilizados na confecção dos protótipos foram disponibilizados pela empresa Vallourec & Mannesmann do Brasil, que forneceu os resultados dos ensaios de caracterização do aço dos perfis tubulares circulares das diagonais e montantes e do perfil retangular dos banzos. Na Tabela 3.2 Temos as dimensões nominais e as propriedades mecânicas dos perfis.

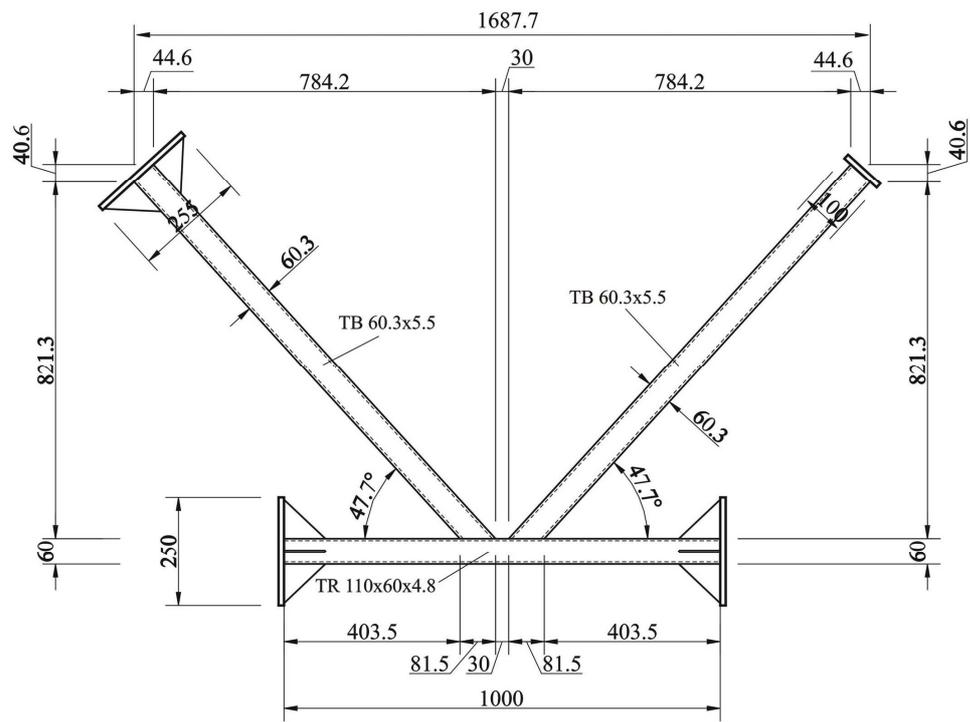
Tabela 3.2– Dimensões nominais e propriedades mecânicas dos perfis componentes dos protótipos das ligações.

Perfis	Aço	Limite de escoamento $f_y$ (MPa)	Limite de ruptura $f_u$ (MPa)	Alongamento (%)
Banzo - 110x60x4,8	VMB 350 COR	456	555	32
Diagonais - 60,3x5,5	VMB 350 COR	442	570	33
Montante - 38,1x3,2	ASTM A 192	250	325	35

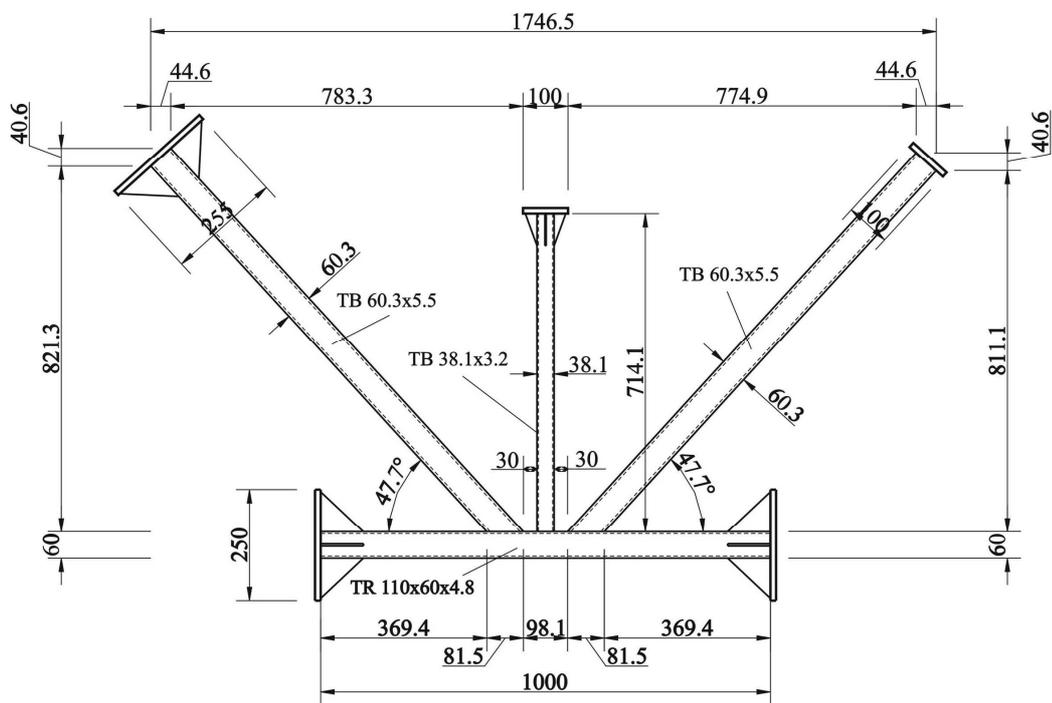
Com os perfis apresentados foram produzidos os nove protótipos a serem ensaiados, seguindo o esquema geral apresentado na Figura 3.2 (a) para a ligação “T”, (b) para a ligação “K” e (c) para a “KT”. O detalhe das chapas soldadas às extremidades dos elementos é apresentado no item 3.4.



(a) Ligação “T”



(b) Ligação "K"



(c) Ligação "KT"

Figura 3.2 - Esquema geral dos protótipos produzidos.

As dimensões dos membros das ligações foram definidas em função da fixação do sistema de aplicação de carga na laje de reação do laboratório, que possui furos a cada 50 cm, sendo que nos itens seguintes será apresentado este sistema.

Antes da realização dos ensaios foram levantadas as reais dimensões das seções transversais e o nível de imperfeições oriundas da fabricação. Para estas medições foram utilizados, paquímetros, réguas e trenas e objetivaram também a verificação do posicionamento da instrumentação por meio dos extensômetros elétricos de resistência (Freitas e Mayor, 2006). Os resultados dessas medições serão apresentados no capítulo seguinte.

### **3.4. Esquema de montagem dos ensaios**

Para os ensaios dos protótipos foram utilizadas peças acessórias e peças de fixação das extremidades do banzo, componentes do sistema de apoio dos protótipos; além de peças de apoio para os atuadores hidráulicos, componentes do sistema de aplicação dos carregamentos. Os sistemas de apoio dos protótipos e o de aplicação dos carregamentos foram desenvolvidos para os ensaios realizados por Freitas et al. (2006). Estes foram devidamente dimensionados para se adequarem à magnitude dos carregamentos aplicados, variação da geometria das ligações e condições específicas do laboratório, como a resistência máxima de 500 kN por furo da laje de reação, os quais possuem distância de 50 cm entre seus centros.

Contudo, para a geometria dos protótipos deste trabalho algumas adaptações foram realizadas, sendo criadas novas furações nas peças existentes e também a confecção de novas peças. Além disso, foram colocados anteparos na região da conexão do banzo com o sistema de apoio dos protótipos e no sistema de aplicação de carregamentos, com o objetivo de eliminar uma possível movimentação do conjunto. A Figura 3.3 ilustra o esquema geral de montagem de uma ligação “KT”.

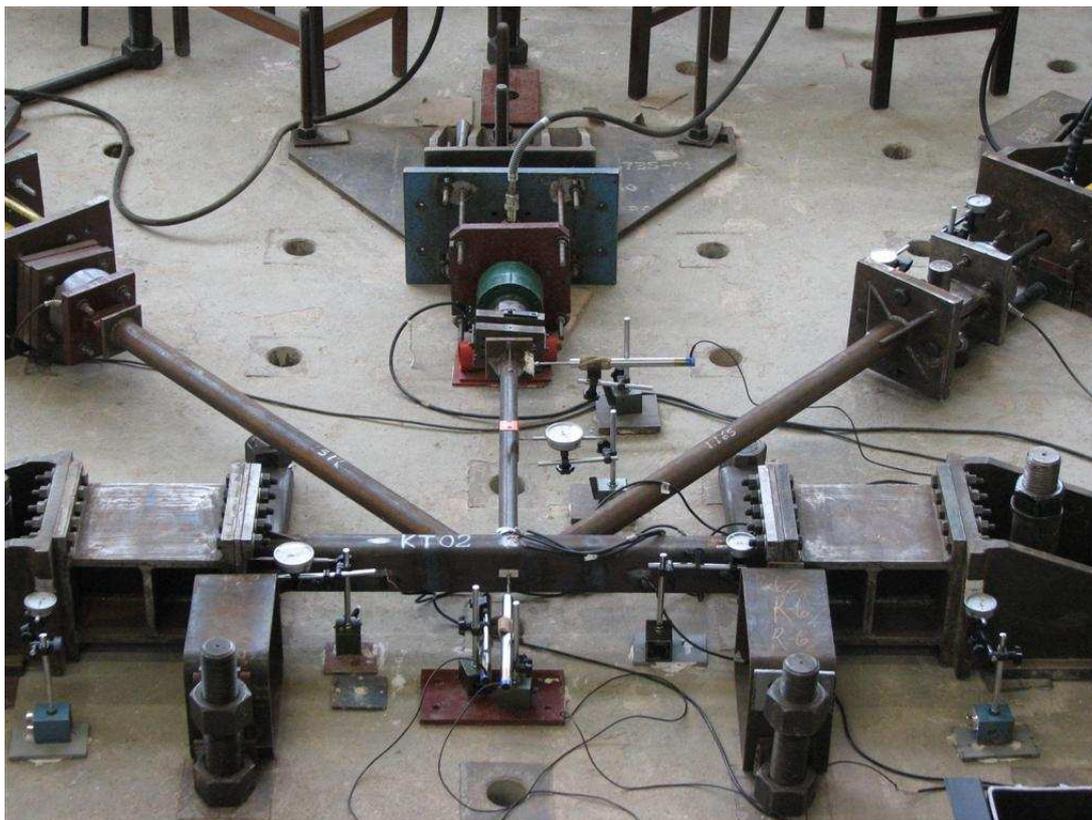


Figura 3.3 – Esquema geral de montagem para a ligação “KT”.

#### **3.4.1. Sistema de apoio dos protótipos**

Para o sistema de apoio dos protótipos foi utilizada uma peça de fixação do banzo na laje de reação que permite pequenas mudanças de posicionamento, propiciando assim, o ajuste da montagem às pequenas diferenças nas dimensões dos protótipos provenientes da fabricação. Estes ajustes são realizados utilizando a folga entre os parafusos de fixação, a furação da peça de fixação e os furos da própria laje.

Para adaptar este sistema às dimensões dos protótipos analisados neste trabalho foi criada uma peça acessória, sendo tal peça fabricada para fixar de maneira adequada o banzo que teve seu comprimento reduzido em relação aos ensaios realizados por Freitas et al. (2006). Este procedimento é justificado uma vez que nos protótipos N1 e N3, anteriormente analisados, foi observado uma flexão excessiva do banzo no momento do ensaio. Esta flexão, associada ao comprimento do banzo, pode ter contribuído para que os resultados de tais ensaios não fossem conclusivos.

A Figura 3.4 ilustra um esquema da fixação, à laje de reação, da peça de fixação do banzo e desta à peça acessória conectada por duas linhas de cinco parafusos. Observa-se também a fixação do banzo à peça acessória por duas linhas de cinco parafusos. Na mesma figura vê-se peças identificadas como anteparos, que foram posicionadas para restringir possíveis movimentos do protótipo.

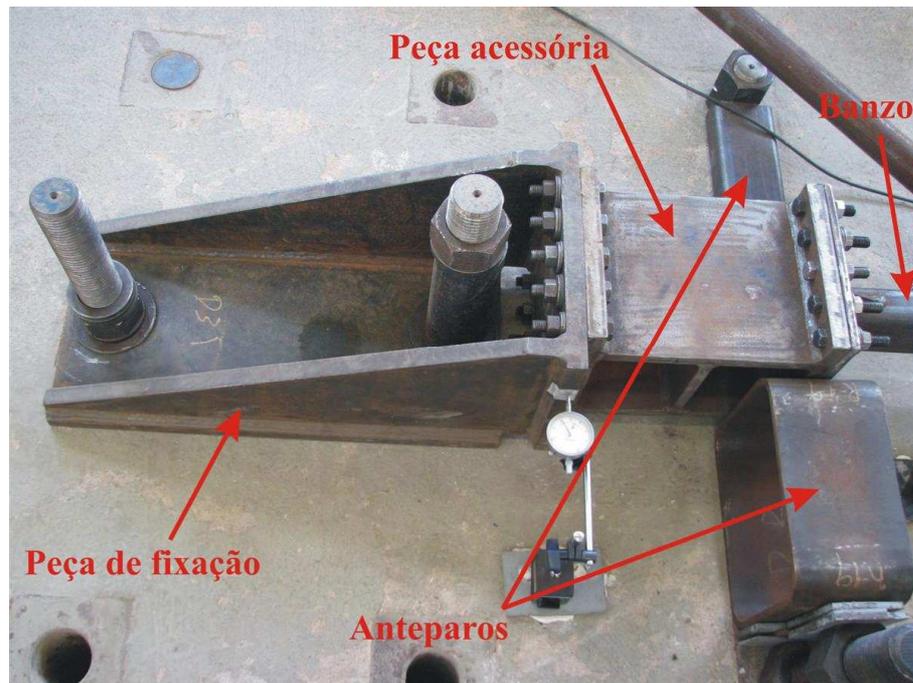


Figura 3.4 - Esquema de fixação do banzo à laje de reação.

Nas extremidades dos banzos de cada protótipo tem-se soldada uma chapa de aço enrijecida de 12,5 mm de espessura, que juntamente com as linhas de cinco parafusos e a grande inércia da peça acessória visa obter um engaste, com a finalidade de representar a continuidade do banzo. Na Figura 3.5 observa-se a chapa de aço enrijecida parafusada à peça acessória por duas linhas de cinco parafusos superior e inferior. Na Figura 3.6 tem-se o desenho de projeto da referida extremidade. A chapa de aço foi projetada para evitar qualquer mecanismo localizado de colapso.



Figura 3.5 - Detalhe de uma das extremidades do banzo.

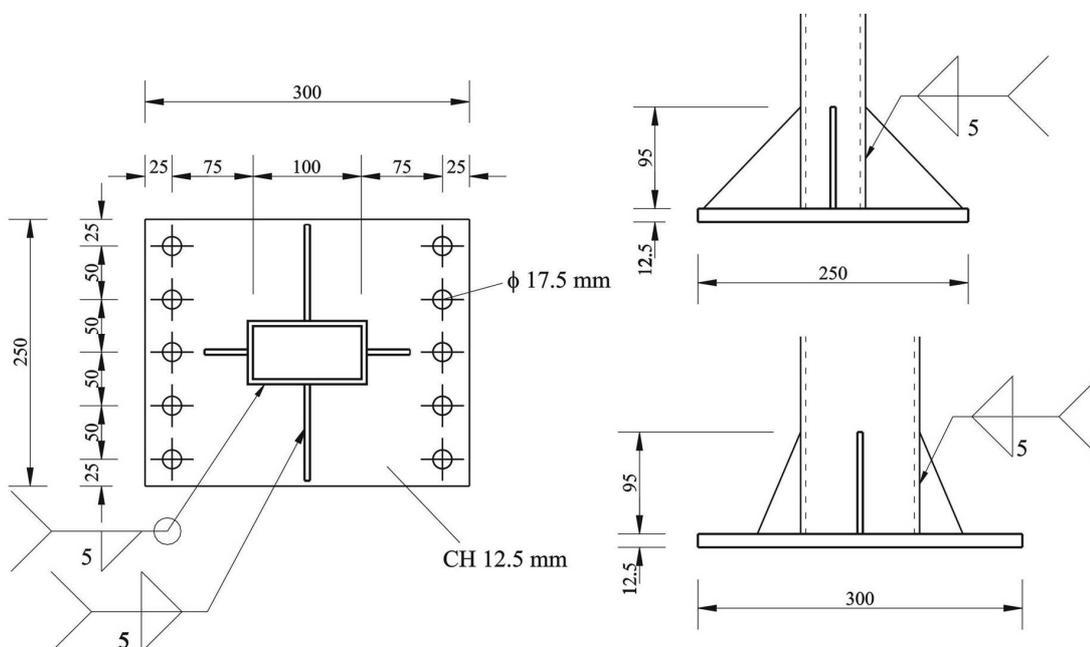
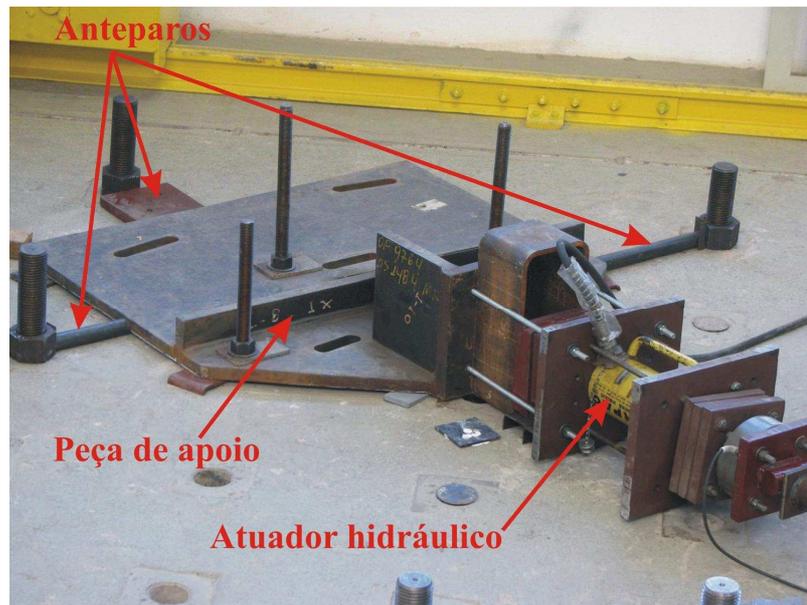


Figura 3.6 - Detalhamento de projeto da chapa de extremidade.

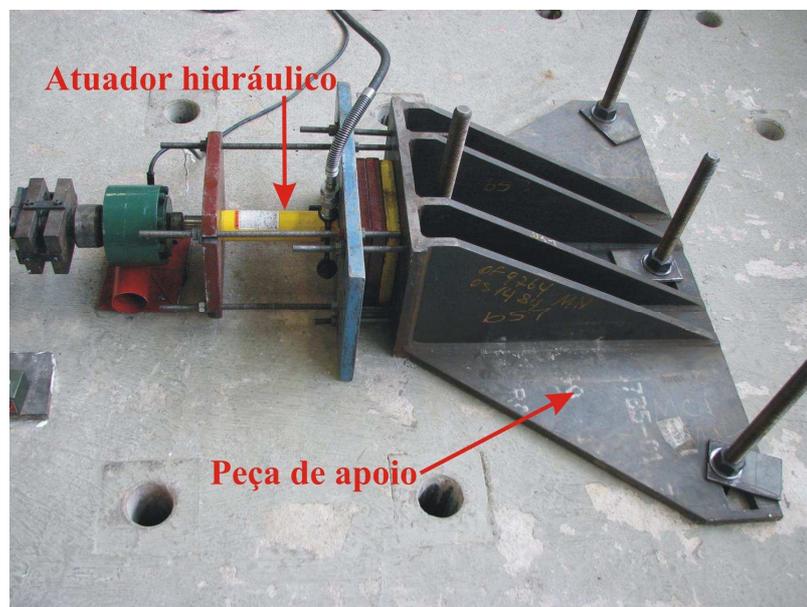
### 3.4.2. Sistema de aplicação dos carregamentos

Para a aplicação dos carregamentos de compressão em uma das diagonais, para ligações do tipo “K”; em uma das diagonais e no montante, para ligações do tipo “KT” e no montante em ligações do tipo “T”, foram utilizadas peças de apoio para os atuadores hidráulicos. Os apoios dos atuadores foram fixados à laje de reação por meio de parafusos, e a existência de furos oblongos nessas peças permitiu o posicionamento de acordo com a geometria das ligações. A Figura 3.7 (a) apresenta o sistema de aplicação

de carregamento de compressão para as diagonais de ligações do tipo “K” e “KT”, que utiliza um atuador hidráulico de capacidade nominal de 500 kN. E a Figura 3.7 (b) o sistema para os montantes, em ligações do tipo “T” e “KT”, por meio de um atuador hidráulico de capacidade nominal de 100 kN. Observa-se novamente anteparos posicionados para evitar movimento no sistema de aplicação da carga.



(a) diagonal



(b) montante

Figura 3.7 - Sistemas de aplicação de carregamento de compressão.

Para aplicação do carregamento de compressão nas diagonais dos protótipos foram soldadas às suas extremidades chapas quadradas de 100 mm x100 mm e com espessura de 12,5 mm. A finalidade destas chapas é a distribuição uniforme do carregamento na barra comprimida. Para evitar a transmissão de momento em função de imperfeições foi utilizado rolete no ponto de transmissão da carga ao protótipo. Na Figura 3.8 pode-se visualizar o sistema montado com a chapa soldada na extremidade da diagonal comprimida de um dos protótipos e na Figura 3.9 o desenho de projeto da extremidade das diagonais comprimidas.

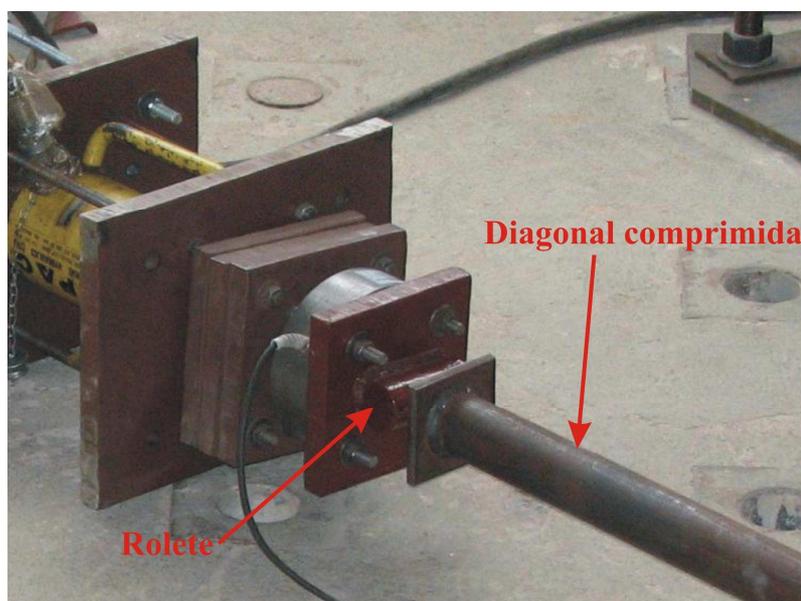


Figura 3.8 - Chapa com rolete e chapa de distribuição uniforme na diagonal comprimida.

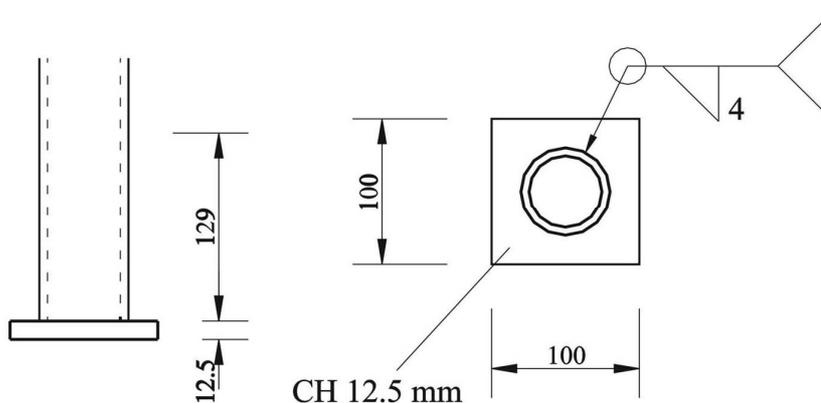


Figura 3.9 - Desenho de projeto da chapa para regularização do carregamento de compressão na diagonal.

Nos montantes também foram soldadas chapas em suas extremidades, além de quatro enrijecedores, para garantir a distribuição uniforme do carregamento, uma vez que a relação entre as dimensões da chapa e o diâmetro da peça, neste caso, é maior do que para as diagonais (Figura 3.10). Na extremidade do sistema de aplicação de carregamento no montante foi fixada uma rótula universal como pode ser visto na Figura 3.11.

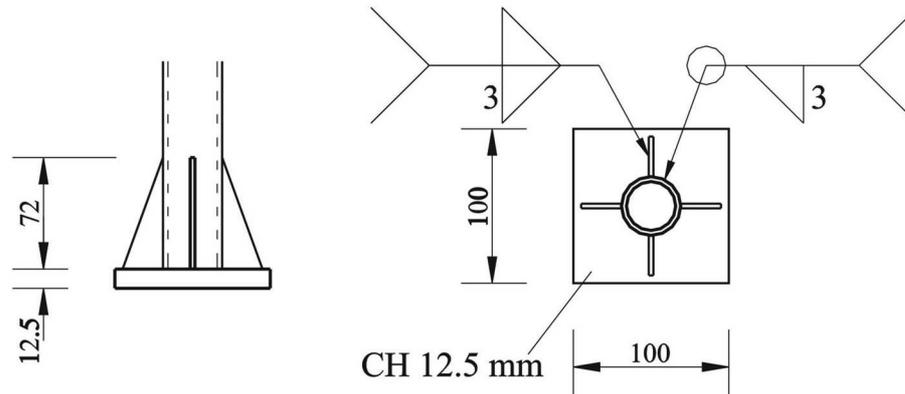


Figura 3.10 - Chapa para regularização do carregamento de compressão no montante.

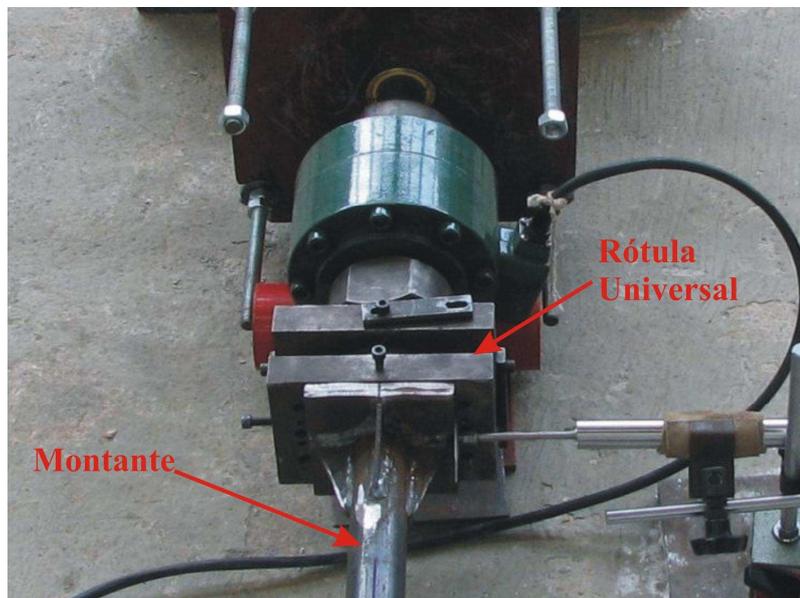


Figura 3.11 - Rótula universal e chapa de distribuição para o montante.

Para as diagonais a serem tracionadas utilizou-se um atuador hidráulico com haste vazada, com capacidade nominal de 200 kN, que por meio de um sistema de reação

permitiu a aplicação do carregamento de tração em uma das diagonais para as ligações “K” e “KT” (Figura 3.13). Com o uso deste tipo de atuador hidráulico o esquema agora montado foi significativamente mais simples em relação ao utilizado anteriormente por Freitas et al. (2006).

No esquema anterior elaborou-se um sistema de aplicação de carregamento mais complexo, também por meio de reação. Este era composto de uma peça fixa, perpendicular ao alinhamento da diagonal, ligada à laje de reação por meio de 6 parafusos, sendo os furos da peça feitos de forma a possibilitar ajustes de posicionamento para adaptação às diferentes ligações, além de duas peças móveis conectadas entre si por dois tirantes de aço que transpassavam a peça fixa com capacidade de movimentação no sentido do alinhamento da diagonal. O carregamento era aplicado com o uso de um atuador hidráulico, preso por parafusos na parte fixa e reagindo diretamente na peça móvel oposta à ligação (Mendanha, 2006). Tal esquema pode ser visualizado na Figura 3.12.

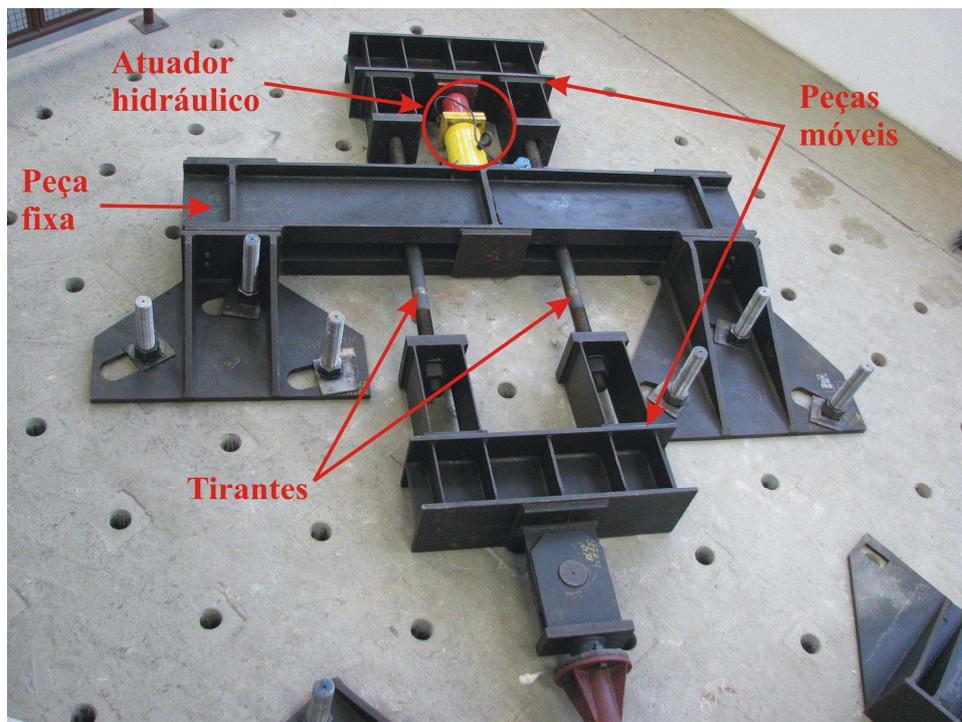


Figura 3.12 – Sistema utilizado anteriormente para aplicação do carregamento de tração.

No sistema utilizado neste trabalho, o atuador hidráulico foi preso por meio de parafusos a uma das peças componentes do sistema fixo descrito anteriormente, fixada à

laje de reação por três parafusos. O uso do atuador hidráulico com haste vazada, juntamente com a introdução de um novo furo na peça de fixação permitiu a passagem de uma barra rosqueada pelo centro do atuador, transmitindo o esforço até a outra extremidade, na qual foi rosqueada um adaptador (Figura 3.13).

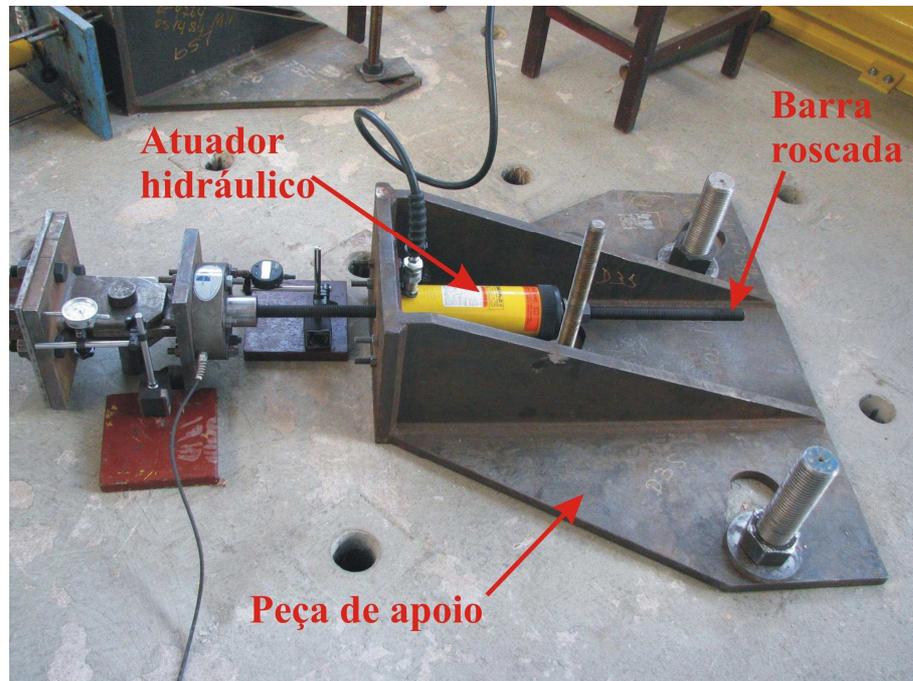


Figura 3.13 - Sistema para aplicação do carregamento de tração.

No sistema de aplicação de carregamento de tração foi conectado um apoio tipo pino parafusado a extremidade da diagonal tracionada (Figura 3.14). Para conectar o sistema rotulado e por conseqüência o sistema de aplicação de carga às diagonais a serem tracionadas, foram soldadas às suas extremidades chapas quadradas enrijecidas de 255 mm x 255 mm e com espessura de 12,5 mm. Na figura 3.15 tem-se os desenhos de projeto dessas chapas.



Figura 3.14 - Chapa de extremidade e sistema rotulado para a aplicação de tração às diagonais.

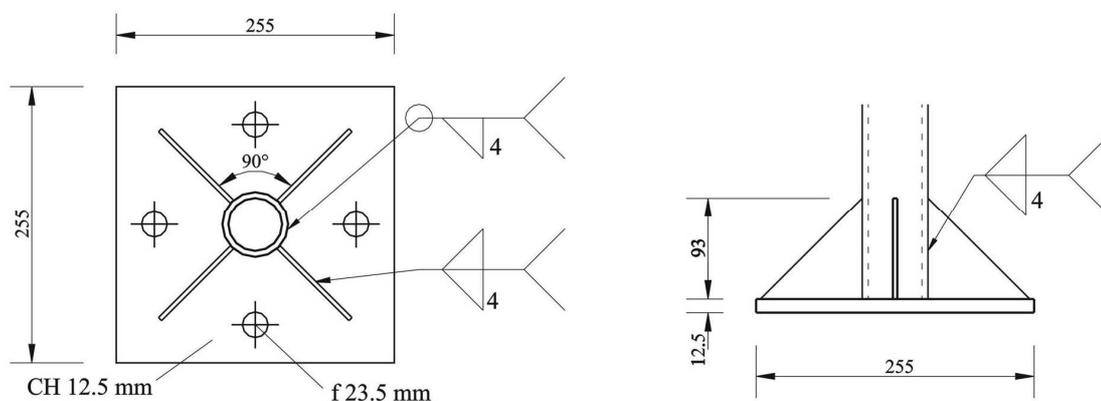


Figura 3.15 - Chapa de extremidade das diagonais tracionadas.

A figura 3.16 mostra o esquema completo de montagem dos ensaios para uma ligação do tipo “KT”, com o posicionamento de cada sistema de aplicação de carga.

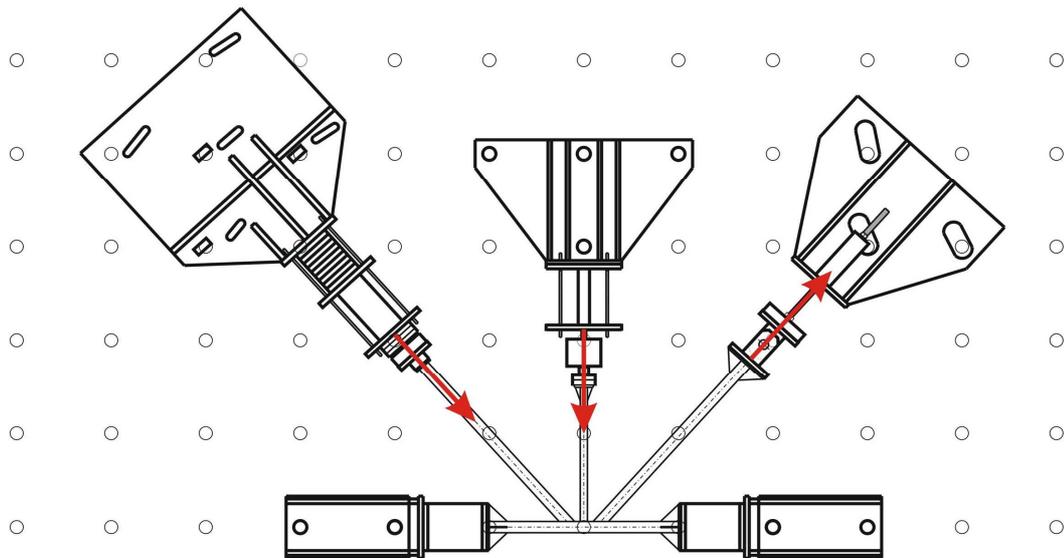


Figura 3.16 - Esquema de montagem de um protótipo do tipo “KT”.

### 3.5. Instrumentação e sistema de aquisição de dados

A função dos ensaios é o monitoramento das ligações, considerando as deformações e os deslocamentos ocorridos durante a aplicação do carregamento, de forma a simular de maneira real o comportamento da estrutura.

Os deslocamentos lineares foram medidos por meio de deflectômetros e LVDT's (Linear Variable Displacement Transducers). Ambos foram fixados em pontos definidos previamente e com a finalidade de monitorar os deslocamentos ocorridos durante o ensaio. Nos deflectômetros a leitura é por meio de um mostrador digital (Figura 3.17 (a)) ou analógico (Figura 3.17 (b)). Nos LVDT's, Figura 3.18, os deslocamentos são medidos e armazenados por meio de um sistema de aquisição de dados automático.



(a) digital



(b) analógico

Figura 3.17 - Deflectômetros de haste.

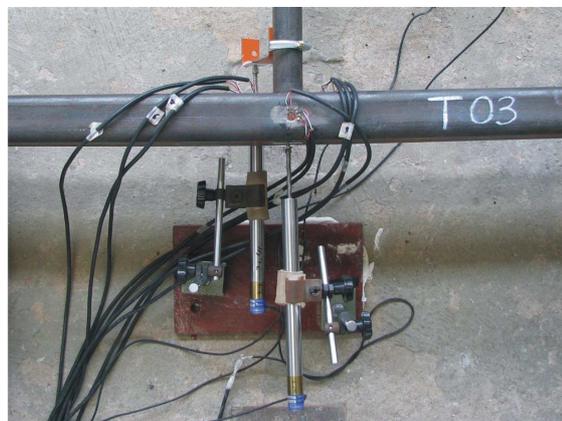


Figura 3.18 – LVDT's utilizados nos ensaios.

Nos ensaios os deflectômetros foram posicionados no sistema de apoio dos protótipos e no sistema de aplicação dos carregamentos para acompanhar possível movimentação dos mesmos. Essa instrumentação foi de extrema importância para que fosse identificado, nos primeiros ensaios, a movimentação excessiva de algumas peças componentes do sistema, configurando um movimento de corpo rígido. Tal constatação justificou a colocação dos anteparos nos sistemas de apoio e de aplicação dos carregamentos que foram descritos anteriormente. A instrumentação por meio dos deflectômetros foi mantida em todos os ensaios para monitoramento de possíveis movimentações indesejáveis. Na figura 3.19, temos a posição dos deflectômetros para o ensaio em uma ligação “KT”.

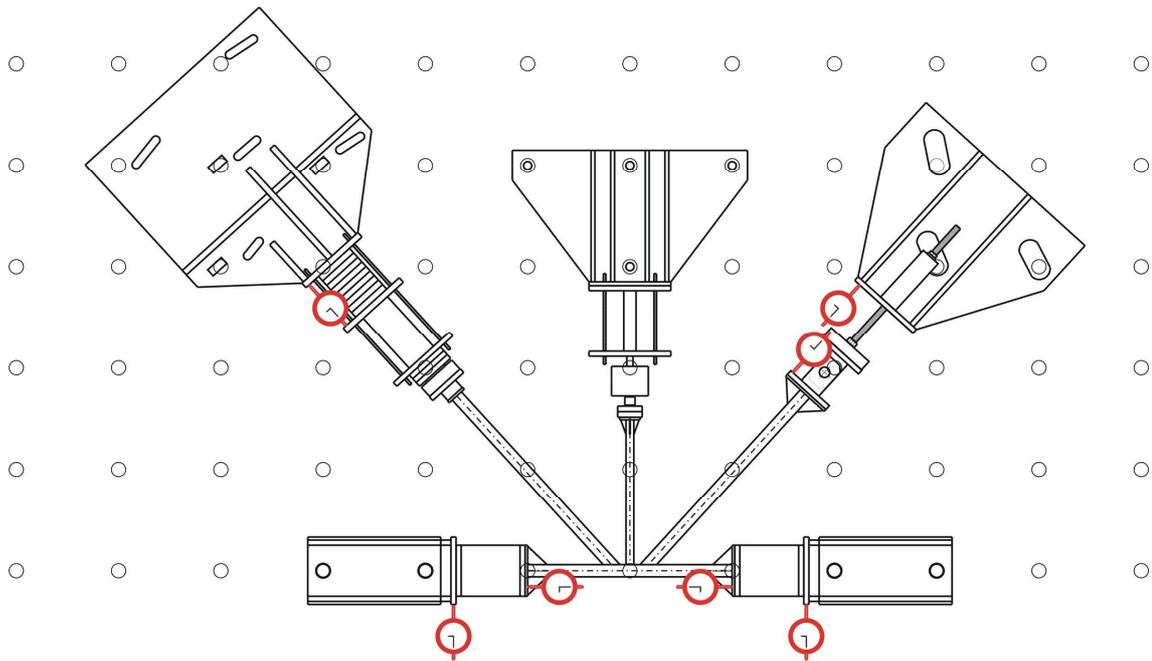


Figura 3.19 - Posicionamento dos defletômetros em um ensaio de ligação "KT".

Os LVDT's foram posicionados em diferentes pontos dos protótipos tendo finalidades distintas. Em todos os ensaios dos três tipos de ligações analisadas foi utilizado pelo menos 01 LVDT posicionado na face inferior do banzo para medição do deslocamento devido à flexão do mesmo no decorrer do ensaio. Em ligações do tipo "T" e "KT" foi colocado um LVDT paralelo ao eixo do montante para medir o afundamento deste na parede superior do banzo. Para esses dois tipos de ligações também foram colocados mais dois LVDT's perpendiculares ao montante, sendo um colocado na extremidade onde foi aplicado o carregamento e o outro no meio do comprimento do mesmo. Ambos com a finalidade de medir o deslocamento transversal do montante.

No caso das deformações, a instrumentação foi realizada por extensômetros elétricos de resistência unidirecionais e também do tipo roseta tripla a 90° (Figura 3.20), para aço, das marcas KYOWA e EXCEL SENSORES. A deformação específica é lida pelo sistema de aquisição de dados discutido a seguir.



Figura 3.20 – Rosetas.

Para os protótipos da ligação “T” foi colada uma roseta na lateral do banzo, e outras duas na face superior, uma de cada lado da ligação do banzo com o montante, como representado na Figura 3.21. Sempre no meio em relação a largura da face considerada.

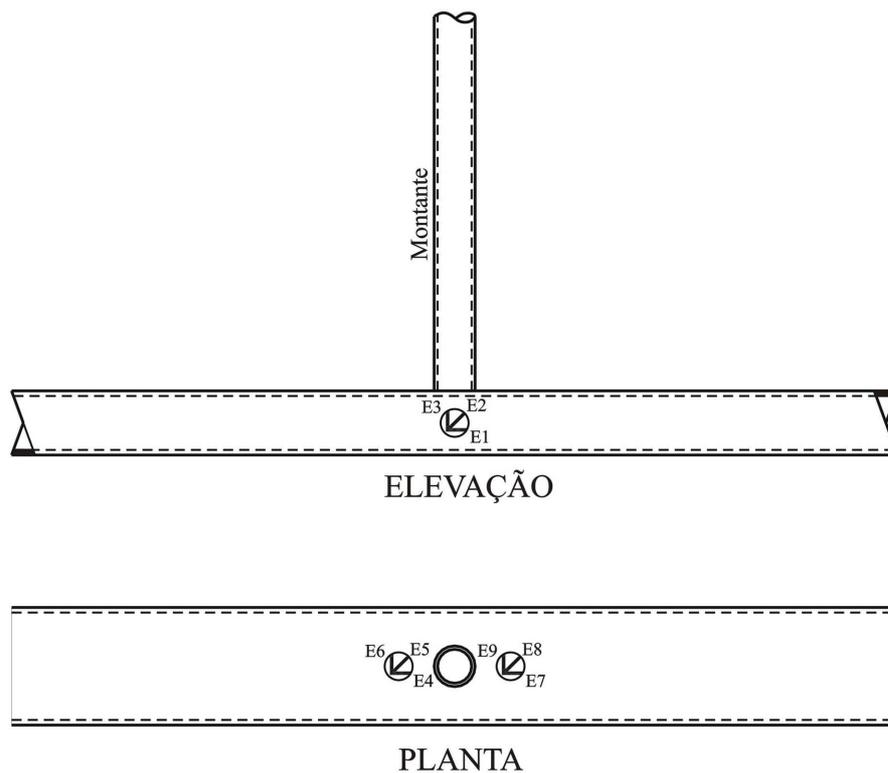


Figura 3.21 – Posicionamento dos extensômetros para a ligação do tipo “T”.

Para as ligações “K” foi colada uma roseta na lateral e outras três na face superior do banzo, sendo uma entre a diagonal comprimida e a extremidade do banzo, outra entre a diagonal tracionada e a outra extremidade, no meio da largura das faces, e a terceira

entre as diagonais. Para esta última como o afastamento entre as diagonais foi insuficiente para a colagem, a mesma foi colada mais próxima a face lateral do banzo. Além disso, um extensômetro linear foi colado na diagonal tracionada, como pode ser visto na Figura 3.22.

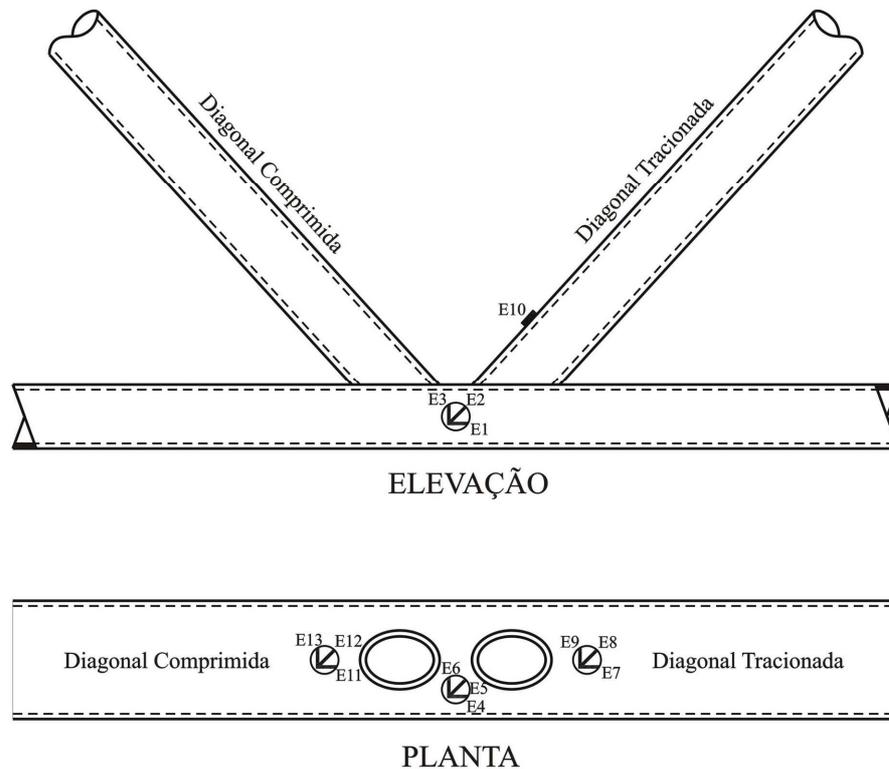


Figura 3.22 - Posicionamento dos extensômetros para a ligação do tipo "K".

Nos protótipos da ligação "KT" foram coladas cinco rosetas no banzo. Uma em sua lateral, quatro na face superior do banzo, sendo uma entre a diagonal comprimida e a extremidade do banzo, uma entre a diagonal tracionada e a outra extremidade, e duas entre as diagonais e o montante. Três extensômetros lineares foram colados no protótipo, sendo um na diagonal tracionada e outros dois na face inferior do banzo. Também nesse tipo de ligação, para as rosetas posicionadas entre as diagonais e o montante, devido ao pequeno afastamento entre esses membros, a posição das rosetas é mais próxima à face lateral do banzo, conforme Figura 3.23.

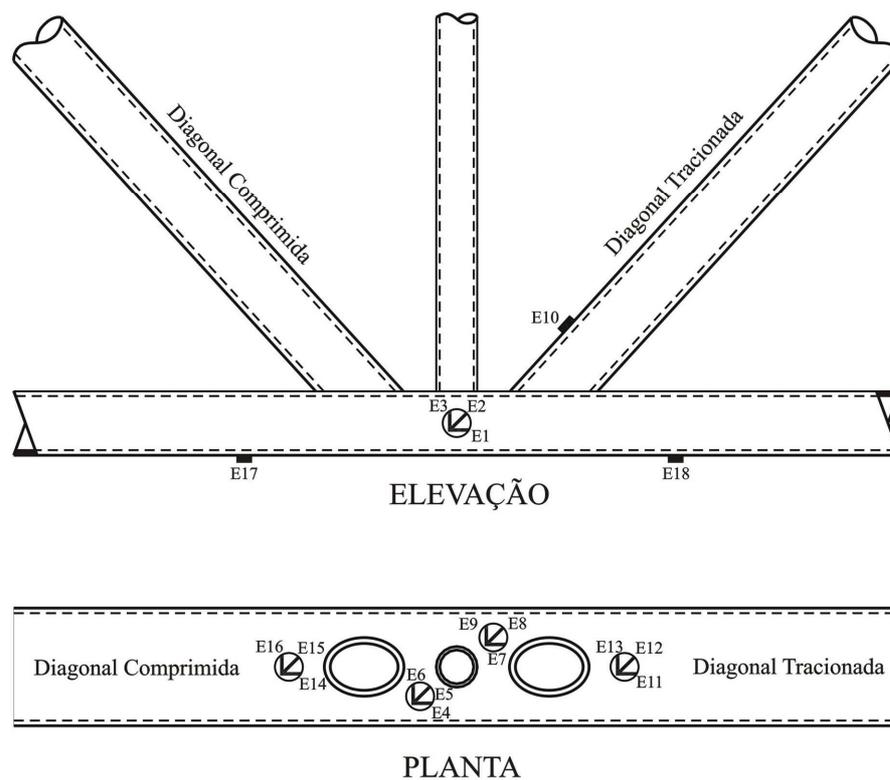
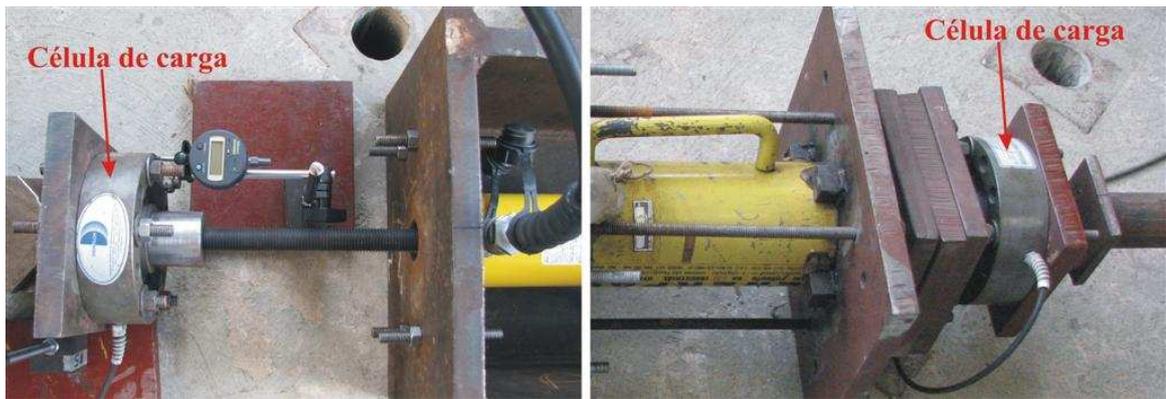


Figura 3.23 - Posicionamento dos extensômetros para a ligação do tipo “KT”.

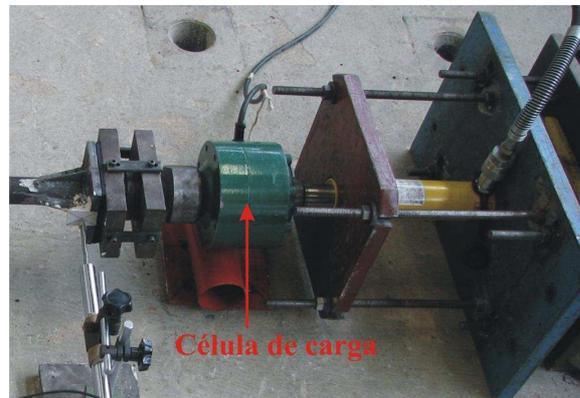
A posição real medida de cada extensômetro e roseta para todos os protótipos é apresentada no capítulo 4 quando da apresentação das medições das imperfeições oriundas da fabricação dos mesmos.

Já para medição dos carregamentos aplicados às diagonais e montantes por meio de atuadores hidráulicos, foram utilizadas células de carga de diversas capacidades de acordo com o nível de carregamento aplicado a essas peças, como pode ser visto na Figura 3.24.



(a) diagonal tracionada

(b) diagonal comprimida



(a) montante

Figura 3.24 – Células de carga utilizadas nos ensaios.

Em relação ao sistema de aquisição de dados, excetuando-se os defletores que possuem sua leitura manual, os demais aparelhos utilizados, LVDT's, extensômetros e células de carga, tiveram seus dados lidos por meio de sistema automático controlado por computador dotado de sistema de controle e monitoramento de aquisição. Tal sistema é constituído de módulos de 8 canais "Spider 8" fabricado pela HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik ,2003) com a aquisição de dados efetuada através do programa "Catman 4.5" e armazenada no computador. A Figura 3.25 apresenta o sistema automático de aquisição de dados.



Figura 3.25 - Sistema automático de aquisição de dados.

### 3.6. Metodologia de ensaio

A aplicação do carregamento nas diagonais comprimidas e tracionadas e nos montantes, foi realizada manualmente por meio de atuadores hidráulicos. O monitoramento da carga aplicada foi feito por células de carga previamente calibradas, que têm os dados lidos pelo sistema de aquisição.

Inicialmente, com a finalidade de ajustar e verificar o sistema de aplicação de cargas, aquisição de dados e eliminar as folgas de montagem, foi realizado um pré-ensaio a partir da aplicação de passos de carga na fase elástica do material.

Nos ensaios a aplicação do carregamento foi dividida em vários passos de carga de acordo com o nível de carregamento aplicado a cada tipo de ligação, sendo que a cada passo foi realizada a leitura manual dos deflectômetros e os demais dados captados pelo sistema de aquisição automático de dados.

O critério de parada dos ensaios ocorreu quando foi observada a formação de um mecanismo de colapso da peça, pois não houve nenhuma inconformidade de funcionamento dos equipamentos envolvidos nos experimentos durante a realização dos mesmos.

### **3.7. Ensaio de tensões residuais**

O método escolhido para a avaliação das tensões residuais no tubo retangular componente do banzo foi o Método do Seccionamento em Tiras, tendo por base o trabalho desenvolvido por Rodrigues (1993). Tal método foi desenvolvido pelo Structural Stability Research Council – SSRC (1981). Fundado em 1940 sob a denominação de Column Research Council – CRC, este órgão foi o primeiro a aplicar o Método do Seccionamento em Tiras em 1950. Trata-se de um método destrutivo o qual permite uma avaliação unidirecional das tensões residuais por meio do retorno elástico do material.

A metodologia empregada consistiu nos seguintes passos:

- 1) retirada de um corpo-de-prova de cerca de 1 m de comprimento do perfil;
- 2) no entorno da seção média longitudinal do corpo de prova instala-se uma série de extensômetros elétricos de resistência (EER), que são colados na direção longitudinal do perfil;
- 3) Neste ponto é realizada uma primeira leitura de referência dos extensômetros (Etapa 1);
- 4) secciona-se o corpo de prova em duas seções transversais sendo então liberado o trecho instrumentado. No caso, o trecho liberado tinha 200 mm de comprimento, pois devido a parede do perfil ser relativamente espessa, 4,8 mm, necessitava-se de um comprimento que permitisse a medida da deformada por flexão. Sendo a medida dessa deformada utilizada para obtenção das tensões residuais internas do perfil por meio de método indireto, como será visto posteriormente;

5) após o seccionamento transversal é feita uma segunda leitura dos extensômetros (Etapa 2);

6) secciona-se o corpo de prova longitudinalmente em diversas tiras, no caso 26 tiras. No ensaio as tiras tinham cerca de 1 cm de largura. O corte foi realizado minuciosamente através de uma serra de fita (Figura 3.26) devido à largura reduzida da tira para que não houvesse prejuízo à instrumentação. Foram utilizados EER com base de 2 mm de forma a viabilizar o corte em tiras.

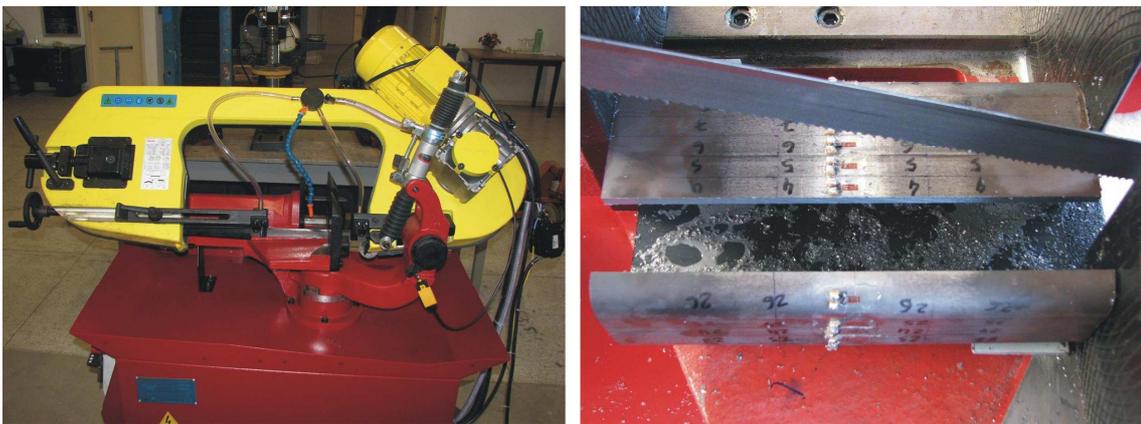


Figura 3.26 – Serra de fita.

7) por fim é realizada a terceira leitura, dos extensômetros colados em cada tira de forma a obtermos os valores das tensões residuais aliviadas (Etapa 3);

A Figura 3.27 mostra o corpo de prova instrumentado na sua seção transversal média e algumas tiras obtidas após o corte longitudinal.

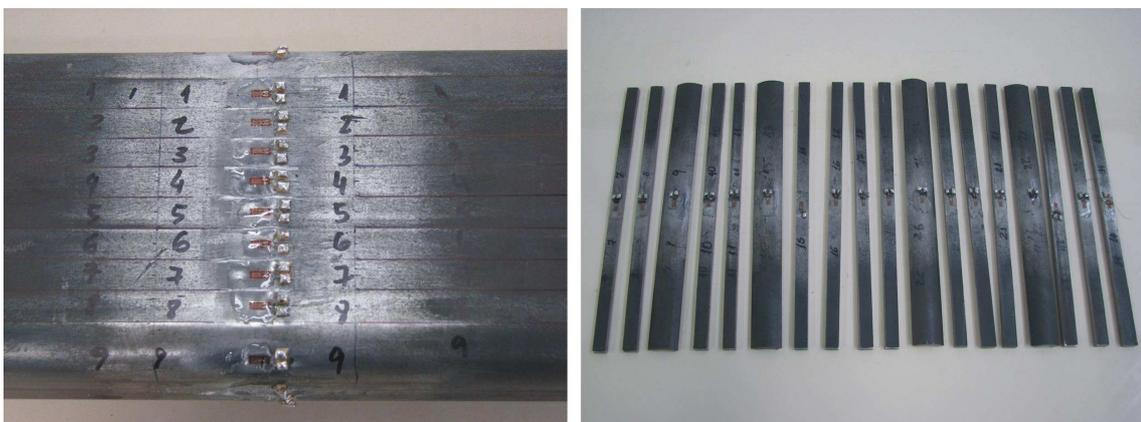


Figura 3.27 - Corpo de prova instrumentado e algumas tiras após o corte longitudinal.

As medidas das tensões residuais longitudinais obtidas foram da face externa da parede do tubo, uma vez que a geometria da seção impossibilita a instrumentação da face interna. Contudo, para obtenção das tensões residuais internas, realizou-se a medida da deformada longitudinal de flexão das tiras seccionadas. Esta deformada é produzida pela liberação das tensões residuais após os cortes longitudinais (Etapa 3), tendo o seu raio de curvatura uma ligação direta com os efeitos da flexão. Para obtenção da deformada longitudinal foram feitas medições em cada uma das tiras após o corte longitudinal do perfil. Estas medidas foram realizadas com o auxílio de LVDT's (Linear Variable Displacement Transducers), aparelhos que possuem uma grande precisão.

Foram realizadas medidas da deformada das tiras em diferentes pontos, a fim de se validar a hipótese da deformada suposta circular, a qual resultaria de uma condição de flexão pura nas tiras. Na Figura 3.28 tem-se para uma das tiras a comparação entre os pontos da deformada medida e um arco de circunferência, demonstrando que estas deformadas apresentam uma forma circular, validando desta forma a hipótese adotada.

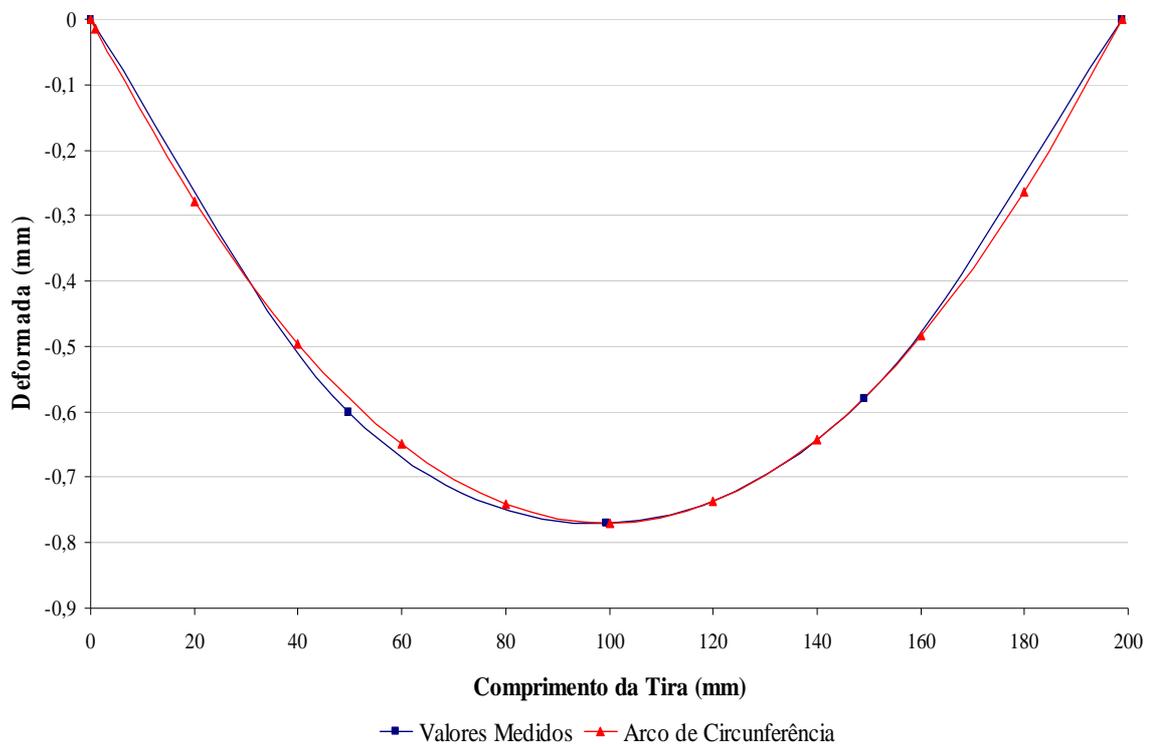


Figura 3.28 - Deformada da tira número 1.

Além das deformadas mediu-se também a dimensão L e a espessura t da tira, conforme indicado pela Figura 3.29.

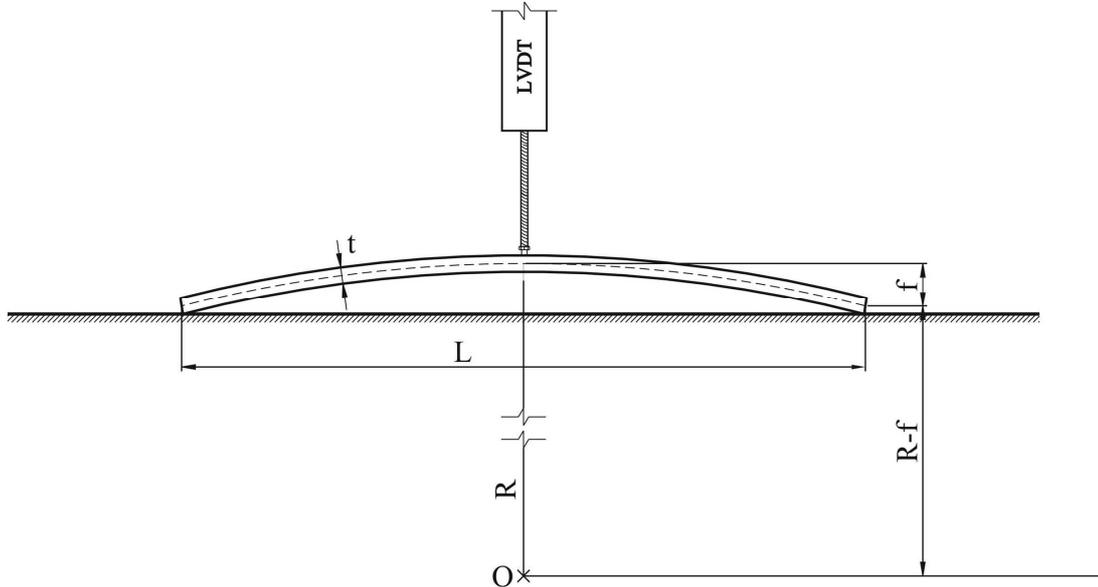


Figura 3.29 - Deformada circular de uma tira.

Aplicando a hipótese comprovada anteriormente da deformada de tipo circular, pode-se deduzir o valor do raio de curvatura R, em relação à superfície média da tira, em função da flecha f e do comprimento L, por meio da seguinte expressão:

$$R = \left( f^2 + \frac{L^2}{4} \right) \frac{1}{2f} \quad (3.1)$$

Conhecido o raio de curvatura do trecho pode-se calcular os valores das deformações específicas  $\epsilon_f$  nas superfícies superior e inferior da tira, referente à parcela das tensões residuais de flexão. Sendo esta deformação calculada por meio da seguinte expressão:

$$\epsilon_f = \pm \frac{t \cdot f}{f^2 + L^2/4} \quad (3.2)$$

Com os valores das tensões,  $\sigma_f$ , obtidos por meio da lei de Hooke.

Rodrigues (1993), com o objetivo de propor um método satisfatório para a determinação das tensões residuais internas em pontos de difícil acesso como o interior de tubos,

testou uma técnica de levantamento indireto das deformações. Foi adotada uma combinação entre extensometria e levantamento das deformadas longitudinais das tiras. Para uma seção submetida à flexão composta tem-se os diagramas de deformação conforme a Figura 3.30.

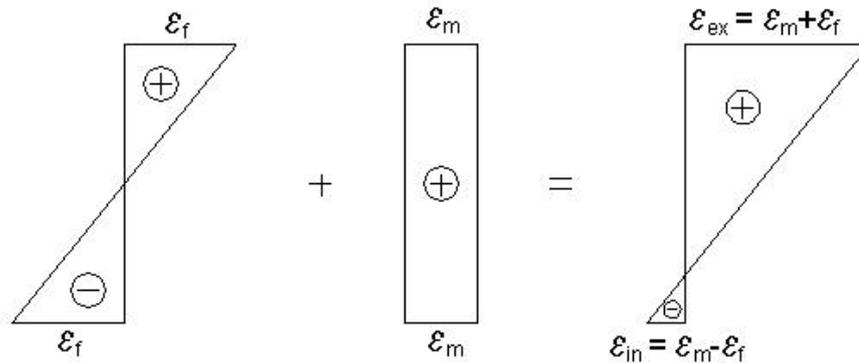


Figura 3.30 - Diagrama de deformação de uma seção submetida à flexão composta.

Onde:

$\epsilon_f$  = deformação devido ao efeito de flexão pura;

$\epsilon_m$  = deformação devido ao efeito membranar;

$\epsilon_{ex}$  = deformação resultante externa (obtidas por meio dos extensômetros elétricos);

$\epsilon_{in}$  = deformação resultante interna (a ser determinada)

Tem-se então:

$$\epsilon_{in} = \epsilon_{ex} - 2\epsilon_f \quad (3.3)$$

$$\epsilon_{r_m} = -\epsilon_{in} \quad (3.4)$$

sendo  $\epsilon_{rin}$  a deformação elástica referente à tensão residual na face interna do perfil.

Os resultados das medições das tensões residuais longitudinais relativas ao corpo-de-prova ensaiado podem ser visualizados na Figura 3.31.

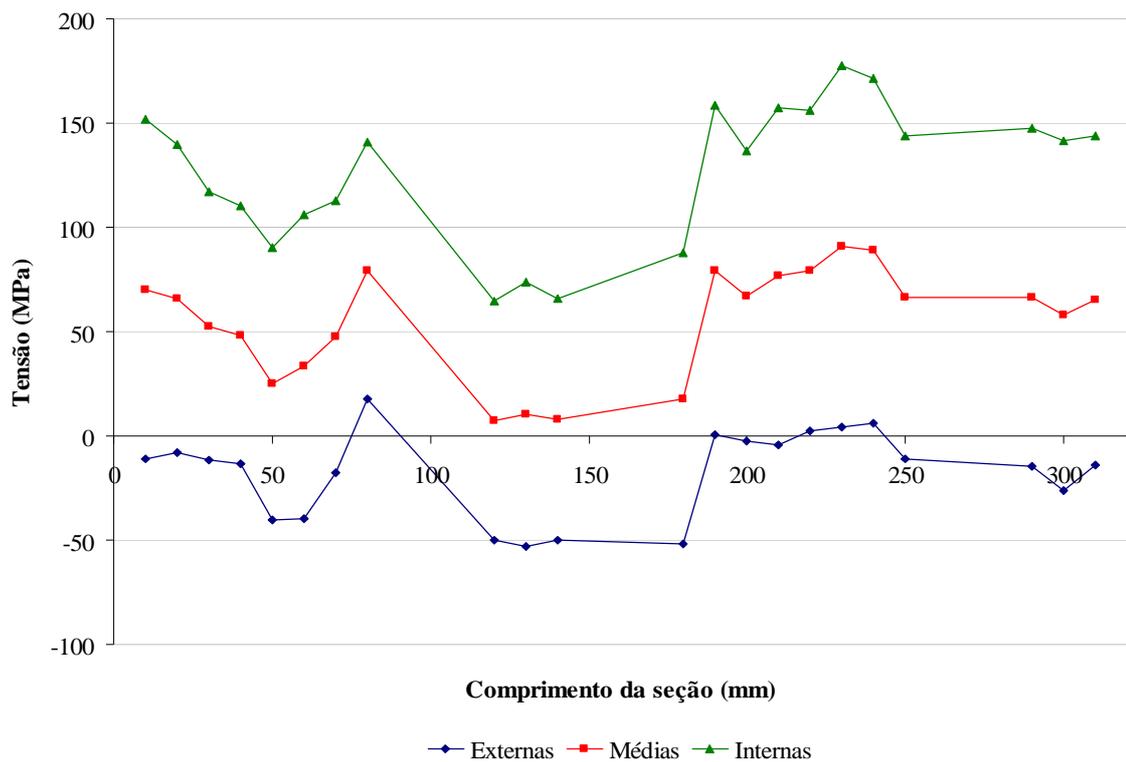


Figura 3.31 - Distribuição das tensões residuais externas, médias e internas, ao longo da seção do tubo retangular.

Da observação do gráfico da figura 3.31, pode-se concluir que os valores das tensões residuais medidos foram baixos, levando-se em conta o processo de obtenção deste tipo de perfil esperava-se encontrar valores bem maiores. Por meio de levantamento realizado com o fabricante do perfil, de modo a identificar possíveis processos diferentes na fabricação do mesmo, obteve-se a informação de que o lote ao qual o perfil pertencia foi submetido a tratamento térmico. Esta informação posterior justifica os baixos níveis de tensões residuais.

### **4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS**

#### **4.1. Introdução**

A seguir tem-se os resultados experimentais dos ensaios realizados neste trabalho. Os resultados são relativos às deformações, deslocamentos e carregamentos. As medições reais da geometria dos protótipos, utilizadas nas análises do capítulo 5, e as posições dos extensômetros elétricos de resistência também estão apresentadas a seguir.

Foram fabricados três protótipos para cada tipo de ligação com o intuito de ensaiar no mínimo dois de cada tipo, sendo reservado o terceiro protótipo para o caso dos resultados obtidos com os dois primeiros não fossem conclusivos.

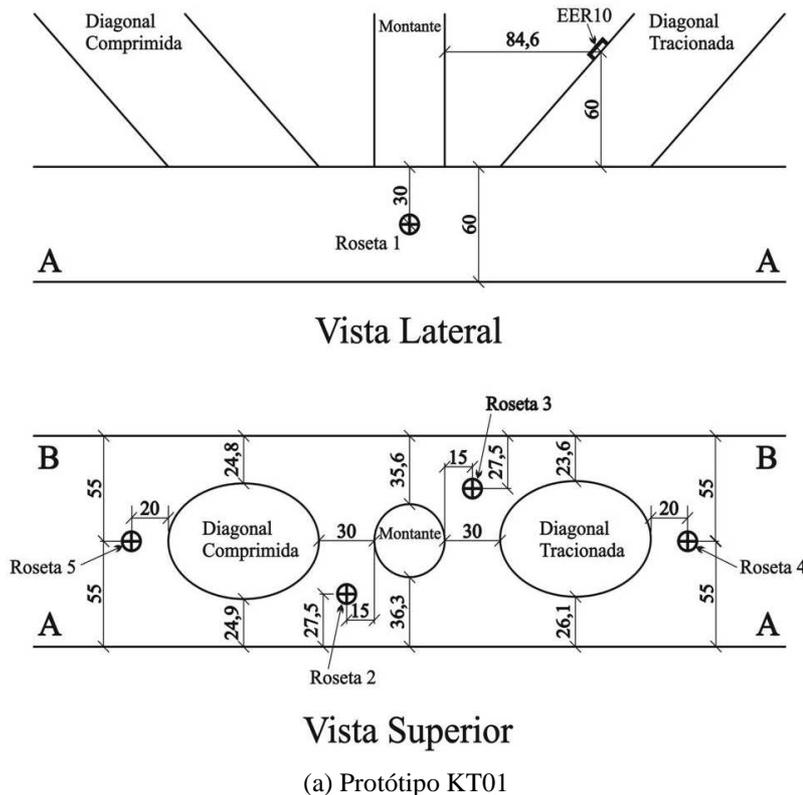
Os resultados apresentados a seguir para todos os protótipos ensaiados são em função da tensão de von Mises obtida a partir das deformações medidas por extensômetros tipo roseta. São apresentados também resultados das tensões normais, calculadas por meio das deformações medidas nos extensômetros lineares, e dos deslocamentos, medidos pelos LVDT's posicionados como apresentado no capítulo 3 item 3.5. Os resultados são apresentados por tipo de ligação ensaiada, ligação "KT", ligação "K" e ligação "T".

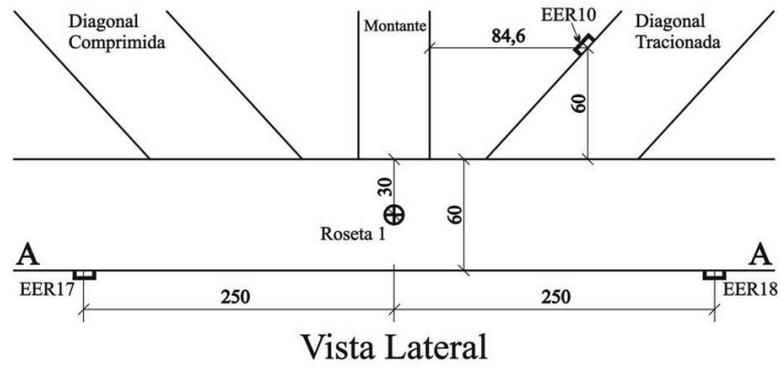
O nível de carregamento utilizado nos ensaios foi obtido a partir da máxima resistência de cada ligação conforme o Eurocode 3 para os esforços máximos da treliça otimizada.

#### **4.2. Ligação "KT"**

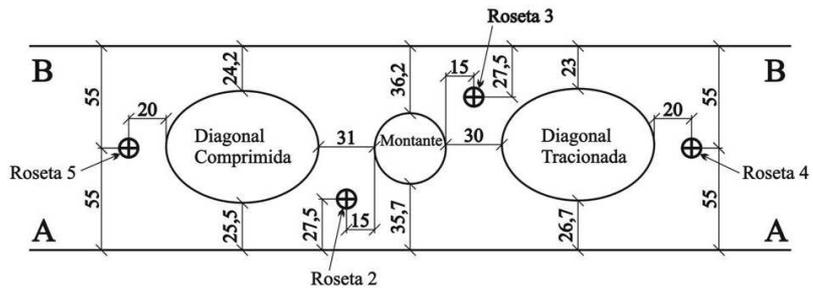
Para a ligação "KT" foram realizados três ensaios. Nos dois primeiros, KT01 e KT02, os valores da Tensão de von Mises foram divergentes, principalmente nas rosetas 2 e 3, nas quais as medições indicaram o colapso da ligação por plastificação da face do banzo. Assim o terceiro ensaio, KT03, foi realizado para confirmar o resultado dos dois primeiros.

As medidas das imperfeições de fabricação dos protótipos estão representadas na Figura 4.1 (a) para o protótipo KT01, na Figura 4.1 (b) para o KT02 e na Figura 4.1 (c) para o protótipo KT03. Nestas figuras também são apresentados a nomenclatura e o posicionamento das rosetas e extensômetros lineares colados nos protótipos. Sendo, roseta 1, posicionada na face lateral do banzo; roseta 2 e roseta 3, posicionadas na face superior do banzo entre a diagonal comprimida e o montante e entre a diagonal tracionada e o montante, respectivamente; roseta 4 e roseta 5, coladas na face superior do banzo entre a diagonal tracionada e a extremidade do banzo e entre a diagonal comprimida e a outra extremidade do banzo, respectivamente. Um extensômetro elétrico de resistência linear, EER10, foi fixado na diagonal a ser tracionada e outros dois, EER17 e EER18, foram fixados na face inferior do banzo. No caso dos extensômetros EER17 e EER18, estes foram colados apenas nos protótipos KT02 e KT03.



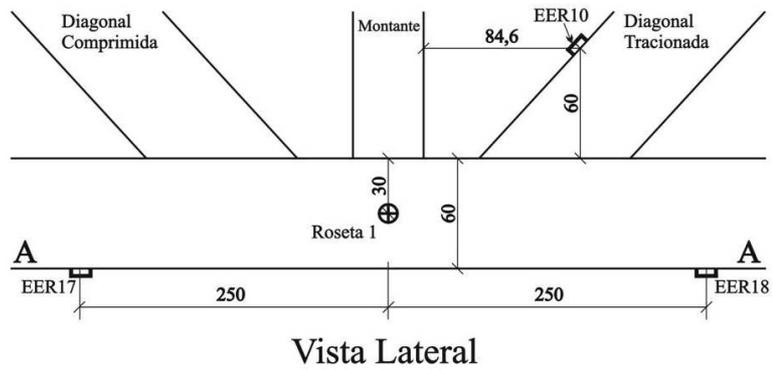


Vista Lateral

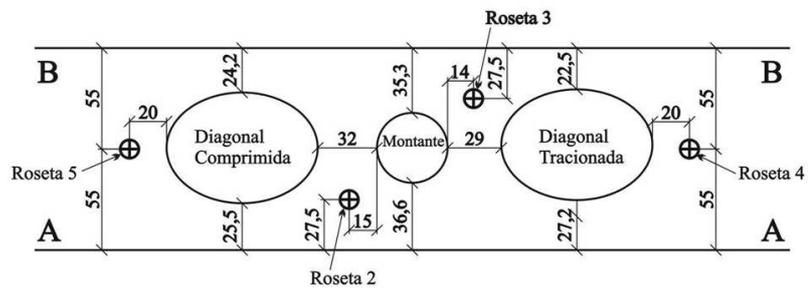


Vista Superior

(b) Protótipo KT02



Vista Lateral



Vista Superior

(c) Protótipo KT03

Figura 4.1 – Imperfeições geométricas dos protótipos da ligação tipo “KT”.

Observa-se de maneira geral que a posição das diagonais e montante está deslocada em relação ao eixo longitudinal do banzo da ligação.

As cargas aplicadas nas diagonais comprimidas e tracionadas tiveram o mesmo valor em módulo, e a carga aplicada ao montante foi cerca de 75% da carga das diagonais. O nível de carregamento em cada membro foi determinado a partir da máxima resistência obtida teoricamente por meio das equações do capítulo 2 (Eurocode 3). Para a aplicação do carregamento o ensaio foi dividido em passos de carga com o carregamento sendo aplicado simultaneamente nas diagonais e montante. Inicialmente foi aplicado carregamento com passos de carga maiores e quando mais próximo da carga de colapso determinada teoricamente segundo o Eurocode 3 (2005), os passos de carga tiveram seus valores reduzidos para obter um valor mais preciso da carga de colapso.

Durante o ensaio, depois de um certo nível de carregamento, apenas os atuadores hidráulicos de compressão eram acionados, uma vez que a carga na diagonal tracionada estava sendo aplicada indiretamente por reação, devido ao tipo de montagem do sistema e da forma de aplicação da carga. Observou-se também que o valor desta reação era ligeiramente maior que o carregamento aplicado à diagonal comprimida, sendo ocasionado por imperfeições existentes no protótipo.

Para o protótipo KT01 o escoamento do material ocorreu para uma carga de 45,00 kN para a diagonal tracionada, 42,50 kN para diagonal comprimida e 31,20 kN para o montante. O ensaio foi finalizado após o colapso total da ligação na fase plástica do material, com níveis de carga de 108,90 kN, 89,05 kN e 66,00 kN, para a diagonal tracionada, diagonal comprimida e montante, respectivamente.

No ensaio do protótipo KT02 o escoamento do material ocorreu para uma carga de 60,00 kN para a diagonal tracionada, 59,00 kN para diagonal comprimida e 43,60 kN para o montante. Após a identificação do modo de colapso o ensaio prosseguiu até os níveis de carga de 97,60 kN, 85,90 kN e 63,60 kN, para a diagonal tracionada, diagonal comprimida e montante respectivamente.

Observa-se a divergência da carga de início de escoamento nos dois ensaios descritos anteriormente, o que levou a realização do terceiro ensaio, protótipo KT03.

Para o protótipo KT03 o escoamento do material ocorreu para uma carga de 60,00 kN para a diagonal tracionada, 58,90 kN para diagonal comprimida e 43,60 kN para o montante, sendo finalizado após o colapso total da ligação na fase plástica do material, com níveis de carga de 106,80 kN, 90,00 kN e 66,90 kN, para a diagonal tracionada, diagonal comprimida e montante respectivamente.

Os resultados das tensões de von Mises nas cinco rosetas coladas em cada protótipo da ligação tipo “KT” estão apresentados nas Figuras 4.2 a 4.6. Para os três ensaios o modo de colapso preponderante foi a plastificação da face do banzo assim como determinado teoricamente. No esquema apresentado na Figura 3.16 a diagonal à direita é a tracionada e da esquerda a comprimida. Nas figuras tem-se também a identificação da tensão de escoamento obtida pelo ensaio de caracterização do material do banzo dos protótipos.

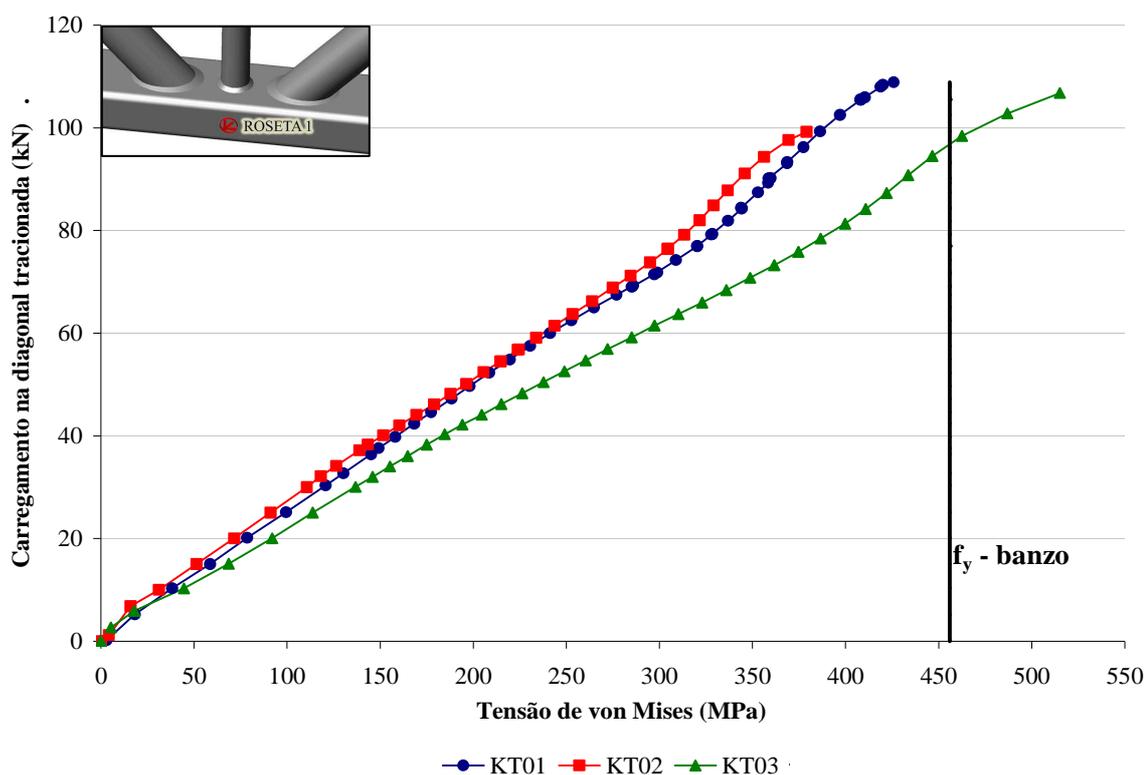


Figura 4.2 – Gráfico Carregamento x Tensão de von Mises para a ligação “KT” – Roseta 1.

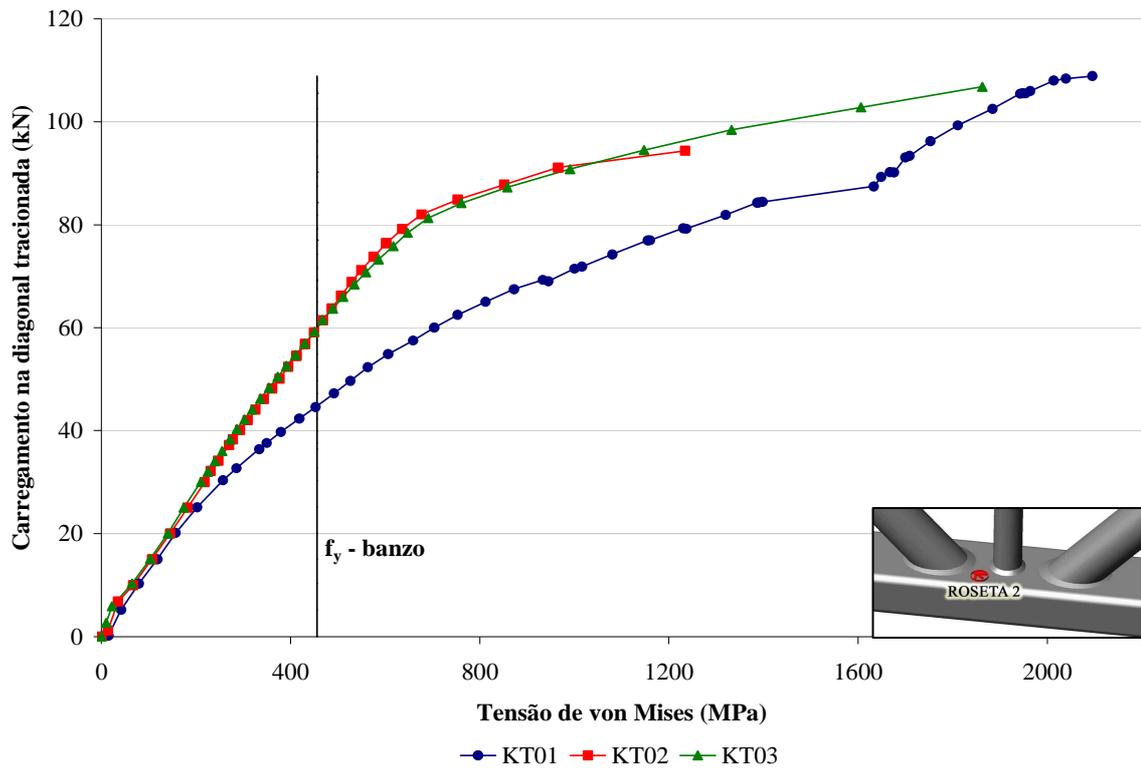


Figura 4.3 – Gráfico Carregamento x Tensão de von Mises para a ligação “KT” – Roseta 2.

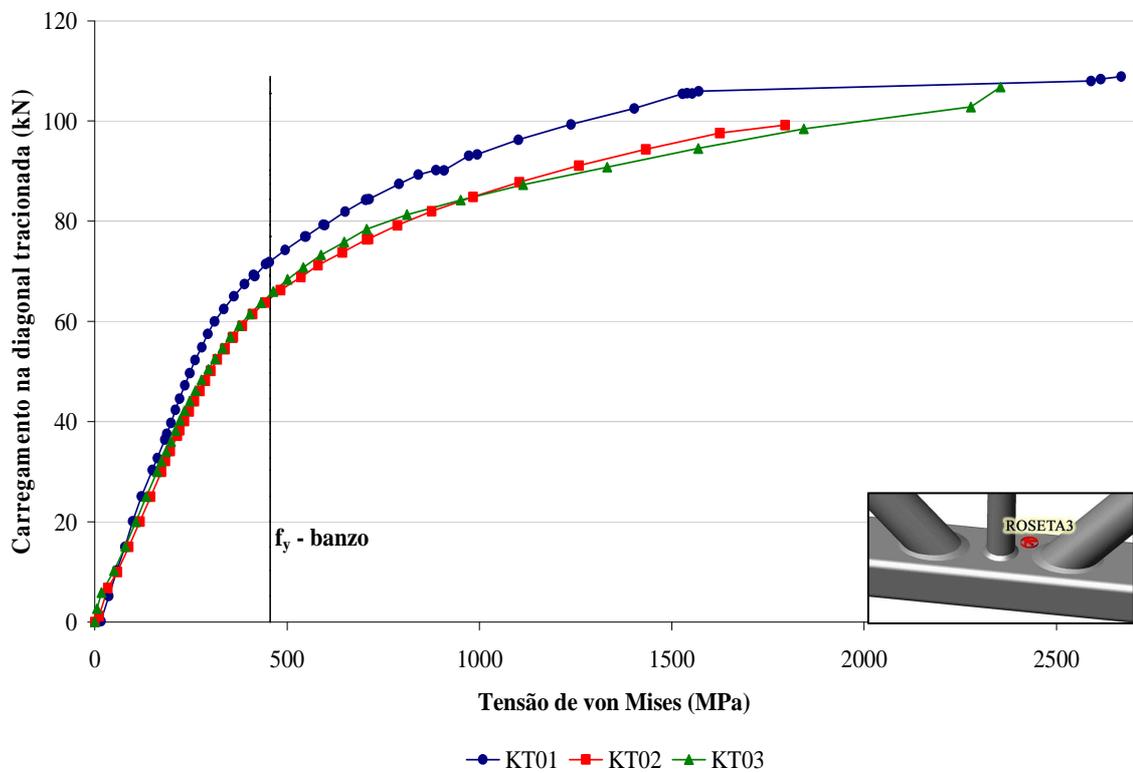


Figura 4.4 – Gráfico Carregamento x Tensão de von Mises para a ligação “KT” – Roseta 3.

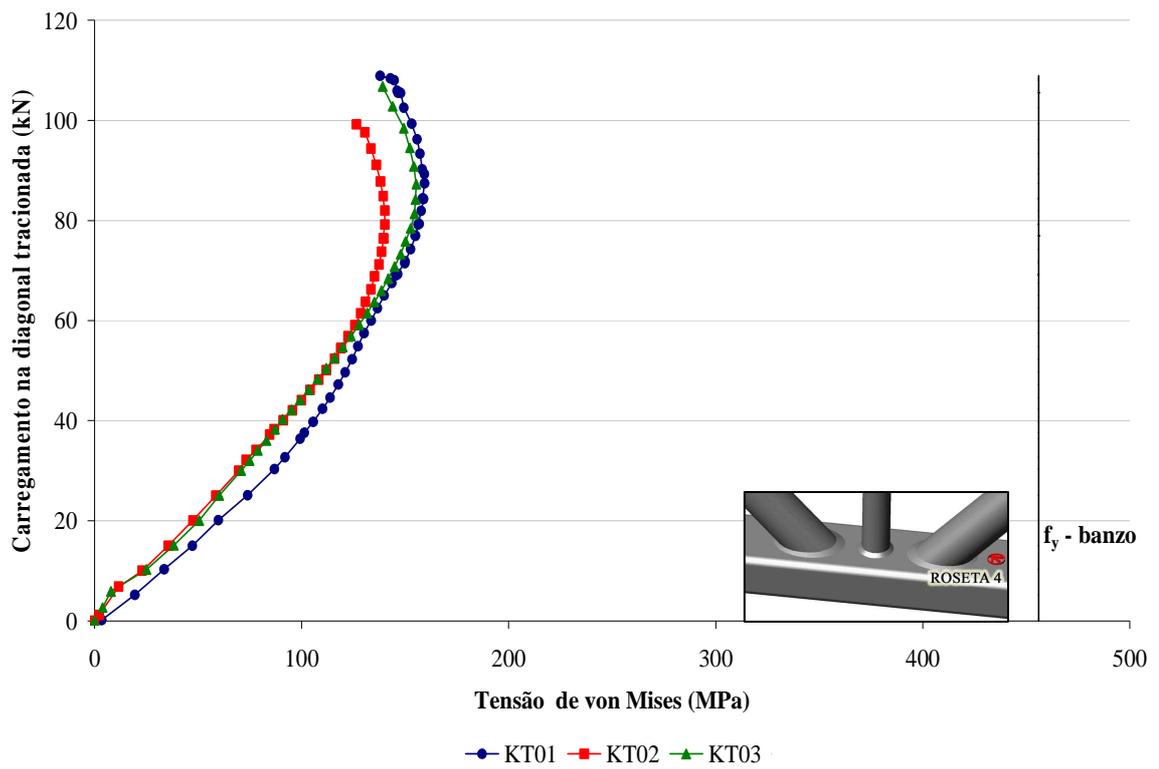


Figura 4.5 – Gráfico Carregamento x Tensão de von Mises para a ligação “KT” – Roseta 4.

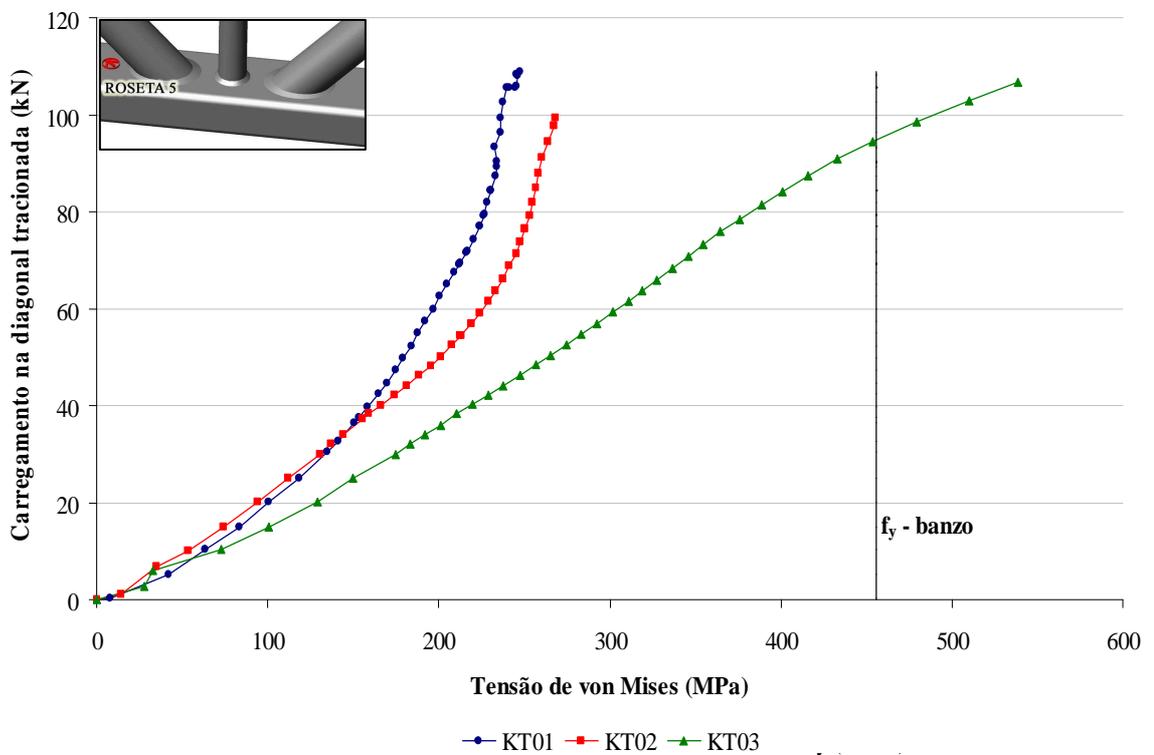


Figura 4.6 – Gráfico Carregamento x Tensão de von Mises para a ligação “KT” – Roseta 5.

Observa-se, comparando os gráficos das tensões apresentados, que as tensões máximas ocorrem nas rosetas 2 e 3, caracterizando o mecanismo de colapso (plastificação da face do banzo) aproximadamente simultaneamente nas duas rosetas. Observa-se também que o ensaio KT01 apresentou divergência nos valores das tensões nas rosetas 2 e 3 em relação aos demais ensaios, tendo uma melhor correlação com os outros dois ensaios para as demais rosetas.

Na Figura 4.7 tem-se o gráfico das tensões normais obtidas por meio das deformações medidas pelo extensômetro linear colado na diagonal tracionada. Neste gráfico pode-se observar a ótima correlação entre os três ensaios e que o aço da diagonal tracionada não atingiu o escoamento, uma vez que toda a deformação ocorrida nesta peça no decorrer do ensaio voltou a zero após o descarregamento dos protótipos, configurando a fase elástica do material.

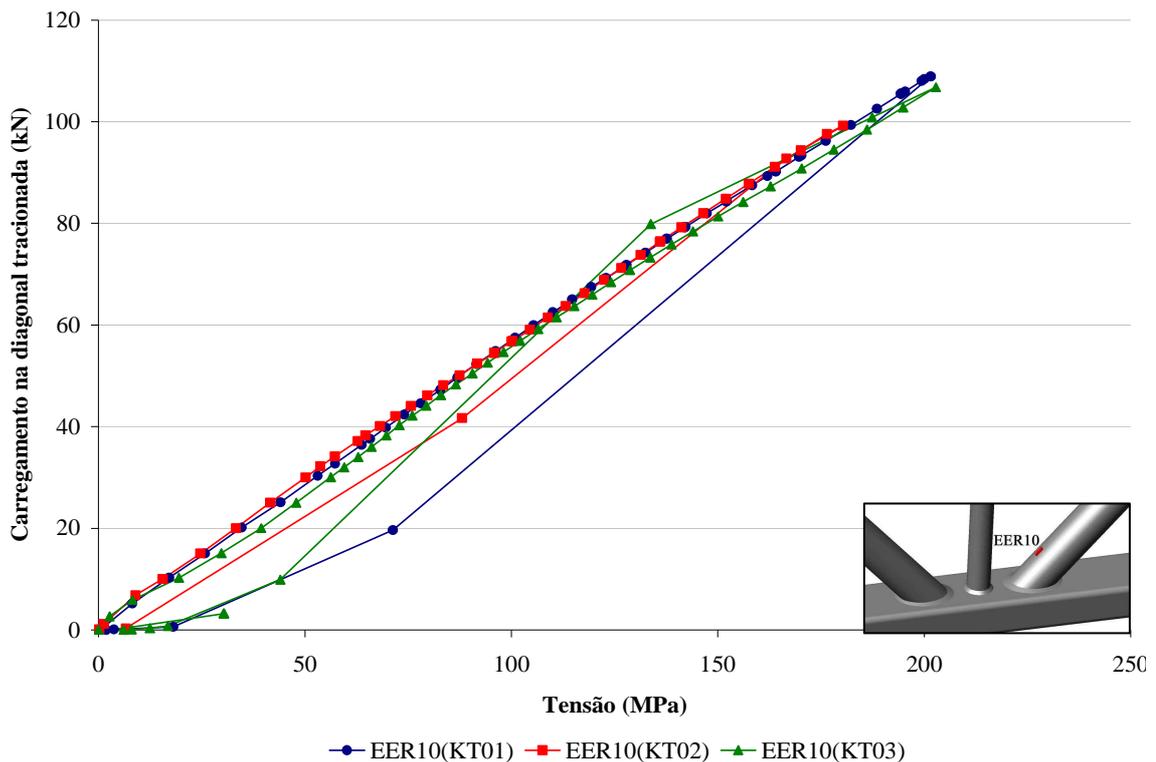


Figura 4.7 – Gráfico Carregamento X Tensão na diagonal tracionada para a ligação “KT”.

Na Figura 4.8 tem-se o gráfico da tensão normal na face inferior do banzo, calculada por meio das deformações medidas com os extensômetros lineares colados nos protótipos KT02 e KT03, com o intuito de avaliar a magnitude das tensões a que esta

parte do banzo foi submetida. Observa-se que a tensão na face inferior do banzo anterior à posição da diagonal comprimida, onde estão colados os extensômetros identificados como EER 17, está submetida a uma tensão normal de tração; e a parte posterior à diagonal tracionada, onde estão colados os extensômetros identificados como EER 18, está submetida a uma tensão normal de compressão. Sendo as tensões de tração maiores em função do equilíbrio de forças no protótipo.

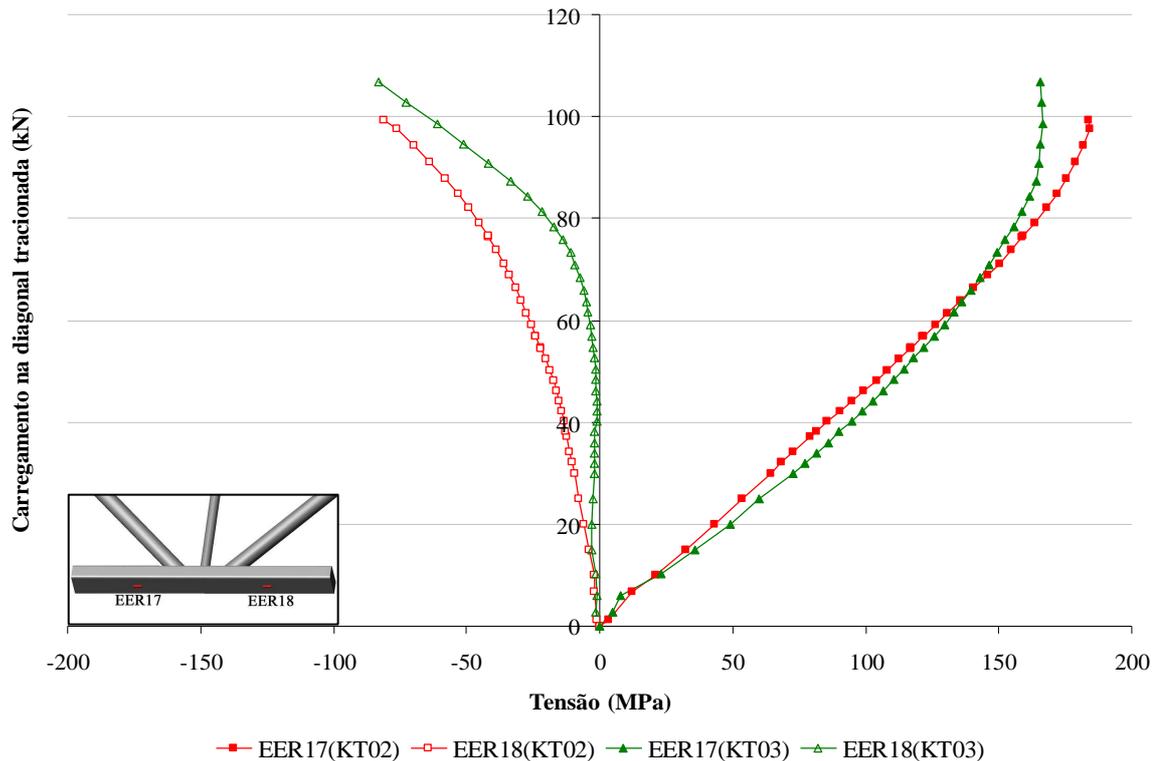


Figura 4.8 – Gráfico Carregamento x Tensão na face inferior do banzo.

O gráfico da Figura 4.9 apresenta o deslocamento por flexão ocorrido na seção média do banzo e o deslocamento longitudinal do montante para os três ensaios. Uma vez que o montante acompanha a deformação por flexão do banzo, a diferença entre estas duas leituras, para cada ensaio, representa o afundamento do montante na parede superior do banzo. Para o protótipo KT01 essa diferença no final do ensaio, ou seja, o afundamento total foi de 2,70 mm, para o KT02 de 2,41 mm e para o protótipo KT03 de 3,16 mm.

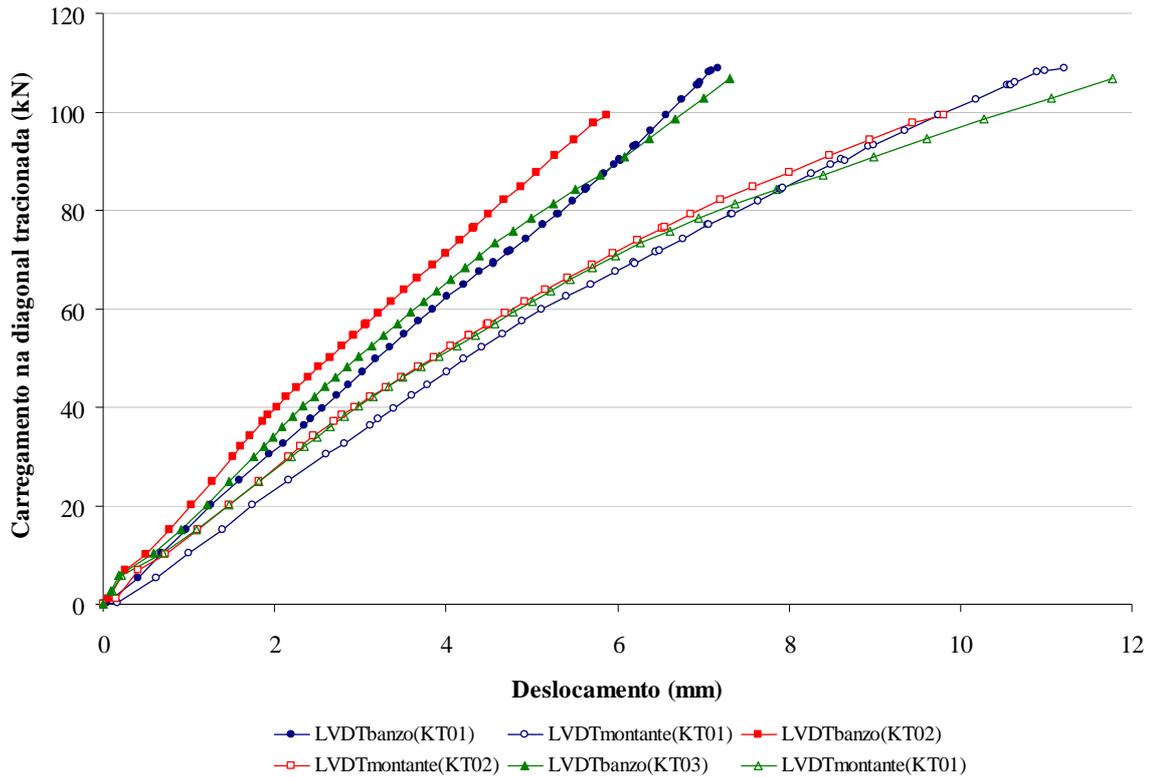


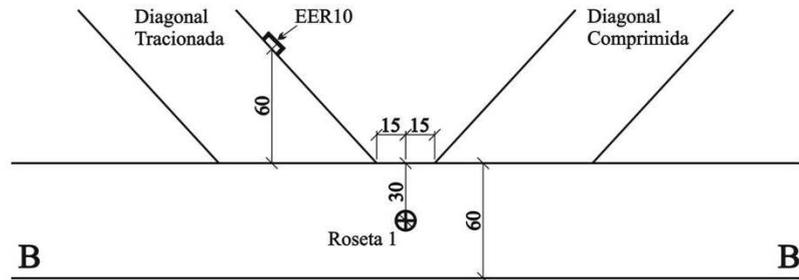
Figura 4.9 – Gráfico Carregamento x Deslocamento por flexão do banzo e longitudinal do montante para a ligação “KT”.

### 4.3. Ligação “K”

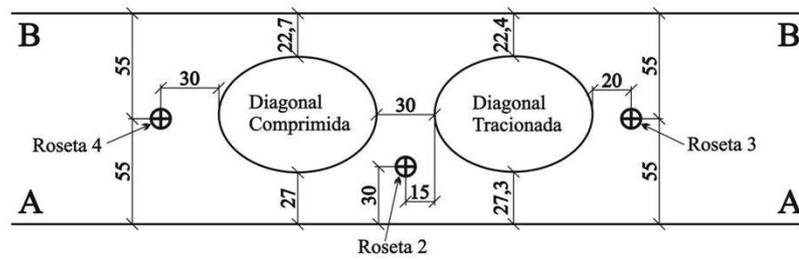
Para este tipo de ligação foram ensaiados dois dos três protótipos fabricados. Uma vez que um dos protótipos, o K03, apresentou grandes imperfeições quanto ao alinhamento da diagonal comprimida, o que impossibilitou sua utilização para ensaio. No entanto, o mesmo foi utilizado para testar o sistema de aplicação de carga de tração em uma das diagonais. Portanto, para a ligação “K” foram analisados os resultados obtidos através dos ensaios dos protótipos K01 e K02.

As medidas das imperfeições de fabricação dos protótipos e o posicionamento da instrumentação via extensômetros estão representados na Figura 4.10 (a) para o protótipo K01 e na Figura 4.10 (b) para o K02. Nestas figuras também tem-se a nomenclatura do extensômetro linear e das rosetas coladas nos protótipos da ligação do tipo “K”. Sendo a roseta 1 posicionada na face lateral do banzo; roseta 2 posicionada na face superior do banzo entre as diagonais; roseta 3 e roseta 4, coladas na face superior do banzo entre a diagonal tracionada e a extremidade do banzo e entre a diagonal

comprimida e a outra extremidade do banzo, respectivamente. O extensômetro EER10 foi colado na diagonal tracionada.



Vista Lateral



Vista Superior

(a) Protótipo K01



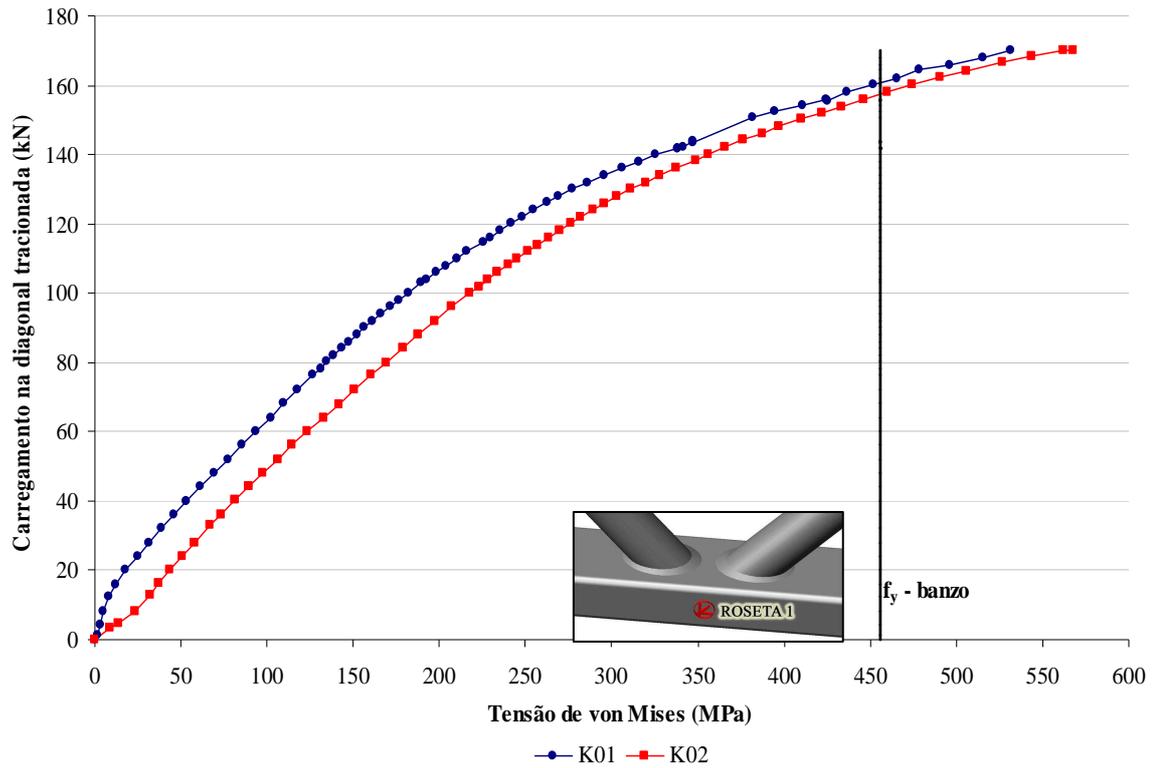


Figura 4.11 – Gráfico Carregamento x Tensão de von Mises para a ligação “K” – Roseta 1.

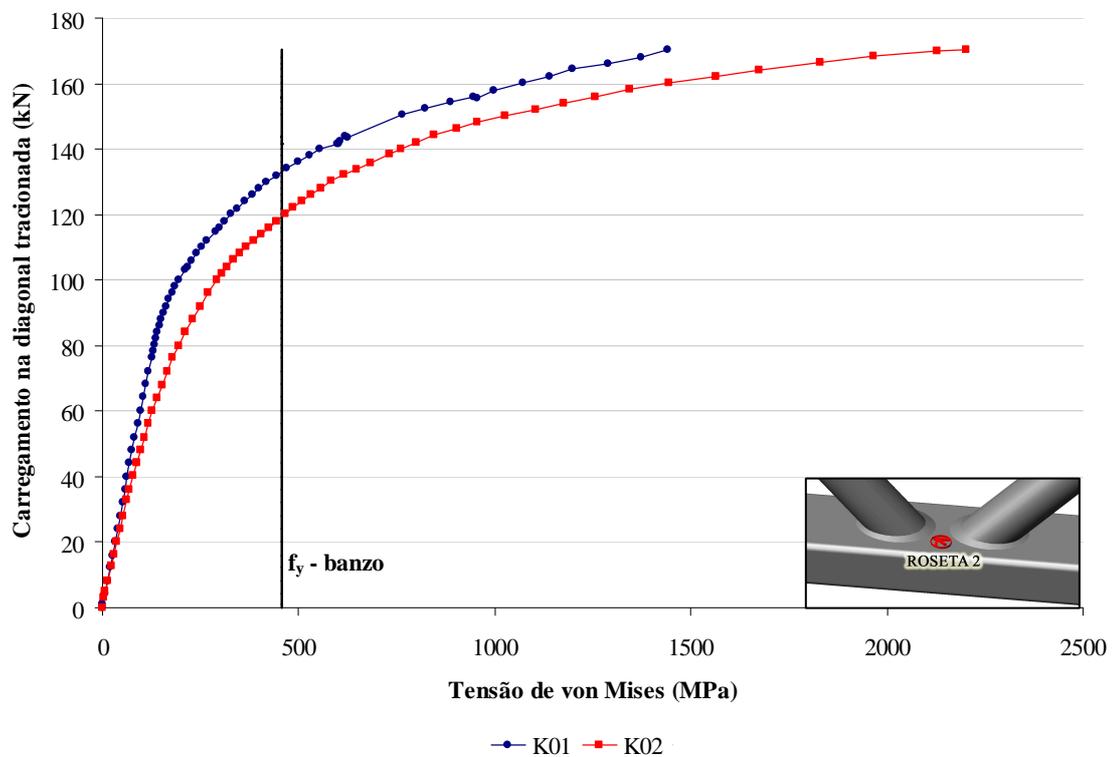


Figura 4.12 – Gráfico Carregamento x Tensão de von Mises para a ligação “K” – Roseta 2.

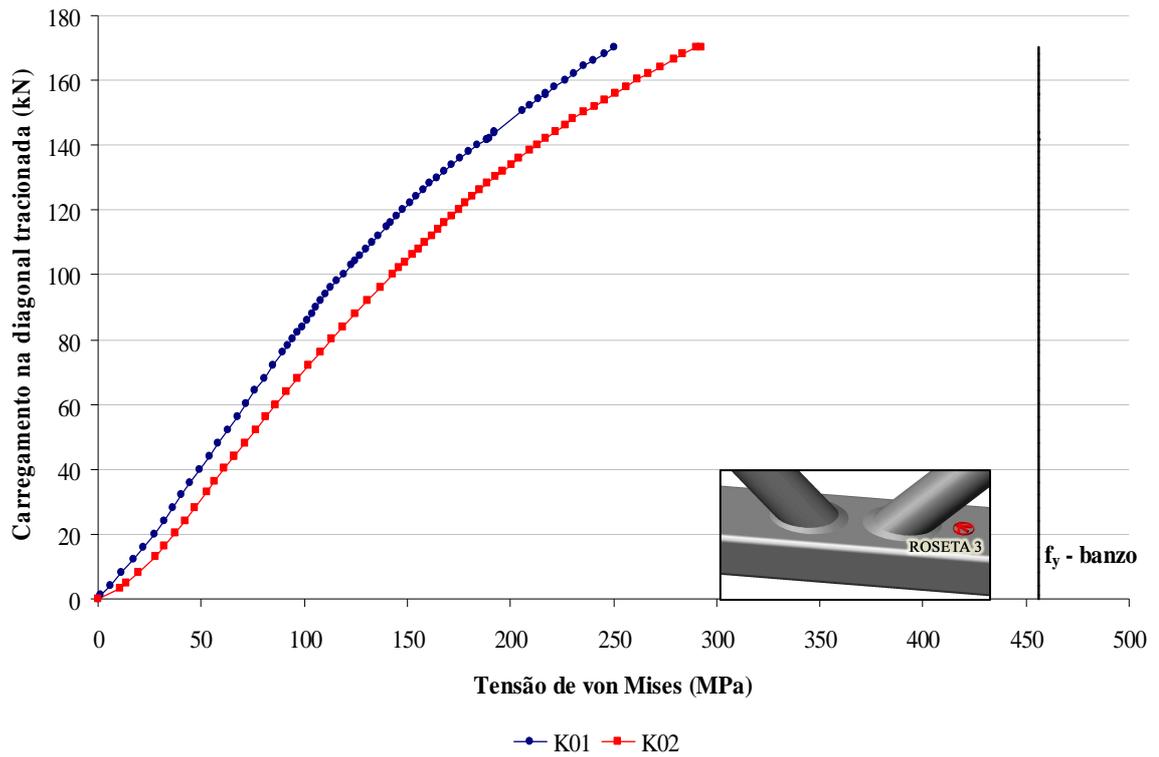


Figura 4.13 – Gráfico Carregamento x Tensão de von Mises para a ligação “K” – Roseta 3.

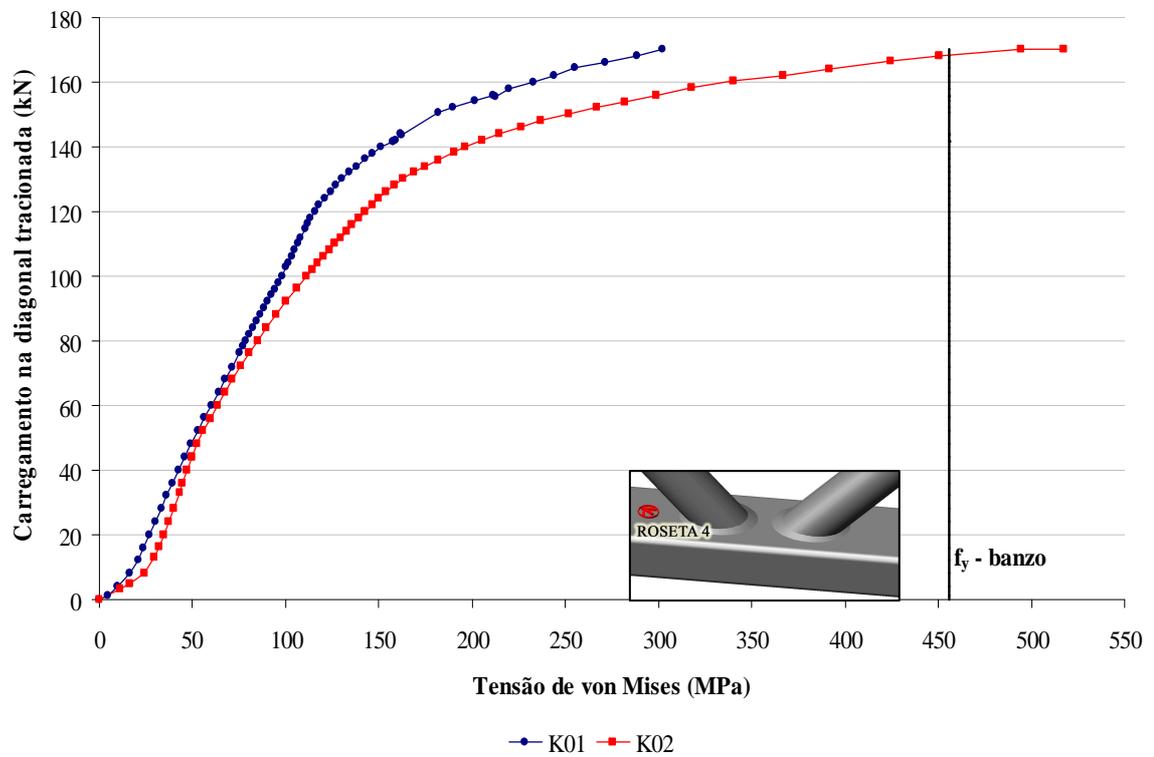


Figura 4.14 – Gráfico Carregamento x Tensão de von Mises para a ligação “K” – Roseta 4.

As tensões normais na diagonal tracionada apresentam uma ótima correlação entre os dois ensaios, como pode ser visto na Figura 4.15. Observa-se ainda que para a ligação “K” o aço da diagonal tracionada não atingiu o escoamento, uma vez que toda a deformação ocorrida voltou a zero após o descarregamento dos protótipos, configurando a fase elástica do material.

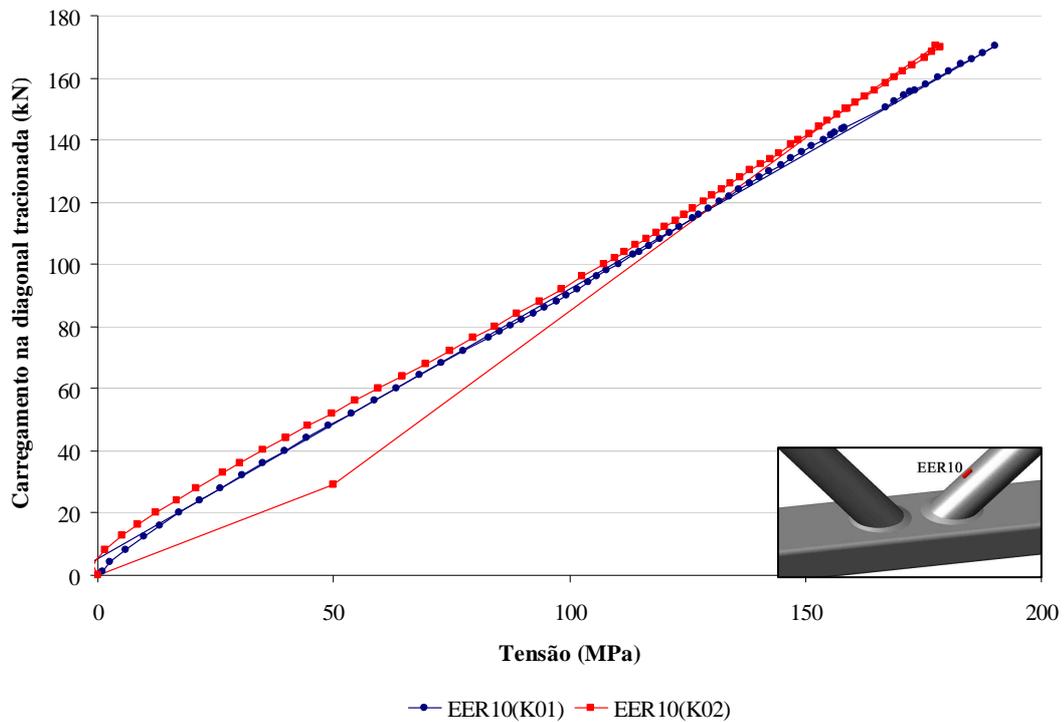
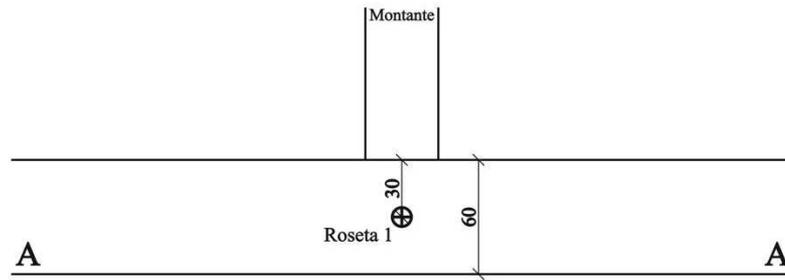


Figura 4.15 – Gráfico Carregamento X Tensão na diagonal tracionada para a ligação “K”.

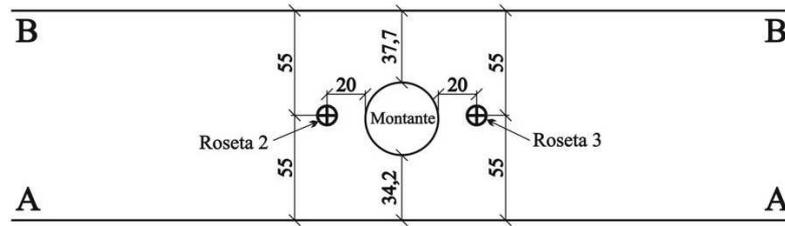
#### 4.4. Ligação “T”

Foram realizados três ensaios com os protótipos da ligação tipo “T”. Contudo, houve problemas de movimentação excessiva do sistema de fixação do banzo no decorrer do ensaio do protótipo T01, por isso os resultados do mesmo foram desconsiderados. Sendo analisados os dados obtidos por meio dos ensaios dos protótipos T02 e T03.

As medidas das imperfeições de fabricação dos protótipos e o posicionamento da instrumentação via extensômetros estão representados na Figura 4.16 (a) para o protótipo T02 e 4.16 (b) para o T03. Nestas figuras tem-se também a nomenclatura para identificação das rosetas coladas nos protótipos da ligação do tipo “T”. Sendo, roseta 1 posicionada na face lateral do banzo; roseta 2 e roseta 3 posicionadas na face superior do banzo, uma de cada lado do montante.

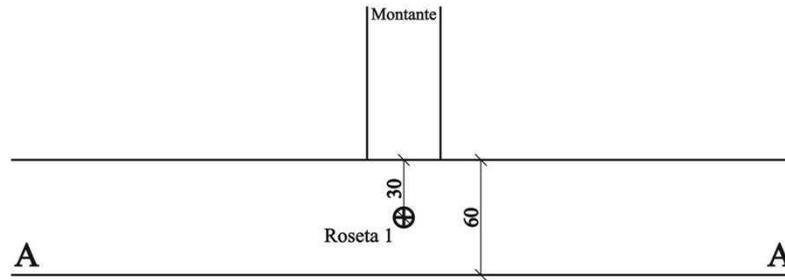


Vista Lateral

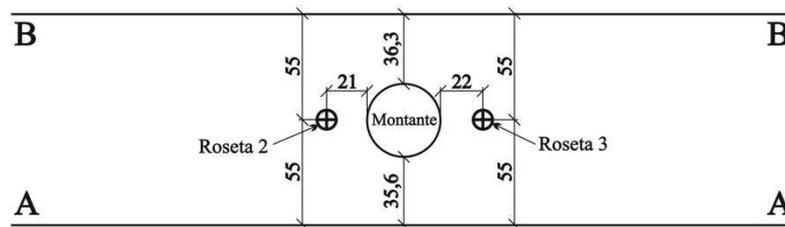


Vista Superior

(a) Protótipo T02



Vista Lateral



Vista Superior

(b) Protótipo T03

Figura 4.16 - Imperfeições geométricas dos protótipos da ligação tipo "T".

Para os protótipos da ligação “T” o escoamento do material ocorreu para uma carga de compressão no montante de 40,60 kN e 41,50 kN para os ensaios T02 e T03, respectivamente. O ensaio do protótipo T02 foi finalizado com um carregamento de 80,20 kN após ocorrer um problema nas conexões do sistema de aplicação do carregamento, tendo ocorrido na fase plástica do material. Já o ensaio T03 foi finalizado com uma carga de 60,10 kN.

Nas Figuras 4.17 à 4.19 temos as tensões de von Mises calculadas através das deformações medidas nos pontos de localização das rosetas coladas nos protótipos da ligação do tipo “T”, as quais apresentaram uma boa correlação para ambos os ensaios. Para os dois ensaios o modo de colapso preponderante foi a plastificação da face do banzo assim como determinado teoricamente através das equações do Eurocode 3 (2005) para este tipo de ligação.

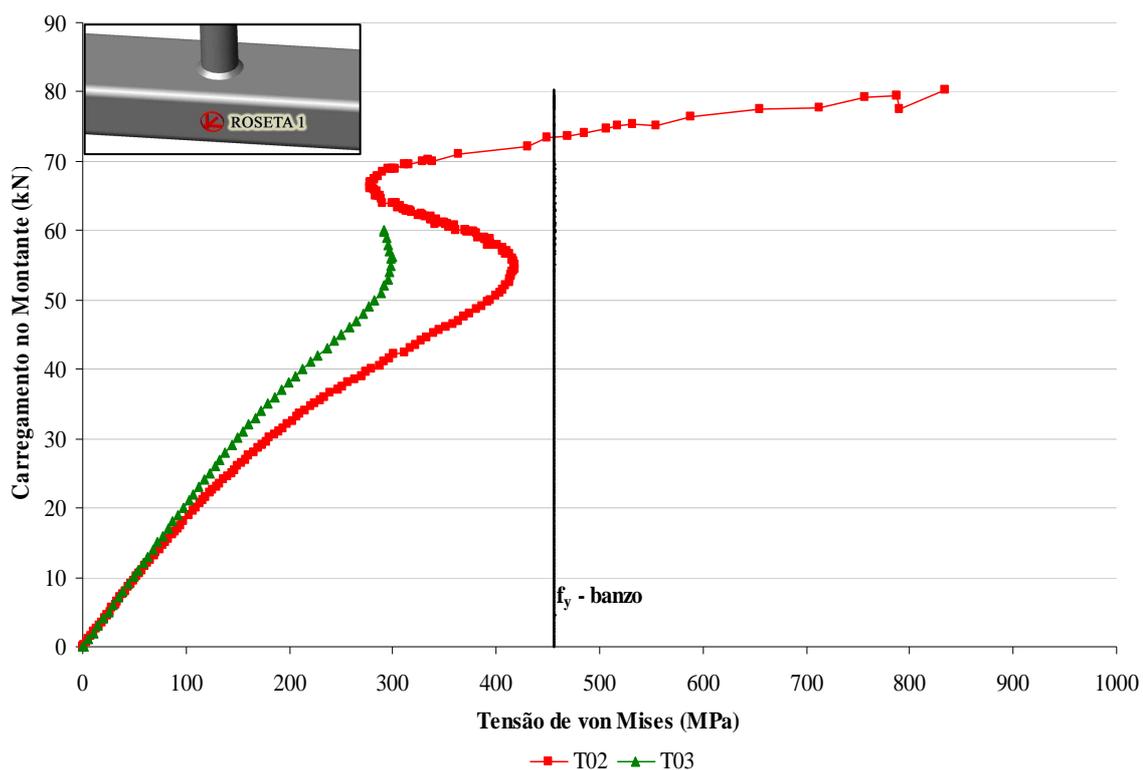


Figura 4.17 – Gráfico Carregamento x Tensão de von Mises para a ligação “T” – Roseta 1.

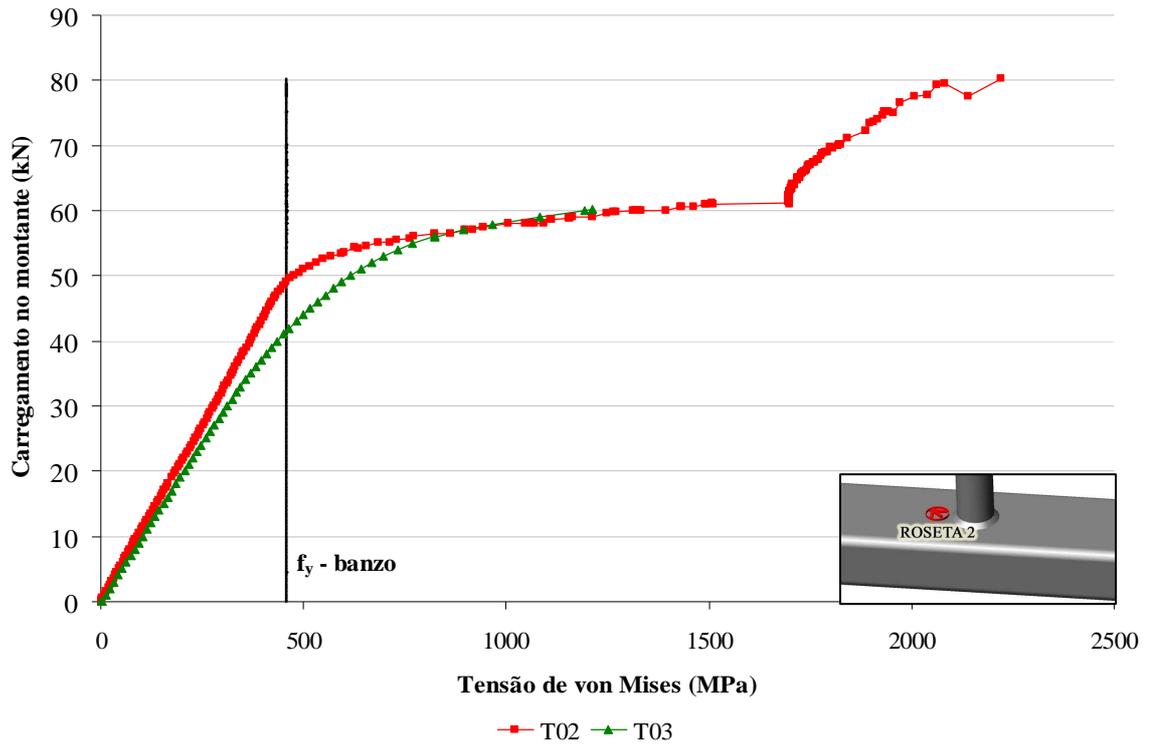


Figura 4.18 – Gráfico Carregamento x Tensão de von Mises para a ligação “T” – Roseta 2.

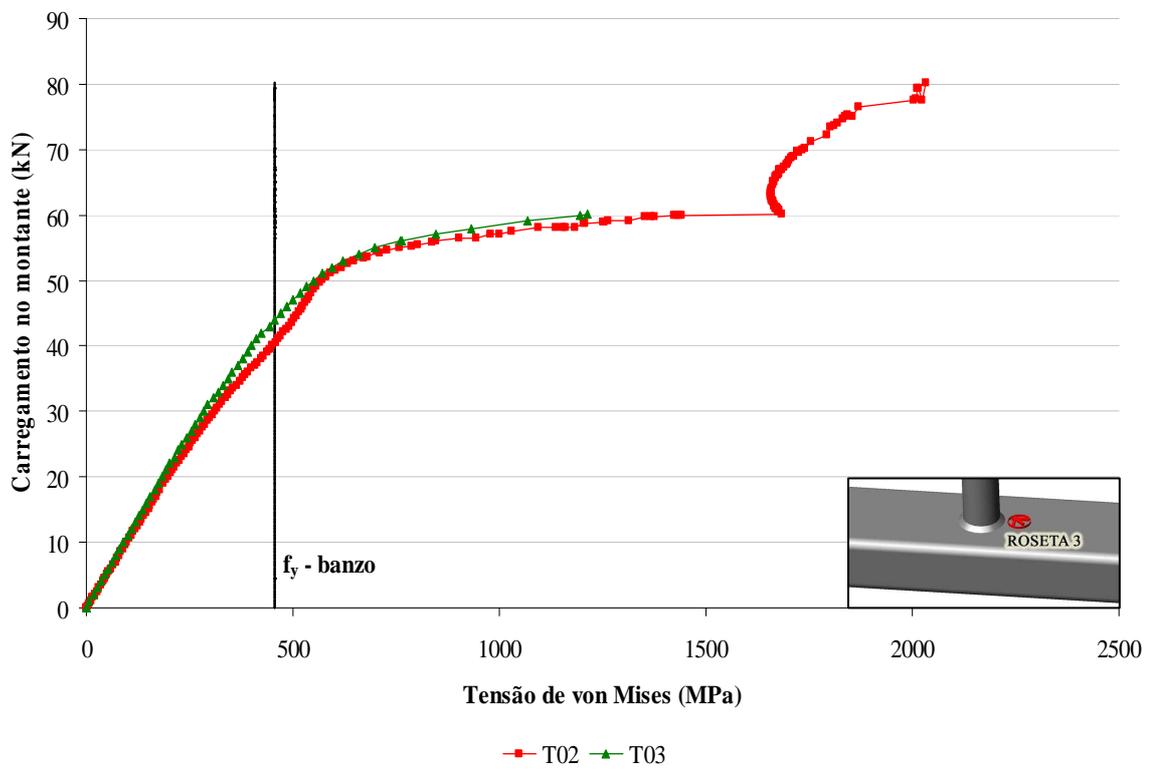


Figura 4.19 – Gráfico Carregamento x Tensão de von Mises para a ligação “T” – Roseta 3.

O gráfico da Figura 4.20 apresenta o deslocamento por flexão ocorrido na seção média do banzo e o deslocamento longitudinal do montante para os dois ensaios da ligação do tipo “T”, sendo o deslocamento destas partes dos protótipos nos dois ensaios bastante similares. Contudo, o afundamento final do montante em relação ao banzo foi bem maior no protótipo T02, que apresentou um afundamento final de 13,60 mm, do que no protótipo T03, com um afundamento final de 3,94 mm. Este fato pode ser explicado uma vez que o carregamento último aplicado no ensaio T02 foi maior. Ambos os ensaios foram finalizados com o material já na fase plástica.

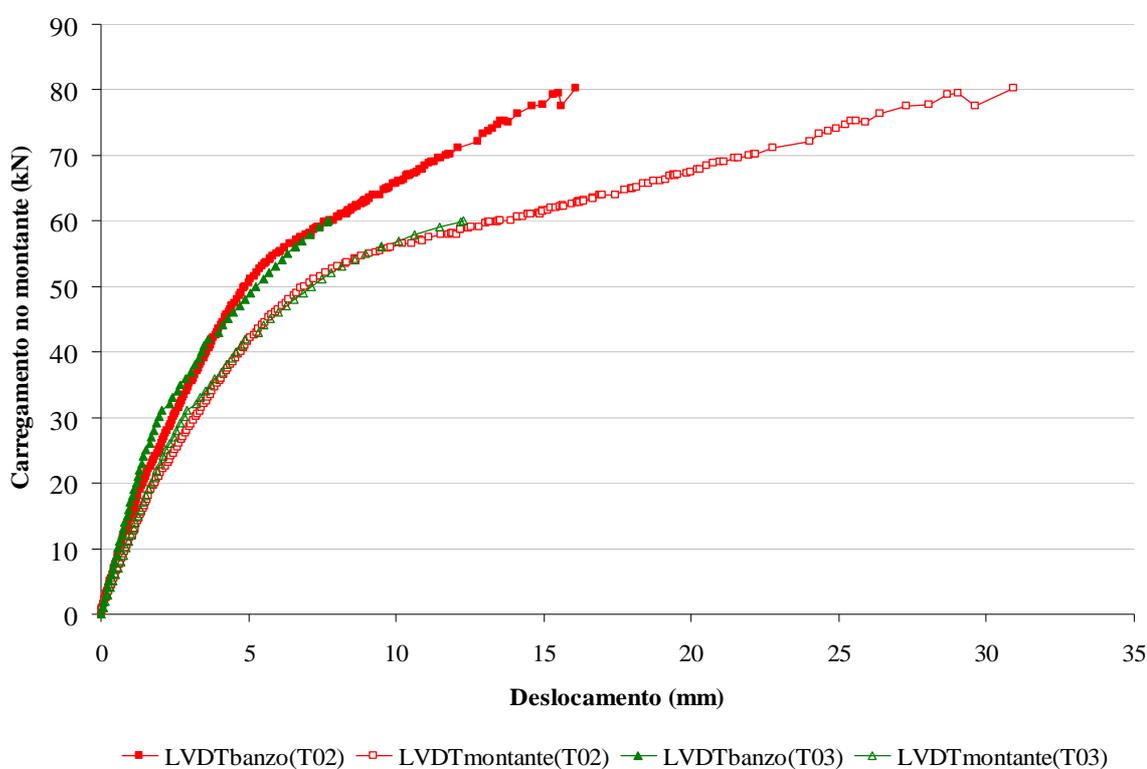


Figura 4.20 – Gráfico Carregamento x Deslocamento por flexão do banzo e longitudinal do montante para a ligação “T”.

Na Figura 4.21 pode-se observar o afundamento do montante na face superior do banzo para o protótipo T02.



Figura 4.21 – Afundamento do montante na face superior do banzo no protótipo T02.

#### 4.5. Análise dos resultados

Nos ensaios dos três tipos de ligação, “KT”, “K” e “T”, observou-se que o modo de falha é o mesmo, plastificação da face do banzo, modo A da Figura 2.4. O modo de falha para cada um dos protótipos ensaiados, a carga de escoamento do material ( $P_y$ ) e a carga última ( $P_{ult.}$ ) dos ensaios experimentais estão resumidos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1- Cargas aplicadas e modos de colapso dos ensaios experimentais.

Tipo de ligação	Protótipo	Elemento	Cargas Exp. (kN)		Modo de colapso
			$P_y$	$P_{ult.}$	
KT	KT 01	Diag. Tencionada	45,00	108,90	A
		Diag. Comprimida	-42,50	-89,05	A
		Montante	-31,20	-66,00	A
	KT02	Diag. Tencionada	60,00	97,60	A
		Diag. Comprimida	-59,00	-85,90	A
		Montante	-43,60	-63,60	A
	KT03	Diag. Tencionada	60,00	106,80	A
		Diag. Comprimida	-58,90	-90,00	A
		Montante	-43,60	-66,90	A
K	K01	Diag. Tencionada	136,00	170,00	A
		Diag. Comprimida	-136,00	-170,00	A
	K02	Diag. Tencionada	121,30	170,00	A
		Diag. Comprimida	-121,30	-170,00	A
T	T02	Montante	-40,60	-80,26	A
	T03	Montante	-41,50	-60,10	A

Nas ligações que possuem montante, “KT” e “T” a plastificação ocorreu em função do funcionamento deste no banzo. Ou seja, a resistência da ligação está associada diretamente a carga de compressão do montante, visto a simetria do carregamento nas diagonais. Observa-se na Tabela 4.1 que para a carga de escoamento e carga máxima, para os dois tipos de ligação, tem-se valores próximos das cargas no montante. Conforme pode ser verificado também na Figura 4.22, que mostra o gráfico Carregamento no montante versus Tensão de von Mises nas rosetas que indicaram o colapso por plastificação da face do banzo, sendo roseta 2 para o protótipo KT02 e roseta 3 para o protótipo T02.

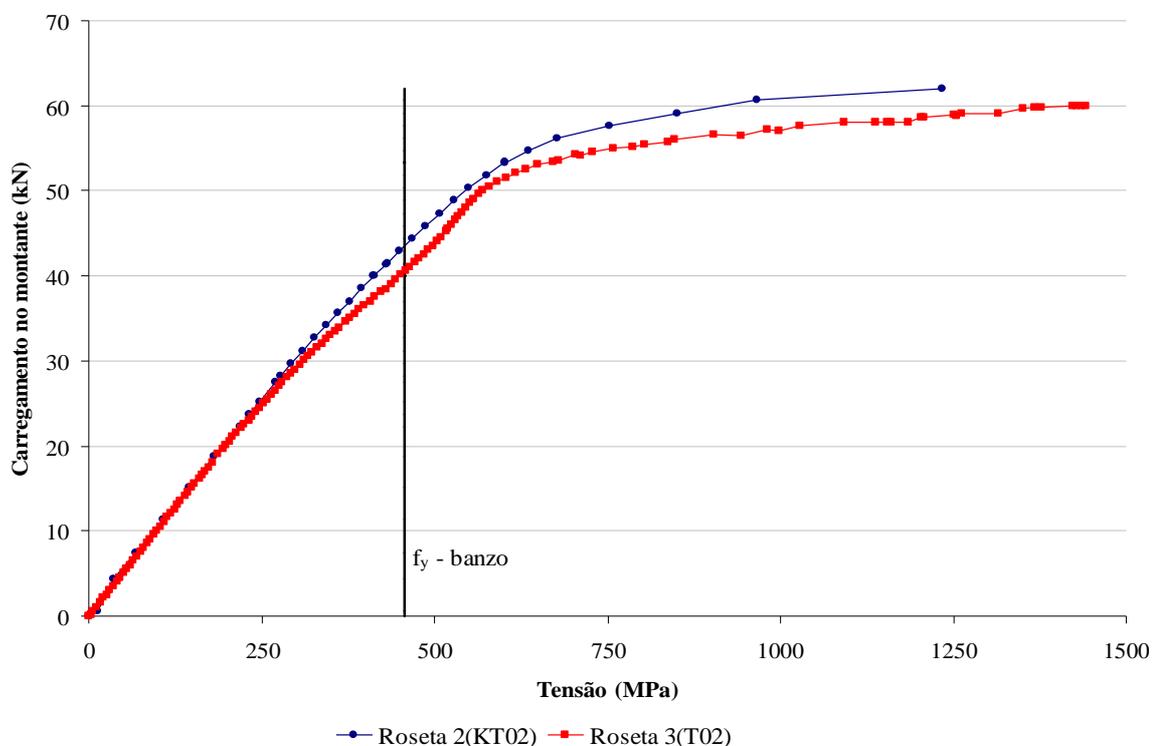


Figura 4.22 – Gráfico Carregamento no montante x Tensão de von Mises para os protótipos KT02 e T02.

Comparando os ensaios experimentais da ligação “K” com a “KT” e “T” observa-se o mesmo mecanismo, plastificação da face do banzo. No entanto, observa-se um aumento significativo de resistência da ligação “K” em relação às ligações “KT” e “T”. Como pode ser observado na Tabela 4.1.

## 5. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

### 5.1. Introdução

Neste capítulo são apresentadas as comparações dos resultados experimentais com a prescrição de norma, Eurocode 3, e com o modelo numérico em elementos finitos. As comparações com o Eurocode 3 foram com relação a carga última obtida experimentalmente e a resistência da ligação. As comparações com o modelo numérico foram relativas à distribuição de tensões e comportamento da ligação objetivando a validação do mesmo.

### 5.2. Comparação com as prescrições do Eurocode 3

A comparação dos resultados experimentais com as prescrições do Eurocode 3 são apresentados na Tabela 5.1. Os resultados teóricos foram obtidos a partir da automação do dimensionamento através do programa Mathcad. A tabela apresenta o modo de falha para cada um dos protótipos ensaiados e os determinados teoricamente, a carga de escoamento do material ( $P_y$ ) e a carga última ( $P_{ult.}$ ) dos ensaios experimentais e a carga de projeto segundo o Eurocode 3.

Para determinação das cargas de colapso segundo o Eurocode 3 foi utilizado o mesmo esquema das ligações ensaiadas, levando-se em conta a excentricidade das ligações do tipo “KT” e “K” que geram momento fletor, conforme esquema apresentado na Figura 5.1.

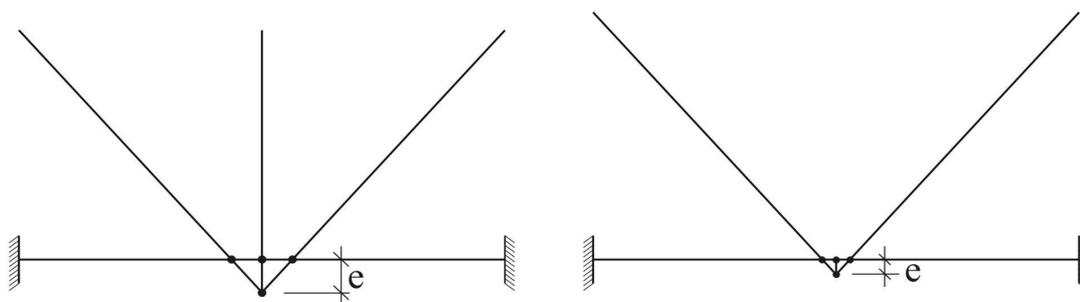


Figura 5.1 - Esquema para cálculo das cargas teóricas de colapso para as ligações do tipo “KT” e “K”.

Tabela 5.1- Limites teóricos e cargas aplicadas nos ensaios experimentais.

Tipo de ligação	Protótipo	Elemento	Cargas Experimentais (kN)		Carga de projeto Eurocode 3 $N_{i,Rd}$ (kN)	Modo de colapso	
			$P_y$	$P_{ult.}$		Exp.	Eurocode
KT	KT 01	Diag. Tractionada	45,00	108,90	111,46	A	A
		Diag. Comprimida	-42,50	-89,05	-111,46	A	A
		Montante	-31,20	-66,00	-82,47	A	A
	KT02	Diag. Tractionada	60,00	97,60	111,46	A	A
		Diag. Comprimida	-59,00	-85,90	-111,46	A	A
		Montante	-43,60	-63,60	-82,47	A	A
	KT03	Diag. Tractionada	60,00	106,80	111,46	A	A
		Diag. Comprimida	-58,90	-90,00	-111,46	A	A
		Montante	-43,60	-66,90	-82,47	A	A
K	K01	Diag. Tractionada	136,00	170,00	161,00	A	E
		Diag. Comprimida	-136,00	-170,00	-161,00	A	E
	K02	Diag. Tractionada	121,30	170,00	161,00	A	E
		Diag. Comprimida	-121,30	-170,00	-161,00	A	E
T	T02	Montante	-40,60	-80,26	-49,57	A	A
	T03	Montante	-41,50	-60,10	-49,57	A	A

Inicialmente, com relação as cargas experimentais e a de projeto, observa-se que a ligação “T” possui boa correlação entre os resultados experimentais de  $P_y$  e os obtidos pelo Eurocode, o mesmo não ocorre com as ligações “K” e “KT”. Nestas ligações a carga de projeto é maior que a carga última,  $P_{ult.}$ . Esta dispersão está associada a excentricidade e sua relação com a altura  $h_0$  do perfil do banzo, o que é quantificado no dimensionamento através da redistribuição do momento nos membros que compõem a ligação. A proporção da excentricidade em relação à geometria do perfil é elevada com o ponto de trabalho (ponto de intercessão das linhas média dos elementos) saindo do banzo, com uma excentricidade de 31,3 mm para a ligação “K” e 68,8 mm para a ligação “KT”. Destaca-se também que no caso da ligação “KT” o valor da carga no montante é elevado, em função da alta resistência do mesmo quando da avaliação da carga a ser utilizada nos ensaios, para este nível de carga no montante (75% da carga das diagonais) a formulação não apresenta bons resultados. No entanto é uma situação possível em treliças, por exemplo, com cargas concentradas oriundas de estruturas em planos diferentes ao da treliça. Assim acredita-se que quanto maior a proporção do valor

da carga no montante em relação as diagonais, maior a dispersão nos resultados experimentais com a prescrição do Eurocode.

Com relação ao modo de colapso, tem-se o mesmo modo indicado pelo dimensionamento teórico por meio do Eurocode 3 para as ligações “KT” e “T”. Para a ligação “K” o cisalhamento do banzo, foi o preponderante segundo a prescrição. Isto está associado a menor resistência ao cortante do banzo (ver equação 2.23). Assim a formulação para a ligação “K” não apresenta boa correlação com o experimental para banzos na faixa de valor  $h_0$ , altura de 60 mm, utilizado neste trabalho.

### **5.3. Comparação com a análise numérica**

Nos itens seguintes será apresentada a análise numérica realizada, descrevendo-se a metodologia e os diversos passos seguidos para se chegar a modelos representativos das ligações reais.

Faz-se também uma análise comparativa entre os modelos numéricos e os resultados dos ensaios experimentais. As comparações foram realizadas para cada tipo de ligação confrontando os dados de tensões das rosetas coladas nos protótipos e as tensões obtidas nos modelos numéricos referente a cada um dos ensaios.

#### **5.3.1. Metodologia da análise numérica.**

Para a geração dos modelos computacionais utilizou-se o software ANSYS, versão 11.0, que é baseado no Método dos Elementos Finitos. Através dos ensaios dos protótipos foi feita a calibração dos modelos para que, de forma satisfatória, eles pudessem analisar o comportamento estrutural das ligações em estudo.

Para a modelagem foram aplicadas as mesmas diretrizes utilizadas por MENDANHA (2006). Dentre as principais podemos citar:

- Utilização do elemento de casca “Shell 181” (Figura 5.2) para a geração da malha de elementos finitos, o qual apresenta quatro nós com seis graus de liberdade por nó, translação nas direções x, y, z e rotações em x, y, z. O elemento foi escolhido em função do raio de curvatura da seção do banzo, refinamento da malha e menor custo computacional.

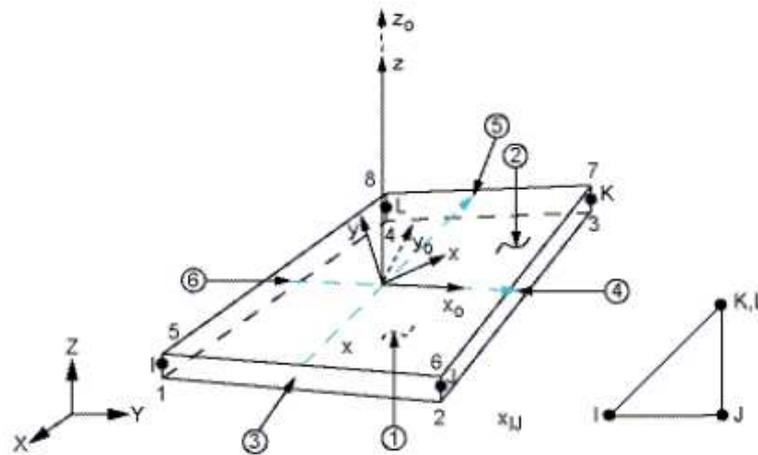


Figura 5.2 - Elemento de casca Shell 181 (Programa ANSYS).

- Consideração da curvatura no vértice dos perfis retangulares componentes do banzo proveniente da conformação mecânica do tubo, sendo adotado o raio de curvatura igual a duas vezes a espessura da parede do perfil, conforme avaliação feita na seção transversal do tubo retangular componente do banzo.
- Modelagem do cordão de solda, de forma a aproximar ao máximo possível o modelo do real, baseada no trabalho de Lee e Wilmschurst (1995). Neste trabalho os autores estudaram diversos caminhos de modelagem da solda utilizando elementos de casca em ligações duplo “K” com “gap” em perfis tubulares circulares. Três ligações com diferentes dimensões da solda foram modeladas, como apresenta a Figura 5.3. Um quarto tipo de modelagem da solda, consistindo de um elemento sólido prismático superposto à interseção do elemento de casca foi também analisado. Os resultados indicaram que o modelo com elemento sólido elevou o valor da carga última muito pouco em relação ao elemento de casca, não justificando seu uso além de apresentar problemas de compatibilidade. Comparando o modelo sem solda com os outros três modelos de diferentes tamanhos de solda, o modelo com o maior tamanho da “garganta da solda”, representado na Figura 5.3 pelo número um, apresentou os melhores resultados. Este modelo foi utilizado na simulação em elementos finitos para seis ligações duplo “K” fornecendo bons resultados.

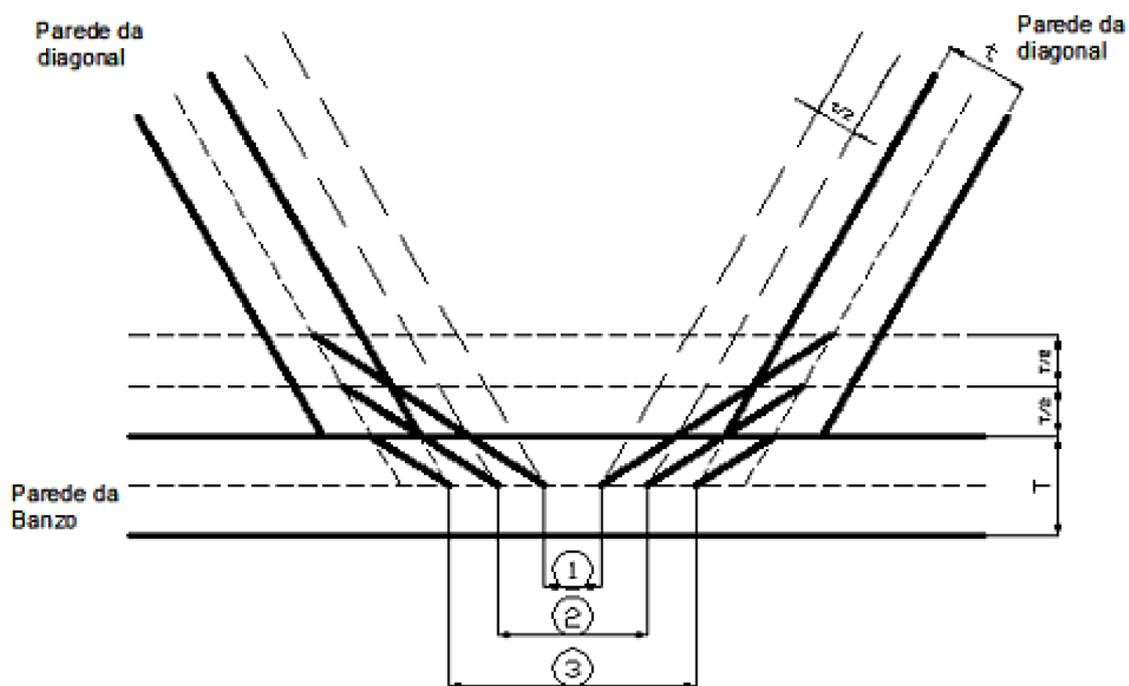


Figura 5.3 - Modelagem da solda (Lee e Wilmshurst , 1995).

Na Figura 5.4 temos um modelo numérico de uma ligação “KT” onde pode-se ver a modelagem do cordão de solda no encontro dos elementos, a curvatura nos vértices do perfil tubular retangular do banzo e a malha de elementos finitos gerada com o elemento de casca “Shell 181”.

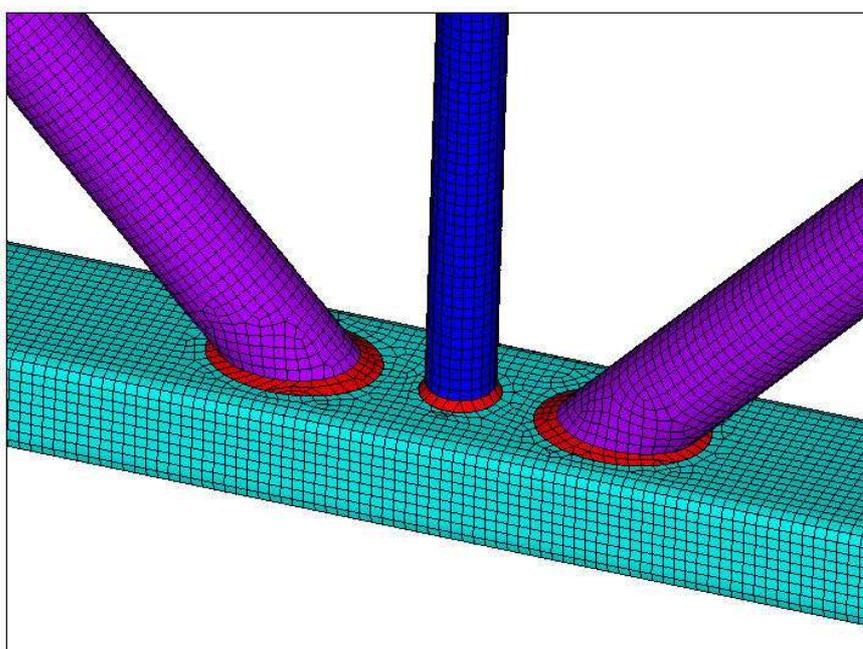


Figura 5.4 - Modelo numérico de uma ligação “KT”.

Fazendo uso das diretrizes citadas anteriormente foram gerados os modelos dos três tipos de ligações, sendo tais modelos identificados como NKT02 e NKT03 para a ligação “KT”; NK01 e NK02 pra a ligação “K” e NT02 e NT03 para a ligação “T”.

Para a geração de cada modelo primeiramente foi feita uma pré-modelagem em 3D das ligações no AutoCAD (2006). As peças componentes das ligações, banzo, diagonais e montante, foram desenhadas com as dimensões externas reduzidas de metade da espessura do perfil, devido a modelagem no Ansys tomar como base para espessura do elemento de casca a superfície média. As peças foram unidas em cada ligação levando-se em conta as imperfeições geométricas de fabricação dos protótipos conforme os itens 4.2, 4.3 e 4.4 do capítulo 4, formando um único sólido.

Para que fosse evidenciado os pontos de localização das rosetas coladas nos protótipos foi preciso a divisão do sólido, de forma que tivesse nós da malha de elementos finitos nos mesmos pontos de localização das rosetas. Para isso, o sólido foi dividido em várias partes, sendo o ponto de localização das rosetas evidenciado pela união dos vértices de cada parte, visando-se apenas a identificação das rosetas coladas na face superior do banzo, onde a variação de tensões é significativa mesmo para pontos próximos.

Na análise dos modelos foi utilizado material com relação tensão deformação não linear, inelástica, com diagrama bi-linear. O diagrama foi elaborado com base nos dados de ensaio em laboratório do aço. Para a modelagem foram utilizados os seguintes parâmetros de entrada:

- módulo de elasticidade do aço,  $E = 205000$  MPa;
- coeficiente de Poison,  $\nu = 0,3$ ;
- limite de escoamento do aço conforme Tabela 3.2;
- módulo tangente do período pós-elástico de 720 MPa para o banzo, 765MPa para o montante e 930 MPa para as diagonais.

Algumas condições de contorno foram inseridas no modelo para que fosse simulada a situação de ensaio. Uma dessas condições foi a restrição de todos os graus de liberdade

dos nós localizados na extremidade do banzo, uma vez que, segundo Mendanha (2006), a rigidez da placa soldada nas extremidades do banzo funcionam na modelagem numérica como engaste. Nas ligações do tipo “KT” e “T” teve-se ainda a restrição do deslocamento horizontal na extremidade do montante no ponto de aplicação da carga, devido ao uso da rótula universal no ensaio experimental para estes tipos de ligações.

A aplicação do carregamento no modelo numérico, assim como nos ensaios experimentais, foi gradual por meio de passos de carga, com o incremento de carregamento a cada passo controlado automaticamente pelo programa, em função de convergência pelo processo iterativo de Newton-Raphson.

### **5.3.2. Ligação “KT”**

Para a ligação “KT” serão apresentados os resultados dos modelos numéricos NKT02 e NKT03, comparados com os resultados experimentais obtidos para as rosetas coladas nas faces superior e lateral do banzo dos protótipos KT02 e KT03. O modelo numérico referente ao protótipo KT01 não foi criado, uma vez que os resultados experimentais apresentaram dispersão em relação aos outros dois protótipos ensaiados.

A modelagem do cordão de solda foi baseada no trabalho de Lee e Wilmshurst (1995) com a perna da solda perpendicular à face dos elementos constituintes da ligação igual a  $1,0t$ ; sendo  $t$  a espessura do montante ou da diagonal ou do banzo, representado na Figura 5.3 pelo número 2.

Na análise numérica foram restringidos todos os graus de liberdade dos nós na extremidade do banzo. E como nos ensaios dos protótipos foi utilizada a rótula universal no montante, a extremidade deste no modelo numérico teve o deslocamento horizontal restringido. Para as diagonais nenhum tipo de condição de contorno foi imposta, não tendo nenhum tipo de deslocamento restringido nas extremidades que recebem o carregamento.

Nos modelos numéricos foi aplicada uma carga de 60kN tanto na diagonal comprimida quanto na tracionada, e no montante uma carga com um valor de 75% do valor

aplicado às diagonais (45kN), sendo o carregamento aplicado nos nós da extremidade dos membros (diagonais/montante).

Nas Figuras 5.5 a 5.9 tem-se os gráficos carga x tensão comparativos entre os resultados experimentais dos protótipos KT02 e KT03 e numéricos para os modelos NKT02 e NKT03 no ponto de fixação da roseta 1, posicionada na face lateral do banzo e das rosetas 2, 3, 4 e 5, posicionadas na face superior do banzo

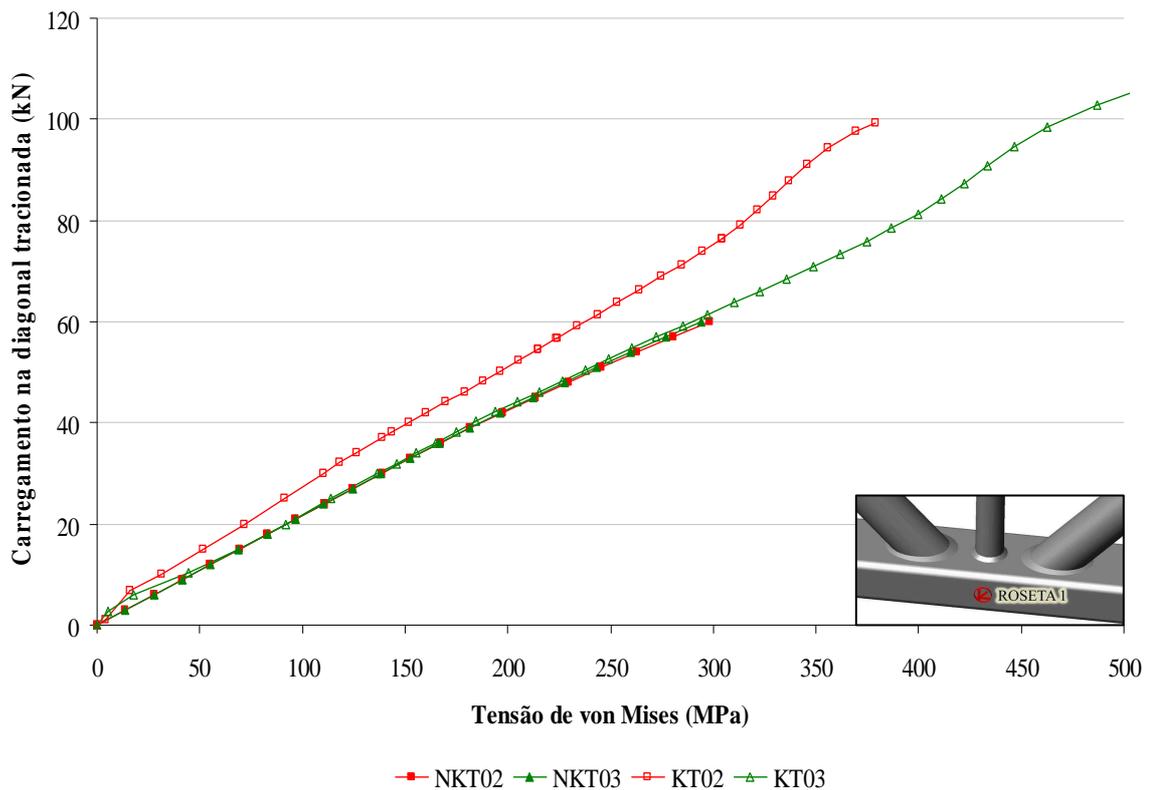


Figura 5.5 – Comparação entre os modelos numéricos e experimental para a ligação “KT” – Roseta 1.

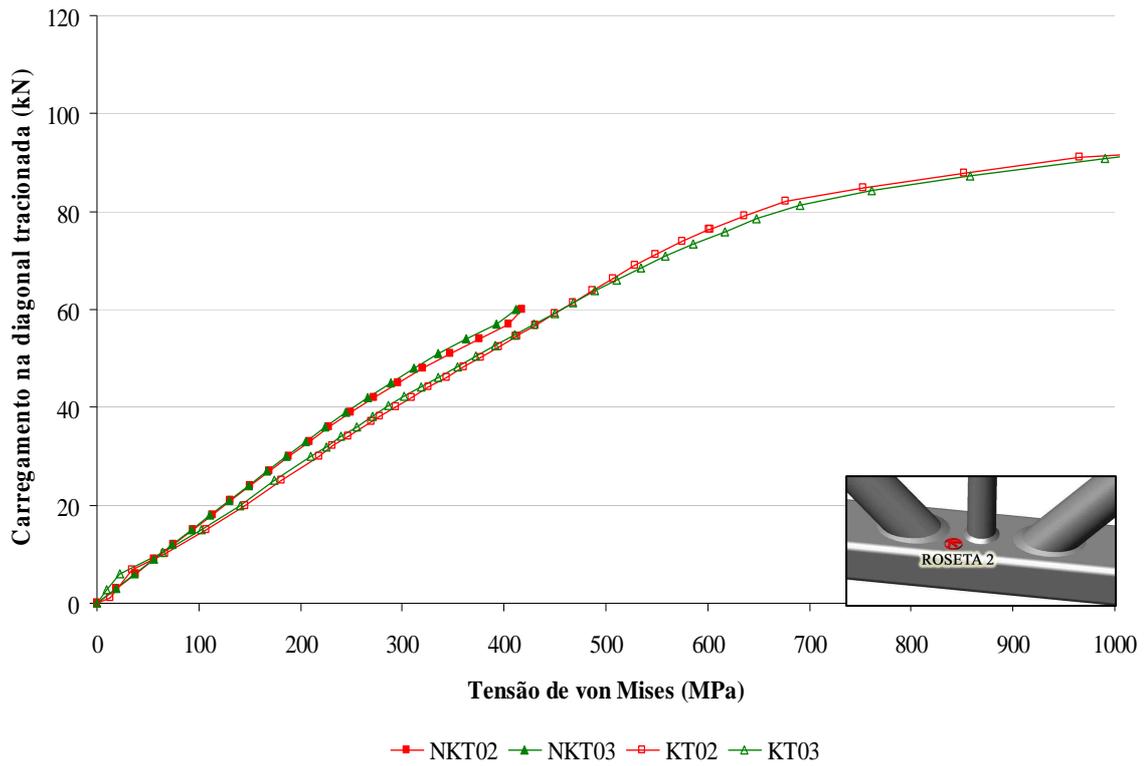


Figura 5.6 – Comparação entre os modelos numéricos e experimental para a ligação “KT” – Roseta 2.

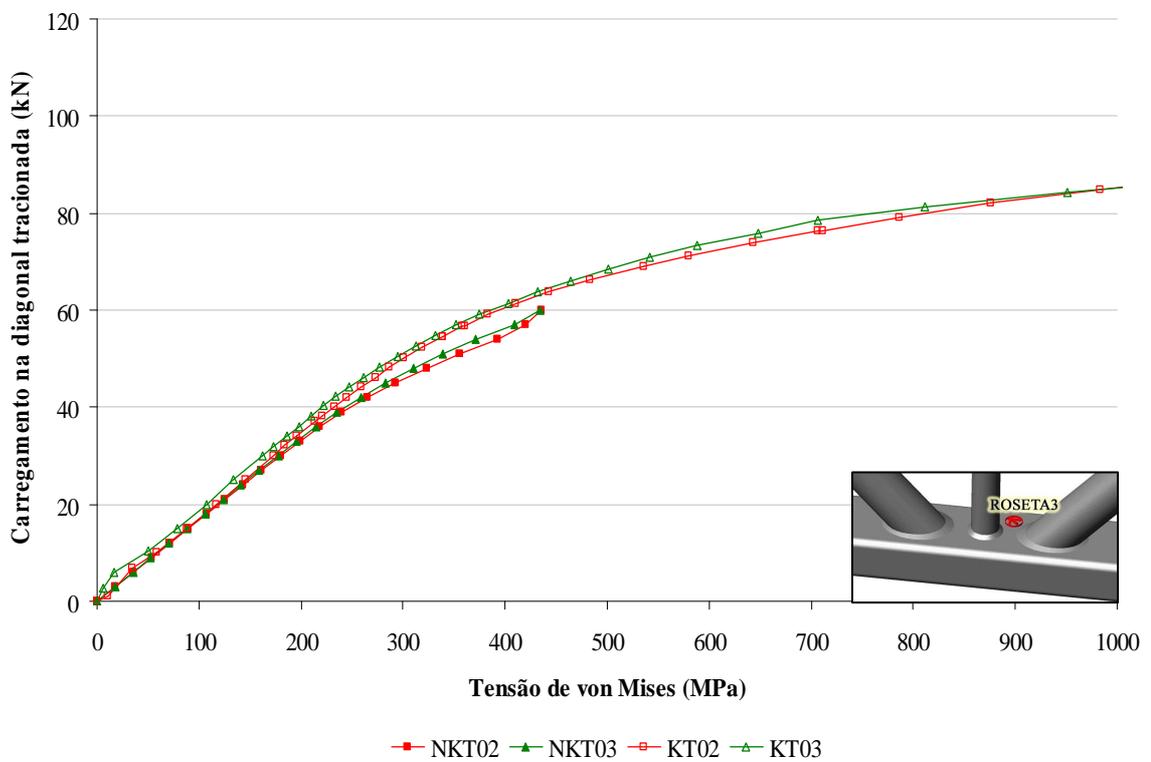


Figura 5.7 – Comparação entre os modelos numéricos e experimental para a ligação “KT” – Roseta 3.

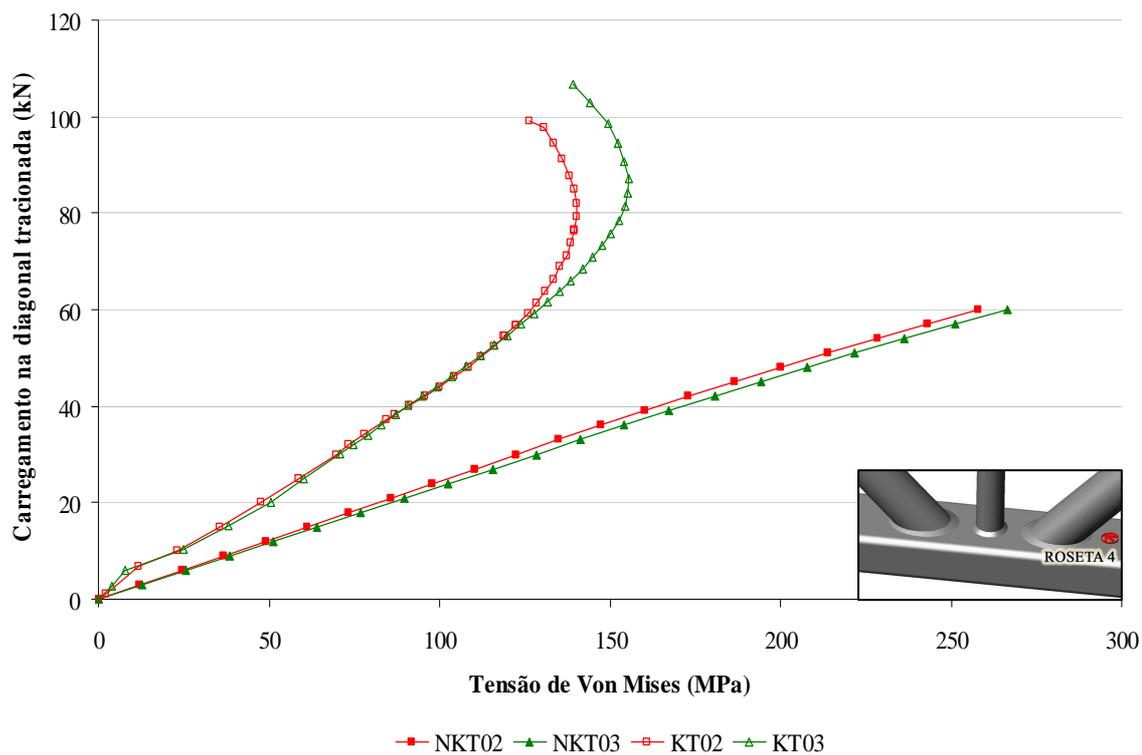


Figura 5.8 – Comparação entre os modelos numéricos e experimental para a ligação “KT” – Roseta 4.

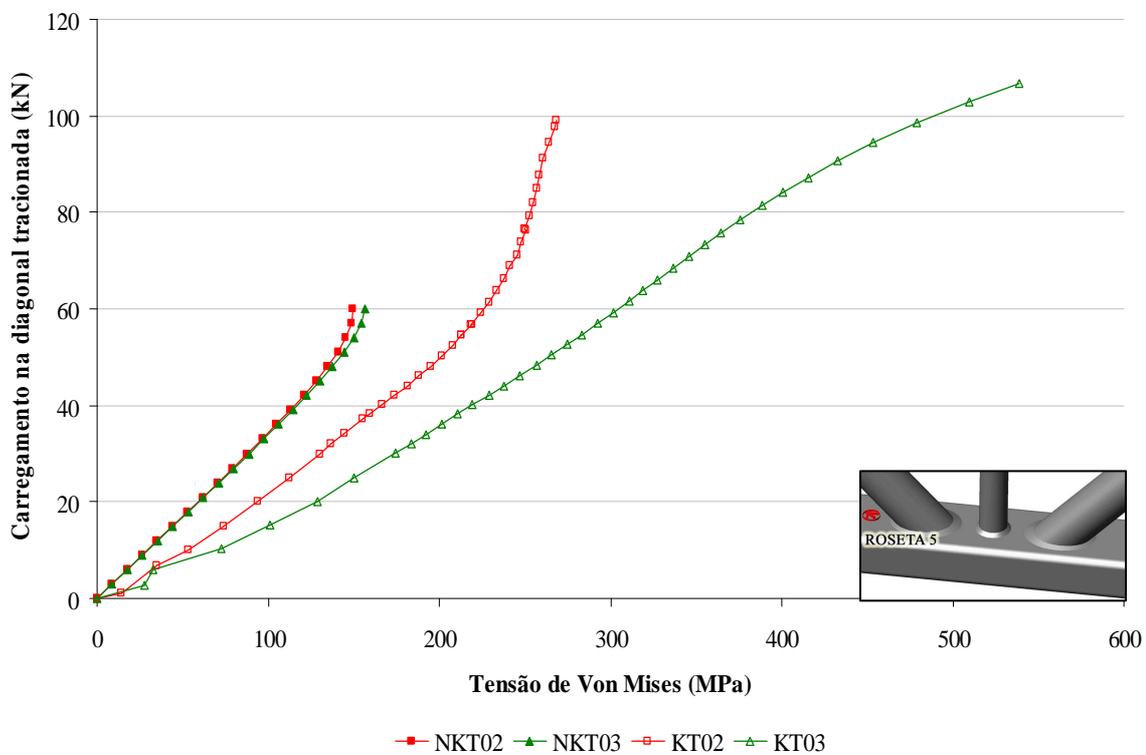


Figura 5.9 – Comparação entre os modelos numéricos e experimental para a ligação “KT” – Roseta 5.

Observa-se que os modelos numéricos apresentam uma boa correlação com os dados experimentais, principalmente nas rosetas 1, 2 e 3 com as curvas de tensão dos modelos numéricos bem próxima a do experimental até a plastificação do material . Na roseta 4 podemos perceber que o modelo numérico é menos rígido que o experimental acontecendo o inverso na roseta 5 para ambos os ensaios e modelos numéricos, havendo maior divergência entre os resultados para estas duas rosetas.

Na Figura 5.10 e 5.11 tem-se a configuração deformada e a distribuição de tensão de von Mises para os modelos NKT02 e NKT03, respectivamente.

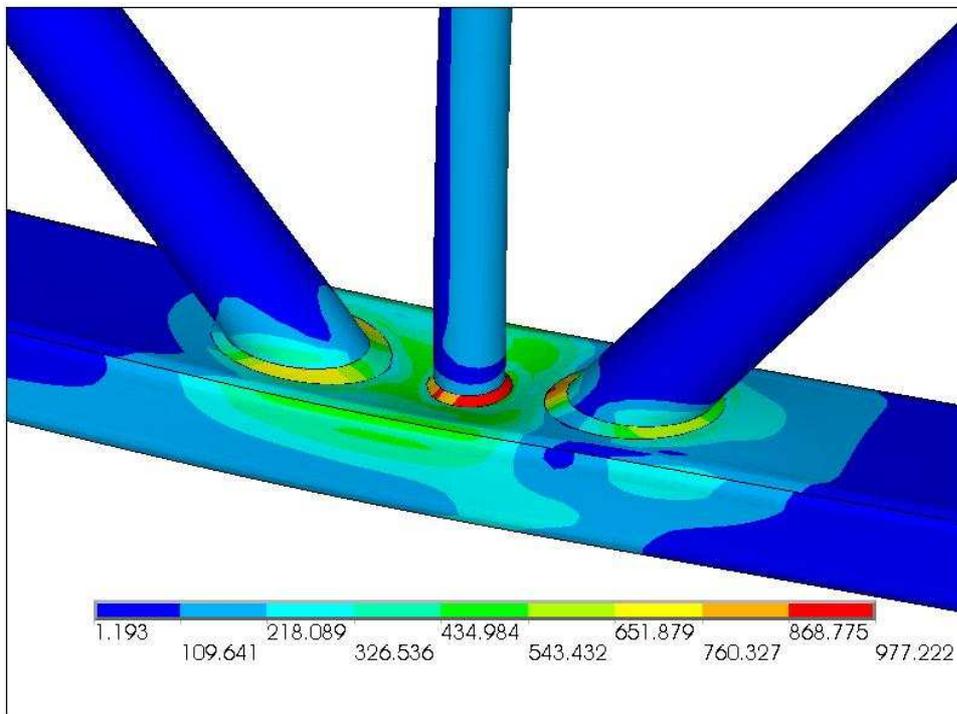


Figura 5.10 - Configuração deformada e distribuição da tensão de von Mises para o modelo NKT02.

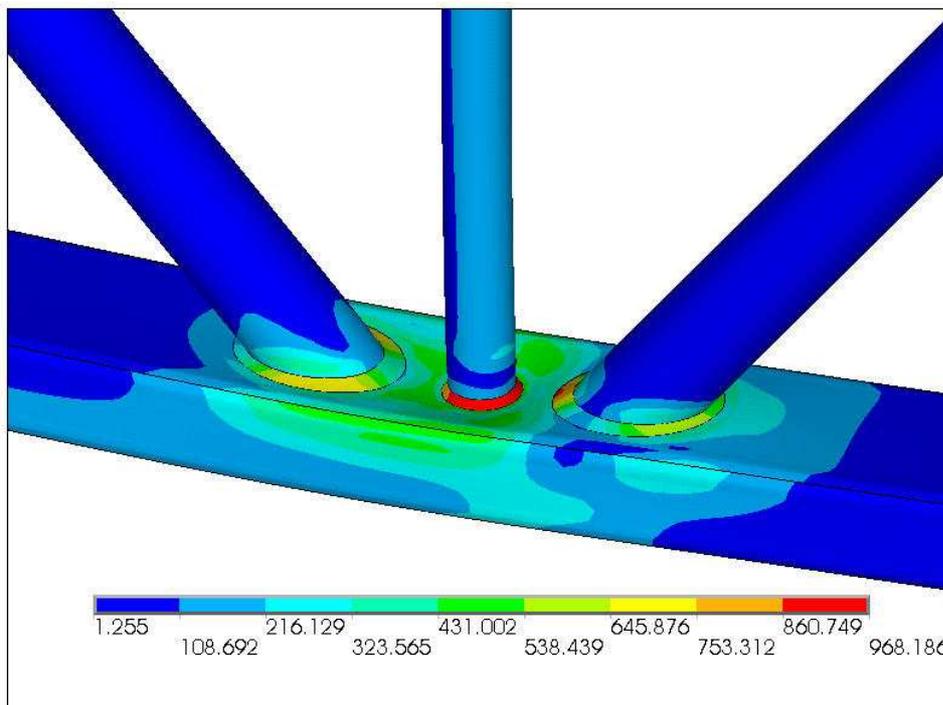


Figura 5.11 - Configuração deformada e distribuição da tensão de von Mises para o modelo NKT03.

### 5.3.3. Ligação “T”

Para a ligação “T” serão apresentados os resultados dos modelos numéricos NT02 e NT03, comparados com os resultados experimentais obtidos para a roseta 1 colada na face lateral do banzo e as rosetas 2 e 3 coladas na face superior do banzo dos protótipos T02 e T03.

Também para a ligação “T” a modelagem do cordão de solda foi baseada no trabalho de Lee e Wilmshurst (1995), só que para este caso a perna da solda perpendicular à face dos elementos constituintes da ligação foi tomada igual a  $1,5t$ ; sendo  $t$  a espessura do montante ou do banzo, representado na Figura 5.3 pelo número 1. Pois, na modelagem com este comprimento de solda obteve-se melhores resultados, apresentando uma distribuição de tensão mais próxima a obtida com os resultados experimentais.

Assim como nas demais ligações, na análise numérica foram restringidos todos os graus de liberdade dos nós da extremidade do banzo. Como nos protótipos foi utilizada a rótula universal no montante a extremidade desta peça que recebe o carregamento teve o deslocamento horizontal restringido na modelagem.

A carga de compressão aplicada nos modelos numéricos foi de 45 kN distribuída em cada nó componente da malha na extremidade do montante, sendo a aplicação dividida em passos de carga.

Nas Figuras 5.12 a 5.14 tem-se os gráficos carga x tensão comparativos entre os resultados experimentais dos protótipos T02 e T03 e numéricos para os modelos NT02 e NT03 no ponto de fixação das rosetas.

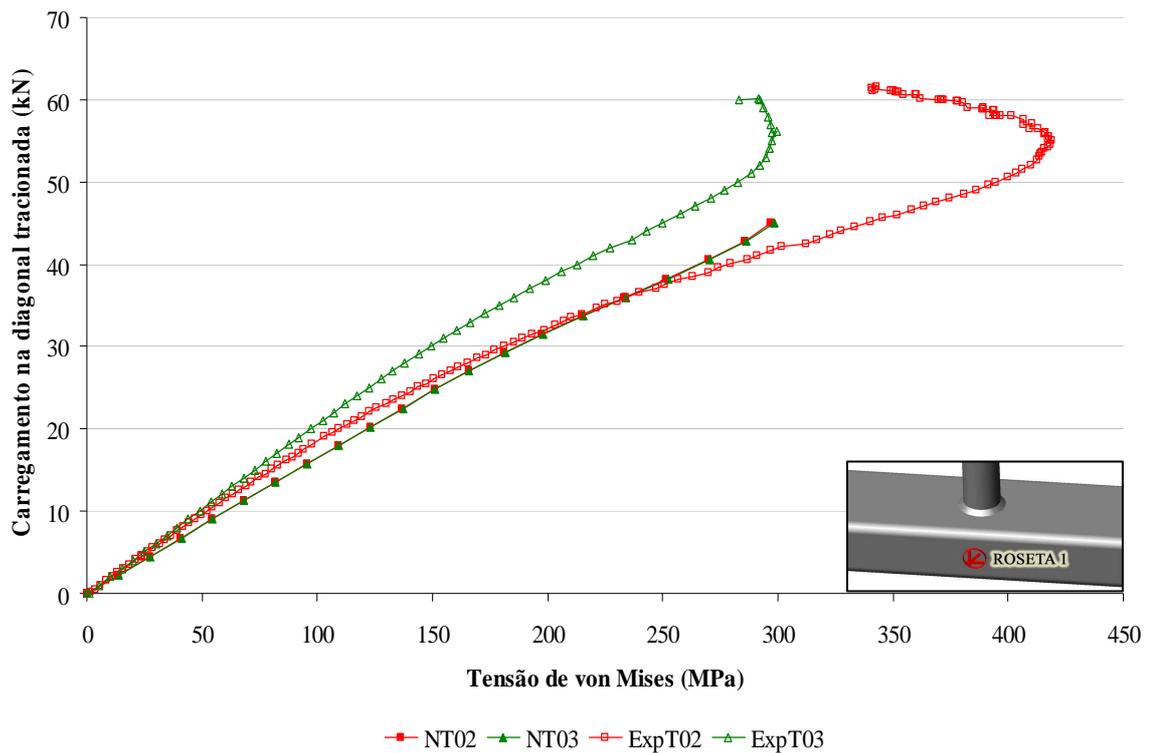


Figura 5.12 – Comparação entre os modelos numéricos e experimental para a ligação "T" – Roseta 1.

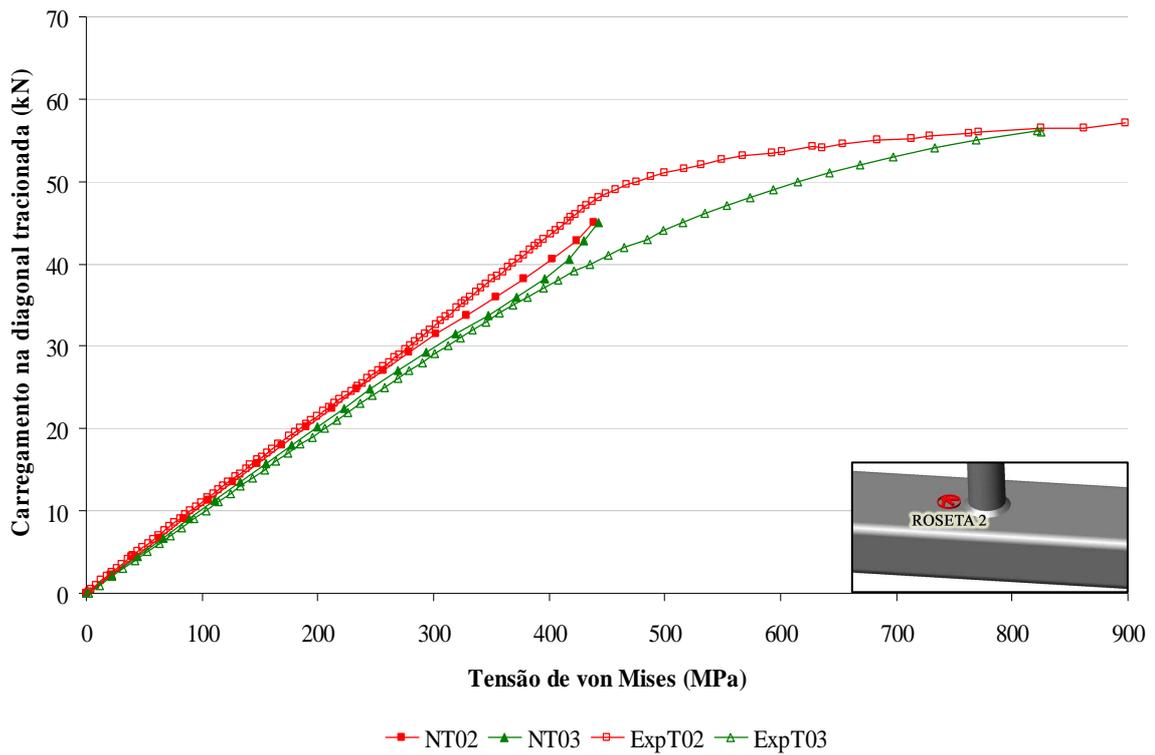


Figura 5.13 – Comparação entre os modelos numéricos e experimental para a ligação “T” – Roseta 2.

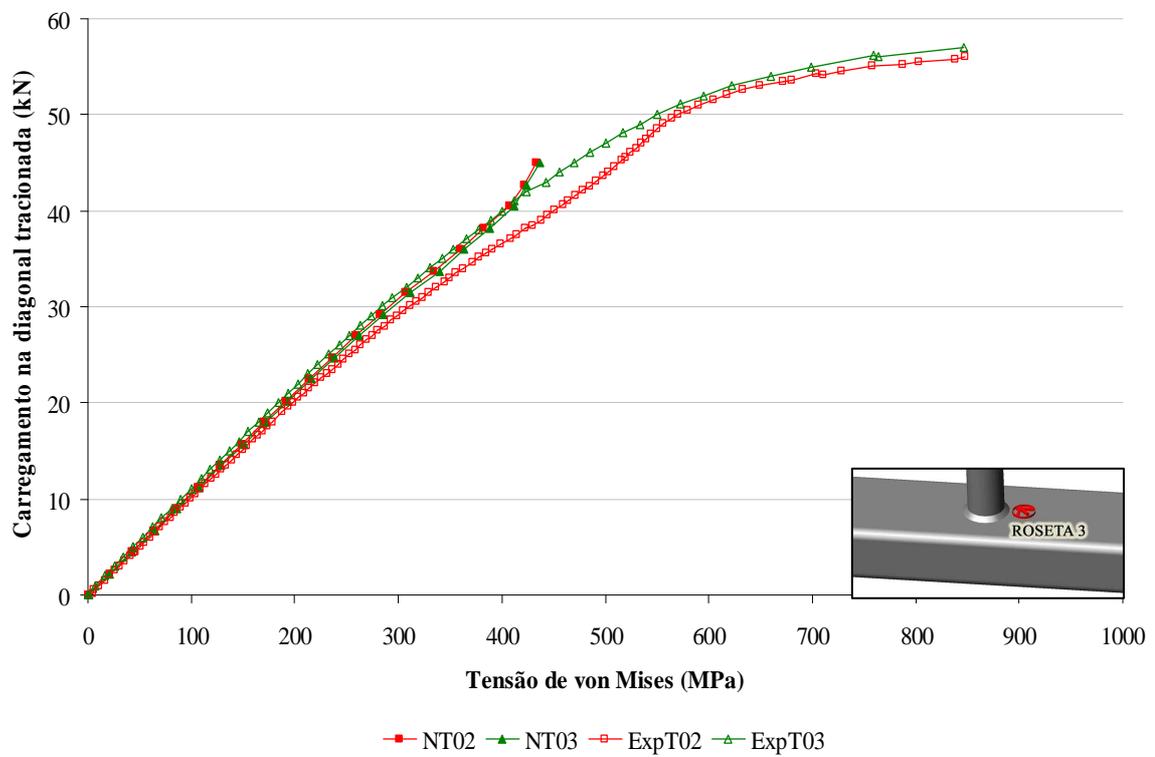


Figura 5.14 – Comparação entre os modelos numéricos e experimental para a ligação “T” – Roseta 3.

Observa-se que os modelos numéricos têm uma ótima correlação com os dados experimentais, para todas as rosetas, apresentando o mesmo nível de tensões desde o início da aplicação do carregamento até a plastificação do material. Ainda pode-se concluir que os modelos numéricos entre si têm resultados de tensões muito próximos, isto se deve ao fato das imperfeições medidas nos protótipos e inseridas nos modelos numéricos serem pequenas.

Nas figuras 5.15 e 5.16 vê-se a distribuição da tensão de von Mises para os modelos numéricos T02 e T03, respectivamente, com suas configurações deformadas. Podendo-se concluir quando se observa a deformação e o nível de tensões na zona da ligação entre montante e banzo, que o modo de colapso preponderante é a plastificação da face do banzo, assim como no ensaio experimental.

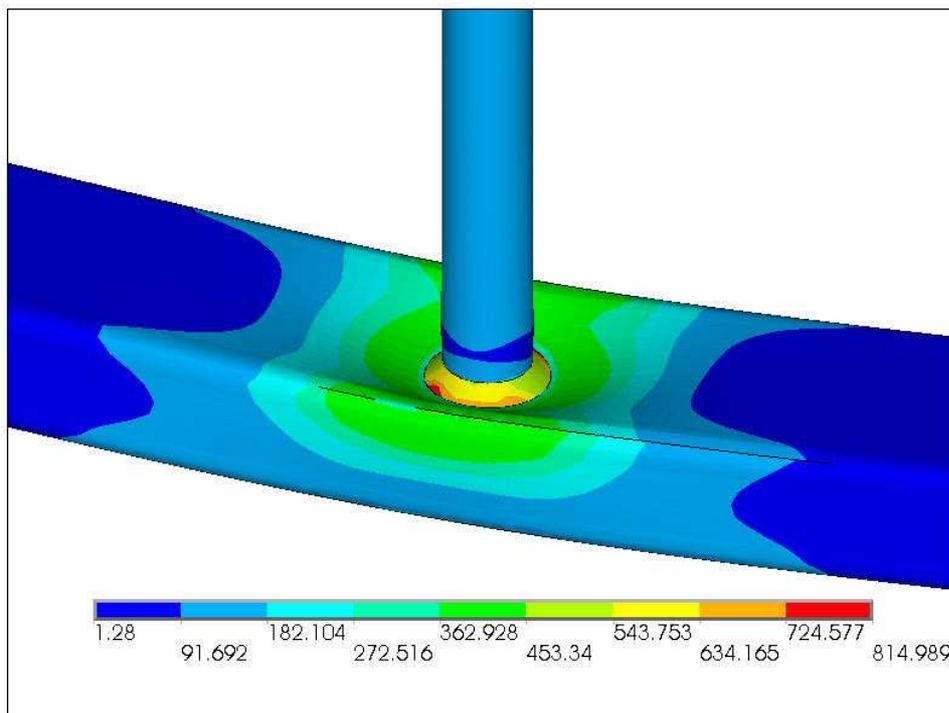


Figura 5.15 - Configuração deformada e distribuição da tensão de von Mises para o modelo NT02.

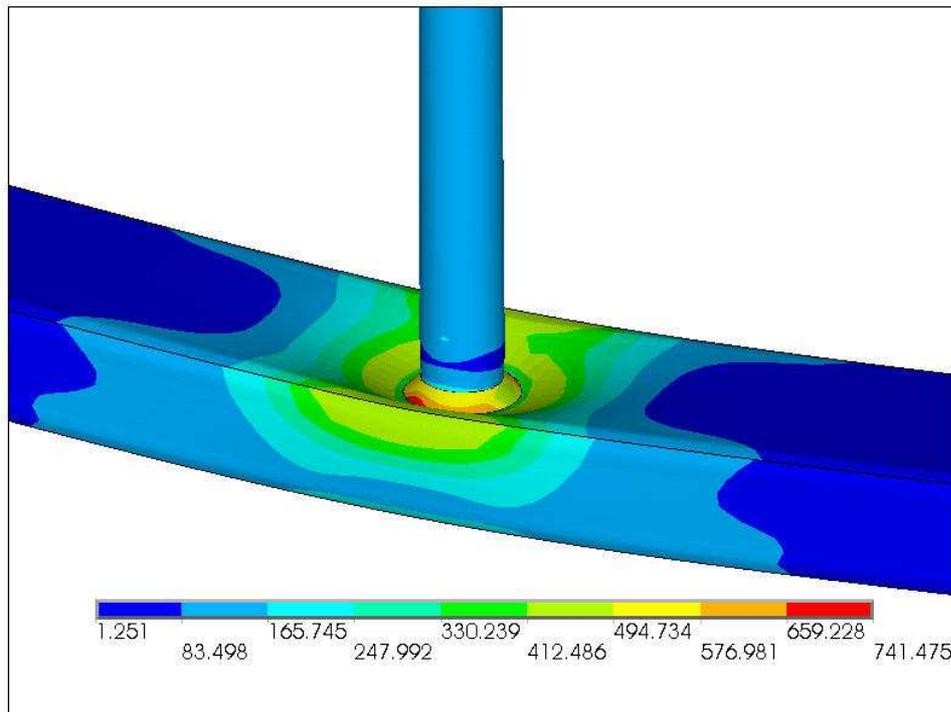


Figura 5.16 - Configuração deformada e distribuição da tensão de von Mises para o modelo NT03.

#### 5.3.4. Ligação “K”

O mesmo tipo de modelagem foi utilizada na ligação “K” para construção dos modelos NK01 e NK02, com restrição de todos os graus de liberdade nas extremidades do banzo, aplicação gradual do carregamento de 120 kN distribuído nos nós das extremidades das diagonais, por meio de passos de carga.

Na ligação “K” foram obtidos resultados similares a ligação “KT” quando comparamos a distribuição de tensão de von Mises do modelo numérico com os do ensaio experimental, com carga última bem próxima a de colapso dos protótipos, 120 kN. Carga esta que levou ao escoamento do material, configurando a plastificação da face do banzo. Na roseta 1 tem-se uma boa correlação, na roseta 2 tem-se as mesmas tendências da curva experimental, no entanto com divergência maior que a mesma roseta no ensaio da ligação “KT”. Para as demais rosetas há maior divergência de resultados o que já foi observado na ligação “KT”. A comparação a nível de tensões com os dados experimentais pode ser vista no gráfico Carga na diagonal tracionada x Tensão de von Mises nas Figuras 5.17 a 5.20 para as rosetas coladas nos protótipos e evidenciadas no modelo numérico conforme item 5.3.1.

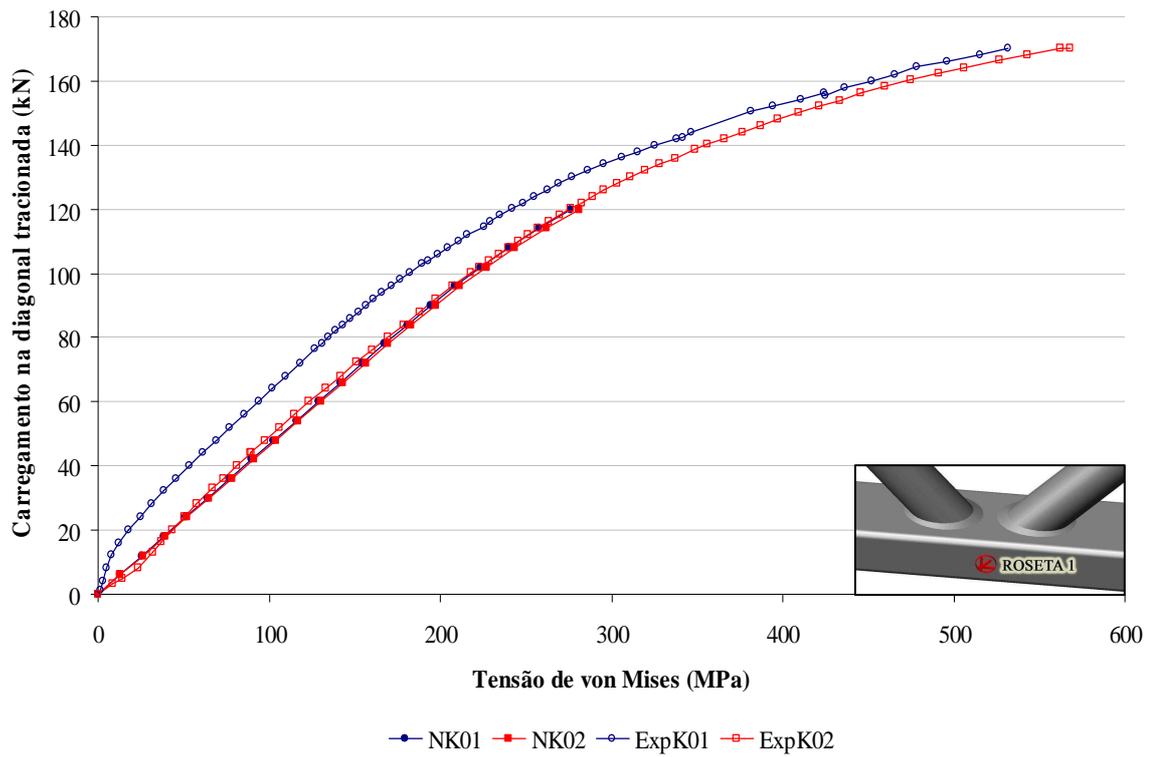


Figura 5.17 – Comparação entre os modelos numéricos e experimental para a ligação “K” – Roseta 1.

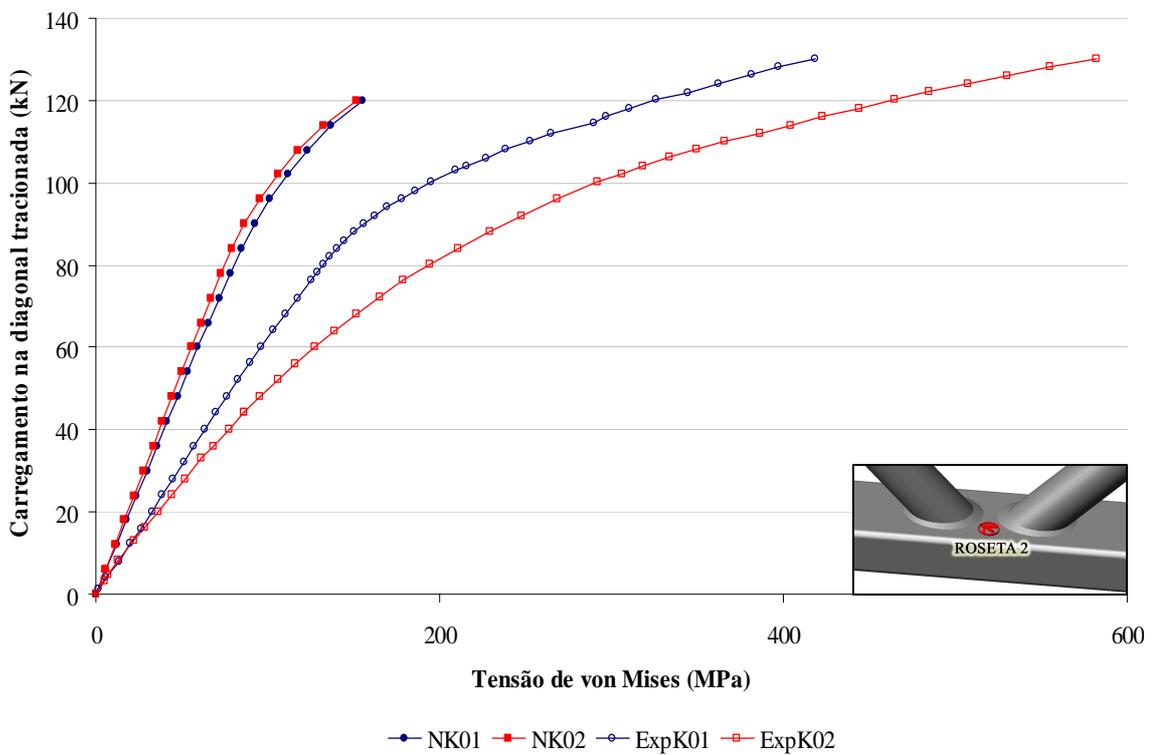


Figura 5.18 – Comparação entre os modelos numéricos e experimental para a ligação “K” – Roseta 2.

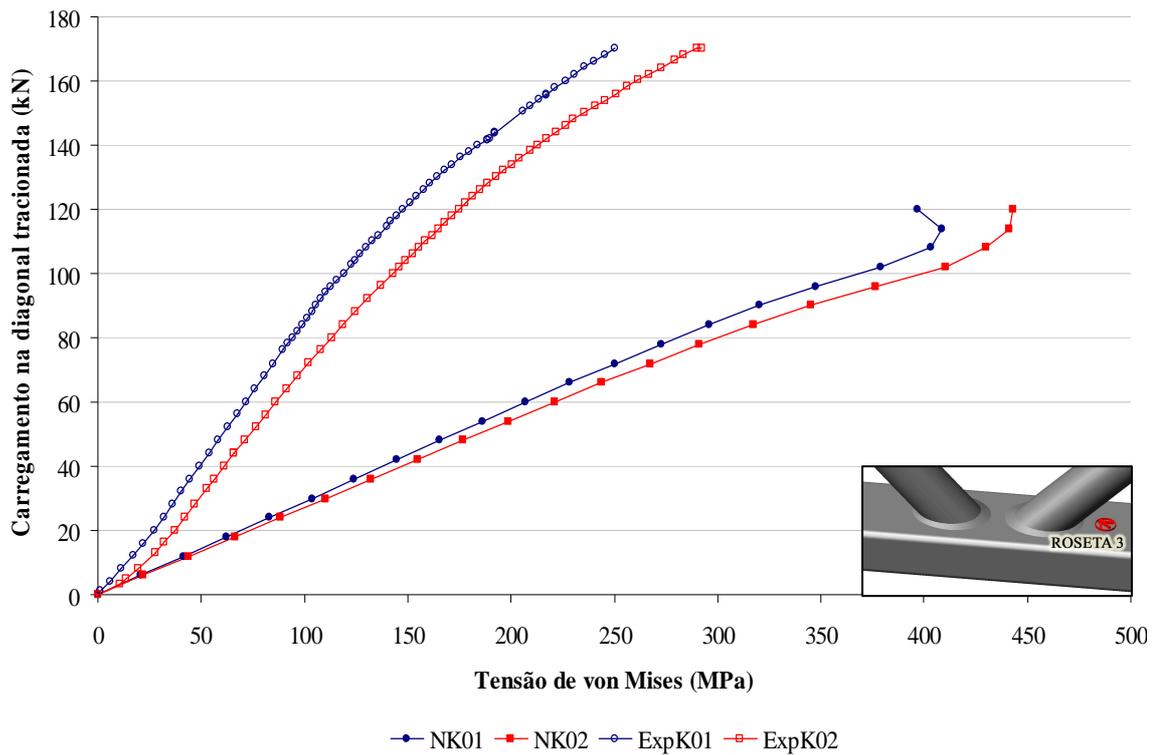


Figura 5.19 – Comparação entre os modelos numéricos e experimental para a ligação “K” – Roseta 3.

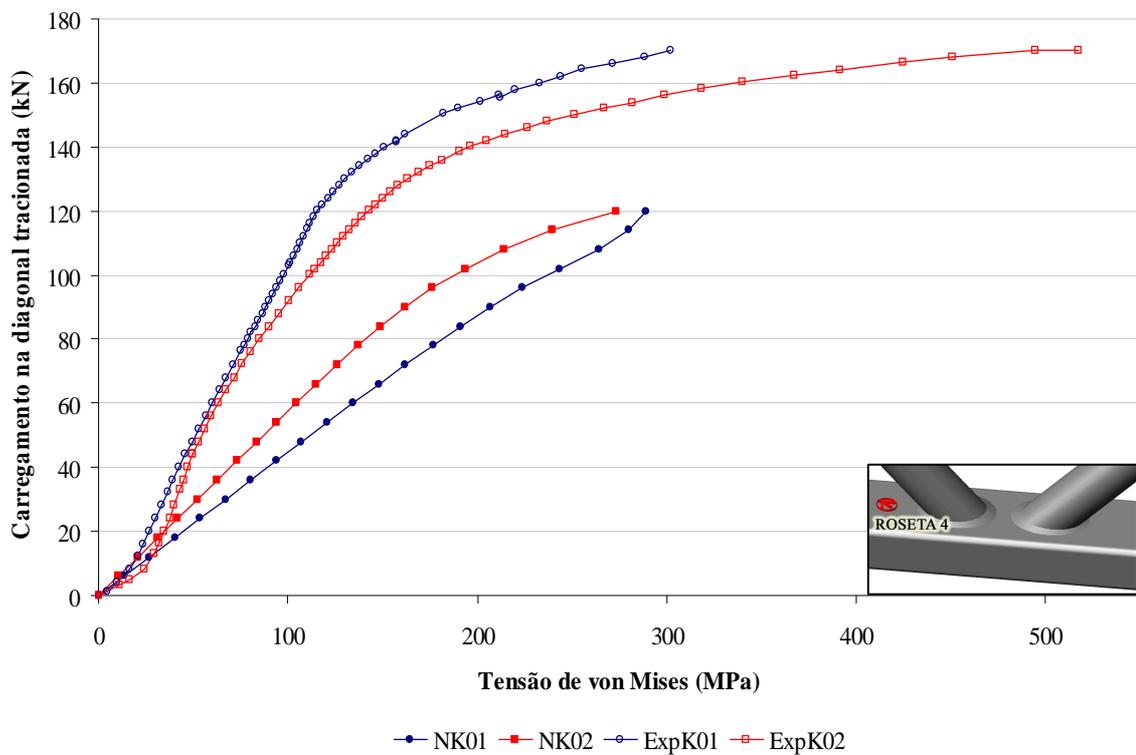


Figura 5.20 – Comparação entre os modelos numéricos e experimental para a ligação “K” – Roseta 4.

Da observação dos gráficos pode-se concluir que para o carregamento aplicado de 120 kN os níveis de tensão nas rosetas localizadas entre as extremidades do banzo e as diagonais comprimidas e tracionadas são maiores que na roseta entre as diagonais. Divergindo dos resultados experimentais, nos quais a roseta 2 (entre as diagonais) acusou o colapso da ligação em ambos os ensaios.

Mendanha (2006) realizou uma modelagem de uma ligação “K”, nomeada em seu trabalho como N5, utilizando as mesmas diretrizes usadas para análise numérica deste trabalho, apresentando bons resultados. Contudo, nos ensaios experimentais e por consequência nos modelos numéricos analisados por Mendanha (2006), não houve monitoramento por meio de rosetas da região entre as diagonais e as extremidades do banzo, sendo a análise realizada com a ligação na fase elástica inicial. Existem também diferenças geométricas importantes entre o protótipo N5 e os protótipos K01 e K02, aqui analisados, como as dimensões dos perfis componentes das ligações. Outra diferença está no comprimento do banzo, sendo menor nos protótipos K01 e K02, o que proporciona uma menor influência da flexão do banzo, ou seja, temos um efeito localizado maior.

Diversos testes foram feitos para tentar melhorar os resultados obtidos numericamente. Dentre as tentativas foi feita uma modelagem com o comprimento das diagonais reduzido, com o intuito de diminuir a rotação das extremidades deste membro, uma vez que o sistema de aplicação de carga nos ensaios restringe parcialmente este tipo de movimento, apesar de não termos feito nenhuma medida de deslocamento nesta extremidade. Contudo, os resultados obtidos foram praticamente os mesmos do modelo que tem o comprimento das diagonais iguais as dos protótipos. Outra tentativa foi a de restringir a rotação das diagonais em torno do eixo perpendicular ao plano da ligação, mais uma vez os resultados não foram satisfatórios, podendo-se concluir que esta não é a razão da modelagem não apresentar bons resultados em relação aos experimentais. Desta forma, uma investigação mais profunda se faz necessária para poder avaliar melhor o modelo numérico.

### 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo do comportamento de treliças compostas de perfis tubulares é de fundamental importância, e em particular de suas ligações, uma vez que as mesmas são pontos críticos no dimensionamento dessas estruturas, sendo necessário uma investigação profunda sobre a trajetória de tensões nas ligações.

O estudo das ligações apresentadas neste trabalho é parte integrante do desenvolvimento de um sistema treliçado misto de piso, composto por treliças de perfis tubulares circulares nas diagonais e montantes e retangulares no banzo, formando um sistema misto com a laje de concreto, que é ligada a treliça de aço por meio de conectores de cisalhamento.

Visto que este tipo de sistema é relativamente novo e a clara necessidade do aprofundamento no Brasil do estudo das estruturas treliçadas, e em particular de suas ligações, é de grande importância a realização de pesquisas através de ensaios experimentais que venham também respaldar o desenvolvimento de modelos numéricos que possam representar bem as estruturas reais. Com a utilização de softwares e computadores cada dia mais avançados aliados a ensaios experimentais o desenvolvimento deste tipo de tecnologia é crescente e cada vez mais confiável.

Este trabalho teve como primeiro objetivo estudar um sistema treliçado composto de um grupo de treliças nas quais variou-se a altura, vão e ângulo formado entre diagonais e banzo, para que se pudesse selecionar a treliça “ótima”. E a partir desta treliça dita “ótima” foi feita uma análise de suas ligações por meio de ensaios experimentais, com o objetivo de monitorar o comportamento destes nós e de calibrar um modelo numérico representativo de ligações tubulares de treliças. Além disso, foi feito um levantamento da distribuição de tensões residuais do perfil tubular componente do banzo, para que se pudesse avaliar a influência dessas tensões na resistência da ligação.

Com relação à metodologia e resultados dos ensaios experimentais, faz-se importante destacar alguns itens:

- A montagem do esquema de ensaio do protótipo na posição horizontal se mostrou bastante adequada, com grande economia de equipamentos e sistemas de montagem e carregamento.
- As adaptações feitas no sistema de carregamento e apoio dos protótipos desenvolvidos para os ensaios realizados por Freitas et al. (2006), se mostraram bastante eficazes, com destaque para a colocação dos anteparos, que conseguiram impedir o deslocamento da montagem, um problema constatado nos ensaios realizados anteriormente por Freitas et al. (2006).
- A aplicação dos carregamentos de forma independente foi bem coordenada como se pôde verificar pela seqüência de passos de carga a partir dos dados adquiridos pelo sistema automático de aquisição de dados.
- A instrumentação dos protótipos através de extensômetros elétricos, LVDT's e deflectômetros foi apropriada, não havendo nenhum tipo de problema com os aparelhos ao longo de todos os ensaios, tampouco com o sistema automático de aquisição de dados.
- A técnica utilizada para levantamento da distribuição de tensões residuais no perfil retangular do banzo se mostrou bem eficiente. Apesar da dificuldade imposta pela geometria do perfil, com a instrumentação da face externa da parede do tubo por meio de extensômetros elétricos e medida indireta das tensões na face interna, tornou-se viável a obtenção da distribuição das tensões residuais ao longo do comprimento e espessura da seção transversal do perfil retangular.
- Os valores das tensões residuais medidos foram baixos, com o maior valor na seção média da parede do tubo não alcançando 30% da tensão de escoamento do aço do perfil retangular. Levando-se em conta o processo de obtenção deste tipo de perfil

esperava-se encontrar valores bem maiores, contudo o perfil ensaiado foi submetido a tratamento térmico. E, neste nível, a influência das tensões residuais pôde ser desprezada, não sendo levada em conta na análise numérica.

A partir dos ensaios nos protótipos e da análise comparativa entre os modelos numéricos desenvolvidos e os resultados dos ensaios, pôde-se verificar que:

- Analisando os dados de tensão, deslocamento, carga última e modo de colapso de cada protótipo válido conclui-se que houve uma excelente correlação entre os ensaios em cada ligação.
- Nas ligações que possuem montante, “KT” e “T”, a plastificação ocorreu em função do funcionamento deste no banzo. Ou seja, a resistência da ligação está associada diretamente a carga de compressão do montante, visto a simetria do carregamento nas diagonais.
- A modelagem seguindo as mesmas diretrizes utilizadas por Mendanha (2006), uso do elemento de casca “Shell 181”, modelagem da curvatura no vértice do perfil retangular do banzo e modelagem do cordão de solda, se mostrou eficaz para a criação dos modelos numéricos das ligações analisadas neste trabalho, tendo maior divergência para a ligação “K”.
- O diagrama tensão x deformação do material bi-linear usado apresentou-se adequado, mas verifica-se a necessidade de uma melhor representação através de um diagrama multilinear para que se possa ter uma melhor representação da fase plástica do aço, uma vez que os gráficos de carregamento na diagonal tracionada ou carregamento no montante x tensão de von Mises, em alguns pontos analisados, apresentaram uma dispersão, caracterizando a mudança brusca no comportamento do aço.
- A modelagem do cordão de solda exerce papel fundamental na distribuição de tensões na face superior do banzo, principalmente na ligação “T” que teve modelado um maior cordão de solda baseada no artigo de Lee e Wilmshurst, com a perna da solda perpendicular à face dos elementos constituintes da ligação igual a  $1,5t$ , sendo  $t$

a espessura do montante ou do banzo, para que obtivesse resultados satisfatórios. Já na ligação “KT” e “K” o cordão de solda teve uma perna menor em relação a ligação “T”, também com a modelagem baseada no artigo de Lee e Wilmshurst com a perna da solda perpendicular à face dos elementos constituintes da ligação igual a  $1,0t$ , uma vez que o “gap” para essas ligações é pequeno e um maior cordão de solda influencia bastante na distribuição das tensões, contudo sua modelagem é essencial para a boa correlação com a carga última experimental.

- Mesmo tendo sido utilizadas as mesmas diretrizes da modelagem para as ligações “KT” e “T” no modelo da ligação “K” este não apresentou bons resultados, mesmo com as tentativas de modificações de algumas condições de contorno. Sinalizando que investigações mais profundas no modelo devem ser implementadas, chegando até na mudança do tipo de elemento, de casca para sólido, na análise por elementos finitos, para que se tenha um modelo adequado também para este tipo de ligação.

Da comparação entre as prescrições do Eurocode 3 e os dados experimentais, verificou-se que:

- Com relação às cargas experimentais e as de projeto observa-se que a ligação “T” possui boa correlação entre os resultados experimentais e os obtidos pelo Eurocode. Com relação às ligações “K” e “KT” o mesmo não foi verificado. Nestas ligações a carga de projeto é maior que a carga última. Esta dispersão está associada a excentricidade e sua relação com a altura  $h_0$  do perfil do banzo o que é quantificado no dimensionamento através da redistribuição do momento nos membros que compõem a ligação.
- Destaca-se também que no caso da ligação “KT” o valor da carga no montante é elevado, em função da alta resistência do mesmo quando da avaliação da carga a ser utilizada nos ensaios. Para este nível de carga no montante (75% da carga das diagonais) a formulação não apresenta bons resultados.
- Com relação ao modo de colapso, tem-se o mesmo modo indicado pelo dimensionamento teórico por meio do Eurocode 3 para as ligações “KT” e “T”. Para a ligação “K” o cisalhamento do banzo, foi o preponderante segundo a prescrição,

isto está associado a menor resistência ao cortante do banzo. Assim a formulação para a ligação “K” não apresenta boa correlação com o experimental para banzos na mesma faixa de altura do utilizado neste trabalho.

Como sugestão para trabalhos futuros, tem-se:

- Estudo teórico-experimental de novas ligações com reforço na face do banzo a partir da soldagem de uma chapa de aço na região da ligação.
- Estudo teórico experimental de ligações tipo “T”, com variação do diâmetro do montante, de forma a avaliar a influência da razão entre o diâmetro do montante e largura da parede do banzo ( $d_1/b_0$ ), na resistência deste tipo de ligação.
- Análise numérica de ligações “K” com “gap” pequeno, com variação de outros parâmetros na análise numérica como, por exemplo, a utilização de elemento sólido para tentar obter um modelo representativo capaz de analisar a forte influência da flexão neste tipo de ligação.
- Análise teórico-experimental do sistema treliçado misto completo, com verificações das ligações e outras partes do sistema estrutural, como a interface aço-concreto.
- Avaliar experimentalmente a influência de cargas de compressão e tração no banzo, com variação da altura  $h_0$  do mesmo.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ABAQUS/Standard 2003. Version 6.4, Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc, USA.

American Institute of Steel Construction Inc - AISC, 2005. Load and resistance factor design specification for steel hollow structural sections.

Ansys, Inc. theory reference (version 11.0), 2007.

Araújo, A. H. M., Requena, J. A. V., Minchillo, D. G. V., Thomaz, S. A. M., 2001. Projeto, fabricação e montagem de estruturas com perfis tubulares. I CICOM, IV Seminário Internacional do uso de estruturas metálicas na construção civil. São Paulo.

AutoCAD 2006, Autodesk, Inc., versão 2006.

Chiew, S. P., Soh, C. K., 2000. Strain concentrations at intersection regions of a multiplanar tubular DX-joint. Journal of Constructional Steel Research. School of Civil and Structural Engineering, Nanyang Technological University, Singapore.

Choo, Y. S., Qian, X. D., Foo, K.S., 2004. Static strength variation of thick-walled CHS X-joints with different included angles and chord stress levels. Marine structures, 17, p. 311 – 324.

Choo, Y. S., Qian, X. D., Wardenier, J., 2006. Effects of boundary conditions and chord stresses on static strength of thick-walled CHS K-joints. Journal of Constructional Steel Research 62 , p. 316–328.

CIDECT, 1996. Design Guide for Rectangular Hollow Section (RHS) Joints Under Predominantly Static Loading. Köln:Verl. TÜV Rheinland.

CIDECT, 1996. Design Guide for Circular Hollow Section (CHS) Joints Under Predominantly Static Loading. Köln:Verl. TÜV Rheinland.

Davies, G., Crockett, P., 1996. The strength of welded T-DT joints in rectangular and circular hollow section under variable axial loads. Journal of Constructional Steel Research, vol. 37, n. 1. p. 1-31,

European Committee for Standardisation, Eurocode 3, 2005: Design of steel structures: ENV 1993 – 1-1: General rules and rules for buildings.

Eurocode 3, 2005. Design of steel structures – part 1.8: Design of joints, CEN, European Committee for Standardisation, Brussels. prEN 1993-1.8.

Firno, C. S., 2005. Arquitetura com perfis tubulares: uma nova linguagem. Trabalho Apresentado à III Feira Internacional de Tubos, Válvulas, Conexões e Componentes, Tubotech, São Paulo.

Fleischer, O., Puthli, R., 2006. Evaluation of experimental results on slender RHS K-gap joints. Anais do 11º ISTS, International Symposium on Tubular Structures, Québec, Canada.

Freitas, A. M. S., Muniz, C. F. D. G., Moraes, C. S., 2006. Relatório interno de projeto. V&M.

Freitas, A. M. S., Mayor, Y. M. S., 2006. Relatório de imperfeições.

Gerken, F. S., 2003. Perfis Tubulares: Aspectos arquitetônicos e estruturais. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto.

Hottinger Baldwin Messtechnik, (2003b). Catman 4.5 Operating Manual.

Lee, M. M. K., & Wilmshurst, S. R., 1995. Numerical modeling of CHS Joints with multiplanar double-K configuration. Journal of Constructional Steel Research, vol. 32. p. 281-30.

Kosteski, N., Packer, J. A., Puthli, R. S., 2003. A finite element method based yield load determination procedure for hollow structural section connections. Journal of Constructional Steel Research 59, p. 453–471.

Lima, L. R., et al., 2005. Análise Paramétrica de Ligações “T” com Perfis Tubulares em Aço através de um Modelo de Elementos Finitos. CILAMCE 2005, Guarapari, Espírito Santo.

- Liu, D. K., Wardenier, J., 2006. Effect of chord loads on the strength of RHS uniplanar gap K-joints. Anais do 11º ISTS, International Symposium on Tubular Structures, Québec, Canada.
- Liu, D. K., Yu, Y., Wardenier, J., 1998. Effect of Boundary Conditions and Chord Preload on the Strength of RHS Uniplanar Gap K-Joints. Proceedings of the Eighth International Symposium on Tubular Structures, Singapore, p. 223-230.
- Manual Mannesmann. Catálogos com informações técnicas. 12 points in favour of hot rolled MSH Mannesmann structural hollow section, cap. 2 - Residual stresses.
- Manual Vallourec & Mannesmann Tubes. Catálogos com informações técnicas. Tubos estruturais de seção circular (MSH). Dimensões, Propriedades geométricas e materiais.
- Mashiri, F. R., Zhao, X. L., 2003. Plastic Mechanism Analysis of Welded Thin-Walled T-Join Madeupof Circular Braces and Square Chords under In-Plane Bending. Australia: Monash University, Department of Civil Engineering.
- Mendanha, F. O., 2006. Análise de ligações de perfis tubulares em aço do tipo K e KT. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto.
- Meyer, K. F., 2002. Estruturas Metálicas: estruturas com tubos: projeto e introdução ao cálculo. KM Engenharia. Belo Horizonte, Minas Gerais.
- Modenesi, P. J., 2001. Soldagem I: Descontinuidades e Inspeção em Juntas Soldadas. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Morgan, M. R., Lee, M. M. K., 1998. Prediction of Stress Concentrations and Degrees of Bending in Axially Loaded Tubular K-Joints. Journal of Structural Engineering. Swansea, vol 45 n.1, p. 67-97.
- Packer, J. A. & Henderson, J. E., 2007. Hollow Structural Section Connections and Trusses: A Design Guide, 2nd edition. Canadian Institute of Steel Construction.

- Packer, J. A., 1986. Design Examples for HSS Trusses. Canadian Journal of Civil Engineering. Vol. 13, n.4, p. 460-473.
- Packer, J. A., 1997. Design guide for rectangular hollow section (RHS) joints under predominantly static loading. Köln:Verl, TÜV Rheinland, 102 p.
- RAUTARUUKKI OYJ, H. V., 1998. Design Handbook for Rautaruukki Structural Hollow Sections. Hämeenlinna.
- Requena, J. A. V., Santos, A. L. E. F., 2007. Coleção técnico-científica V&M do Brasil. Dimensionamento de ligações em barras tubulares de estruturas metálicas planas.
- Rodrigues, F. C., 1993. Estudo teórico experimental de perfis de chapa dobrada submetidos a compressão. Tese de doutorado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Saidani, M., 1998. The effect of Joint Eccentricity on the Distribution of Forces in RHS Lattice Girders. Journal of Constructional Steel Research, Warwickshire, UK, Research 47, p. 211-221.
- Santos, A. L. E. F., 2003 Ligações de Barras Tubulares para Estruturas Metálicas Planas. Dissertação de mestrado. Faculdade de Engenharia Civil – Departamento de Estruturas, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo.
- Santos, A. L. E. F., Requena, J. A., Freitas, A. M. S., 2002 Ligações de Estruturas Metálicas Tubulares Planas: Abordagem Teórica. II Congresso Internacional da Construção Metálica – II CICOM. São Paulo, CD-ROM.
- Shao, Y. B., 2006. Geometrical effect on the stress distribution along weld toe for tubular T- and K-joints under axial loading. Journal of Constructional Steel Research 63, p. 1351-1360.
- Sopha, T., Chiew, S.P., Wardenier, J., 2006. Test results for RHS K-Joints with 50% and 100% overlap. Anais do 11º ISTS, International Symposium on Tubular Structures, Québec, Canada.

Spyros, K., Romeijn, A., Wardenier, J., 2000. Stress Concentrations in Tubular Gap K-Joints: Mechanics and Fatigue Design. *Engineering Structures* n.22, p. 4-14.

SSRC, 1981. "Determination of residual stresses in structural shapes", Structural Stability Research Council, Task Group 6, Reprinted from *Experimental Techniques*, vol. 5, n° 3, 4-7, Sept.

Tabet, F., et al., 2006. Avaliação do coeficiente de eficiência em ligações "T" com perfis tubulares através do Método dos Elementos Finitos. Trabalho apresentado ao XXVI Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, Belém, Pará.

Vegte, G. J. Van der, Makino, Y., 2006. The ultimate strength of axially loaded CHS uniplanar T-joints subjected to axial chord load. *Anais do 11° ISTS, International Symposium on Tubular Structures*, Québec, Canada.

Wardenier, J., 2000. *Hollow Sections in Structural Applications*. Delft University Technology of Netherlands.

Wingerde, A. M. V., Packer, J. A., Wardenier, J., 2001. Simplified SCF Formulae and Graphs for CHS and RHS K and KK Connections. *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 53.

Zhao, X. L., 2000. Deformation limit and ultimate strength of welded T-joints in cold-formed RHS sections. *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 53, p. 149- 165.