

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

**ANÁLISE TEÓRICA-EXPERIMENTAL DE LIGAÇÕES  
TIPO “K” E “KT” COMPOSTAS POR PERFIS  
TUBULARES DE SEÇÃO RETANGULAR E CIRCULAR.**

**AUTORA: IARA MAPA SOUTTO MAYOR**

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: Construções Metálicas.

Ouro Preto, Abril de 2010

M473a

Mayor, Iara Mapa Soutto

Análise teórica-experimental de ligações tipo “K” e “KT” compostas por perfis tubulares de seção retangular e circular [manuscrito] / Iara Mapa Soutto Mayor - 2010.

xvii, 150f.: il. color.; graf.; tabs.

Orientadora: Profa. Dra. Arlene Maria Sarmanho Freitas

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

Área de concentração: Construção Metálica.

1. Estruturas metálicas - Teses. 2. Aço tubular - Estruturas - Teses. 3. Ligações metálicas - Teses. 4. Tubos - Teses. I. Universidade Federal de Ouro Preto. II. Título.

CDU: 624.014.27

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

## **Agradecimentos**

A Deus, que tanto me deu força para vencer mais esta etapa.

Aos meus pais pelo incentivo e apoio por todas as horas.

A minha irmã Cibele pela amizade.

Ao Luiz pelo apoio, carinho e incentivo.

A todos os colegas do mestrado, principalmente para o João Nivaldo e a Sylvia Letizia pela amizade, companheirismo e pelos momentos de alegria.

Aos funcionários do laboratório Dequinha, João e Sr. Osvaldo pela disposição nos ensaios experimentais.

A Róvia, a atenção e apoio.

A Professora Arlene pela motivação, incentivo e orientação ao longo deste trabalho.

À Capes e a Vallourec & Mannesmann do Brasil pelo apoio e financiamento deste trabalho.

## **Resumo**

Neste trabalho é apresentado um estudo de ligações soldadas do tipo “K” e “KT” com afastamento das barras, 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 experimental, teórica e numérica das ligações. Os ensaios experimentais foram realizados em protótipos em escala real, com a geometria das ligações definida a partir de uma análise dos ensaios realizados anteriormente no Laboratório de Estruturas “Prof. Altamiro Tibiriçá Dias” do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Os ensaios dos protótipos das ligações visaram a obtenção do comportamento, carga última e modo de colapso da ligação e a comparação destes com modelos teóricos e numéricos. As análises teóricas foram realizadas a partir das prescrições de norma. A análise numérica em elementos finitos envolveu a geração e análise 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. Foi realizada também uma análise numérica da influência da altura do perfil do banzo na resistência da ligação. As ligações ensaiadas apresentaram como modo de falha a “Plastificação da face ou de toda a seção transversal do banzo, junto com as diagonais ou montantes” (Modo A). A comparação dos resultados dos ensaios indicaram que a relação entre as cargas experimentais e as de projeto, obtidas pelas prescrições do Eurocode 3, apresentam boa correlação. Os resultados indicaram que quanto maior a carga no montante menor a resistência da ligação à plastificação da face do banzo. Os resultados obtidos pelos modelos numéricos das ligações tipo “K” apresentam uma boa convergência quando comparados com os resultados experimentais.

## **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. 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 and compared with numerical and theoretical models. The theoretical analysis was carried out from the codes prescriptions. The numerical analysis finite element methods involved the generation and analysis from the results obtained in experimental results. The model represents the behavior and load capacity of the tested joints. We also carried out a numerical analysis of the influence of the chord height at the load capacity of the joints. The joints tested indicated the failure mode "Plastic failure of the chord face" (Mode A). The results showed that the loads using Eurocode, and the ones from the experimental had good correlation for the "K" and "KT" joints. The results indicated the influence of the vertical load vertical member ("KT") at the strength of the chord face. The numerical model and experimental results had good correlation for the "K" joint.

# Sumário

<b>1. Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1. Construções com perfis tubulares de aço .....	1
1.2. Treliças planas .....	5
1.3. Objetivo .....	6
1.4. Justificativa.....	6
1.5. Revisão Bibliográfica .....	7
<b>2. Dimensionamento e análise da tipologia das ligações tipo “K” e “KT” .....</b>	<b>12</b>
2.1. Tipos de ligações .....	12
2.2. Excentricidade e afastamento das diagonais .....	13
2.3. Modos de Falha .....	16
2.4. Dimensionamento das ligações soldadas tipo “K” e “KT” .....	17
2.4.1. Parâmetros utilizados pela Eurocode 3 (2005):.....	19
2.4.2. Limitações: .....	19
2.5. Verificação da resistência da ligação.....	21
2.5.1. Ligação soldada tipo “K” com afastamento, formadas por perfis com seção transversal retangular no banzo e circular nos demais membros. ....	21
2.5.2. Ligação soldada tipo “KT” formada por perfis com seção transversal retangular no banzo e circular nos demais membros.....	23
2.6. Análise da tipologia das ligações soldadas tipo “K” e “KT”. ....	24
2.6.1. Ligação tipo “K” .....	25
2.6.2. Ligação tipo “KT” .....	30
<b>3. Apresentação do programa experimental .....</b>	<b>35</b>
3.1. Introdução .....	35
3.2. Ensaios realizados por Mendes (2008).....	37
3.3. Características dos materiais e dimensões dos protótipos.....	39
3.4. Esquema de montagem dos ensaios.....	41
3.4.1. Sistema de aplicação dos carregamentos.....	42
3.4.2. Sistema de apoio dos banzos .....	48
3.5. Instrumentação e sistema de aquisição de dados.....	50
3.6. Metodologia de ensaio .....	56

<b>4.</b>	<b>Apresentação e análise dos resultados experimentais .....</b>	<b>58</b>
4.1.	Considerações iniciais .....	58
4.2.	Ligação tipo “K” .....	58
4.3.	Ligação tipo “KT” .....	66
4.4.	Análise dos resultados .....	72
4.4.1.	Resultados Experimentais .....	72
<b>5.</b>	<b>Modelagem computacional e comparação dos resultados obtidos com os resultados teóricos de norma. ....</b>	<b>74</b>
5.1.	Considerações iniciais .....	74
5.2.	Comparação entre os resultados experimentais e as cargas de projeto .....	74
5.3.	Metodologia da análise numérica .....	77
5.4.	Análise comparativa entre os modelos numéricos e os resultados experimentais .....	82
5.4.1.	Ligações tipo “K” .....	82
5.4.2.	Ligações tipo “KT” .....	87
5.5.	Análise da influência da altura do banzo .....	93
5.5.1.	Ligações tipo “K” .....	94
5.5.2.	Ligações tipo “KT” .....	100
<b>6.</b>	<b>Considerações finais .....</b>	<b>108</b>
6.1.	Considerações Gerais .....	108
6.1.	Análise Teórica .....	109
6.2.	Análise Experimental .....	109
6.2.1.	Metodologia experimental .....	109
6.2.2.	Comparação entre os resultados experimentais e a análise teórica .....	109
6.3.	Análise Numérica .....	110
6.3.1.	Modelagem numérica .....	110
6.3.2.	Comparação entre a análise numérica e os resultados experimentais .....	111
6.4.	Análise da influência da altura do banzo .....	112
6.4.1.	Modelos numéricos com diferentes alturas e espessuras do banzo .....	112
6.5.	Trabalhos Futuros .....	113
	<b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA. ....</b>	<b>114</b>

<b>ANEXOS .....</b>	<b>119</b>
<b>ANEXO A.....</b>	<b>120</b>
<b>Anexo A – limites teóricos e cálculo da resistência da ligação tipo “K” ensaiada neste trabalho.....</b>	<b>121</b>
<b>Anexo B – limites teóricos e cálculo da resistência da ligação tipo “KT” ensaiada neste trabalho.....</b>	<b>128</b>
<b>Anexo C – dados experimentais das ligações tipo “K” .....</b>	<b>136</b>
<b>Anexo D – dados experimentais das ligações tipo “KT” .....</b>	<b>145</b>

## Lista de Figuras

<b>1. Introdução .....</b>	<b>1</b>
Figura 1.1– Passarela em perfil tubular. (Vallourec & Mannesman Tubes).....	2
Figura 1.2- Distribuição de tensões residuais em perfis retangulares. ....	3
Figura 1.3– Treliça plana - Estádio João Havelange “Engenhão”, Rio de Janeiro/Brasil.....	4
Figura 1.4– Treliça espacial - Aeroporto de Hamburgo, Alemanha. ....	4
Figura 1.5 – Treliça apresentado as ligações do tipo “K”, “KT” e “T” com afastamento.....	5
Figura 1.6– Treliça apresentado as ligações do tipo “K” com sobreposição. ....	6
Figura 1.7– Excentricidades analisadas por Saidani (1998).....	8
Figura 1.8– Modelos analisadas por Saidani (1998). ....	8
<b>2. Dimensionamento e análise da tipologia das ligações tipo “K” e “KT” .....</b>	<b>12</b>
Figura 2.1 – Ligações dos tipos “K” e “KT” com afastamento.....	12
Figura 2.2 – Tipos de ligações em relação à posição das diagonais.....	13
Figura 2.3 – Ligação “K” com afastamento. ....	14
Figura 2.4 – Mecanismos de falha devido à força axial de perfis tubulares retangulares.....	16
Figura 2.5 – Parâmetros geométricos da ligação tipo “K” e “KT” com afastamento. 18	
Figura 2.6 - Ligação do tipo “K” com afastamento.....	21
Figura 2.7 – Ligação do tipo “KT”.....	24
Figura 2.8 - Gráfico da Resistência da ligação tipo “K” versus a relação geométrica entre a excentricidade e a altura do banzo ( $e/h_0$ ). ....	26
Figura 2.9 - Gráfico da Resistência da ligação tipo “K” versus a relação geométrica entre o diâmetro da diagonal e a largura do banzo ( $d/b_0$ ). ....	28

Figura 2.10 – Gráfico da Resistência da ligação tipo “K” versus o afastamento da ligação.....	29
Figura 2.11 – Gráfico da Resistência da ligação tipo “KT” versus a relação geométrica entre a excentricidade e a altura do banzo. ....	30
Figura 2.12 – Gráfico da Resistência da ligação tipo “KT” versus a relação geométrica entre o diâmetro das diagonais a largura do banzo. ....	31
Figura 2.13 – Gráfico da Resistência da ligação tipo “KT” com diâmetro das diagonais igual a 48,3mm versus o afastamento. ....	32
Figura 2.14 – Gráfico da Resistência da ligação tipo “KT” com diâmetro das diagonais igual a 60,3mm versus o afastamento das diagonais.....	33
<b>3. Apresentação do programa experimental.....</b>	<b>35</b>
Figura 3.1 – Nomenclatura utilizada para as dimensões dos protótipos. ....	38
Figura 3.2 – Esquema geral das ligações ensaiadas. ....	40
Figura 3.3 – Esquema de montagem da ligação “KT”. ....	41
Figura 3.4 – Sistemas de aplicação de carregamento de compressão na diagonal....	42
Figura 3.5 – Sistemas de aplicação de carregamento de compressão no montante....	43
Figura 3.6 - Rótula e chapa de distribuição uniforme na diagonal comprimida. ....	43
Figura 3.7 - Desenho de projeto da chapa para regularização do carregamento de compressão na diagonal.....	44
Figura 3.8 – Desenho de projeto da chapa para regularização do carregamento de compressão no montante. ....	44
Figura 3.9 – Sistema de aplicação de carga do montante com a rótula universal e chapa de distribuição uniforme no montante.....	45
Figura 3.10 - Rótula universal e chapa de distribuição uniforme no montante após o primeiro ensaio “KT01-B”. ....	45
Figura 3.11 – Novo sistema de aplicação de carga do montante.....	46
Figura 3.12 – Sistemas de aplicação de carregamento de tração na diagonal. ....	47

Figura 3.13 - Chapa de extremidade e sistema rotulado para a aplicação de tração às diagonais.....	47
Figura 3.14 - Desenho de projeto da chapa para regularização do carregamento de tração na diagonal tracionada. ....	48
Figura 3.15 – Esquema geral do sistema de aplicação de carregamento.....	48
Figura 3.16 – Sistema de apoio do banzo à laje de reação. ....	49
Figura 3.17 – Detalhe da extremidade do banzo. ....	50
Figura 3.18 - Desenho do projeto da extremidade do banzo.....	50
Figura 3.19 – Defletômetro de haste com mostrador analógico.....	51
Figura 3.20 – LVDT’s. ....	51
Figura 3.21 – Posicionamento dos Defletômetros.....	52
Figura 3.22 – Extensômetro e Rosetas. ....	52
Figura 3.23 – Posicionamento dos extensômetros para a ligação do tipo “K”.....	53
Figura 3.24 –Posicionamento dos extensômetros para a ligação do tipo “KT”.....	54
Figura 3.25 –Células de carga utilizadas nos ensaios.....	55
Figura 3.26 – Sistema automático de aquisição de dados “Spider 8”. ....	55
Figura 3.27 – Sistema de aquisição de dados. ....	56

#### **4. Apresentação e análise dos resultados experimentais..... 58**

Figura 4.1 – Imperfeições e posição dos extensômetros nos ensaios das ligações tipo “K”.....	60
Figura 4.2 – Carga x Tensão de von Mises para as ligações tipo “K” - Roseta 1.....	63
Figura 4.3 – Carga x Tensão de von Mises para as ligações tipo “K”- Roseta 2. ....	63
Figura 4.4 – Carga x Tensão de von Mises para as ligações tipo “K” – Roseta 3. ....	64
Figura 4.5 – Carga x Tensão de von Mises para as ligações tipo “K” – Roseta 4. ....	64
Figura 4.6 – Carga x Tensão normais para as ligações tipo “K” –.....	65
Figura 4.7 – Imperfeições e posição dos extensômetros nos ensaios das ligações tipo “KT”. ....	67
Figura 4.8 – Carga x Tensão de von Mises para as ligações tipo “KT” – Roseta 1... ..	69
Figura 4.9 – Carga x Tensão de von Mises para as ligações tipo “KT” – Roseta 2... ..	69

Figura 4.10 – Carga x Tensão de von Mises para as ligações tipo “KT” – Roseta 3.	70
Figura 4.11 – Carga x Tensão de von Mises para ligações tipo “KT” – Roseta 4. ....	70
Figura 4.12 – Carga x Tensão de von Mises para ligações tipo “KT” – Roseta 5. ....	71
Figura 4.13 - Carga x Tensão normais para as ligações tipo “KT” – .....	72
<b>5. Modelagem computacional e comparação dos resultados obtidos.....</b>	<b>74</b>
Figura 5.1 - Esquema para cálculo das cargas teóricas de falha para as ligações tipo “KT” e “K” .....	75
Figura 5.2 – Sólido 3D gerado no AutoCAD 2006.....	77
Figura 5.3 - Modelagem da solda (Lee e Wilmsurts, 1995).....	78
Figura 5.4 – Modelo 3D de uma ligação tipo “KT” .....	79
Figura 5.5 – Elemento de casca Shell 181 (Programa Ansys).....	80
Figura 5.6 - Modelo Numérico de uma ligação “KT” .....	80
Figura 5.7 – Condições de Contorno no banzo. ....	82
Figura 5.8 – Carga x Tensão de von Mises das Ligações tipo “K” – Roseta 1.....	83
Figura 5.9 – Carga x Tensão de von Mises das Ligações tipo “K” – Roseta 2.....	83
Figura 5.10 – Carga x Tensão de von Mises das Ligações tipo “K” – Roseta 3.....	84
Figura 5.11 – Carga x Tensão de von Mises das Ligações tipo “K” – Roseta 4.....	84
Figura 5.12 - Distribuição de tensão de von Mises da ligação NK01-B. ....	85
Figura 5.13 - Distribuição de tensão de von Mises da ligação NK02-B. ....	86
Figura 5.14 - Distribuição de tensão de von Mises da ligação NK03-B. ....	86
Figura 5.15 – Carga x Tensão de von Mises das Ligações tipo “KT”– Roseta 1.....	88
Figura 5.16 – Carga x Tensão de von Mises das Ligações tipo “KT”– Roseta 2.....	89
Figura 5.17 – Carga x Tensão de von Mises das Ligações tipo “KT”– Roseta 3.....	89
Figura 5.18 – Carga x Tensão de von Mises das Ligações tipo “KT” – Roseta 4.....	90
Figura 5.19 – Carga x Tensão de von Mises das Ligações tipo “KT”– Roseta 5.....	90
Figura 5.20 – Distribuição de tensão e configuração deformada da ligação NKT01-B. .....	91

Figura 5.21 – Distribuição de tensão e configuração deformada da ligação NKT02-B. .....	92
Figura 5.22 – Distribuição de tensão de von Mises da ligação NK60.....	95
Figura 5.23 – Distribuição de tensão de von Mises da ligação NK70.....	95
Figura 5.24 – Distribuição de tensão de von Mises da ligação NK80.....	96
Figura 5.25 – Distribuição de tensão de von Mises da ligação NK90.....	96
Figura 5.26 – Distribuição de tensão de von Mises da ligação NK100.....	97
Figura 5.27 – Gráfico Carga x a relação geométrica $h_0/b_0$ das ligações tipo “K”.....	98
Figura 5.28 – Gráfico Carga x a relação geométrica $e/h_0$ das ligações tipo “K”.....	99
Figura 5.29 – Distribuição de tensão e configuração deformada da ligação NKT60. .....	101
Figura 5.30 – Distribuição de tensão e configuração deformada da ligação NKT70. .....	101
Figura 5.31 – Distribuição de tensão e configuração deformada da ligação NKT80. .....	102
Figura 5.32 – Distribuição de tensão e configuração deformada da ligação NKT90. .....	102
Figura 5.33 – Distribuição de tensão e configuração deformada da ligação NKT100. .....	103
Figura 5.34 – Gráfico Carga x a relação geométrica $h_0/b_0$ das ligações tipo “KT”..	105
Figura 5.35 - Gráfico Carga x a relação geométrica $e/h_0$ das ligações tipo “KT”....	106

**Anexo C – Dados experimentais das ligações tipo “K”**ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.

Figura C. 1 - Carga x Deformação para as ligações tipo “K01-B” – Roseta 1 (EER1, EER2 e EER3). .....	136
Figura C. 2 - Carga x Deformação para as ligações tipo “K02-B” – Roseta 1 (EER1, EER2 e EER3). .....	136

Figura C. 3 - Carga x Deformação para as ligações tipo “K03-B” – Roseta 1 (EER1, EER2 e EER3).....	137
Figura C. 4 - Carga x Deformação para as ligações tipo “K01-B” – Roseta 2 (EER4, EER5 e EER6).....	137
Figura C. 5 - Carga x Deformação para as ligações tipo “K02-B” – Roseta 2 (EER4, EER5 e EER6).....	138
Figura C. 6 - Carga x Deformação para as ligações tipo “K03-B” – Roseta 2 (EER4, EER5 e EER6).....	138
Figura C. 7 - Carga x Deformação para as ligações tipo “K01-B” – Roseta 3 (EER9, EER8 e EER7).....	139
Figura C. 8 - Carga x Deformação para as ligações tipo “K02-B” – Roseta 3 (EER9, EER8 e EER7).....	139
Figura C. 9 - Carga x Deformação para as ligações tipo “K03-B” – Roseta 3 (EER9, EER8 e EER7).....	140
Figura C. 10 - Carga x Deformação para as ligações tipo “K01-B” – Roseta 4 (EER10, EER11 e EER12).....	140
Figura C. 11 - Carga x Deformação para as ligações tipo “K02-B” – Roseta 4 (EER10, EER11 e EER12).....	141
Figura C. 12 - Carga x Deformação para as ligações tipo “K03-B” – Roseta 4 (EER10, EER11 e EER12).....	141
Figura C. 13 - Carga x Deformação para as ligações tipo “K01-B” - EER13 e EER14. .....	142
Figura C. 14 - Carga x Deformação para as ligações tipo “K02-B” - EER13 e EER14. .....	142
Figura C. 15 - Carga x Deformação para as ligações tipo “K03-B” - EER13 e EER14. .....	143

**Anexo D – Dados experimentais das ligações tipo “KT”**ERRO! INDICADOR  
NÃO DEFINIDO.

Figura D. 1 - Carga x Deformação para as ligações tipo “KT01-B” – Roseta 1 (EER1, EER2 e EER3).....	145
Figura D. 2 - Carga x Deformação para as ligações tipo “KT02-B” – Roseta 1 (EER1, EER2 e EER3).....	145
Figura D. 3 - Carga x Deformação para as ligações tipo “KT01-B” – Roseta 2 (EER4, EER5 e EER6).....	146
Figura D. 4 - Carga x Deformação para as ligações tipo “KT02-B” – Roseta 2 (EER4, EER5 e EER6).....	146
Figura D. 5 - Carga x Deformação para as ligações tipo “KT01-B” – Roseta 3 (EER7, EER8 e EER9).....	147
Figura D. 6 - Carga x Deformação para as ligações tipo “KT02-B” – Roseta 3 (EER7, EER8 e EER9).....	147
Figura D. 7 - Carga x Deformação para as ligações tipo “KT01-B” – Roseta 4 (EER10, EER11 e EER12).....	148
Figura D. 8 - Carga x Deformação para as ligações tipo “KT02-B” – Roseta 4 (EER10, EER11 e EER12).....	148
Figura D. 9 - Carga x Deformação para as ligações tipo “KT01-B” – Roseta 5 (EER13, EER14 e EER15).....	149
Figura D. 10 - Carga x Deformação para as ligações tipo “KT02-B” – Roseta 5 (EER13, EER14 e EER15).....	149
Figura D. 11 - Carga x Deformação para as ligações tipo “KT01-B” – EER16 e EER17.....	150
Figura D. 12 - Carga x Deformação para as ligações tipo “KT02-B” – EER16 e EER17.....	150

## **Lista de Tabelas**

<b>2. Dimensionamento e análise da tipologia das ligações tipo “K” e “KT” .....</b>	<b>12</b>
Tabela 2. 1 – Dimensões e peso linear dos perfis utilizados por Mendes (2008). ....	25
Tabela 2. 2 – Tipologia da ligação tipo “K” .....	29
Tabela 2. 3 – Tipologia da ligação tipo “KT” .....	34
<b>3. Apresentação do programa experimental .....</b>	<b>35</b>
Tabela 3.1 - Comparação das dimensões das ligações tipo “K” utilizados por Mendes (2008) e as dimensões utilizadas neste trabalho.....	36
Tabela 3.2 - Comparação das dimensões das ligações tipo “KT” utilizados por Mendes (2008) e as dimensões utilizadas neste trabalho. ....	36
Tabela 3.3 – Tipologia das ligações ensaiadas por Mendes (2008). ....	37
Tabela 3.4 – Resultados obtidos por Mendes (2008) dos limites teóricos e das cargas experimentais aplicadas nos elementos considerando os efeitos na face superior do banzo.....	39
Tabela 3.5 – Dimensões das ligações ensaiadas.....	39
Tabela 3.6 - Propriedades mecânicas dos perfis componentes dos protótipos das ligações. ....	41
<b>4. Apresentação e análise dos resultados experimentais .....</b>	<b>58</b>
Tabela 4.1 – Tabela de cargas experimentais aplicadas nos elementos considerando os efeitos na face superior do banzo das ligações tipo “K”. ....	62
Tabela 4.2 – Tabela de cargas experimentais aplicadas nos elementos considerando os efeitos na face superior do banzo das ligações tipo “KT”.....	68
Tabela 4.3 – Resultados obtidos das cargas experimentais aplicadas nos elementos considerando os efeitos na face superior do banzo.....	73

## **5. Modelagem computacional e comparação dos resultados obtidos..... 74**

Tabela 5.1 - Resultados obtidos dos limites teóricos e das cargas experimentais aplicadas nos elementos considerando os efeitos na face superior do banzo..... 75

Tabela 5.2 - Resultados obtidos por Mendes (2008) dos limites teóricos e das cargas experimentais aplicadas nos elementos considerando os efeitos na face superior do banzo..... 76

Tabela 5.3 - Resultados obtidos pela análise numérica e das cargas experimentais aplicadas nos elementos considerando os efeitos na face superior do banzo das ligações tipo “K”. ..... 87

Tabela 5.4 - Resultados obtidos pela análise numérica e das cargas experimentais aplicadas nos elementos considerando os efeitos na face superior do banzo das ligações tipo “KT”. ..... 92

Tabela 5.5 – Valores das relações geométricas analisadas para as ligações tipo “K” 94

Tabela 5.6 - Comparação entre os resultados numéricos e a carga de projeto das ligações tipo “K”. ..... 97

Tabela 5.7 - Valores das relações geométricas analisadas para as ligações tipo “KT”.100

Tabela 5.8 - Comparação entre os resultados numéricos e a carga de projeto das ligações tipo “KT”. ..... 104

## 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 devido ao cisalhamento na seção transversal do banzo na região do afastamento.

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

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

$N_{Sd}$  - força normal 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 comprimida das ligações

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

$i = 3 \rightarrow$  representa o montante

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

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

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

### c) Letras gregas minúsculas

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

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

$\varepsilon_{ex}$  = deformação resultante externa

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

$\varepsilon_m$  = deformação devido ao efeito membranar.

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

$\varepsilon_{rin}$  = 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 Poison.

$\sigma_{o,sd}$  - máxima tensão de compressão no banzo.

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

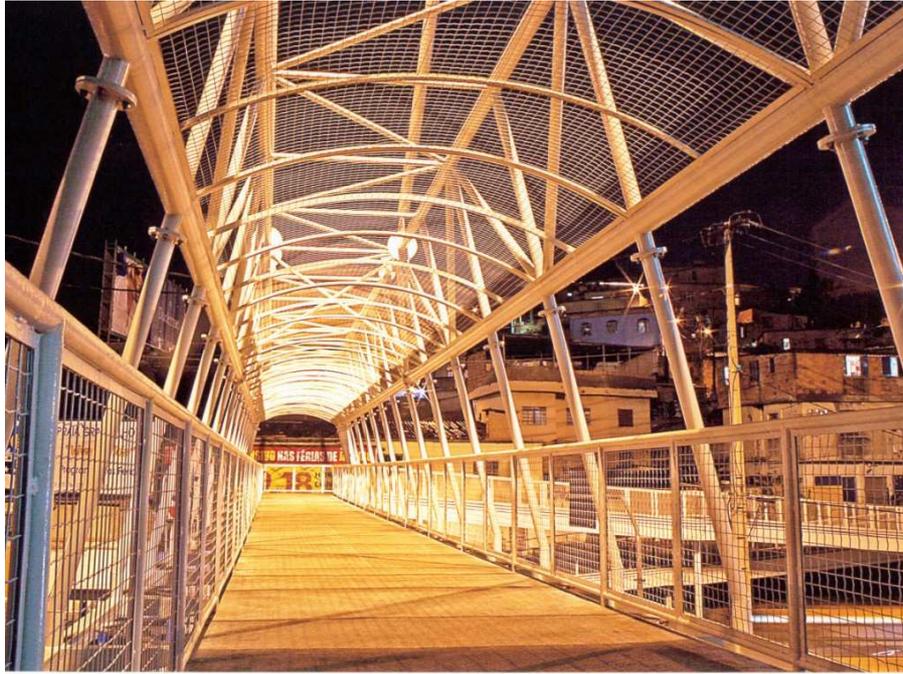
# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Construções com perfis tubulares de aço

Atualmente a construção civil no Brasil tem intensificado o uso de elementos estruturais metálicos associados a diversos fatores como a rapidez de execução. Dentre estes elementos estruturais a sua forma, sua tipologia e seção estão associadas ao tipo de aplicação, estética, condição de uso, etc.

Dentre as diversas tipologias envolvendo a fabricação e forma das seções transversais dos perfis estruturais tem-se os perfis tubulares, largamente utilizados em diversos países. Na Figura 1.1. tem-se um exemplo da utilização desse perfil, objeto deste trabalho.



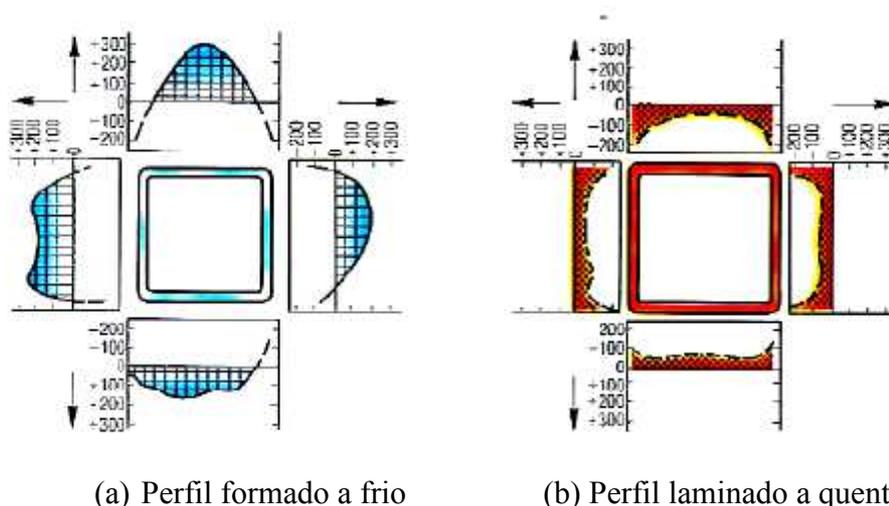
**Figura 1.1– Passarela em perfil tubular. (Vallourec & Mannesman Tubes)**

No Brasil, a utilização deste tipo de perfil na construção metálica apresenta-se em crescimento acelerado devido às vantagens, como por exemplo, alta resistência a torção, cargas axiais e aos efeitos combinados. Associado às vantagens, encontram-se os aspectos de arrojo e modernidade que propiciam diversidades de projetos. Os perfis tubulares podem ser usados como estruturas mistas (tubos preenchidos com concreto), ganhando resistência adicional aos esforços de compressão e melhor proteção contra o fogo; possuem menor área se comparadas às seções abertas, o que conduz a menores custos de pintura, proteção ao fogo etc., facilitando assim os serviços de manutenção e minimizando seus custos. (Coleção técnica – científica V&M do Brasil. Tubos Estruturais, Seção Circular, Quadrada e Retangular).

Os tubos de aço podem ser classificados em função de seu processo de fabricação. Os tubos sem costura são produzidos por processo de laminação a quente, a partir de um bloco maciço de seção circular de aço que é laminado e perfurado, obtendo-se, dessa maneira, suas dimensões finais. São resfriados em leito de resfriamento até temperatura ambiente e, por possuírem distribuição de massa uniforme em torno de seu centro, mantém temperatura praticamente constante ao longo de todo o seu comprimento e em qualquer ponto de sua seção transversal. Isso os distingue de tubos de aço com costura, produzidos a partir de chapas de aço calandradas e “costuradas”, soldadas no encontro

das mesmas. A região afetada termicamente pelo processo de soldagem possui nível de tensões residuais diferente das demais regiões da seção transversal do tubo, também tensionadas devido ao processo de calandragem e expansão. Assim, nos tubos sem costura a distribuição de tensões residuais é mais uniforme, conduzindo a um melhor desempenho do aço em seu emprego estrutural. (Araújo et al, 2001)

Os tubos de seção retangular sem costura podem ser produzidos por um processo de laminação a quente, ou a partir de tubo circular por conformação a frio, à temperatura ambiente. Esta conformação a frio gera diferente espectro das tensões residuais quando comparadas àquelas produzidas por conformação a quente. A Figura 1.2 apresenta a distribuição de tensões residuais, em  $N/mm^2$ , em dois perfis retangulares, um formado a frio de dimensões “160 x 160 x 6 mm” e um laminado a quente de “180 x 180 x 6,3 mm”. (apud Mendanha, 2006)



**Figura 1.2- Distribuição de tensões residuais em perfis retangulares.**  
(apud Mendanha, 2006)

Os perfis tubulares geralmente são aplicados em elementos estruturais, como colunas, treliças planas, espaciais etc. As treliças planas constituídas de perfis tubulares são estruturas leves e relativamente simples de serem projetadas, podendo ser formadas por perfis tubulares de seções transversais retangulares e circulares, como ilustrado na Figura 1.3, sendo suas ligações parafusadas ou soldadas. Já as treliças espaciais são constituídas de três a quatro banzos, como mostrado na Figura 1.4, possuem elevada estabilidade lateral em relação às treliças planas, o que geralmente tornam desnecessárias medidas adicionais para garantir a sua estabilidade quanto à flambagem lateral, podendo também ser usadas para vencer grandes vãos.

Neste trabalho, serão estudadas algumas tipologias de ligações utilizadas em treliças planas.



**Figura 1.3– Treliça plana - Estádio João Havelange “Engenhão”, Rio de Janeiro/Brasil.  
Fonte: Disponível em < <http://diariodorio.com/fotos-do-engenhao-a-noite> >.  
Acesso em: 20 abr. 2010**



**Figura 1.4– Treliça espacial - Aeroporto de Hamburgo, Alemanha.  
(Imagination & Inspiração, Coletânea de Estruturas Tubulares, 2009)**

## 1.2. Treliças planas

As treliças planas apresentam em suas barras os esforços de tração e compressão e constituem um sistema estrutural muito econômico e com capacidade de vencer grandes vãos.

Dependendo das necessidades construtivas, diferentes tipos de ligações podem ser utilizados nesse sistema estrutural, resultando no tipo de treliça a ser usada. A escolha do tipo da ligação depende de vários fatores, tais como: arquitetônicos, facilidade de fabricação, vão livre a ser vencido, entre outros. Há ainda a possibilidade de utilizar banzos em seções tubulares circulares ou retangulares associados com diagonais e montantes com perfis retangulares ou circulares. As ligações podem ser do tipo “T”, “K” e “KT” com afastamento (Figura 1.5) e com sobreposição (Figura 1.6).

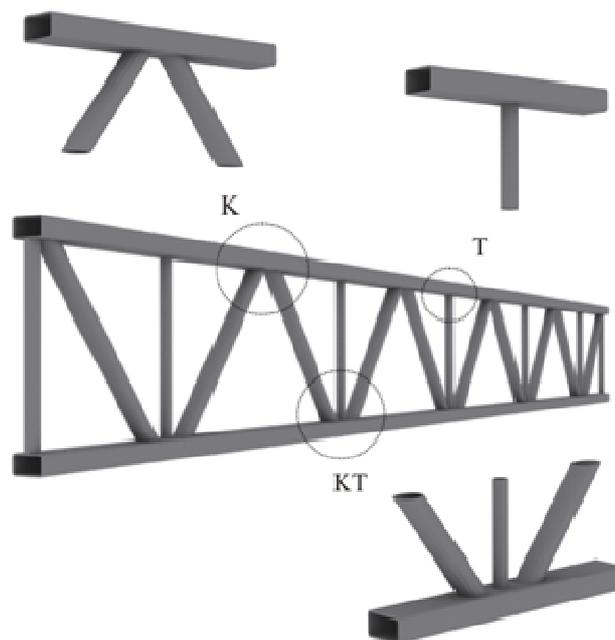
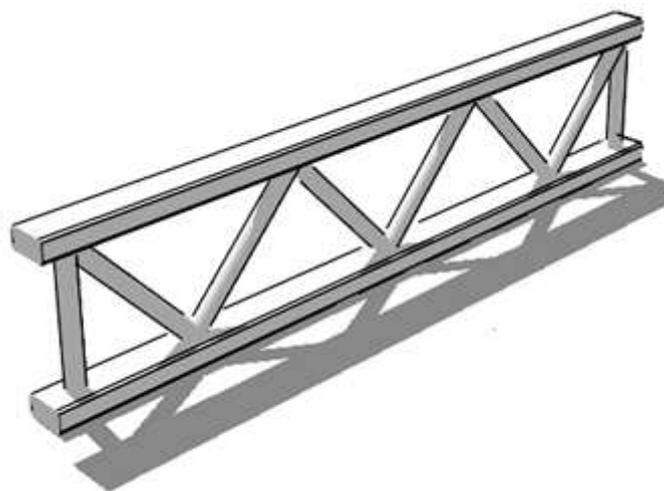


Figura 1.5 – Treliça apresentando as ligações do tipo “K”, “KT” e “T” com afastamento. (Mendes, 2008).



**Figura 1.6– Treliça apresentado as ligações do tipo “K” com sobreposição.**

Neste trabalho, realizou-se um estudo de ligações de treliças planas, composta por perfis tubulares circulares nas diagonais e montantes e retangulares no banzo, sendo a abordagem em ligações soldadas tipo “K” com afastamento e “KT”. Destaca-se que os perfis retangulares nos banzos possibilitam a fixação de conectores de cisalhamento e a utilização destas treliças como treliças mistas de piso.

### **1.3. Objetivo**

O objetivo deste estudo é a avaliação teórica e experimental de ligações soldadas do tipo “K” e “KT” com afastamentos, formadas por perfis tubulares em aço, sem costura, com seção transversal retangular no banzo e circular nos demais membros. Assim, este projeto aborda um estudo teórico a partir de prescrições de normas, ensaios em laboratório de ligações do tipo “K” e “KT”, com configurações diferentes daquelas ensaiadas em trabalhos anteriores. E a partir dos resultados obtidos experimentalmente é realizada a análise e calibração de modelos numéricos através do software Ansys 11.0.

### **1.4. Justificativa**

Em ensaios anteriores, realizados no Laboratório de Estruturas “Prof. Altamiro Tibiriçá Dias” do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto [Freitas (2006), Mendes (2008)], os resultados obtidos para as

ligações do tipo “KT” não foram conclusivos, demonstrando inclusive que nessas ligações a carga de projeto calculada pelo Eurocode 3 (2005) foi maior que a carga de escoamento experimental. Observa-se que essa dispersão pode estar associada à excentricidade da ligação, à pequena altura do banzo em relação à largura do mesmo, pelo afastamento das diagonais ou aos efeitos oriundos da carga aplicada no montante ter sido elevado em relação às cargas dos diagonais.

A partir desses resultados, verifica-se a necessidade de realizar mais estudos teóricos e experimentais destas ligações, variando alguns parâmetros geométricos de modo a avaliar as prescrições existentes e propor novas soluções.

### **1.5. Revisão Bibliográfica**

Nos últimos anos, vêm sendo desenvolvidas pesquisas de caráter experimental, numérica e analítica sobre os vários tipos de ligações soldadas, com perfis tubulares [Choo et al. (2004), Liu e Wardenier (2006), Lee & Wilmshurst, (1995), Lima et al. (2005), Koteski et al. (2003), Fleischer e Puthli (2006), Packer & Henderson (2007), Vegte e Makino (2006)]. A seguir, tem-se uma síntese dos principais trabalhos desenvolvidos recentemente nesta área, por alguns pesquisadores.

**Lee e Wilmshurst (1995)** desenvolveram uma análise numérica sobre ligações tubulares multiplanares do tipo duplo “K” com seção circular, estabelecendo um modelo de elementos finitos que considera vários parâmetros e a investigação de alguns fatores, como a geometria da solda, condições de contorno da extremidade do banzo e das diagonais, modo de carregamento, comprimento do banzo e propriedades dos materiais. O modelo foi rigorosamente calibrado com os dados obtidos dos modelos experimentais. A análise numérica foi realizada usando elemento finito de casca de 4 e 6 nós, com diferenças no carregamento último dos modelos.

**Davies e Crockett (1996)** apresentaram alguns diagramas de interações para esforços de ligações tipo “T” com seções tubulares circulares com carregamento estático nos membros, obtidos por modelos de elementos finitos calibrados e dados experimentais.

CIDECT (1996), Eurocode 3 (2005) e Rautaruuki (1998) apresentam formulações e restrições para o dimensionamento de ligações em treliças formadas por perfis tubulares com diferentes configurações, baseando a resistência última em vários modos de falha da ligação.

Saidani (1998) analisou os efeitos de excentricidades em ligações do tipo “K” em três modelos diferentes, Figuras 1.7 e 1.8. Uma com a ligação totalmente enrijecida, outra 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, concluiu-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. (Mendes, 2008)

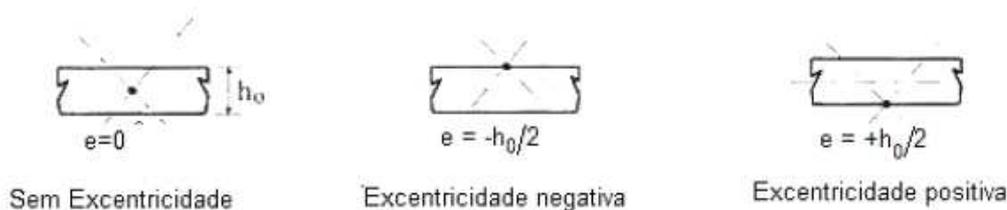


Figura 1.7– Excentricidades analisadas por Saidani (1998).

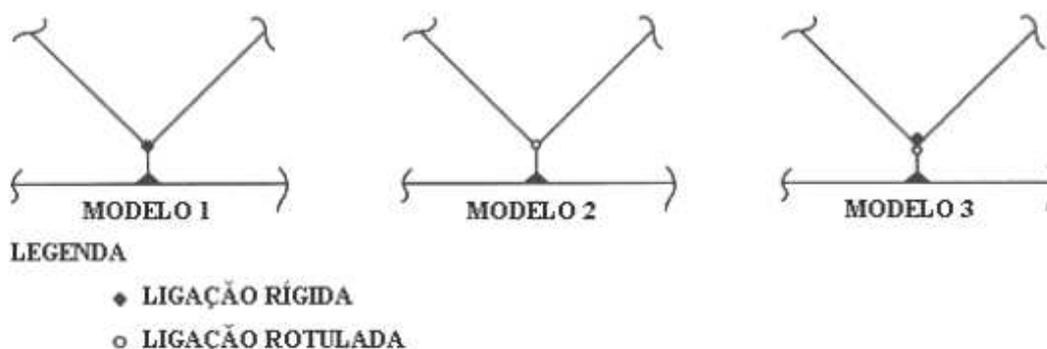


Figura 1.8– Modelos analisadas por Saidani (1998).

**Santos (2003)** apresentou uma análise das ligações em barras tubulares de estruturas metálicas planas, baseada na avaliação do comportamento destas ligações através 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. As barras envolvidas nestas ligações também sofrem a influência de esforços adicionais provocados por excentricidades. 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 à 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 (2006)**, 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 levados 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.

**Mendanha (2006)** apresentou um estudo de ligações soldadas dos tipos “K” e “KT” com afastamento, formadas por perfis tubulares de aço estrutural, sem costura, de seção transversal retangular no banzo e circular para as diagonais e montantes. O trabalho

envolveu um estudo teórico a partir de prescrições de norma, e a geração, análise e calibração de modelos numéricos em elementos finitos, utilizando o software Ansys 9.0, sendo analisados diversos modelos com elementos de casca, avaliando a influência do raio de dobramento e algumas alternativas de modelagem de solda, para uma boa representação das ligações soldadas já ensaiadas.

**Sopha, Chiew e Wardenier (2006)** fizeram uma investigação experimental e ensaios em três protótipos de ligações “K” com sobreposição, 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 “sobreposição” de 50% e 100%, onde  $\beta$  é a relação entre os diâmetros dos elementos e o diâmetro do banzo e  $\gamma$  a razão entre o diâmetro do banzo e o dobro de sua espessura. 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 sobreposição, em perfis tubulares retangulares, verificar também falhas devido ao cisalhamento da diagonal sobreposta.

**Freitas, Mendes e Freitas (2008)** apresentaram um estudo teórico – experimental de ligações soldadas tipo “T”, formadas por perfis tubulares estruturais de aço, com seções retangulares no banzo e circulares no montante. A análise teórica foi feita de acordo com as prescrições da Eurocode 3 (2005), conforme a configuração da ligação. Pelos ensaios experimentais, eles analisaram o comportamento da ligação, a carga última e o modo de falha. A análise numérica em elementos finitos envolveu a análise, geração e calibração de modelos numéricos, com a utilização do software ANSYS 11.0, onde foram desenvolvidos vários modelos com diferentes características, com o objetivo de obter um modelo semelhante ao modelo real.

**Mendes (2008)** apresentou um estudo em ligações soldadas tipo “K”, “KT e “T” com afastamento, formadas por perfis tubulares estruturais de aço sem costura, com seção transversal retangular no banzo e circular nos demais membros. Neste estudo, foram desenvolvidos 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 realizadas a partir das prescrições de norma e as análises numéricas em elementos finitos envolveram a geração, análise e calibração, a partir dos resultados obtidos nos ensaios experimentais. Os resultados experimentais indicaram que a relação entre as cargas experimentais e as de projeto, obtida pela Eurocode 3, para ligação tipo “T”, possui boa correlação sendo que o mesmo não foi verificado para as ligações tipo “K” e “KT”. Dos resultados numéricos seguiram as mesmas tendências, com bons resultados para as ligações tipo “T” e o mesmo não ocorrendo para as ligações “K” e “KT”, em comparação com os resultados experimentais.

**Moazed R., Szyszkowski W., Fotouhi R. (2009)** apresentaram um estudo numérico para modelar estruturas constituídas de ligações tipo “T” formadas por perfis tubulares estruturais de aço, com seções transversais quadradas no montante e banzo. Neste artigo, é feita uma análise para modelar a ligação como elemento de barra a partir da utilização de alguns parâmetros, obtendo assim, resultados similares aos modelos feitos com elementos finitos de casca e sólido.

**2. DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE DA TIPOLOGIA DAS LIGAÇÕES TIPO “K” E “KT”**

**2.1. Tipos de ligações**

Dependendo da necessidade e do tipo da construção diferentes configurações das ligações soldadas podem ser montadas, como por exemplo, as ligações do tipo “K” e “KT” (Figura 2.1). As ligações também podem ser distinguidas em função da posição das diagonais em: com afastamento (Figura 2.2 (a)) e com sobreposição (Figura 2.2 (b)). Nas ligações com afastamento a distância entre os elementos é indicada pela letra “g”.

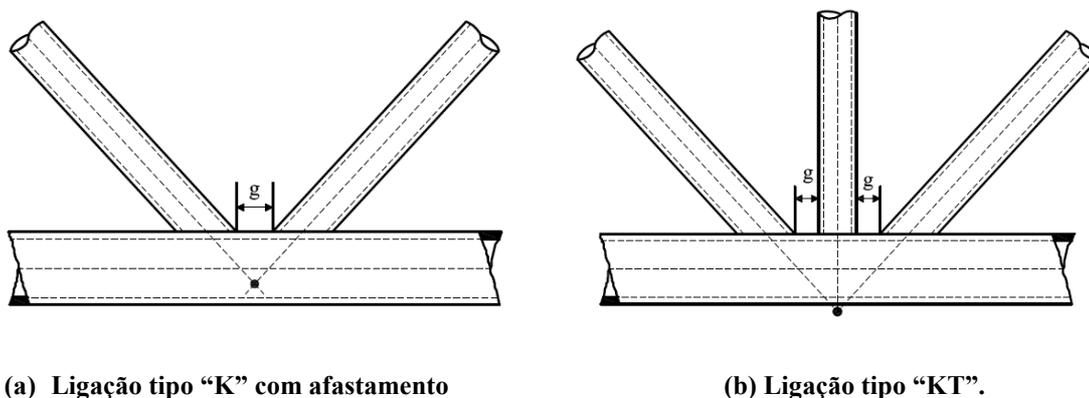


Figura 2.1 – Ligações dos tipos “K” e “KT” com afastamento.

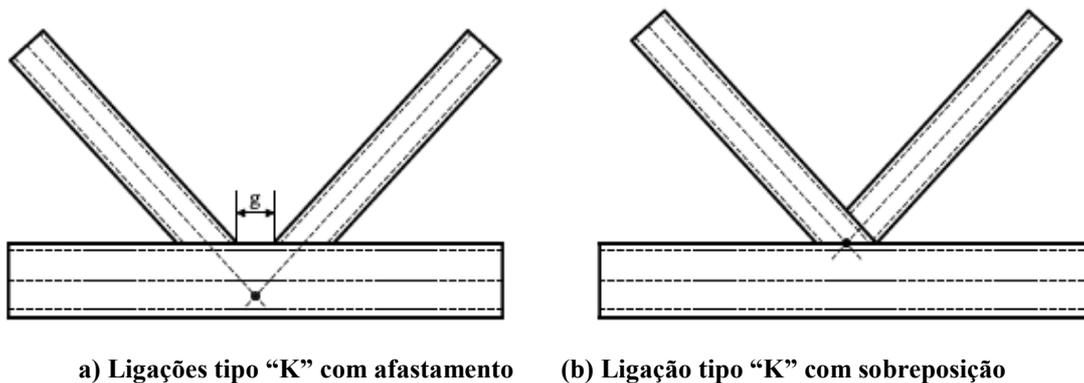


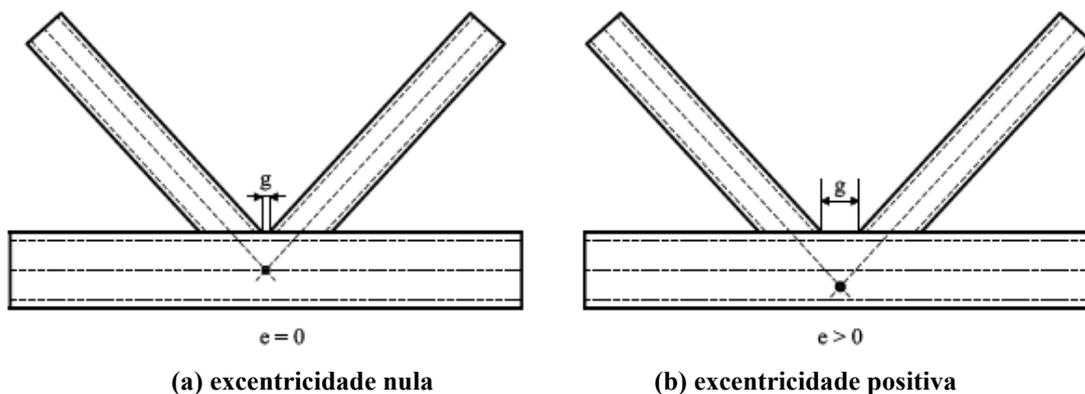
Figura 2.2 – Tipos de ligações em relação à posição das diagonais.

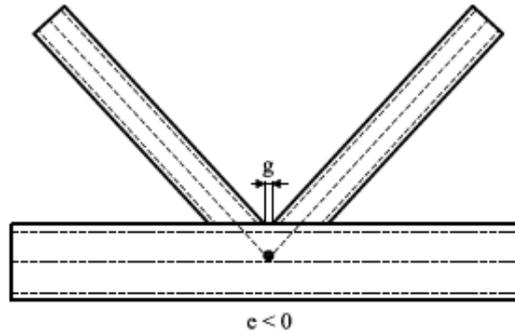
Neste trabalho, é feita a avaliação teórica e experimental das ligações soldadas do tipo “K” e “KT” com afastamento, formadas por perfis tubulares em aço, sem costura, com seção transversal retangular no banzo e circular nos demais membros.

## 2.2. Excentricidade e afastamento das diagonais

No caso da ligação com afastamento a excentricidade, denominada por “e” pode ser classificada como positiva, nula ou negativa. Ela é positiva quando o ponto de interseção das linhas médias das diagonais estiver abaixo da linha média do banzo, já a excentricidade negativa ocorre quando esse ponto for acima da linha média do banzo, e neutra quando estiver em cima da linha média.

Na Figura 2.3 estão representadas as excentricidades nula, positiva e negativa nas ligações tipo “K” com afastamento, e seus respectivos afastamentos das diagonais, denominados “g”.





(c) Excentricidade negativa

Figura 2.3 – Ligação “K” com afastamento.

As excentricidades “e” das ligações tipo “K” com afastamento e “KT” podem ser calculadas da seguinte maneira:

$$e = \left( \frac{d_1}{2\sin\theta_1} + \frac{d_2}{2\sin\theta_2} + g \right) \frac{\sin\theta_1 \cdot \sin\theta_2}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} - \frac{h_0}{2} \quad (2.1)$$

Onde

$d_1, d_2$  = diâmetro das diagonais 1 e 2, respectivamente;

$\theta_1$  e  $\theta_2$  = ângulo entre o banzo e as diagonais 1 e 2, respectivamente;

$h_0$  = altura do banzo.

Se for verificada a existência de excentricidade na ligação ocorrerá o surgimento do momento fletor que é transmitido para as peças da ligação. Contudo, o momento fletor pode ser desprezado se estiver dentro dos limites estabelecidos pelas prescrições do Eurocode 3 (2005) e o CIDECT (1996), como mostrado nas equações 2.2 para banzos circulares e 2.3 para banzos retangulares.

$$-0,55d_0 \leq e \leq 0,25d_0 \quad (2.2)$$

$$-0,55h_0 \leq e \leq 0,25h_0 \quad (2.3)$$

Após a verificação da excentricidade, se este valor não estiver dentro do limite citado anteriormente é necessário fazer a distribuição de momento gerando por “e” entre os elementos que compõem a ligação de acordo com a razão entre a inércia do perfil considerado ”I” e o comprimento do membro ”L”, conforme apresentado no capítulo 5.

O afastamento das diagonais das ligações tipo “K” pode ser calculado pela equação 2.4, segundo o CIDECT (1996), sendo que os valores negativos do afastamento das diagonais, “g”, correspondem às ligações com sobreposição e positivos para as ligações com afastamento.

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

O Eurocode 3 (2005) e o CIDECT (1996) apresentam limites para o afastamento das diagonais, representados pelas seguintes equações:

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

Onde:

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

$$\beta = \frac{d_1 + d_2}{2b_0} \quad (2.7)$$

E RAUTARUKI (1998) apresenta mais um limite para o afastamento, no qual leva em consideração o “g<sub>a</sub>” que é o afastamento “g” menos duas vezes a espessura da solda, como representado na equação 2.8.

$$\frac{g_a}{t_0} \geq 1,5 \quad (2.8)$$

### 2.3. Modos de Falha

Algumas pesquisas experimentais em ligações soldadas já estudadas têm apresentado os diferentes modos de falha, indicados a seguir como modo A a modo F. Estes modos dependem da sollicitação e da tipologia da seção transversal. Na Figura 2.4 tem-se, por exemplo, os modos de falha em ligações com perfis tubulares retangulares.

- **Modo A:** Plastificação da face ou de toda a seção transversal do banzo junto com as diagonais ou montantes;
- **Modo B:** Plastificação, amassamento ou instabilidade da face lateral da seção transversal do banzo junto às diagonais ou montantes sobre compressão;
- **Modo C:** Plastificação ou instabilidade por cisalhamento do banzo junto a diagonais ou montantes;
- **Modo D:** Ruptura por punção da parede do banzo na área de contato com as diagonais ou montantes;
- **Modo E:** Ruptura por concentração de tensão de diagonais ou montantes na região da solda ou da própria solda;
- **Modo F:** Flambagem localizada de diagonais ou montantes comprimidos ou do banzo, na região da ligação.

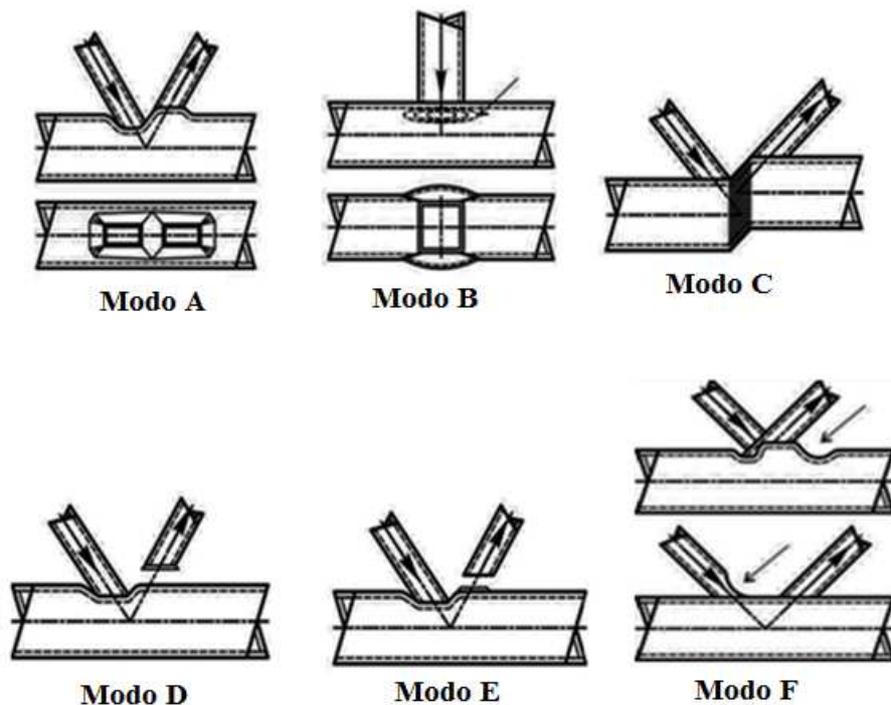


Figura 2.4 – Mecanismos de falha devido à força axial de perfis tubulares retangulares. (Eurocode 3, 2005).

#### 2.4. Dimensionamento das ligações soldadas tipo “K” e “KT”

O dimensionamento das ligações soldadas tipo “K” e “KT” com afastamento aqui apresentado é baseado nos dados obtidos pelo Eurocode 3 (2005) e pelo CIDECT (1996), cujo o Método dos Estados Limites Últimos, representado a seguir, é comumente utilizado.

$$S_d \leq R_d \quad (2.9)$$

$$\sum \gamma_s F \leq \frac{R}{\gamma_M} \quad (2.10)$$

Onde

$$S_d = F \times \gamma_s \quad (2.11)$$

$$R_d = \frac{R}{\gamma_M} \quad (2.12)$$

$R_d$  = Resistência de projeto da ligação;

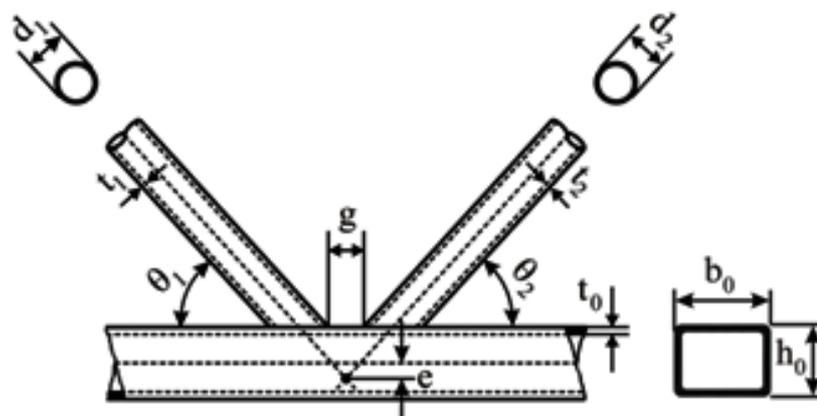
$S_d$  = Esforços solicitantes;

$F$  = Forças aplicadas;

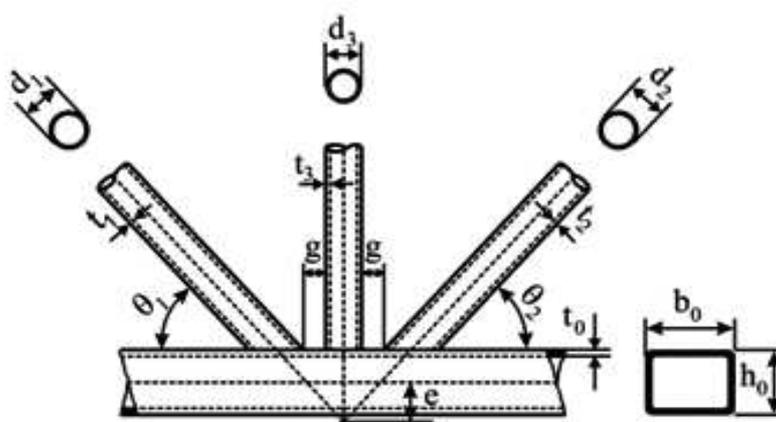
$R$  = Resistência da ligação;

$\gamma_s, \gamma_M$  = Coeficiente de segurança.

Para melhor entendimento deste item a Figura 2.5 apresenta todos os parâmetros geométricos das ligações tipo “K” e “KT” com afastamento, respectivamente.



(a) Ligação do tipo “K” com afastamento.



(b) Ligação do tipo “KT”.

Figura 2.5 – Parâmetros geométricos da ligação tipo “K” e “KT” com afastamento.

Onde:

$b_0$  = largura do banzo

$h_0$  = altura do banzo

$t_0$  = espessura da chapa que constitui o banzo

$d_1, d_2, d_3$  = diâmetro das diagonais 1 e 2 e diâmetro do montante 3, respectivamente

$t_1, t_2, t_3$  = espessura da chapa que constitui as diagonais 1 e 2 e o montante 3, respectivamente

$\theta$  = 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.

#### 2.4.1. Parâmetros utilizados pela Eurocode 3 (2005):

A seguir, estão descritos os parâmetros utilizados no procedimento de dimensionamento das ligações soldadas tipo “K” e “KT” com afastamento e perfis tubulares retangulares no banzo e carregamento no plano da ligação, segundo as prescrições da Eurocode 3 (2005), sendo a resistência de escoamento da ligação determinada segundo os critérios de rupturas.

$$n = \frac{\sigma_{0,Sd}}{f_y/\gamma_M} \quad (2.13)$$

$$\sigma_{0,Sd} = \frac{N_{0,Sd}}{A_0} + \frac{M_{0,Sd}}{W_0} \quad (2.14)$$

$$\gamma = \frac{b_0}{2t_0} \quad (2.15)$$

$$\eta = \frac{d_i}{b_0} \quad (i = 1 \text{ ou } 2) \quad (2.16)$$

Onde:

$f_y$  = tensão de escoamento do material;

$\gamma_M$  = coeficiente de resistência igual a 1,0;

$\sigma_{0,Sd}$  = máxima tensão de compressão de cálculo no banzo na superfície de contato com as diagonais ou montantes;

$N_{0,Sd}$  = máxima força axial solicitante de cálculo no banzo;

$M_{0,Sd}$  = momento fletor de cálculo da ligação;

$A_0$  = área da seção transversal do banzo;

$W_0$  = módulo de resistência elástico da seção transversal do banzo.

#### 2.4.2. Limitações:

Além das limitações já citadas acima em relação ao afastamento e à excentricidade, a formulação para o cálculo da resistência da ligação segundo o Eurocode 3 (2005) é válida segundo algumas características físicas e geométricas das ligações, que são:

A tensão de escoamento do aço usado na composição da peça não pode exceder 460N/mm<sup>2</sup>;

- A espessura da chapa não pode ser inferior a 2,5mm ou superior a 25 mm;
- As peças que compõem a ligação não deverão ter inércia variável;
- O ângulo entre o banzo e as diagonais não pode ser inferior a 30°.

Considerando a geometria das peças que compõem uma ligação “K” e “N” com afastamento, as limitações são representadas através das relações abaixo, considerando banzos em perfis tubulares retangulares e as diagonais e montantes em perfis tubulares circulares ou retangulares.

$$0,5 \leq \frac{h_0}{b_0} \leq 2,0 \quad (\text{para tração e compressão}) \quad (2.17)$$

$$\frac{b_0}{t_0} \leq 35 \quad (\text{para tração e compressão}) \quad (2.18)$$

$$\frac{h_0}{t_0} \leq 35 \quad (\text{para tração e compressão}) \quad (2.19)$$

$$\frac{d_i}{t_i} \leq 50 \quad (i = 1 \text{ ou } 2 \text{ para tração}) \quad (2.20)$$

$$0,4 \leq \frac{d_i}{b_0} \leq 0,8 \quad (i = 1 \text{ ou } 2 \text{ para tração e compressão}) \quad (2.21)$$

Com relação aos limites relacionados com o material, segundo o Eurocode 3(2005), tem-se:

$$\frac{b_0}{t_0} \leq 1,27 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (\text{para tração e compressão}) \quad (2.22)$$

$$\frac{h_0}{t_0} \leq 1,27 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (\text{para tração e compressão}) \quad (2.23)$$

$$\frac{d_i}{t_i} \leq 0,06 \cdot \frac{E}{f_y} \quad (i = 1 \text{ ou } 2 \text{ para compressão}) \quad (2.24)$$

## 2.5. Verificação da resistência da ligação

A resistência de projeto de uma ligação deve ser tomada como o valor mínimo calculado para todos os critérios de modo de falha relacionados a seguir.

Nos Anexos A e B estão apresentados exemplo da automação das verificações das resistências das ligações tipo “K” e “KT”, respectivamente, realizadas com o auxílio do software Mathcad 14.0 (2007).

### 2.5.1. Ligação soldada tipo “K” com afastamento, formadas por perfis com seção transversal retangular no banzo e circular nos demais membros.

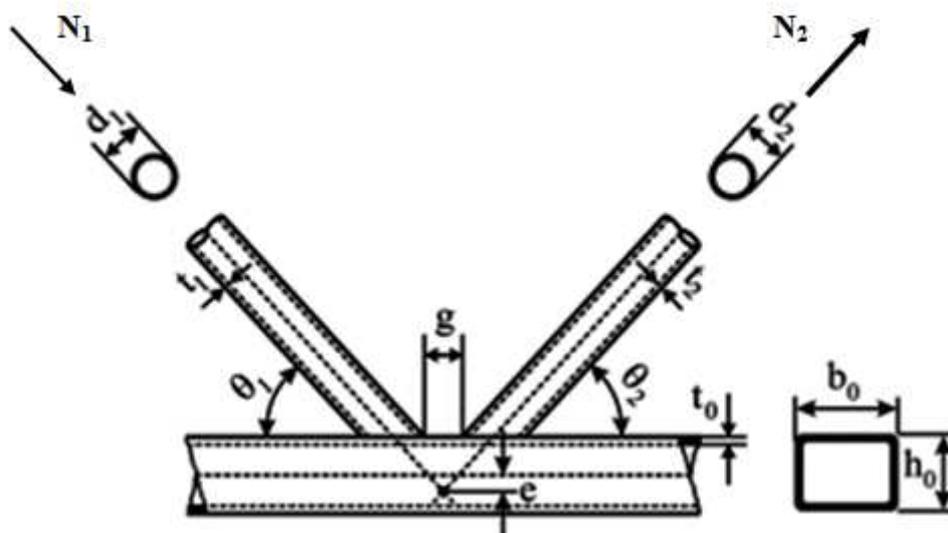


Figura 2.6 - Ligação do tipo “K” com afastamento.

**a) Verificação quanto à plastificação da face ou de toda a seção transversal do banzo, junto com as diagonais e montantes (Modo A).**

$$N_{i,Rd} = \frac{8,9\pi K_n f_{y0} t_0^2 \sqrt{\gamma}}{4 \sin \theta_i} \left( \frac{d_1 + d_2}{2b_0} \right) \quad (i = 1 \text{ ou } 2) \quad (2.25)$$

Onde  $N_{i,Rd}$  é a carga aplicada nas diagonais necessária para ocorrer o escoamento do banzo.

Sendo o parâmetro “ $K_n$ ” representado pela equação 2.26 se  $n > 0$  e pela equação 2.27 se  $n \leq 0$ , relacionando respectivamente à compressão e à tração no banzo.

$$K_n = 1,3 - \frac{0,4}{\beta} n \leq 1,0 \quad (2.26)$$

$$K_n = 1,0 \quad (2.27)$$

**b) Verificação quanto à plastificação ou instabilidade por cisalhamento do banzo, junto a diagonais ou montantes (Modo C).**

$$N_{i,Rd} = \frac{f_{y0} A_v}{\sqrt{3} \sin \theta_i} \quad (i = 1 \text{ ou } 2) \quad (2.28)$$

$$N_{0,Rd} = \frac{\pi}{4} \left[ (A_0 - A_v) f_{y0} + A_v f_{y0} \sqrt{1 - \left( \frac{V_{Sd}}{V_{pl,Rd}} \right)^2} \right] \quad (2.29)$$

$$A_v = (2h_0 + \alpha b_0) t_0 \quad (2.30)$$

$\alpha = 0$  para diagonais com perfis circulares

Sendo:

$A_0$  = área transversal do banzo;

$A = 0$  para diagonais/montantes circulares;

$V_{sd}$  = esforço cortante solicitante;

$V_{pl,Rd}$  = resistência plástica ao cortante de cálculo.

**c) Verificação quanto à ruptura por concentração de tensão nas diagonais ou montantes na região da solda ou da própria solda. (Modo E)**

$$N_{i,Rd} = \frac{\pi f_{yi} t_i}{4} (2d_i - 4t_i + d_i + b_{eff}) \quad (i = 1 \text{ ou } 2) \quad (2.31)$$

Onde:

$$b_{eff} = \frac{10f_{y0}t_0^2d_i}{b_0f_{yi}t_i} \leq d_i \quad (i = 1 \text{ ou } 2) \quad (2.32)$$

**d) Verificação quanto à Ruptura por punção da parede do banzo na área de contato com as diagonais ou montantes; (Modo D)**

$$N_{i,Rd} = \frac{\pi f_{y0}t_0}{4\sqrt{3}\sin\theta_i} \left( \frac{2d_i}{\sin\theta_i} + d_i + b_{e,p} \right) \quad (i = 1 \text{ ou } 2) \quad (2.33)$$

Esta verificação é feita sob a seguinte condição:

$$\beta \leq 1 - \frac{1}{\gamma} \quad (2.34)$$

Sendo:

$$b_{e,p} = \frac{10t_0d_i}{b_0} \text{ e } b_{e,p} \leq d_i \quad (i = 1 \text{ ou } 2) \quad (2.35)$$

**2.5.2. Ligação soldada tipo “KT” formada por perfis com seção transversal retangular no banzo e circular nos demais membros.**

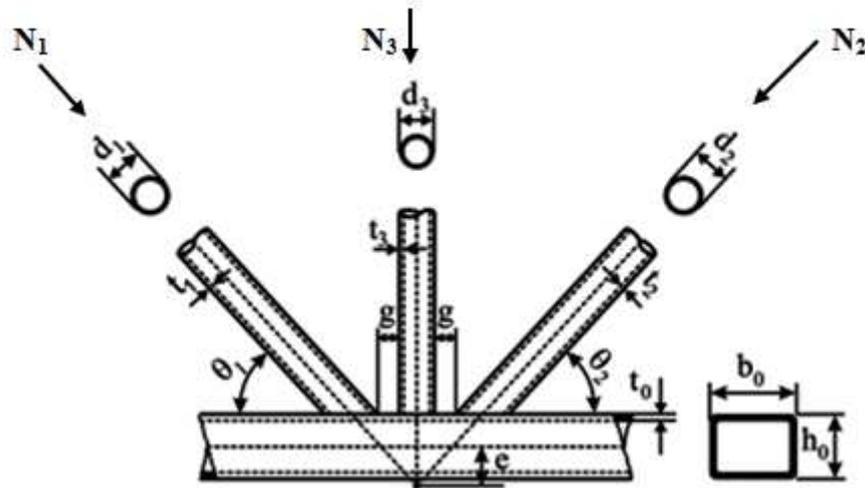


Figura 2.7 – Ligação do tipo “KT”.

$$N_{1,Sd.} \sin \theta_1 + N_{3,Sd.} \sin \theta_3 \leq N_{2,Rd.} \sin \theta_2 \quad (2.36)$$

$$N_{2,Sd.} \sin \theta_2 \leq N_{1,Rd.} \sin \theta_1 \quad (2.37)$$

Onde a resistência  $N_{1,Rd}$  é o valor de  $N_{i,Rd}$  dado anteriormente para a ligação tipo “K” pelas equações 2.25 a 2.35, considerando a diagonal 1, ou seja,  $i = 1,0$  e substituindo nessas equações quando necessário  $(d_1 + d_2 / 2.b_0)$  por  $(d_1 + d_2 + d_3 / 3.b_0)$ .

## 2.6. Análise da tipologia das ligações soldadas tipo “K” e “KT”.

Em ensaios anteriores, realizados no Laboratório de Estruturas “Prof. Altamiro Tibiriçá Dias” do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto [Freitas (2006), Mendes (2008)], os resultados obtidos das ligações do tipo “K” e “KT” não foram conclusivos. Observa-se que esta alteração pode estar associada à excentricidade da ligação, à pequena altura do banzo em relação à largura do mesmo ou pelo afastamento das diagonais. Já para as ligações tipo “KT” esta dispersão pode estar associada também ao efeito da carga aplicada no montante ter sido elevada em relação às diagonais nos ensaios.

A partir desses resultados, verifica-se a necessidade de realizar mais estudos teóricos e experimentais destas ligações, variando alguns parâmetros geométricos das ligações ensaiadas por Mendes (2008), representada pela Tabela 2.1, de modo a avaliar as prescrições existentes e propor novas soluções e limites.

**Tabela 2.1 – Dimensões e peso linear dos perfis utilizados por Mendes (2008).**

<b>Membros</b>	<b>Tipo de perfil</b>	<b>Largura (b<sub>0</sub>) (mm)</b>	<b>Altura (h<sub>0</sub>) (mm)</b>	<b>Diâmetro (d<sub>1,2</sub>) (mm)</b>	<b>Espessura (t<sub>1,2</sub>) (mm)</b>	<b>Peso por metro (kgf/m)</b>
Banzo	Retangular	110	60	-	4,8	11,31
Diagonais	Circular	-	-	60,3	5,5	7,48
Montantes	Circular	-	-	38,1	3,2	2,60

Nos itens a seguir será utilizada para denominar as ligações de Mendes (2008) a seguinte nomenclatura: K01 e K02 para as ligações tipo “K”, e KT01 e KT02 para as ligações tipo “KT”. Os dados do Eurocode 3 (2005) serão representados pela sigla “EC3” e as cargas de escoamento e última experimentais por  $P_y$  e  $P_{últ.}$ , respectivamente.

### **2.6.1. Ligação tipo “K”**

A partir das formulações do Eurocode 3 (2005) apresentadas no item 2.4.3 e com o auxílio do software Mathcad 14.0 (2006) variou-se os diâmetros das diagonais, sendo que a largura do banzo manteve-se constante igual a 110 mm. Essas variações realizadas têm como objetivo a análise e definições de novas ligações para ensaio em laboratório.

Na Figura 2.8, tem-se a relação, para cada um dos sete diâmetros das diagonais variadas, entre a excentricidade e a altura do banzo ( $e/h_0$ ) versus a resistência da ligação. Nessa Figura, também estão representados os valores dos diferentes diâmetros das diagonais, os resultados experimentais dos protótipos “K01” e “K02” para a carga de escoamento,  $P_y$ , e última,  $P_{últ.}$  e os limites do Eurocode 3(2005) da relação  $e/h_0$ , estes representados pelas linhas verticais cheias e tracejadas.

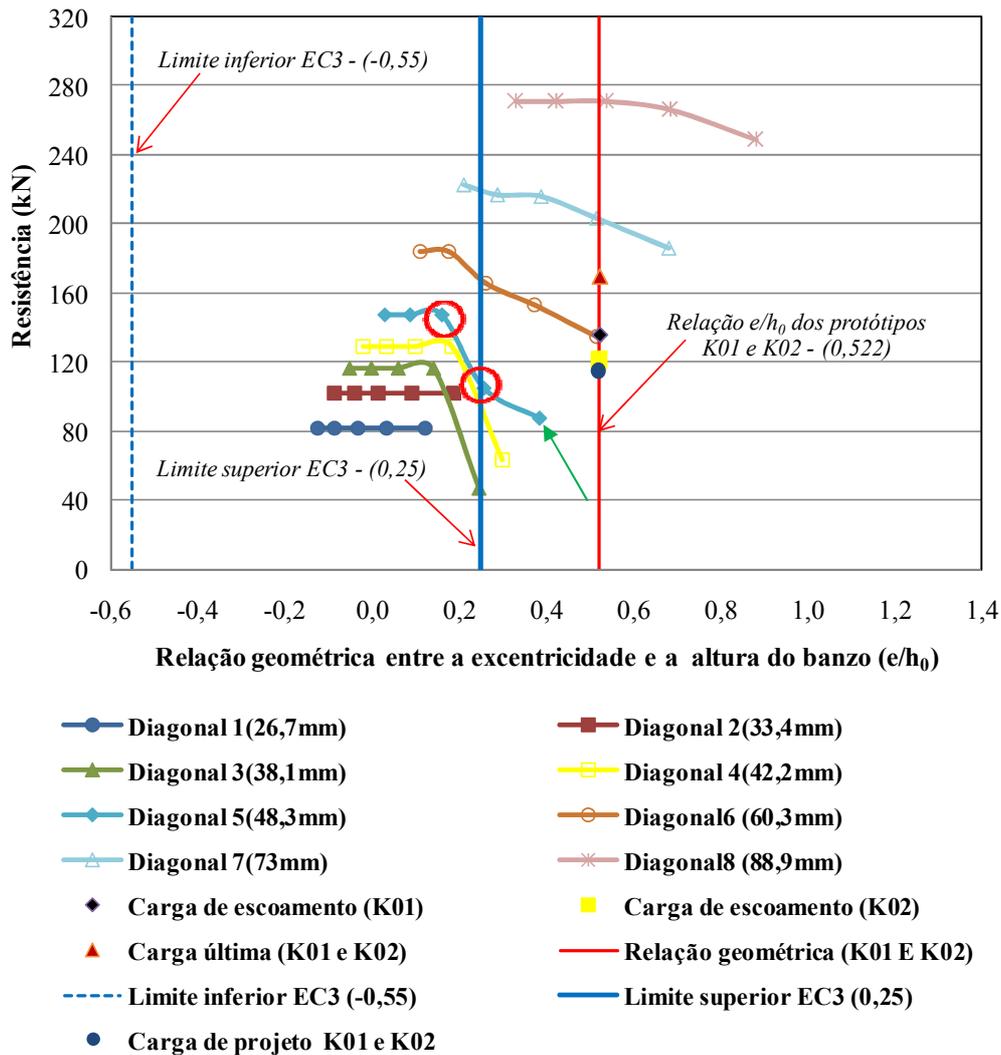


Figura 2.8 - Gráfico da Resistência da ligação tipo “K” versus a relação geométrica entre a excentricidade e a altura do banzo ( $e/h_0$ ).

Observando a Figura 2.8, verifica-se que a relação da excentricidade com a altura do banzo, para alguns casos, está fora do limite prescrito pelo Eurocode 3 (2005), inclusive os protótipo “K01” e “K02”, gerando, assim, momento fletor. Portanto, é necessário fazer a distribuição deste momento entre os elementos que compõem a ligação proporcionalmente aos seus respectivos coeficientes de rigidez relativa  $I/L$ , sendo “I” a inércia do perfil considerado e “L” o comprimento do membro. Em relação à geometria da ligação a ser escolhida para os ensaios deste trabalho, têm-se as seguintes considerações atendendo o Eurocode 3 (2005):

- Manter as mesmas características geométricas do banzo (a altura, a largura e a espessura) e definir a ligação com o diâmetro da diagonal igual a 48,3mm que

apresenta uma excentricidade menor em relação aos protótipos K01 e K02, sendo que, a espessura da diagonal escolhida será em função dos perfis disponíveis no laboratório. Esta opção está representada na Figura 2.8 pela cor azul com o símbolo losango, indicada pela seta verde.

- b) Manter a mesma largura e espessura do banzo e alterar apenas sua altura de 60mm para 70 mm ou 80 mm, utilizando a diagonal com diâmetro de 48,3 mm. Esta opção está representada na Figura 2.8 pela cor azul com o símbolo losango, indicada pelos círculos vermelhos respectivamente.

Observa-se que a opção do item (a) é a mais adequada para este estudo, uma vez que, deixando as características geométricas do banzo constantes, teremos obter uma melhor comparação com os resultados experimentais dos protótipos “K01” e “K02”, que possuem diâmetro das diagonais de 60,3 mm.

A Figura 2.9 mostra a resistência da ligação versus a relação geométrica entre o diâmetro da diagonal e a largura do banzo ( $d/b_0$ ), onde a largura do banzo e os diâmetros das diagonais variaram, descartando os diâmetros de 73 mm e 88,9 mm, devido ao alto valor da excentricidade, e manteve-se a altura do banzo constante. Os limites desta relação, segundo o Eurocode 3 (2005), estão apresentados na figura, bem como os resultados dos protótipos “K01” e “K02” representados pela mesma forma da figura anterior.

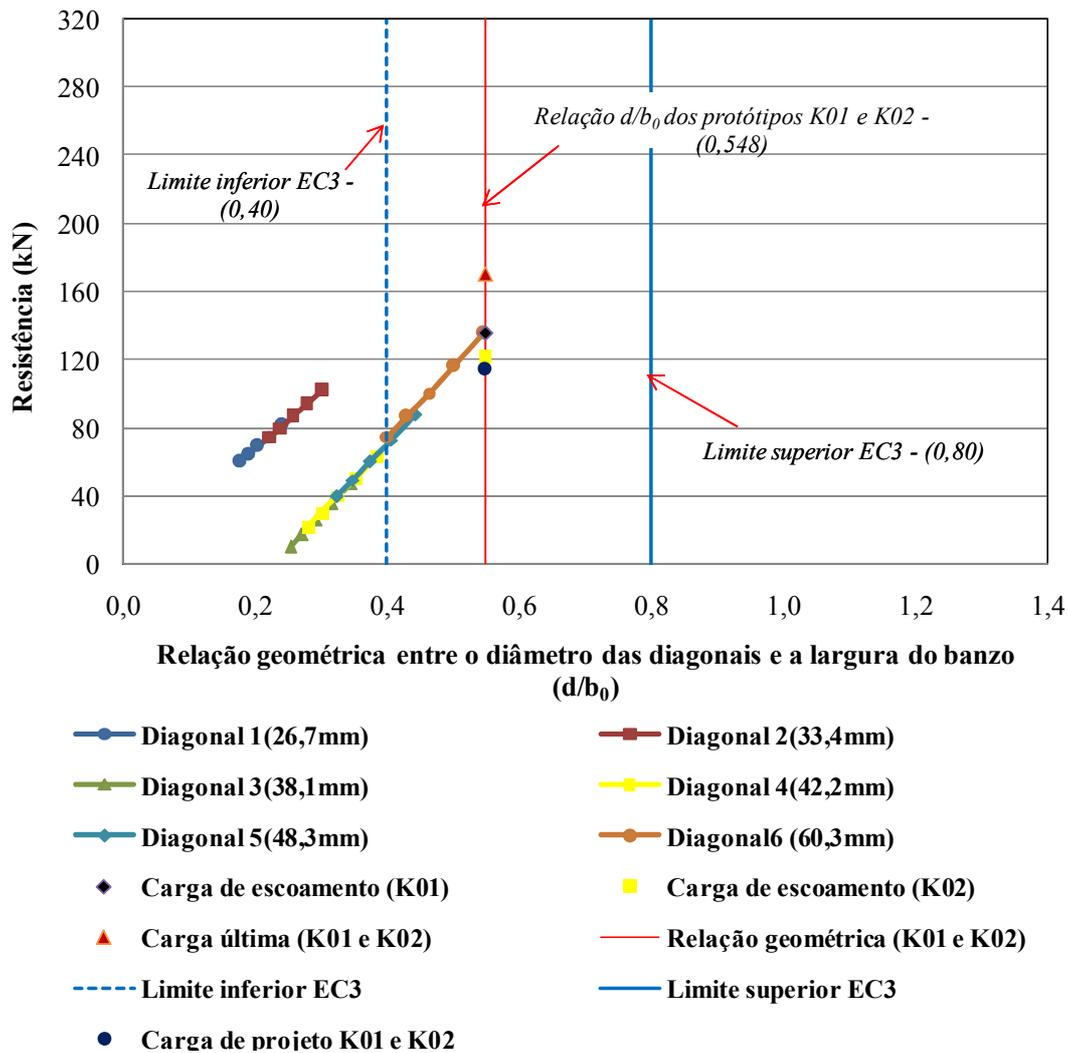


Figura 2.9 - Gráfico da Resistência da ligação tipo “K” versus a relação geométrica entre o diâmetro da diagonal e a largura do banzo ( $d/b_0$ ).

Observa-se pela Figura 2.9 que apenas as diagonais com diâmetro de 60,3mm e 48,3mm estão dentro do limite estabelecido pelo Eurocode 3 (2005), descartando assim, os outros diâmetros das diagonais. Neste caso, mantêm-se a opção do item (a) apresentada anteriormente.

Na Figura 2.10, variou-se o afastamento das diagonais, “g”, e o diâmetro das mesmas, permanecendo constantes as geometrias do banzo (altura: 110 mm, largura: 60 mm e espessura: 4,8 mm). Os limites do Eurocode 3 (2005) também estão representados na Figura 2.10.

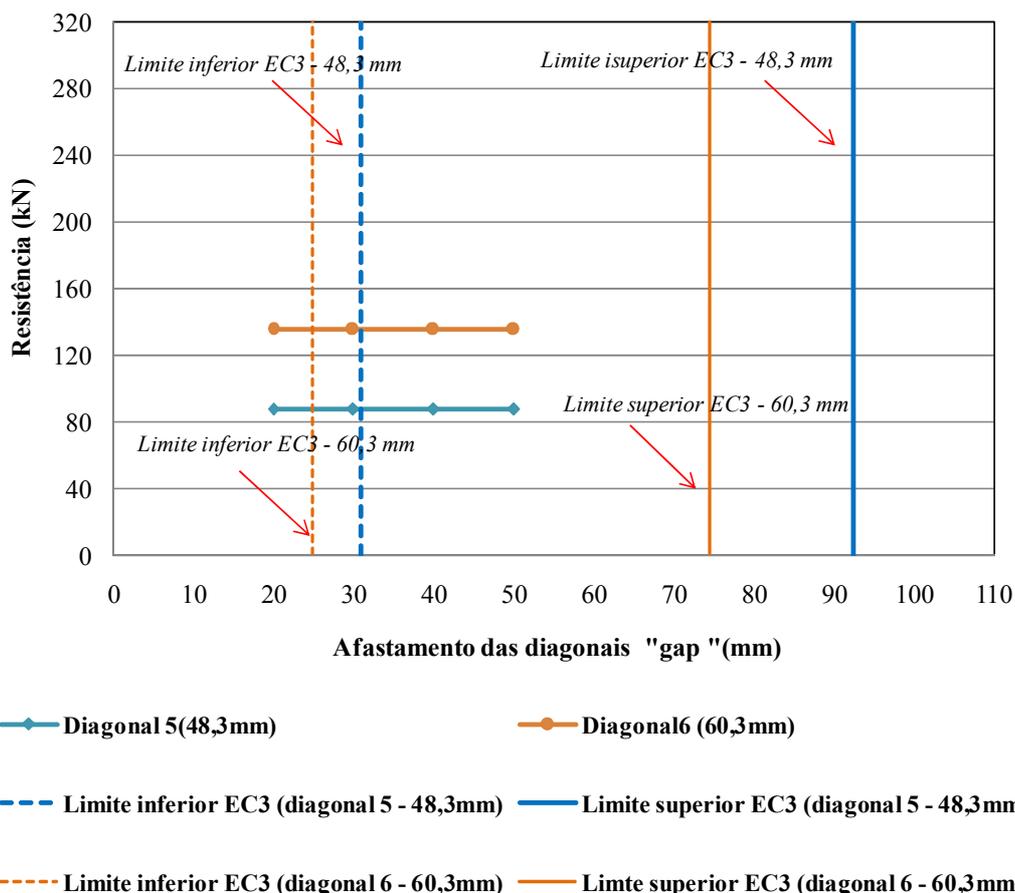


Figura 2.10 – Gráfico da Resistência da ligação tipo “K” versus o afastamento da ligação.

Como o Eurocode 3 (2005) apresenta limites para o afastamento entre as diagonais, deve-se aumentar o afastamento de 30 mm para 32 mm para utilização da opção do item (a). Contudo, mudando o afastamento e deixando as geometrias do banzo e das diagonais constantes, verifica-se que a resistência não será influenciada, no entanto a excentricidade diminuirá.

Portanto, mantém-se a opção do item (a), com o afastamento igual a 32 mm, a excentricidade igual a 23,50 mm e a espessura da diagonal de 3,7 mm. Na Tabela 2.2, têm-se as dimensões finais dos protótipos da ligação tipo “K” a serem ensaiadas.

Tabela 2. 2 – Tipologia da ligação tipo “K”.

Membros	Largura ( $b_0$ ) (mm)	Altura ( $h_0$ ) (mm)	Diâmetro ( $d_{1,2}$ ) (mm)	Espessura ( $t_{1,2}$ ) (mm)	Afastamento ( $g$ ) (mm)	Excentricidade ( $e$ ) (mm)
Banzo	110	60	-	4,8	32	23,50
Diagonais	-	-	48,3	3,7		

## 2.6.2. Ligação tipo “KT”

Para as ligações tipo “KT” primeiramente variou-se os diâmetros das diagonais, do montante e a altura do banzo, deixando constante a largura e espessura do banzo, conforme mostra a Figura 2.11. Os resultados experimentais dos protótipos “KT01” e “KT02” estão representados na mesma figura, bem como as limites do Eurocode (2005) para a mesma relação.

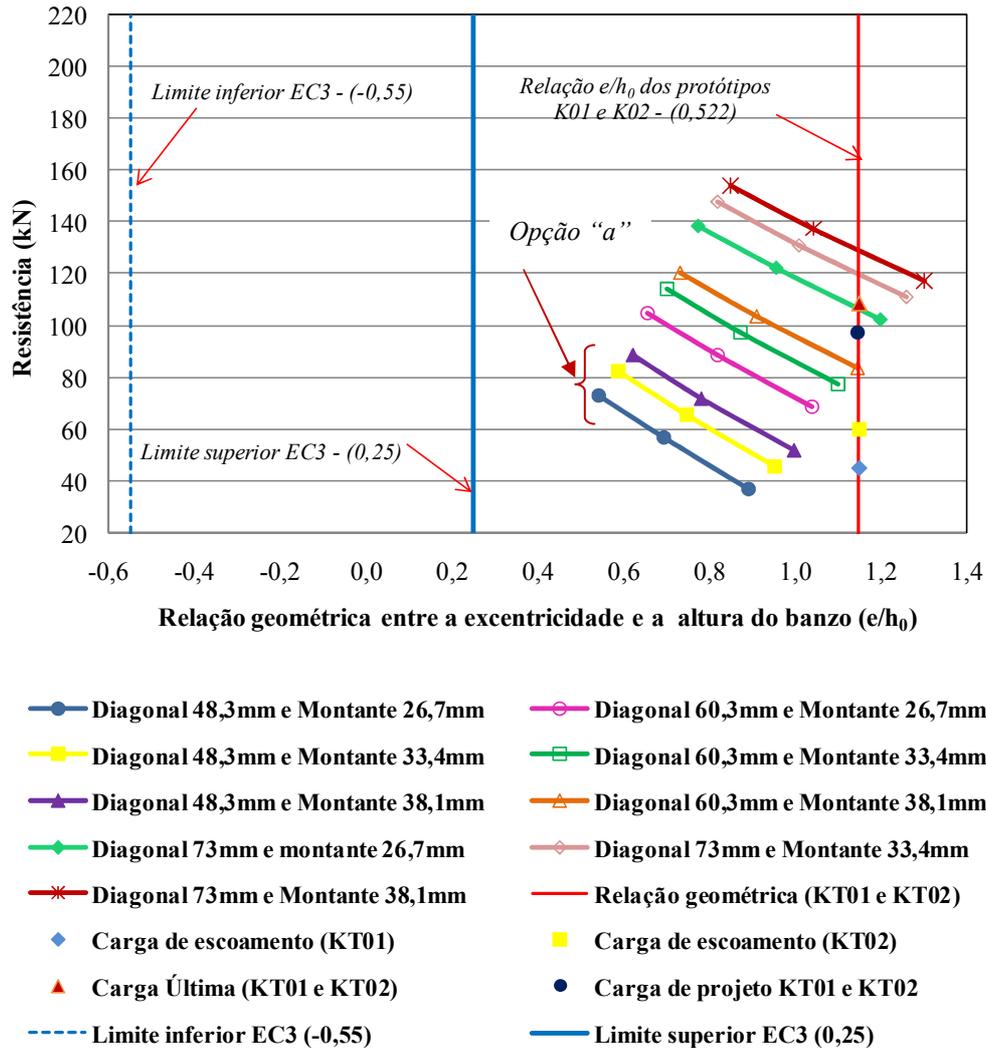


Figura 2.11 – Gráfico da Resistência da ligação tipo “KT” versus a relação geométrica entre a excentricidade e a altura do banzo.

Observa-se na Figura 2.11 que, para todas as configurações da ligação, a relação  $e/h_0$  fica fora dos limites da Eurocode (2005), ocasionando assim, da mesma maneira que a ligação tipo “K”, já citada anteriormente, momento fletor. Portanto, ao analisar a Figura 2.11 têm-se as seguintes opções:

- Manter as características geométricas do banzo e mudar o diâmetro das diagonais de 60,3 mm para 48,3 mm e escolher qualquer das três opções de diâmetro para o montante.
- Manter as características geométricas do banzo e das diagonais, mas diminuir o diâmetro do montante de 38,1 mm para 33,4 mm ou 26,7 mm.

Para a Figura 2.12 variou-se os diâmetros das diagonais e montantes, além da largura do banzo.

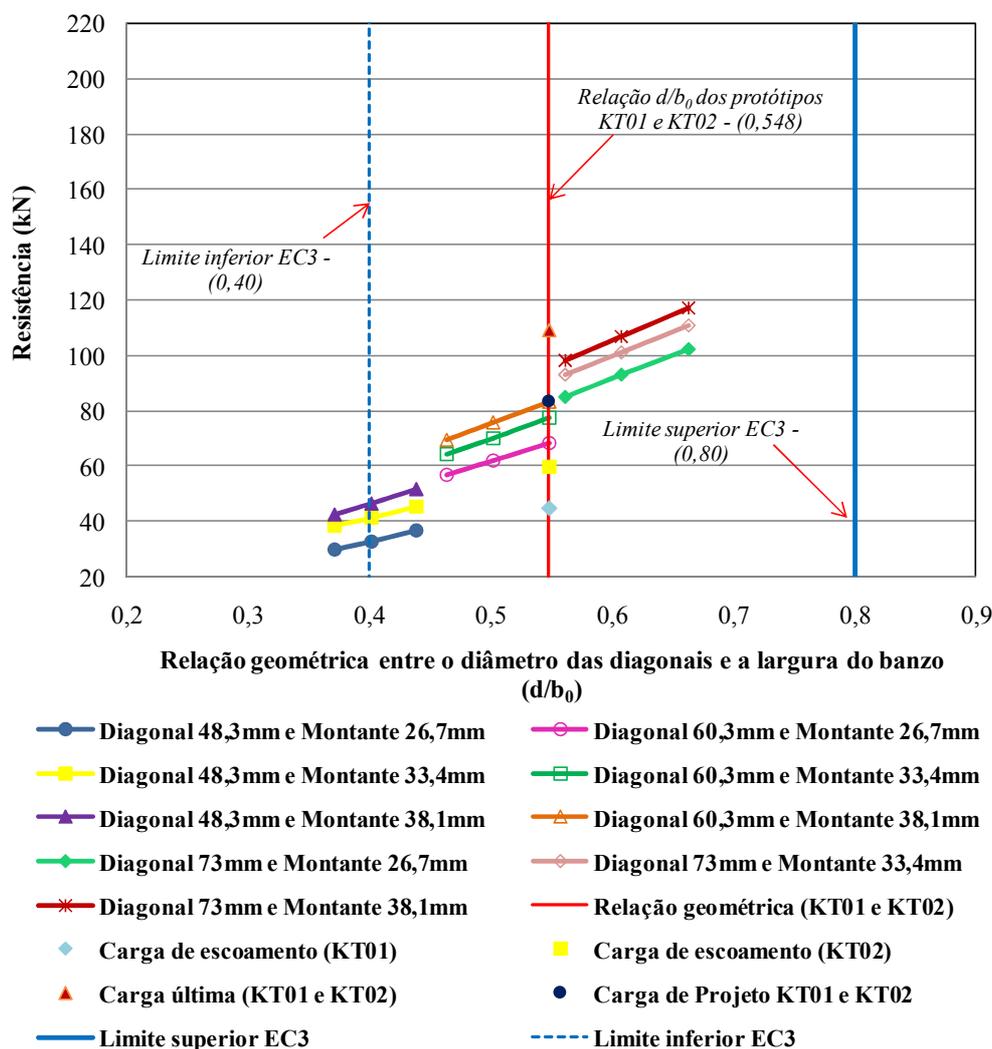
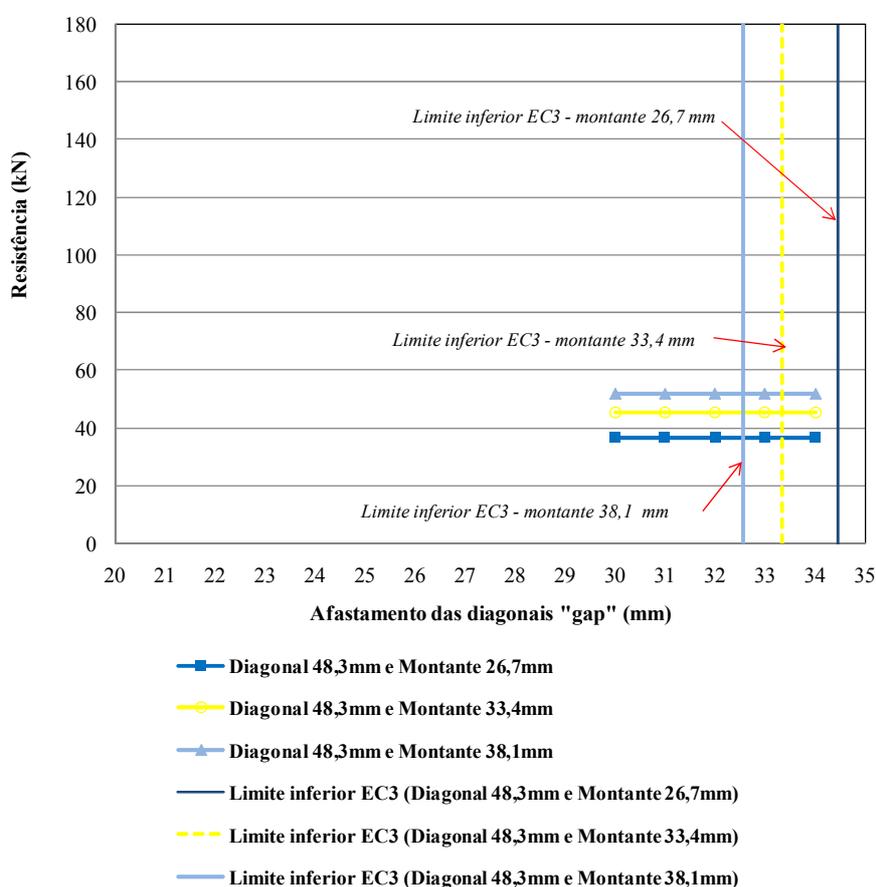


Figura 2.12 – Gráfico da Resistência da ligação tipo “KT” versus a relação geométrica entre o diâmetro das diagonais a largura do banzo.

Observa-se na Figura 2.12 que, para algumas configurações da ligação, a relação do diâmetro das diagonais com a largura do banzo, mostra-se fora do limite estabelecido pelo Eurocode 3 (2005), já excluindo assim, algumas opções. Entretanto, como as duas

opções citadas anteriormente estão dentro dos limites do Eurocode 3 (2005), pode-se optar por utilizar a ligação com as mesmas diagonais escolhidas nas ligações “K” (Tabela 2.2) e com o montante de 38,1mm.

Nas Figuras 2.13 e 2.14, tem-se a relação da resistência das ligações versus a variação do afastamento para os diâmetros das diagonais igual a 48,3 mm e 60,3 mm, respectivamente. Para uma melhor visualização da figura apenas os limites inferiores do Eurocode 3 (2005) estão representados, sendo que os limites superiores para todas as variações são maiores.



**Figura 2.13 – Gráfico da Resistência da ligação tipo “KT” com diâmetro das diagonais igual a 48,3mm versus o afastamento.**

Na Figura 2.13, para a diagonal com diâmetro de 48,3 mm, percebe-se que o afastamento das diagonais está fora do limite do Eurocode 3 (2005) para algumas configurações da ligação, verificando-se que, para qualquer das três opções do gráfico, o afastamento deve ser maior ou igual a 32,5 mm.

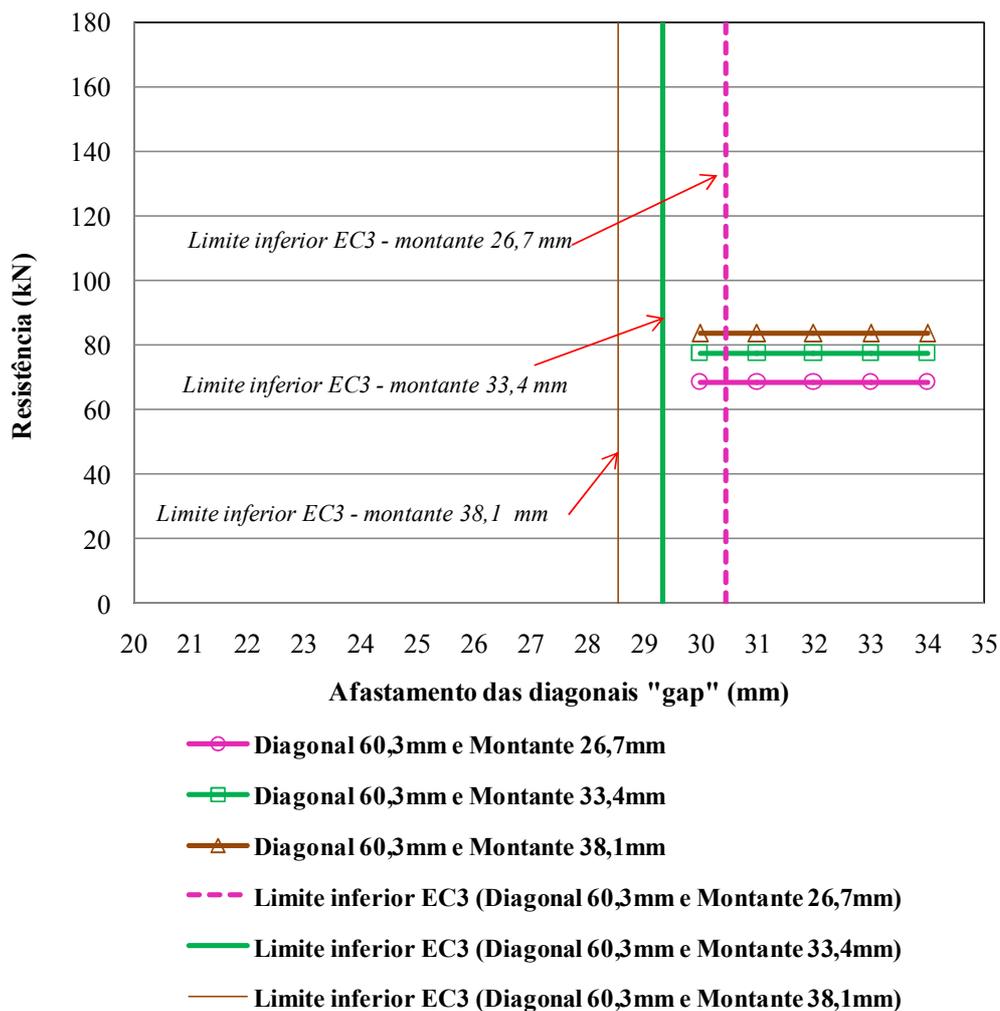


Figura 2.14 – Gráfico da Resistência da ligação tipo “KT” com diâmetro das diagonais igual a 60,3mm versus o afastamento das diagonais.

Já na Figura 2.14, para a diagonal com diâmetro de 60,3 mm, todos os valores do afastamento das diagonais para os montantes de 33,4 mm e 38,1 mm estão dentro do limite do Eurocode 3 (2005), podendo-se então, para essas duas opções de configuração da ligação, usar o afastamento das diagonais com tamanho igual ou superior a 28,5 mm, mas para o montante de 26,7 mm o valor do afastamento deve ser superior a 30,5 mm.

Portanto, a melhor alternativa, observando as Figuras 2.13 e 2.14, seria diminuir o diâmetro das diagonais e deixar o montante de diâmetro de 38,1 mm, mas como consequência, o tamanho do afastamento das diagonais deverá ser maior devido as limitações do Eurocode 3 (2005). Abaixo, encontra-se a Tabela 2.3 com a configuração da ligação escolhida e atendendo os limites do Eurocode 3 (2005).

**Tabela 2. 3 – Tipologia da ligação tipo “KT”.**

<b>Membros</b>	<b>Largura (b<sub>0</sub>) (mm)</b>	<b>Altura (h<sub>0</sub>) (mm)</b>	<b>Diâmetro (d<sub>1,2,3</sub>) (mm)</b>	<b>Espessura (t<sub>1,2,3</sub>) (mm)</b>	<b>Afastamento (g) (mm)</b>	<b>Excentricidade (e) (mm)</b>
Banzo	110	60	-	4,8	33	63,15
Diagonais	-	-	48,3	4,4		
Montante	-	-	38,1	4,3		

Em síntese, as ligações tipo “K” e “KT” para a nova série de ensaios atendem as limitações geométricas (Tabela 2.2 e 2.3) do Eurocode 3 (2005) e possuem níveis de excentricidade fora desses limites (Fórmula 2.3), gerando dessa forma momentos adicionais que devem ser distribuídos entre os membros que compõem a ligação, conforme descrito no item 2.2. Nos capítulos 3 e 4, encontram-se a descrição e apresentação dos ensaios experimentais.

### 3. APRESENTAÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

#### 3.1. Introdução

Neste capítulo, é apresentado o programa experimental realizado no Laboratório de Estruturas “Prof. Altamiro Tibiriçá Dias” do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Os protótipos ensaiados foram selecionados e dimensionados no Capítulo 2.

Os ensaios realizados são de ligações soldadas tipo “K” com afastamento e “KT” formadas por perfis tubulares sem costura fabricados pela empresa Vallourec & Mannesmann do Brasil, sendo utilizados perfis com seções transversais circulares nas diagonais/montantes e retangulares no banzo. Foram realizados um total de cinco ensaios, três das ligações tipo “K” e dois do tipo “KT”, permanecendo as mesmas dimensões do banzo e também o mesmo ângulo entre as diagonais e o banzo.

Conforme o capítulo anterior, a tipologia das ligações soldadas tipo “K” com afastamentos e “KT” deste trabalho possuem algumas modificações em relação às ensaiadas por Mendes (2008), denominadas de “KT01” e “KT02”. Na Tabela 3.1, têm-se as comparações das características gerais das ligações tipo “K” e na Tabela 3.2, das ligações tipo “KT”.

**Tabela 3.1 - Comparação das dimensões das ligações tipo “K” utilizados por Mendes (2008) e as dimensões utilizadas neste trabalho.**

<b>Ligação soldada do tipo “K” com afastamento</b>							
	<b>Membros</b>	<b>Tipo de perfil</b>	<b>Largura b<sub>0</sub> (mm)</b>	<b>Altura h<sub>0</sub> (mm)</b>	<b>Diâmetro d<sub>1,2</sub> (mm)</b>	<b>Espessura t<sub>1,2</sub> (mm)</b>	<b>Afastamento g (mm)</b>
Mendes (2008)	Banzo	Retangular	110	60	-	4,8	30
	Diagonais	Circular	-	-	60,3	5,5	
Tipologia ensaiada neste trabalho	Banzo	Retangular	110	60	-	4,8	32
	Diagonais	Circular	-	-	48,3	3,7	

**Tabela 3.2 - Comparação das dimensões das ligações tipo “KT” utilizados por Mendes (2008) e as dimensões utilizadas neste trabalho.**

<b>Ligação soldada do tipo “KT”</b>							
	<b>Membros</b>	<b>Tipo de perfil</b>	<b>Largura b<sub>0</sub> (mm)</b>	<b>Altura h<sub>0</sub> (mm)</b>	<b>Diâmetro d<sub>1,2</sub> (mm)</b>	<b>Espessura t<sub>1,2,3</sub> (mm)</b>	<b>Afastamento g (mm)</b>
Mendes (2008)	Banzo	Retangular	110	60	-	4,8	30
	Diagonais	Circular	-	-	60,3	5,5	
	Montante	Circular	-	-	38,1	3,2	
Tipologia ensaiada neste trabalho	Banzo	Retangular	110	60	-	4,8	33
	Diagonais	Circular	-	-	48,3	3,7	
	Montante	Circular	-	-	38,1	4,3	

A nomenclatura usada na identificação dos protótipos foi baseada na dissertação de Mendes (2008), sendo, portanto adicionada apenas a letra B no final de cada nomenclatura, como mostrado a seguir:

- K01-B, K02-B e K03-B, para os protótipos com ligação do tipo “K”;
- KT01-B, KT02-B, para os protótipos com ligação do tipo “KT”.

Os ensaios realizados foram baseados nas experiências adquiridas anteriormente no Laboratório de Estruturas “Prof. Altamiro Tibiriçá Dias” do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, por Freitas et al.(2006) e Mendes (2008), sendo apresentados, nos tópicos seguintes, os ensaios realizados por Mendes (2008), a descrição das características mecânicas dos materiais dos perfis e dimensões dos protótipos de cada tipo de ligação, a apresentação do esquema de montagem e procedimentos de ensaio, e a descrição da instrumentação utilizada.

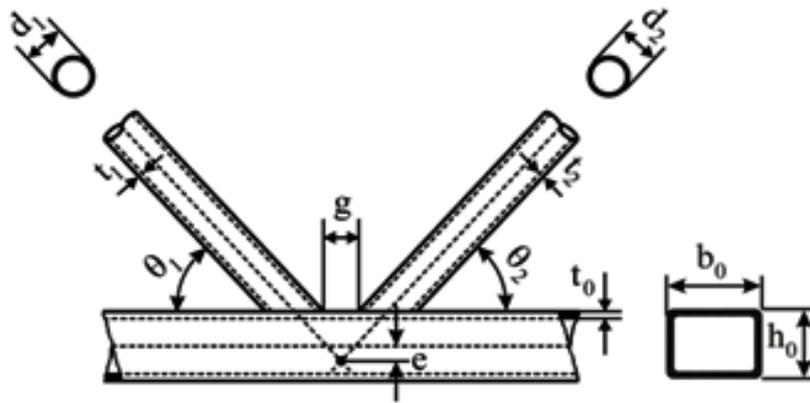
### 3.2. Ensaios realizados por Mendes (2008)

Os ensaios realizados por Mendes (2008) foram em protótipos em escala real de ligações soldadas tipo “T”, “K” e “KT” com afastamento, componentes de um sistema treliçado misto de piso, com seções transversais circulares nas diagonais/montantes e retangulares nos banzos. Os resultados experimentais obtidos para as ligações do tipo “T” e “K” apresentaram uma boa correlação com a carga de projeto calculada pelo Eurocode 3 (2005). No entanto, para as ligações do tipo “KT” a carga de projeto foi maior que a carga última experimental, indicando uma nova série de ensaios que foi desenvolvida neste trabalho.

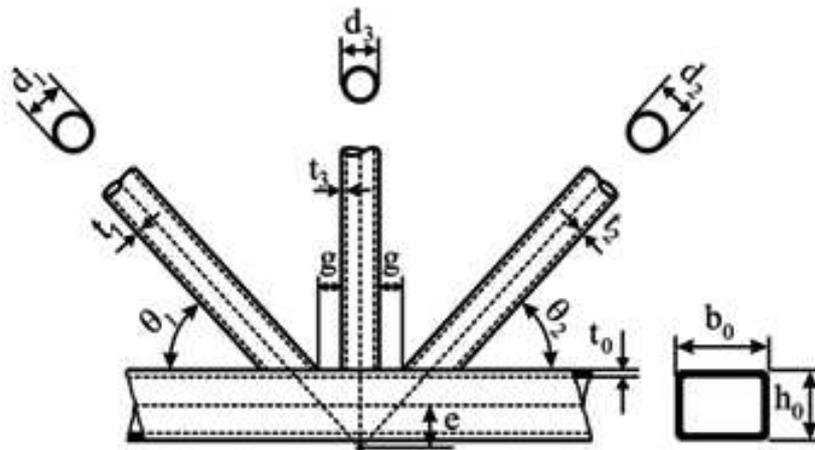
As tipologias e nomenclaturas das ligações tipo “K” e “KT” ensaiadas por Mendes (2008) podem ser observadas na Figura 3.1 e na Tabela 3.3. Neste trabalho, as ligações tipo “T” não serão analisadas, devido aos bons resultados obtidos anteriormente.

Tabela 3.3 – Tipologia das ligações ensaiadas por Mendes (2008).

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)
KT	60,3	5,5	47,7	38,1	3,2	60	100	4,8	30
K	60,3	5,5	47,7	-	-	60	110	4,8	30



(a) Ligação tipo “K” de diagonais com afastamento.



(b) Ligação tipo “KT”.

Figura 3.1 – Nomenclatura utilizada para as dimensões dos protótipos.

A Tabela 3.4 apresenta os limites teóricos e as cargas aplicados nos ensaios realizados por Mendes das ligações tipo “K” e “KT”, verificando, dessa forma, a diferença no valor dos resultados experimentais em comparação com a carga de projeto para as ligações tipo “KT”, no qual o valor da carga de projeto está acima dos valores obtidos experimentalmente para o escoamento.

Tabela 3.4 – Resultados obtidos por Mendes (2008) dos limites teóricos e das cargas experimentais aplicadas nos elementos considerando os efeitos na face superior do banzo.

Tipo de ligação	Protótipo	Elemento	Cargas Experimentais (kN)		$N_{i,Rd}$ (kN)	$\frac{P_y}{N_{i,Rd}}$	Modo de falha	
			$P_y$	$P_{ult.}$			Exp.	Eurocode
KT	KT 01	Diag. Trac.	45,00	108,9	98,12	0,46	A	A
		Diag. Comp.	-42,50	-89,05	-98,12	0,43	A	A
		Montante	-31,20	-66,00	-	-	A	A
	KT02	Diag. Trac.	60,00	97,60	98,12	0,61	A	A
		Diag. Comp.	-59,00	-85,90	-98,12	0,60	A	A
		Montante	-43,60	-63,60	-	-	A	A
	KT03	Diag. Trac.	60,00	106,80	98,12	0,61	A	A
		Diag. Comp.	-58,90	-90,00	-98,12	0,60	A	A
		Montante	-43,60	-66,90	-	-	A	A
K	K01	Diag. Trac.	136,00	170,00	115,00	1,18	A	A
		Diag. Comp.	-136,00	-170,00	-115,00	1,18	A	A
	K02	Diag. Trac.	121,30	170,00	115,00	1,05	A	A
		Diag. Comp.	-121,30	-170,00	-115,00	1,05	A	A

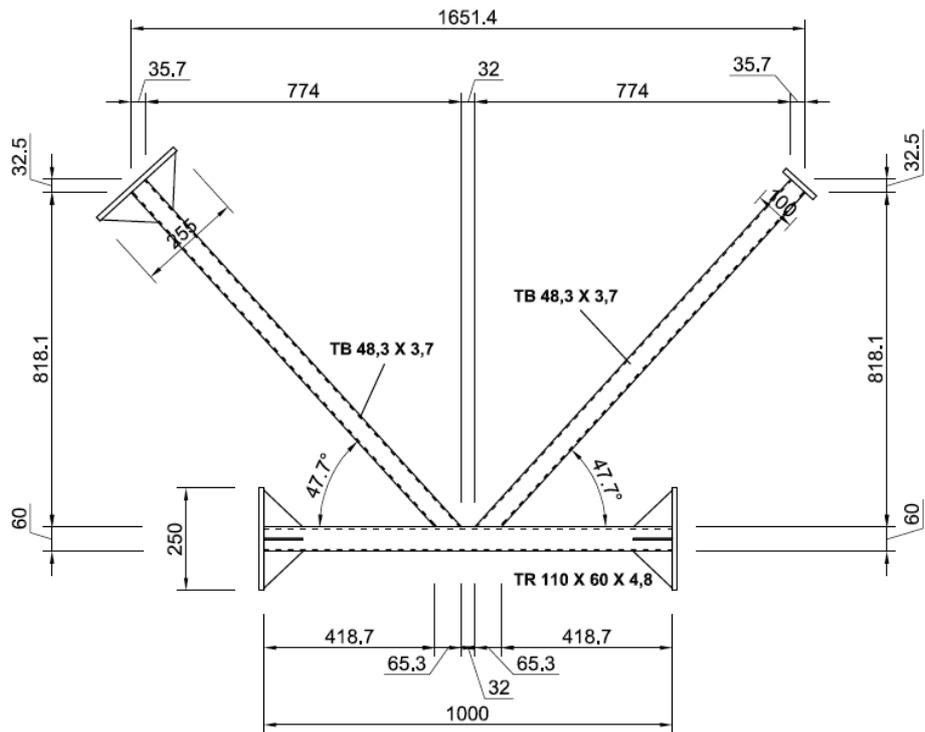
A partir desses resultados, verificou-se a necessidade de realizar mais estudos teóricos e experimentais destas ligações, variando alguns parâmetros geométricos e de carregamento de modo a avaliar as prescrições existentes. Os estudos realizados no capítulo 2 levaram a definição dos protótipos apresentados a seguir.

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

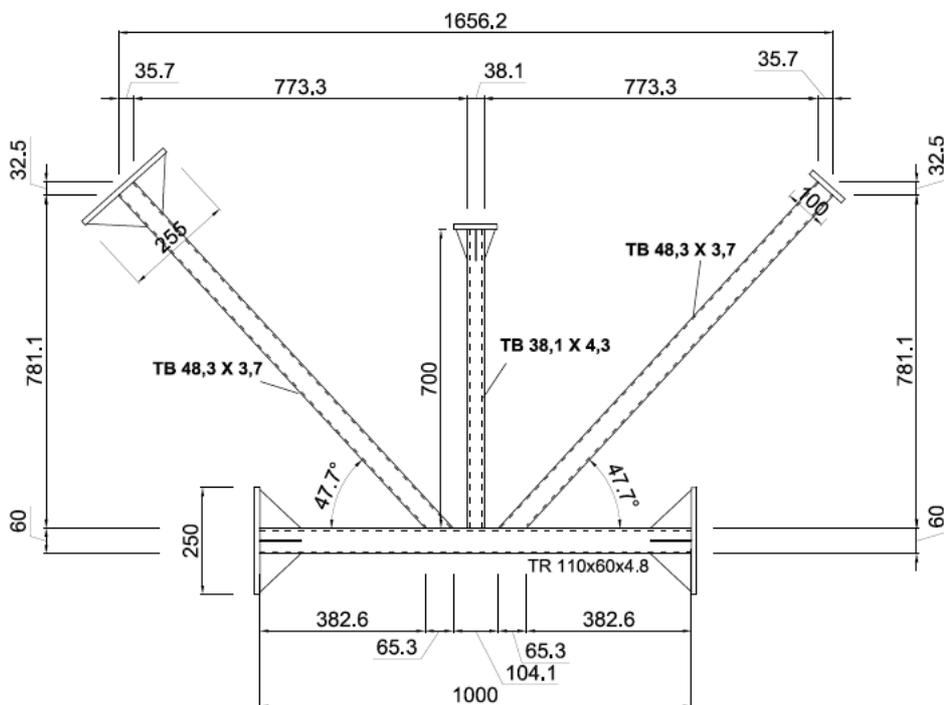
As dimensões e o esquema geral das ligações ensaiadas para este trabalho estão representados na Tabela 3.5 e na Figura 3.2, respectivamente.

Tabela 3.5 – Dimensões das ligações ensaiadas.

Tipo de ligação	Diagonais			Montante		Banzo			Gap
	$d_1$ $d_2$ (mm)	$t_1$ $t_2$ (mm)	$\theta$ (°)	$d_3$ (mm)	$t_3$ (mm)	$h_0$ (mm)	$b_0$ (mm)	$t_0$ (mm)	$g$ (mm)
KT	48,3	3,7	47,7	38,1	4,3	60	100	4,8	33
K	48,3	3,7	47,7	-	-	60	110	4,8	32



(a) Ligação tipo “K” de barras com afastamento.



(b) Ligação tipo “KT”.

Figura 3.2 – Esquema geral das ligações ensaiadas.

Os tubos utilizados na fabricação 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 3.6, observa-se as propriedades mecânicas do perfil do banzo das ligações.

**Tabela 3.6 - propriedades mecânicas dos perfis componentes dos protótipos das ligações.**

Perfis	Aço	Limite de escoamento $f_v$ (MPa)	Limite de ruptura $f_u$ (MPa)	Alongamento (%)
Banzo - 110x60x4,8	VMB 350 COR	456	555	32

### 3.4. Esquema de montagem dos ensaios

O esquema de montagem dos ensaios realizados foi desenvolvido por Freitas et al. (2006), sendo utilizado também por Mendes (2008). Foi desenvolvido um esquema de ensaio na horizontal com a função de eliminar a necessidade de pórticos de reações e complexidades maiores na montagem, utilizando peças acessórias e peças de fixação das extremidades do banzo; peças de apoio para os atuadores hidráulicos para a compressão e para a tração, sendo estas peças devidamente dimensionadas para adequarem à magnitude das cargas aplicadas, ou seja, carga máxima de 500 kN por furo da laje de reação, os quais possuem distâncias de 50 cm entre seus centros. A Figura 3.3 representa o esquema de montagem da ligação “KT”.



**Figura 3.3 – Esquema de montagem da ligação “KT”.**

Devido à diferença de tipologia das ligações entre os protótipos ensaiados e os protótipos de Mendes (2008), foi necessário fazer algumas adaptações na peça de tração e nas de compressão das diagonais e montantes, criando novos furos na peça de compressão da diagonal e o alargamento dos furos existentes na peça de compressão do montante. No caso da peça de tração, foi necessário, além da criação dos furos, soldar chapas sobre esses, com a finalidade de impedir folgas nos furos criados e também obter maior resistência da peça à carga aplicada.

### 3.4.1. Sistema de aplicação dos carregamentos.

Para a aplicação dos carregamentos de compressão em uma das diagonais, para ligações do tipo “K”; e em uma das diagonais e no montante, para ligações do tipo “KT”, 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 e alongamento dos furos na peça do montante e a criação de novos furos na peça das diagonais permitiram o posicionamento de acordo com a geometria das ligações. A Figura 3.4 apresenta o sistema de aplicação de carregamento de compressão para as diagonais das ligações do tipo “K” e “KT”, que utiliza um atuador hidráulico de capacidade nominal de 300 kN. Já a Figura 3.5 representa o sistema para os montantes das ligações tipo “KT”, por meio de um atuador hidráulico de capacidade nominal de 100 kN. Observa-se a utilização de anteparos, nas duas figuras, posicionados para evitar movimento no sistema de aplicação da carga

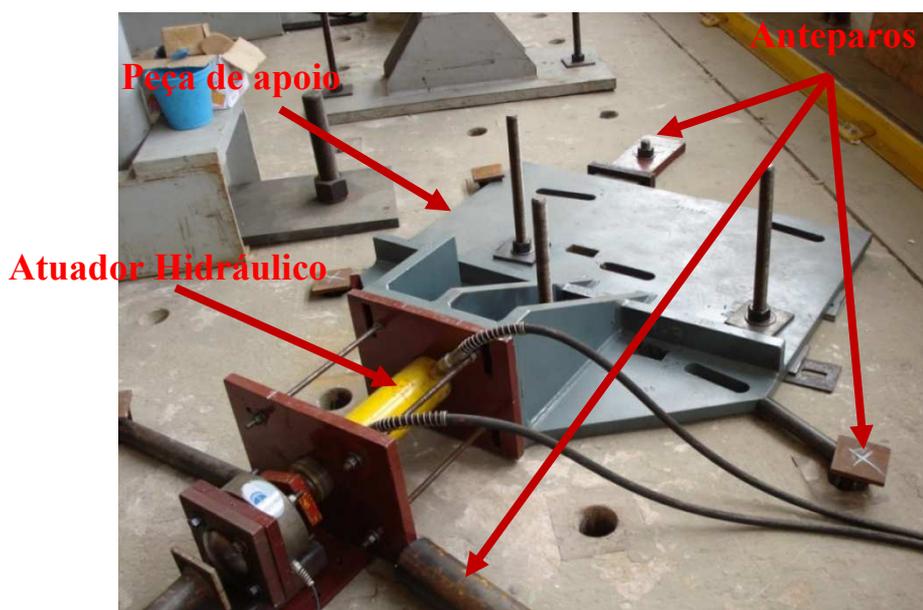


Figura 3.4 – Sistemas de aplicação de carregamento de compressão na diagonal.

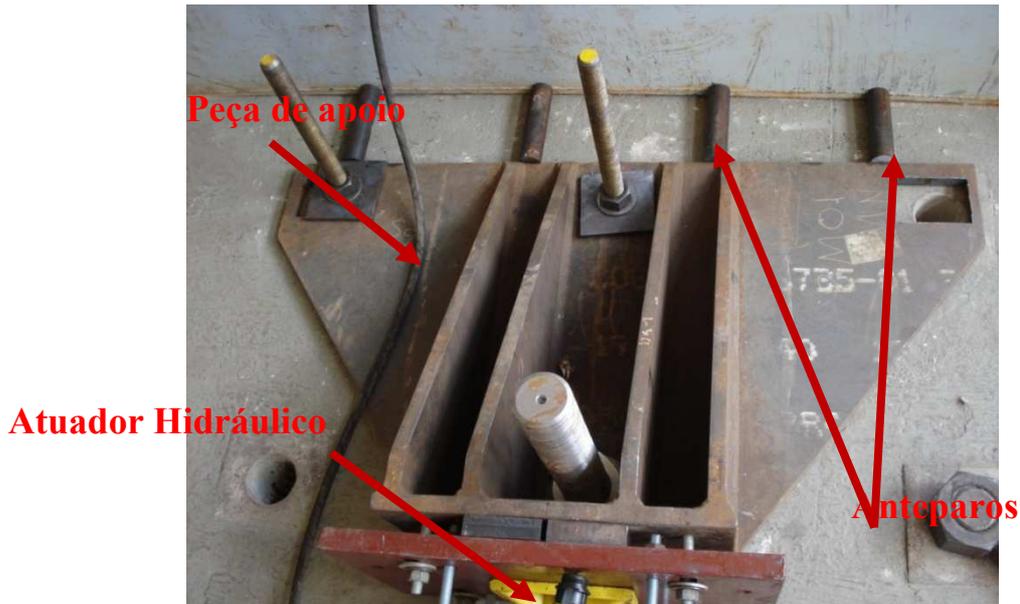


Figura 3.5 – Sistemas de aplicação de carregamento de compressão no montante.

Nas extremidades das diagonais de compressão e nos montantes dos protótipos foram soldadas chapas quadradas de 100 mm x 100 mm e espessura de 12,5 mm para aplicação do carregamento, fazendo, desta forma, a distribuição uniforme do carregamento nas barras comprimidas. Na diagonal de compressão, foi utilizada uma rótula no ponto de transmissão da carga ao protótipo, para evitar a transmissão de momento. Na Figura 3.6, pode-se visualizar o sistema montado com a chapa soldada na extremidade da diagonal comprimida e a utilização da rótula. E a Figura 3.7 representa os desenhos de projeto da extremidade das diagonais comprimidas.

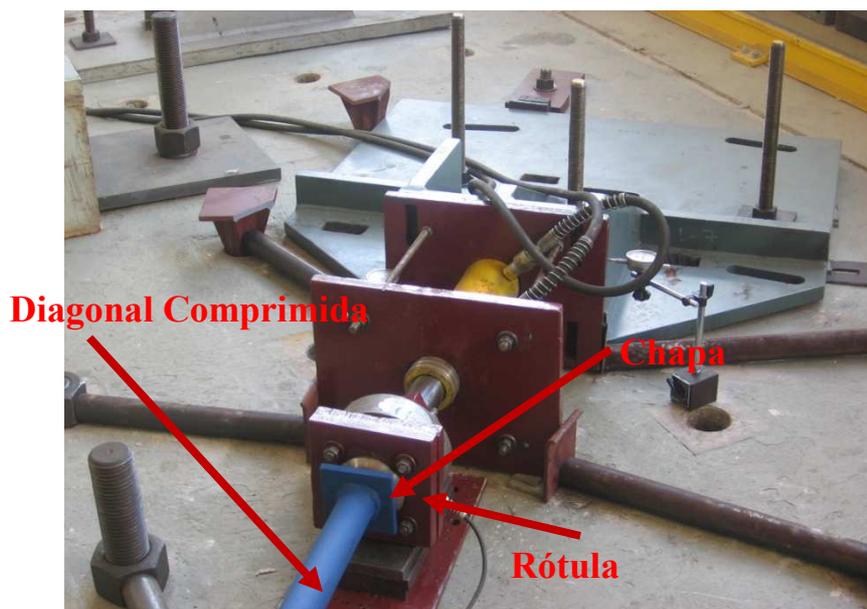
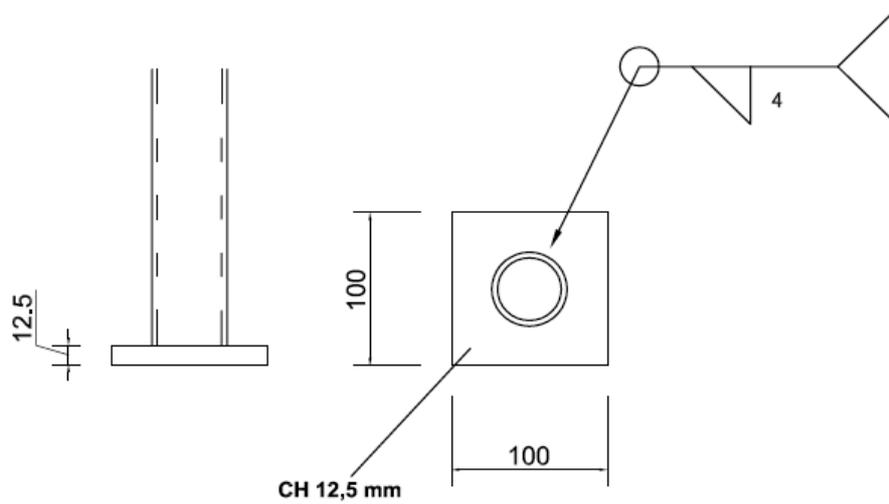
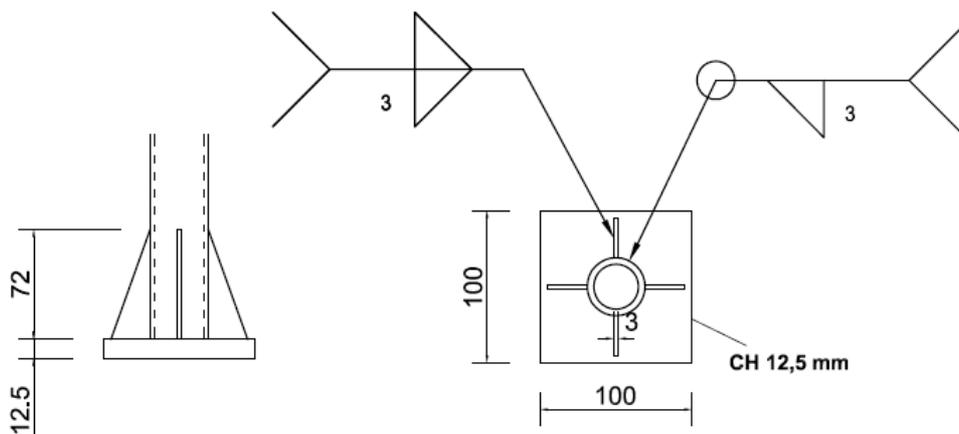


Figura 3.6 - Rótula e chapa de distribuição uniforme na diagonal comprimida.



**Figura 3.7 - Desenho de projeto da chapa para regularização do carregamento de compressão na diagonal.**

No caso do montante, além da chapa, foram soldados quatro enrijecedores, uma vez que a relação entre as dimensões da chapa e o diâmetro da peça é maior do que para as diagonais, como representado na Figura 3.8.



**Figura 3.8 – Desenho de projeto da chapa para regularização do carregamento de compressão no montante.**

Na extremidade do sistema de aplicação de carregamento foi fixada uma rótula universal, como se pode observar na Figura 3.9. Mas durante a realização do primeiro ensaio do tipo “KT”, a rótula impediu a translação do perfil do montante, como consequência houve o amassamento da peça de conexão do macaco com a célula de

carga (Figura 3.10), sendo necessário fazer outro sistema de aplicação de carga no montante, como representado na Figura 3.11.

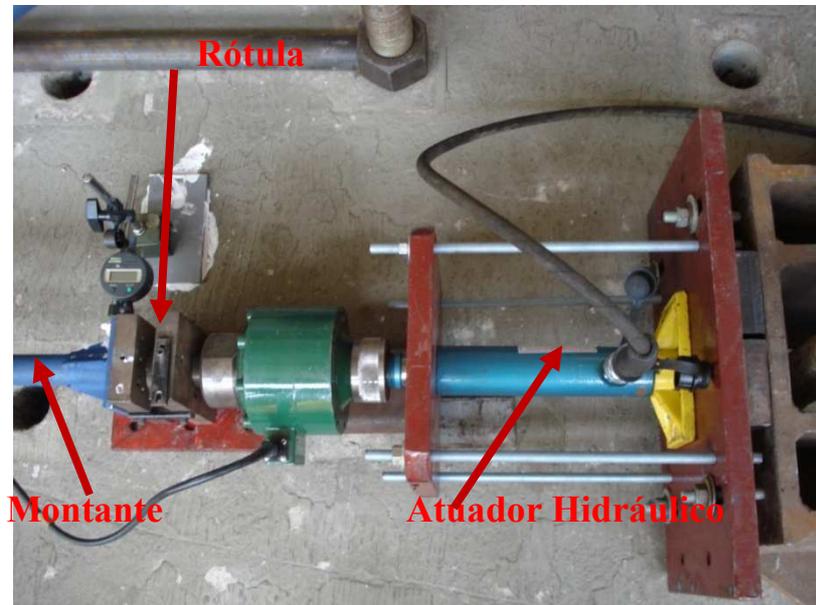
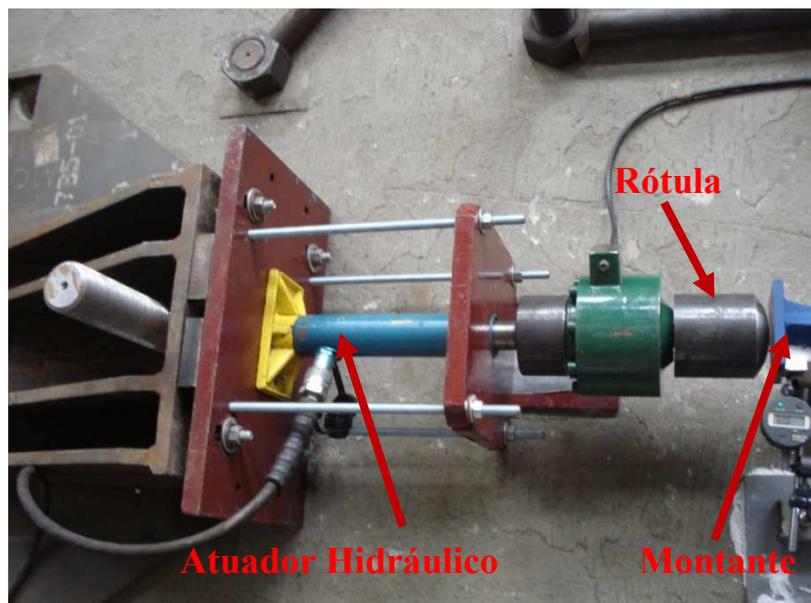


Figura 3.9 – Sistema de aplicação de carga do montante com a rótula universal e chapa de distribuição uniforme no montante.



Figura 3.10 - Rótula universal e chapa de distribuição uniforme no montante após o primeiro ensaio "KT01-B".



**Figura 3.11 – Novo sistema de aplicação de carga do montante.**

No caso da aplicação do carregamento de tração em uma das diagonais, para ligações do tipo “K” e “KT”, também foi utilizada uma peça de apoio para o atuador hidráulico. Essa peça foi fixada à laje de reação por meio de parafusos, e devido à mudança de alguns parâmetros geométricos das ligações foi necessária a criação de novos três furos, permitindo, desta forma, o posicionamento da peça de acordo com a geometria das ligações. Além da criação desses furos, foi necessário soldar três chapas a estes, uma com dimensão de 200 mm x 200 mm e espessura de 12,5 mm e duas com dimensões iguais a 300 mm x 300 mm e espessura de 12,5 mm, com a finalidade de impedir folgas e também obter maior resistência na peça à carga aplicada.

A Figura 3.12 apresenta o sistema de aplicação de carregamento de tração para as diagonais das ligações do tipo “K” e “KT”, que utiliza um atuador hidráulico de pistão vazado com capacidade de 500 kN. Observa-se a utilização de anteparos posicionados para evitar movimento no sistema de aplicação da carga.

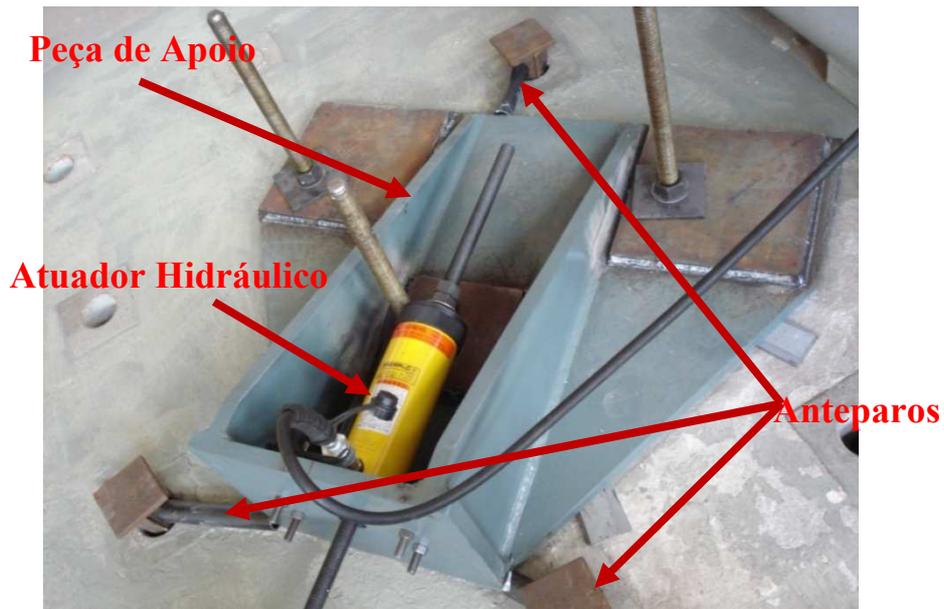
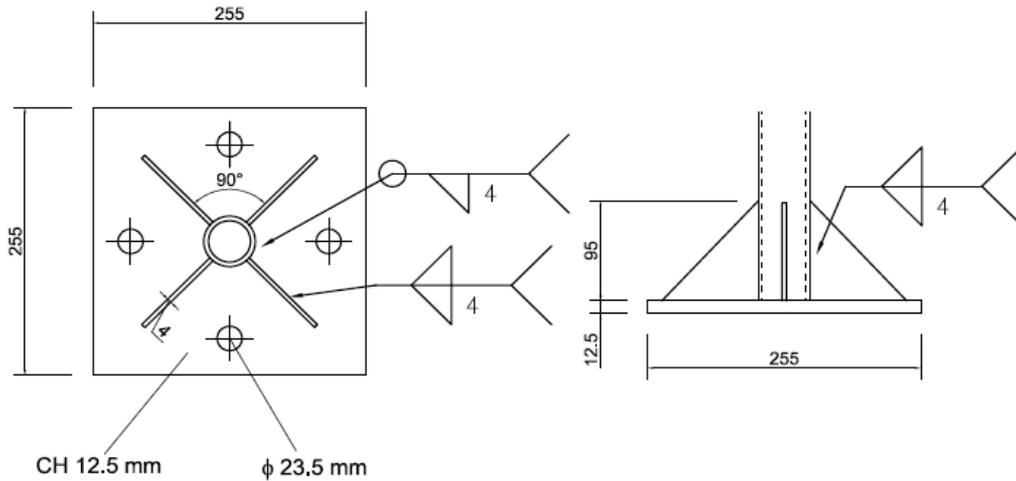


Figura 3.12 – Sistemas de aplicação de carregamento de tração na diagonal.

No sistema de aplicação de carregamento de tração foi conectado um apoio tipo pino parafusado à extremidade da diagonal tracionada (Figura 3.13). Para conectar o sistema rotulado e, por consequência, 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 3.14, têm-se os desenhos de projeto dessas chapas.



Figura 3.13 - Chapa de extremidade e sistema rotulado para a aplicação de tração às diagonais.



**Figura 3.14 - Desenho de projeto da chapa para regularização do carregamento de tração na diagonal tracionada.**

Na Figura 3.15, pode-se visualizar o esquema geral do sistema de aplicação de carregamento das ligações tipo “KT”.



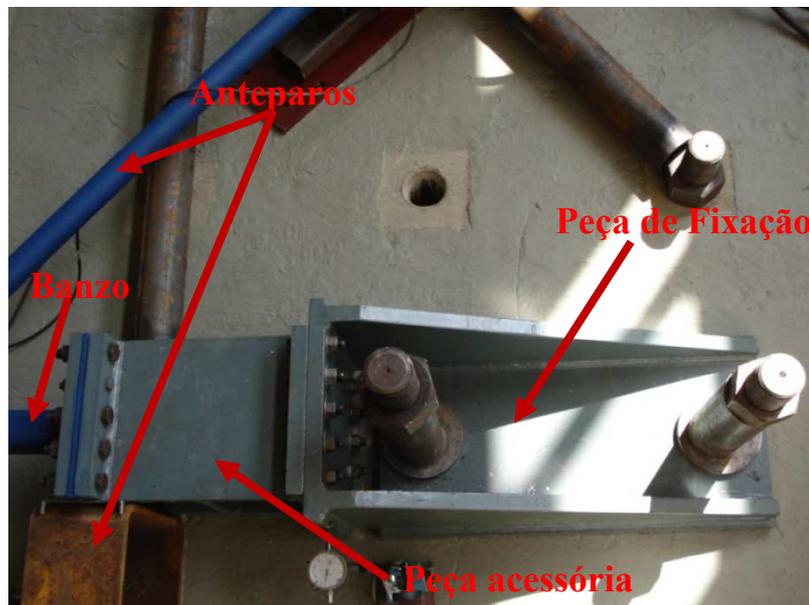
**Figura 3.15 – Esquema geral do sistema de aplicação de carregamento.**

### **3.4.2. Sistema de apoio dos banzos**

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 (Mendes, 2008).

Neste sistema, foi utilizada uma peça acessória dimensionada por Mendes (2008), com a finalidade de fixar de maneira adequada o banzo que teve seu comprimento reduzido em relação aos ensaios realizados por Freitas et al. (2006). A Figura 3.16 ilustra o esquema de fixação do banzo à peça acessória, a peça de fixação e os anteparos, que foram posicionados para restringir possíveis movimentos do protótipo.

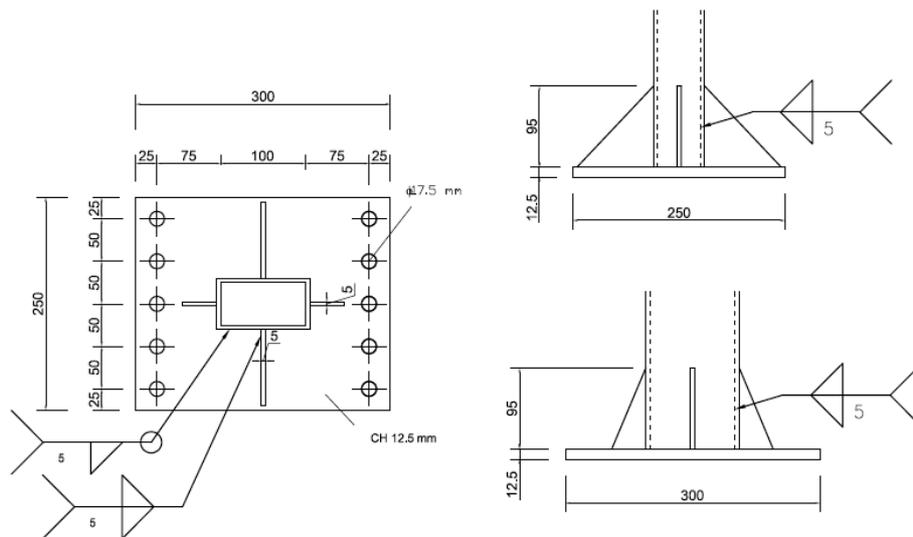


**Figura 3.16 – Sistema de apoio do banzo à laje de reação.**

Na extremidade do banzo, tem-se uma chapa soldada com dimensões 250 mm x 300 mm e espessura de 12,5 mm 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 (Figura 3.17). Na Figura 3.18, tem-se o desenho de projeto da chapa soldada à extremidade do banzo.



**Figura 3.17 – Detalhe da extremidade do banzo.**



**Figura 3.18 - Desenho do projeto da extremidade do banzo.**

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

No decorrer dos ensaios, realizou-se o monitoramento das deformações e dos deslocamentos lineares ocorridos durante a aplicação do carregamento com a instrumentação necessária para cada caso. Para a leitura dos deslocamentos lineares, utilizaram-se os defletômetros de haste com mostrador analógico (Figura 3.19) e os LVDT's (Linear Variable Displacement Transducers), em que as leituras dos

deslocamentos são medidas e armazenadas por meio de um sistema de aquisição de dados automáticos, como mostrado na Figura 3.20.



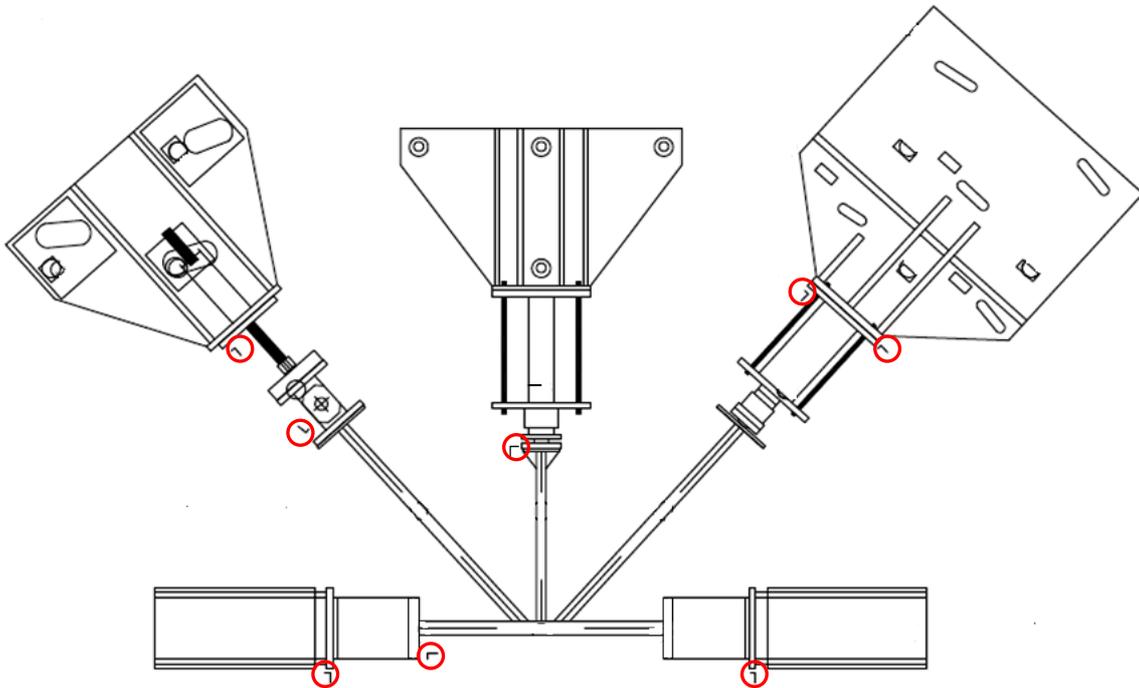
**Figura 3.19 – Defletômetro de haste com mostrador analógico.**



**Figura 3.20 – LVDT's.**

Os defletômetros foram posicionados nos sistemas de carregamento e nas peças de apoio dos protótipos, com a finalidade de se verificar possíveis movimentações das peças envolvidas, configurando a movimentação de corpo rígido. Ao se verificar essas movimentações, utilizaram-se anteparos com a função de impedir esses deslocamentos da ligação e das peças descritas anteriormente. Nas ligações tipo “K”, foram posicionados sete defletômetros. Já nas ligações tipo “KT”, foram posicionados oito,

sendo um a mais no montante, como mostrado na Figura 3.21, em que os círculos vermelhos indicam as posições.



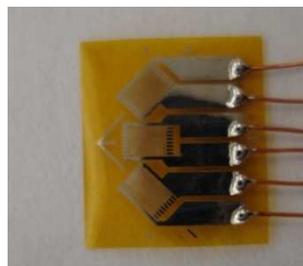
**Figura 3.21 – Posicionamento dos Defletômetros.**

Os LVDT's foram posicionados apenas na face inferior do banzo, oposto as diagonais e montantes, em um total de três em cada ensaio, sendo colocado um no centro do banzo e os outros dois a uma distância de 25 mm do centro, nos dois tipos de ligações.

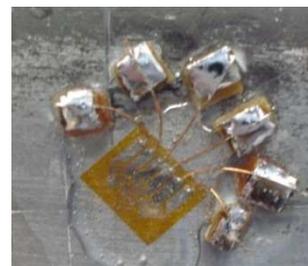
No caso das leituras das deformações para a instrumentação, foram utilizados os extensômetros elétricos de resistência unidirecionais e também do tipo roseta 45° (Figura 3.22), para aço, das marcas KYOWA e EXCEL SENSORES.



**(a) Extensômetro**



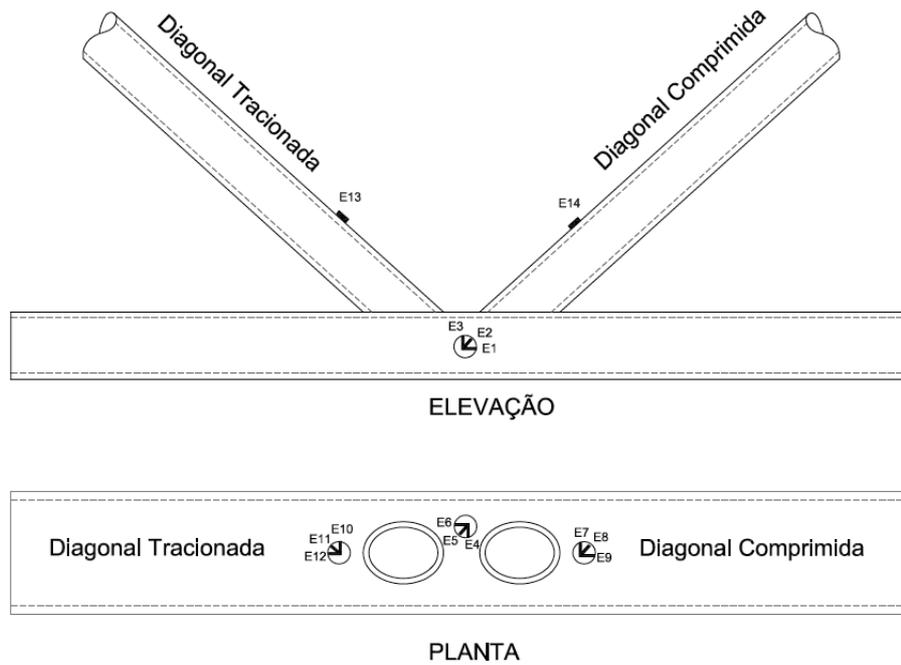
**(b) Roseta**



**(c) Roseta colada no protótipo**

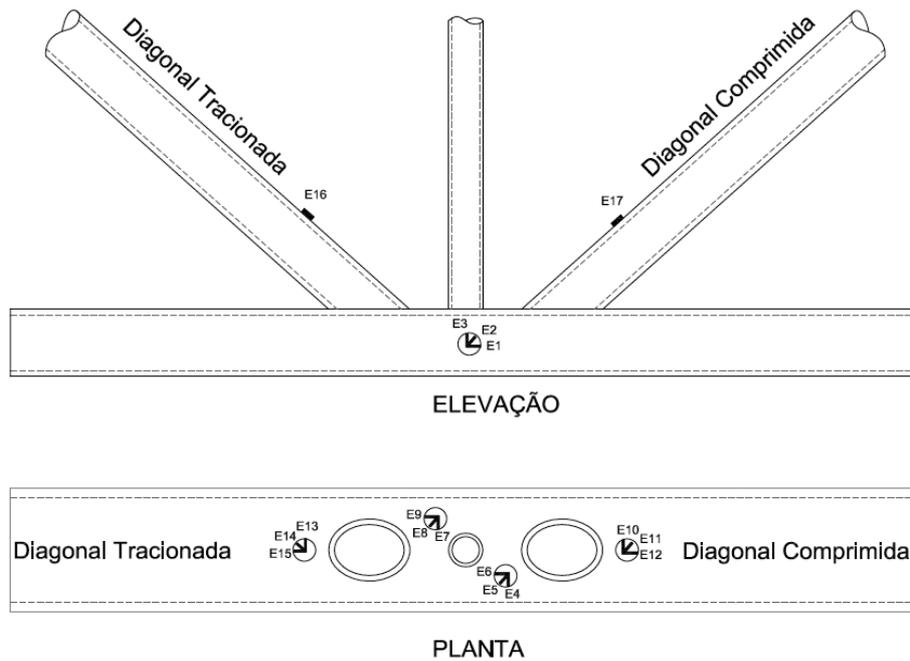
**Figura 3.22 – Extensômetro e Rosetas.**

Nas ligações tipo “K”, foram coladas rosetas no banzo, sendo uma na lateral e outras três na face superior do banzo, uma localizada no centro das diagonais, outra entre a diagonal tracionada e a extremidade do banzo e a outra entre a diagonal comprimida e a outra extremidade, como mostrado na Figura 3.23. Além disso, foram colocados extensômetros unidirecionais nas suas diagonais.



**Figura 3.23 – Posicionamento dos extensômetros para a ligação do tipo “K”.**

Nas ligações tipo “KT”, também foram coladas extensômetros unidirecionais nas diagonais e montantes. Já nos banzos, foram colocadas rosetas, sendo uma na lateral e outras quatro na face superior do banzo, uma localizada entre a diagonal tracionada e o montante, outra entre a diagonal comprimida e o montante, outra entre a diagonal tracionada e a extremidade do banzo e a outra entre a diagonal comprimida e a outra extremidade, como mostrado na Figura 3.24.



**Figura 3.24 –Posicionamento dos extensômetros para a ligação do tipo “KT”.**

Para medição dos carregamentos aplicados às diagonais e montantes por meio de atuadores hidráulicos, foram utilizadas células de carga previamente calibradas de diversas capacidades de acordo com o nível de carregamento aplicado a essas peças. Para a diagonal comprimida, foi usada a célula de carga de capacidade de 300 kN (Figura 3.25a), para a diagonal de tração usou-se a célula de carga de capacidade de 500kN (Figura 3.25b), e por último para o montante utilizou-se a célula de carga com capacidade de 100 kN (Figura 3.25c).



**(a) Diagonal comprimida**



**(b) Diagonal Tracionada**



(c) Montante

Figura 3.25 –Células de carga utilizadas nos ensaios.

Para a aquisição dos dados obtidos a partir dos LVDT's, dos extensômetros e das rosetas foi utilizado um sistema automático controlado por computador dotado de um sistema de controle e monitoramento de aquisição. Esse sistema é constituído de 3 módulos de 8 canais "Spider 8" (Figura 3.26) fabricado pela HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik ,2003) com aquisição de dados efetuada através do programa "Catman 4.5" e armazenada no computador. A Figura 3.27 apresenta a vista geral do sistema automático de aquisição de dados.



Figura 3.26 – Sistema automático de aquisição de dados "Spider 8".



**Figura 3.27 – Sistema de aquisição de dados.**

### **3.6. Metodologia de ensaio**

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

A aplicação do carregamento nos membros das ligações foi realizada manualmente por meio dos atuadores hidráulicos, sendo esta aplicação dividida em vários passos de carga, de acordo com o nível de carregamento aplicado a cada ligação; e para garantir a simultaneidade de aplicação do carregamento, as leituras dos carregamentos das diagonais e do montante foram projetadas na tela do computador. E ao final de cada passo de carga foi realizada a leitura manual de todos os deflectômetros.

Já a medição do carregamento dos ensaios foi realizada pelas células de carga previamente calibradas, como citado anteriormente, sendo captados os dados pelo sistema de aquisição automático de dados.

O término dos ensaios foi estabelecido de acordo com o modo de falha obtido através dos cálculos mostrado no capítulo 2, sendo que em alguns casos foi levada em consideração a limitação dos equipamentos.

### 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

#### 4.1. Considerações iniciais

Nesse capítulo, serão apresentados os resultados dos ensaios realizados, bem como a carga de projeto calculada a partir de uma rotina de cálculo desenvolvida no software Mathcad 14, com base nas prescrições do Eurocode 3 (2005) e do CIDECT (1996) descritas no Capítulo 2.

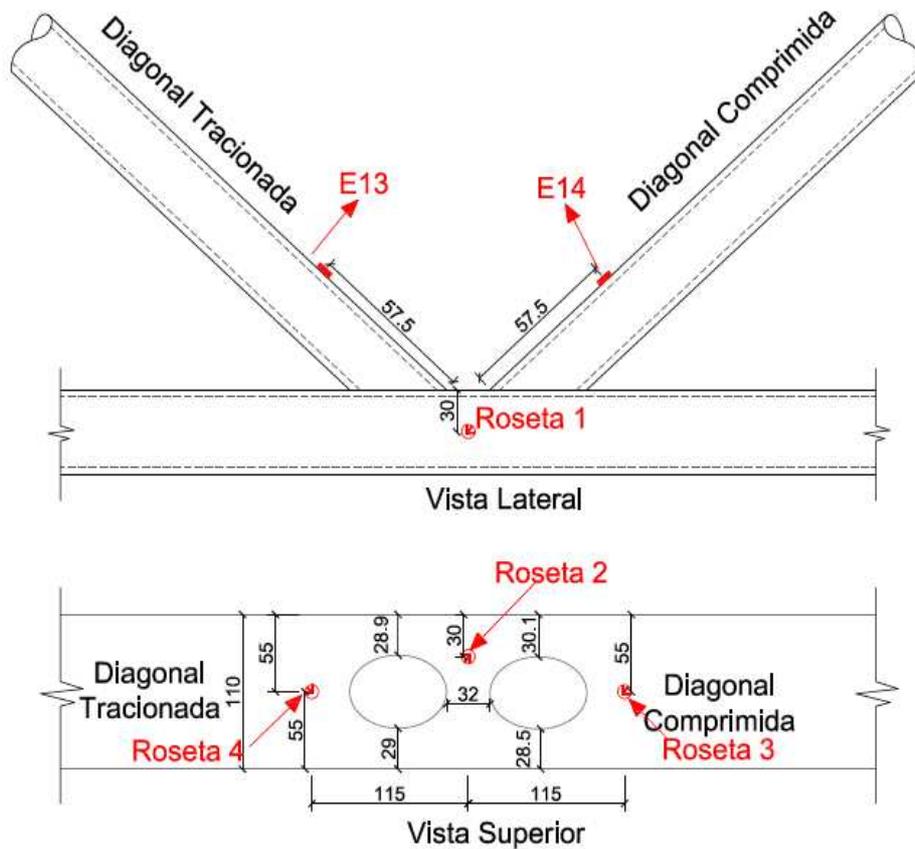
Os resultados experimentais são apresentados em função da tensão de von Mises, obtidos a partir das deformações medidas pelas rosetas para cada tipo de ligação. Além dessas tensões, são analisadas também as tensões normais a partir das deformações obtidas pelo extensômetros lineares colocados nas diagonais e dos deslocamentos medidos pelos LVDT's, posicionados nos banzos das ligações. Nos Anexos C e D, têm-se os resultados experimentais das ligações tipo “K” e “KT”, respectivamente, apresentados em função das deformações específicas medidas pelos extensômetros.

A seguir apresentam-se os resultados experimentais para cada tipo de ligação.

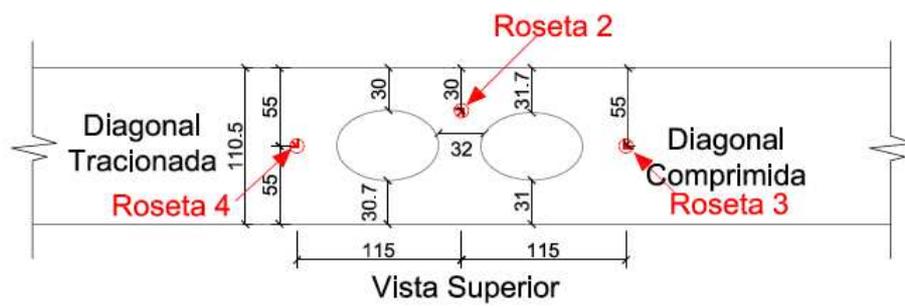
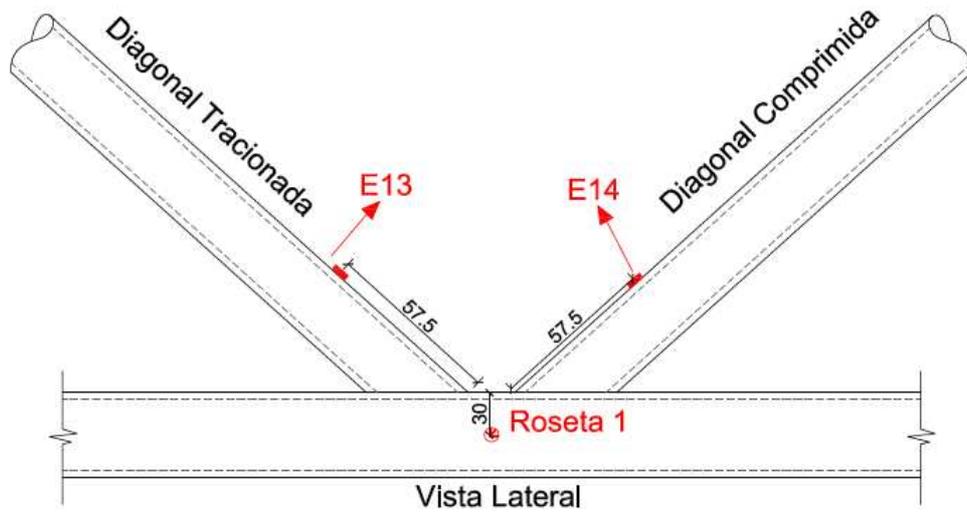
#### 4.2. Ligação tipo “K”

Para a análise das ligações tipo “K” com afastamento foram realizados três ensaios, denominados de K01-B, K02-B, K03-B. Antes da realização dos ensaios foram medidas

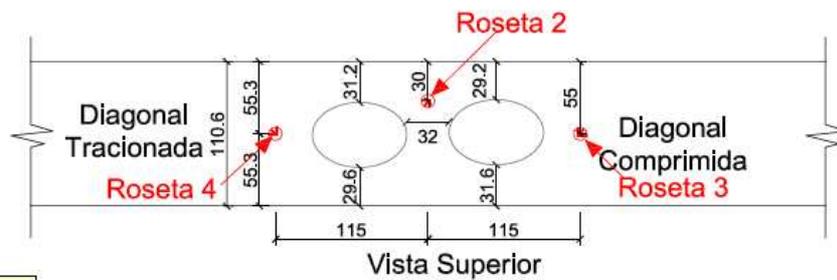
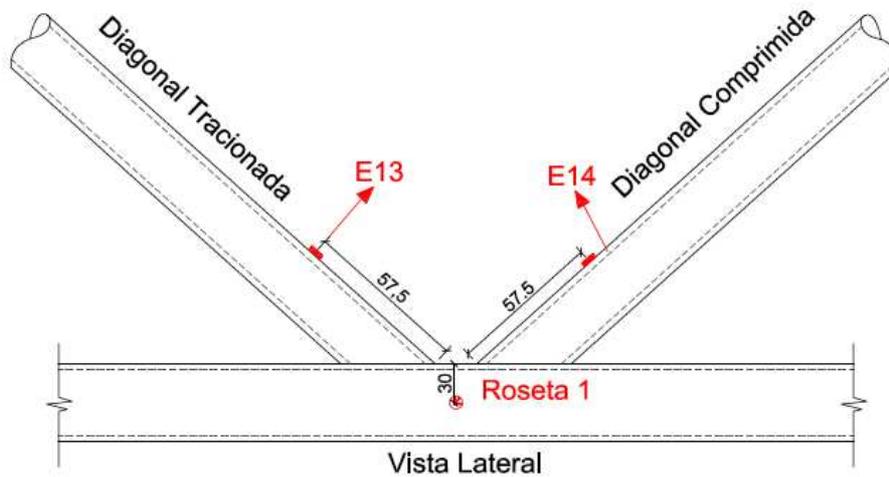
as imperfeições de cada protótipo apresentado na Figura 4.1(a) para o protótipo K01-B, na Figura 4.1(b) para o protótipo K02-B e na Figura 4.1(c) para o protótipo K03-B. Nestas figuras também estão representadas as posições das rosetas e dos extensômetros, onde a roseta 1 está localizada na face lateral do banzo, a roseta 2 na face superior entre as duas diagonais, a roseta 3 também na face superior do banzo mais ao lado da diagonal de compressão e a roseta 4 ao lado da diagonal de tração. Já os extensômetro unidirecionais estão posicionados na diagonal tracionada (EER13) e outro na diagonal comprimida (EER14).



(a) Protótipo K01-B



(b) Protótipo K02-B



(c) Protótipo K03-B

Figura 4.1 – Imperfeições e posição dos extensômetros nos ensaios das ligações tipo “K”.

Após os dois primeiros ensaios (K01-B e K02-B), pode-se observar uma pequena divergência nos resultados; portanto foi necessário fazer o terceiro ensaio para comparação desses (K03-B).

O nível de carregamento aplicado nas diagonais foi determinado a partir da máxima resistência obtida teoricamente, por meio de uma rotina de cálculo desenvolvida com base nos limites e cálculos do Eurocode 3 (2005). Sendo esta carga dividida por passos de carga durante o ensaio e, ao se aproximar da carga de projeto, estes passos de cargas foram diminuindo para melhor visualização do modo de falha e comparação dos resultados.

Para o protótipo K01-B, o início do escoamento do material ocorreu primeiro na roseta 2, com uma carga de 115,35 kN aplicada na diagonal tracionada e 115,33 kN na diagonal comprimida. Ao chegar à carga de 136,34 kN na diagonal tracionada e 136,93 kN na diagonal comprimida, o ensaio foi finalizado, ocorrendo o modo de falha da plastificação da face do banzo.

Já para o protótipo K02-B, o início do escoamento ocorreu com carga aplicada de 98,56 kN na diagonal tracionada e 97,39 kN na diagonal comprimida, também na roseta 2. E a carga última foi de 142,93 kN aplicada na diagonal tracionada e 142,93 kN na diagonal comprimida, ocorrendo também a plastificação da face do banzo como modo de falha.

No protótipo K03-B, o início do escoamento ocorreu com carga de 111,33 kN aplicada na diagonal tracionada e 111,48 kN na diagonal comprimida. A carga última foi de 144,13kN aplicada na diagonal tracionada e 143,80 kN na diagonal comprimida, também tendo-se a plastificação do banzo como modo de falha.

Na Tabela 4.1 estão apresentados as cargas em que ocorre o início do escoamento experimental ( $P_y$ ) e as cargas últimas experimentais ( $P_{últ.}$ ) para cada protótipo.

**Tabela 4.1 – Tabela de cargas experimentais aplicadas nos elementos considerando os efeitos na face superior do banzo das ligações tipo “K”.**

Tipo de ligação	Protótipo	Elemento	Cargas Experimentais (kN)	
			$P_y$	$P_{ult.}$
K	K01-B	Diag. Trac.	115,35	136,34
		Diag. Comp.	-115,33	-136,93
	K02-B	Diag. Trac.	98,56	142,93
		Diag. Comp.	-97,39	-142,83
	K03-B	Diag. Trac.	111,33	144,13
		Diag. Comp.	-111,48	-143,80

A partir dos resultados obtidos nos ensaios, verificou-se que o modo de falha preponderante dos protótipos ensaiados foi a “Plastificação da face ou de toda a seção transversal do banzo, junto a diagonais ou montantes (Modo A)”, o mesmo determinado teoricamente.

Nas Figuras 4.2 a 4.5 estão apresentados os resultados das tensões de von Mises das quatro rosetas coladas no banzo das ligações tipo “K”, até a tensão de escoamento do material do banzo. Nestes gráficos, podem-se observar também as posições das rosetas, sendo a diagonal da direita a diagonal comprimida e o valor do escoamento material do banzo obtido pelo ensaio de caracterização, indicado pela linha vertical.

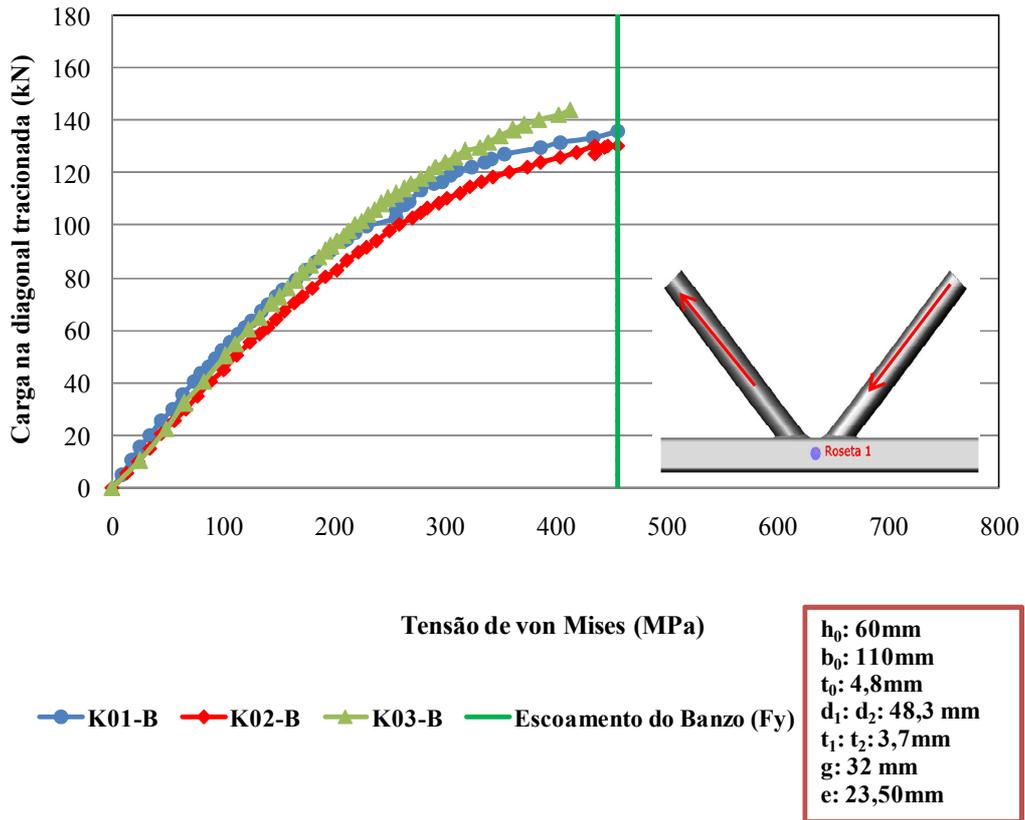


Figura 4.2 – Carga x Tensão de von Mises para as ligações tipo “K” - Roseta 1

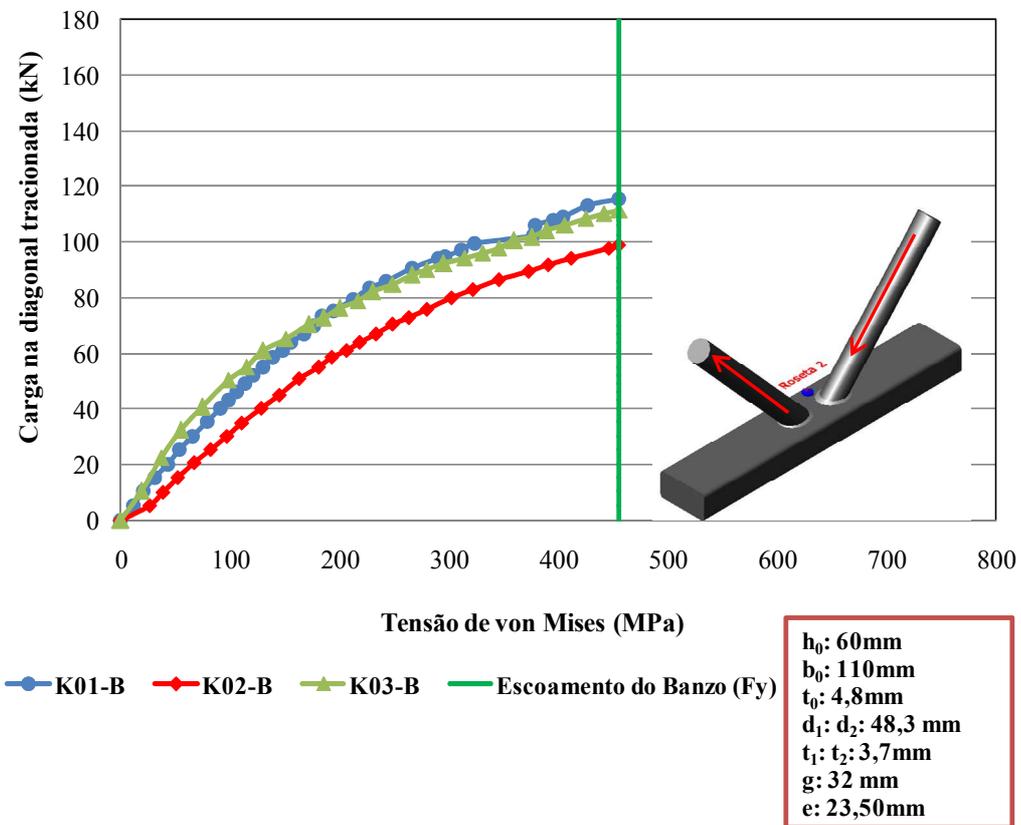


Figura 4.3 – Carga x Tensão de von Mises para as ligações tipo “K”- Roseta 2.

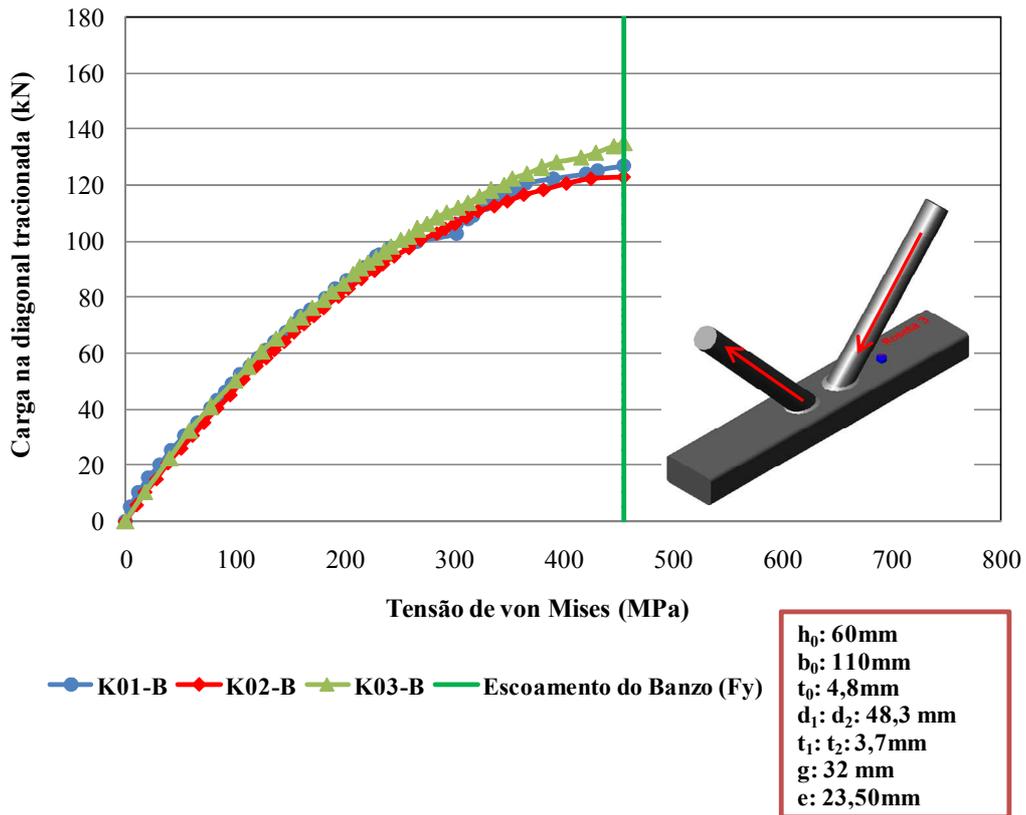


Figura 4.4 – Carga x Tensão de von Mises para as ligações tipo “K” – Roseta 3.

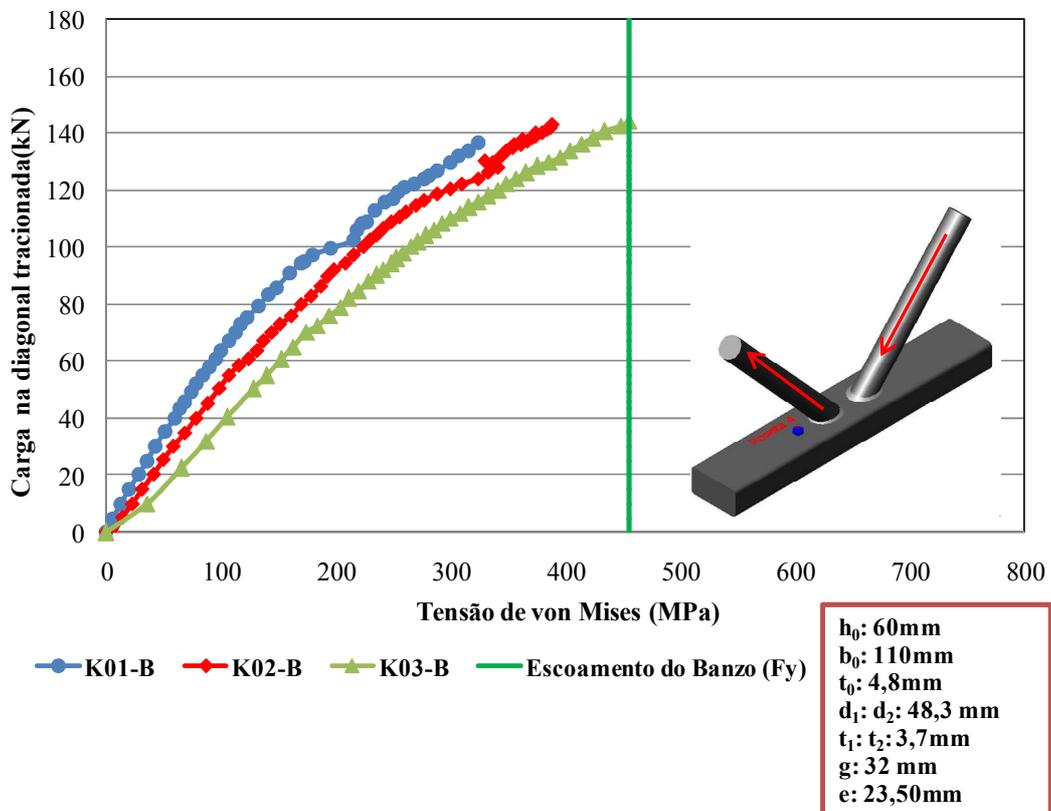


Figura 4.5 – Carga x Tensão de von Mises para as ligações tipo “K” – Roseta 4.

A partir das Figuras 4.2 a 4.5, pode-se observar também uma pequena divergência entre os resultados dos protótipos K02-B dos K01-B e K03-B, tendo uma melhor correlação entre o K01-B e o K03-B. E pelas Figuras 4.3 e 4.4, pode-se observar que o escoamento do banzo ocorre primeiro nas rosetas 2 e 3, configurando o modo de falha como a plastificação da face do banzo.

No caso da relação entre as tensões normais e o carregamento, pode-se observar na Figura 4.6 uma boa correlação entre os protótipos K02-B e o K03-B e que o aço das diagonais não chegaram ao escoamento, pois a deformação ocorrida durante o ensaio voltou à zero após o descarregamento, representando a face elástica do material.

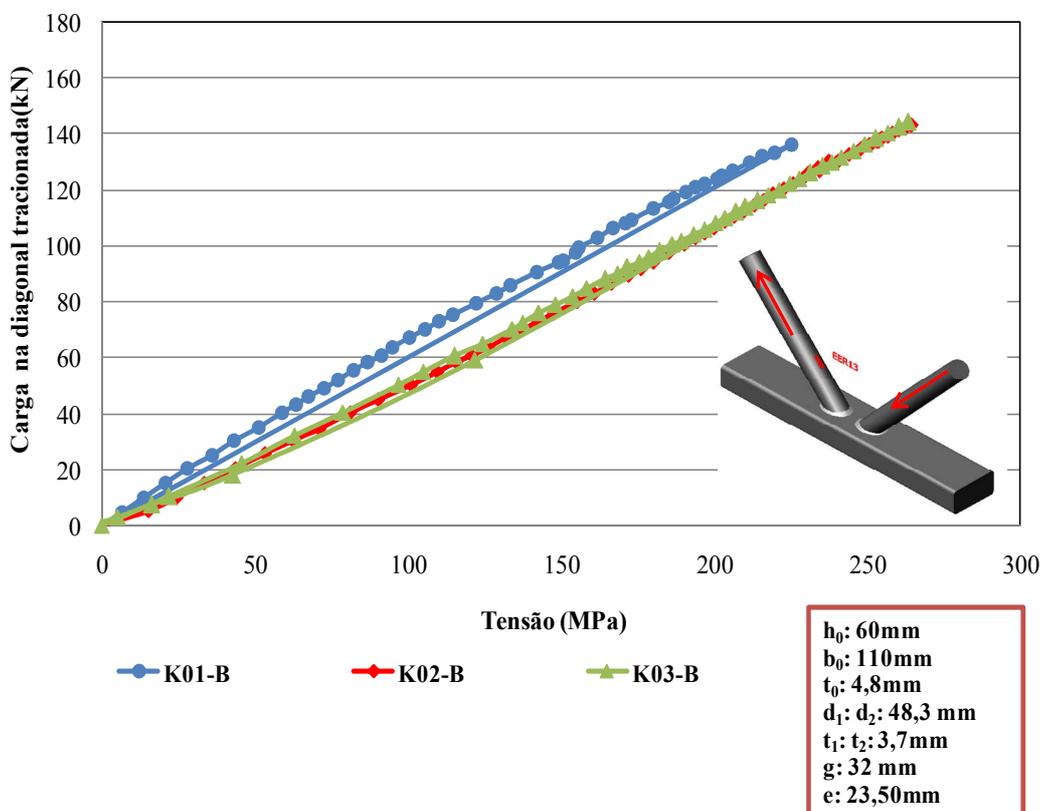
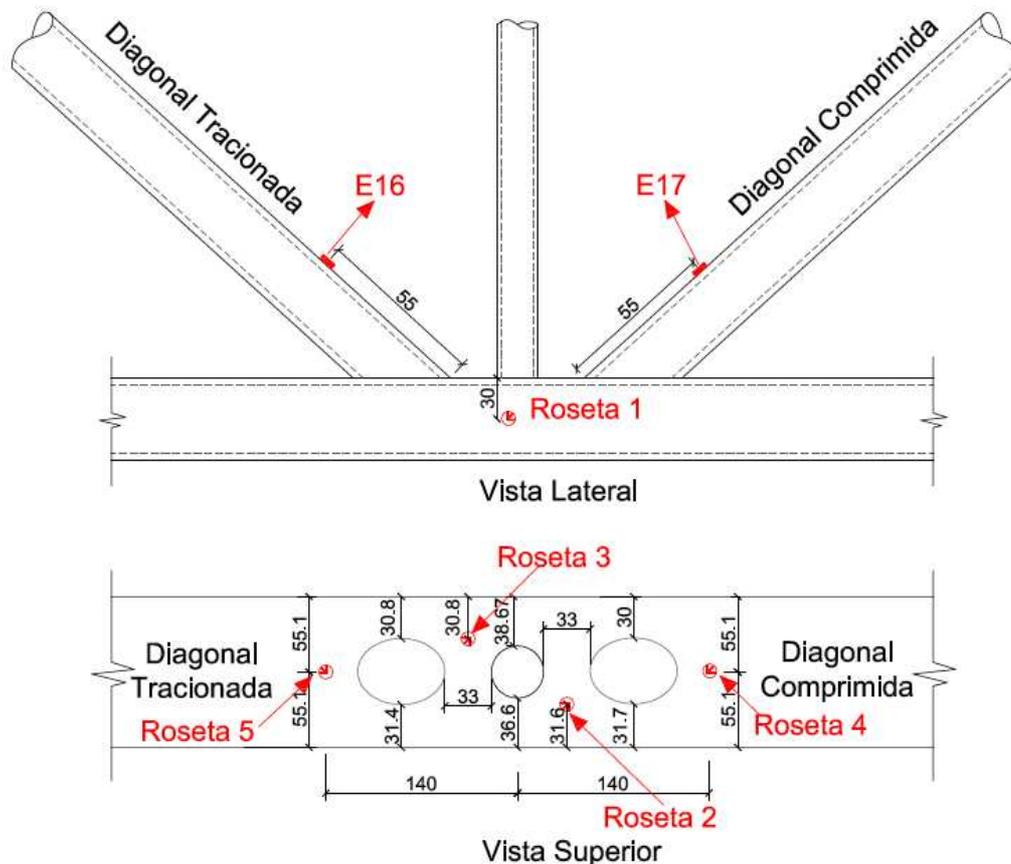


Figura 4.6 – Carga x Tensão normais para as ligações tipo “K” – Extensômetro 13.

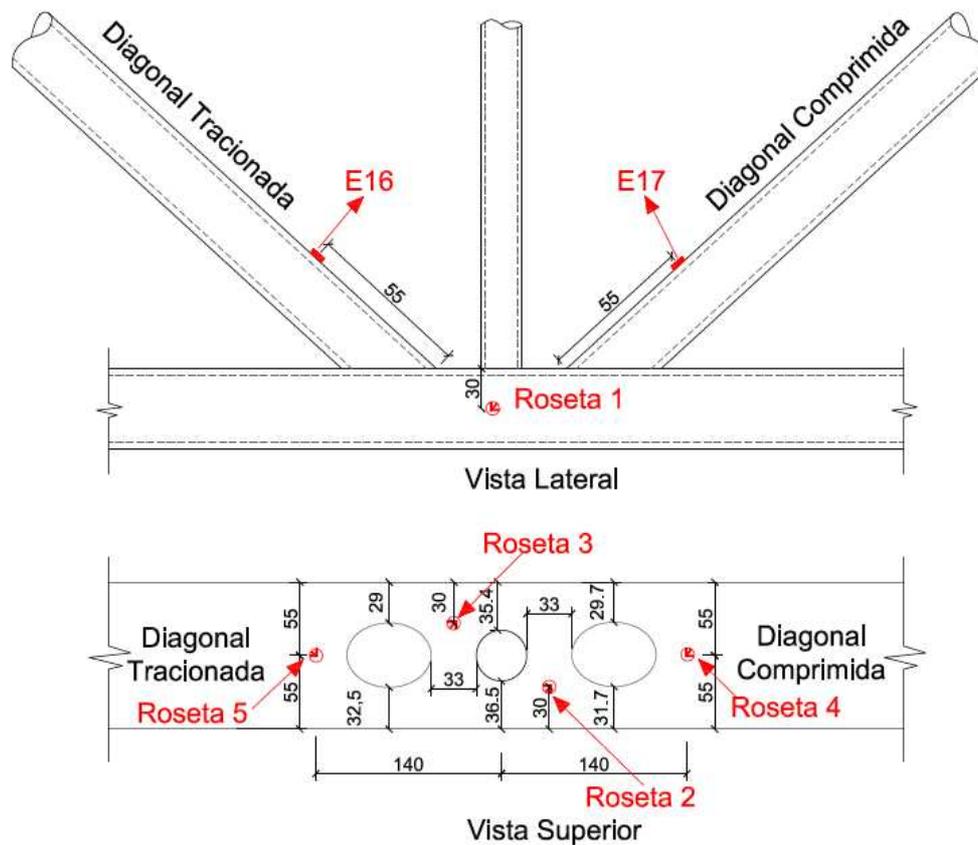
Os deslocamentos obtidos através dos LVDT's foram muito pequenos, sendo considerados desprezíveis.

### 4.3. Ligação tipo “KT”

Para a análise das ligações tipo “KT”, foram realizados apenas dois ensaios, denominados de KT01-B e KT02-B, não sendo necessária a realização do terceiro ensaio devido à boa correlação entre os resultados dos dois primeiros. Antes da realização dos ensaios, foram medidas as imperfeições de cada protótipo apresentado na Figura 4.7(a) para o protótipo KT01-B e na Figura 4.7(b) para o protótipo KT02-B. Nestas figuras, também estão representadas as posições das rosetas e dos extensômetros lineares, onde a roseta 1 está localizada na face lateral do banzo, a roseta 2 na face superior entre a diagonal comprimida e o montante, a roseta 3 também na face superior do banzo entre a diagonal tracionada e o montante, a roseta 4 posicionada ao lado da diagonal de compressão e a roseta 5 ao lado da diagonal de tração. Já os extensômetro lineares estão posicionados na diagonal tracionada (EER16) e outro na diagonal comprimida (EER17).



(a) Protótipo KT01-B



(b) Protótipo KT02-B

Figura 4.7 – Imperfeições e posição dos extensômetros nos ensaios das ligações tipo “KT”.

O nível de carregamento aplicado no montante foi baseado inicialmente na dissertação de Mendes (2008), no qual foi utilizada uma carga de 75% do valor da carga nas diagonais. Como não ocorreu uma boa correlação entre os resultados experimentais e a carga de projeto, achou-se necessário diminuir essa carga, utilizando, dessa forma, um nível de carregamento de 15% da carga das diagonais, determinada a partir da análise de uma treliça de 10m de largura e 0,55m de altura definida por Mendes (2008) e também pela máxima capacidade de carga obtida teoricamente por meio de uma rotina de cálculo desenvolvida com base nos limites e cálculos do Eurocode 3 (2005).

Os carregamentos nas diagonais e montantes também foram divididos em passos de carga durante o ensaio e, ao se aproximar da carga de projeto, estes passos de cargas foram diminuindo para melhor visualização do modo de falha.

Para o protótipo KT01-B, o escoamento do material ocorreu primeiro na roseta 2, com uma carga de 76,72 kN na diagonal tracionada, 76,76 kN na diagonal comprimida e

11,71 kN no montante. E ao chegar a carga de 118,73 kN na diagonal tracionada, 117,43 kN na diagonal comprimida e 17,61 kN no montante, o ensaio foi finalizado, ocorrendo o modo de falha da plastificação da face do banzo.

Já para o protótipo KT02-B, o escoamento ocorreu com carga de 87,04 kN na diagonal tracionada, 86,78 kN na diagonal comprimida e 13,05 kN no montante, também na roseta 2. E a carga última alcançada foi de 125,43 kN na diagonal tracionada, 123,70 kN na diagonal comprimida e 18,67 kN no montante, ocorrendo também a plastificação da face do banzo como modo de falha.

Na Tabela 4.2, estão apresentadas as cargas de escoamento experimentais ( $P_y$ ) e as cargas últimas experimentais ( $P_{ult.}$ ) para cada protótipo.

**Tabela 4.2 – Tabela de cargas experimentais aplicadas nos elementos considerando os efeitos na face superior do banzo das ligações tipo “KT”.**

Tipo de ligação	Protótipo	Elemento	Cargas Experimentais (kN)	
			$P_y$	$P_{ult.}$
KT	KT01-B	Diag. Trac.	76,72	118,73
		Diag. Comp.	-76,761	-117,43
		Montante	-11,71	-17,61
	KT02-B	Diag. Trac.	87,04	125,43
		Diag. Comp.	-86,78	-123,70
		Montante	-13,05	-18,67

A partir dos resultados obtidos nos ensaios, verificou-se que o modo de falha preponderante dos protótipos tipo “KT” ensaiados também foi a “Plastificação da face do banzo (Modo A)”, o mesmo determinado teoricamente.

Nas Figuras 4.8 a 4.12, estão apresentados os resultados das tensões de von Mises das cinco rosetas coladas no banzo das ligações tipo “KT”, até a tensão de escoamento do material do banzo. Nestes gráficos, podem-se observar as posições das rosetas, sendo a diagonal da direita a diagonal comprimida e o valor do escoamento do banzo representado pela linha vertical verde.

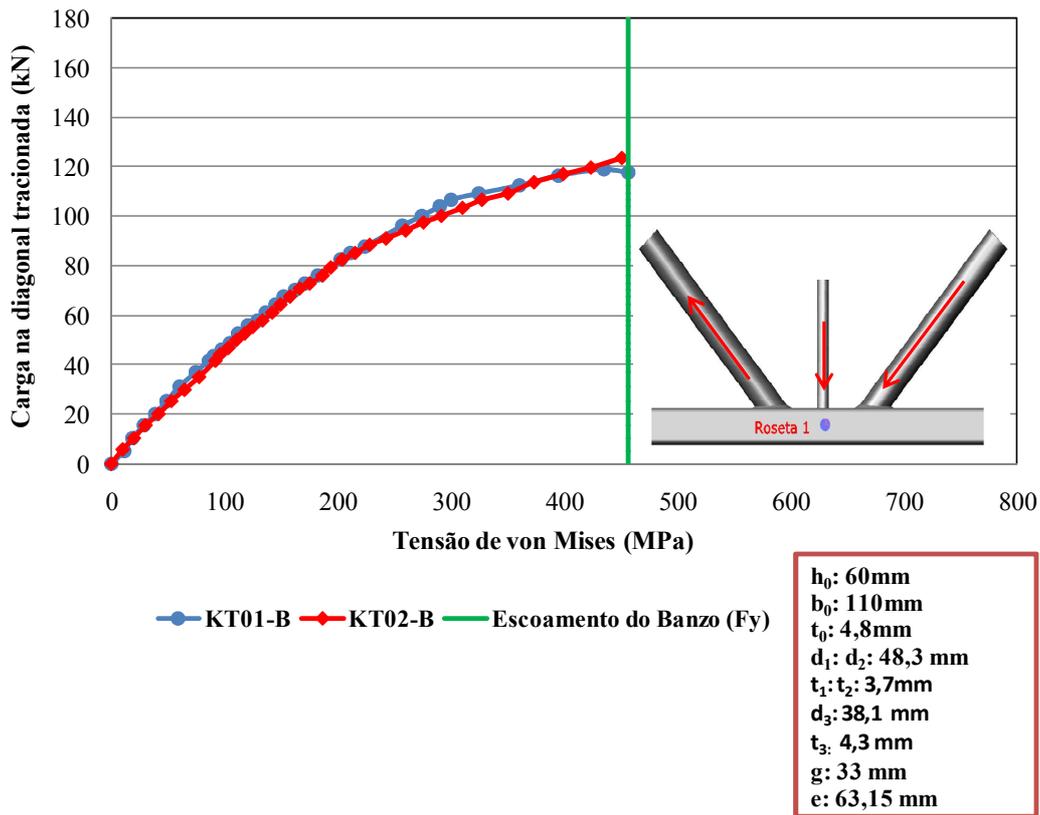


Figura 4.8 – Carga x Tensão de von Mises para as ligações tipo “KT” – Roseta 1.

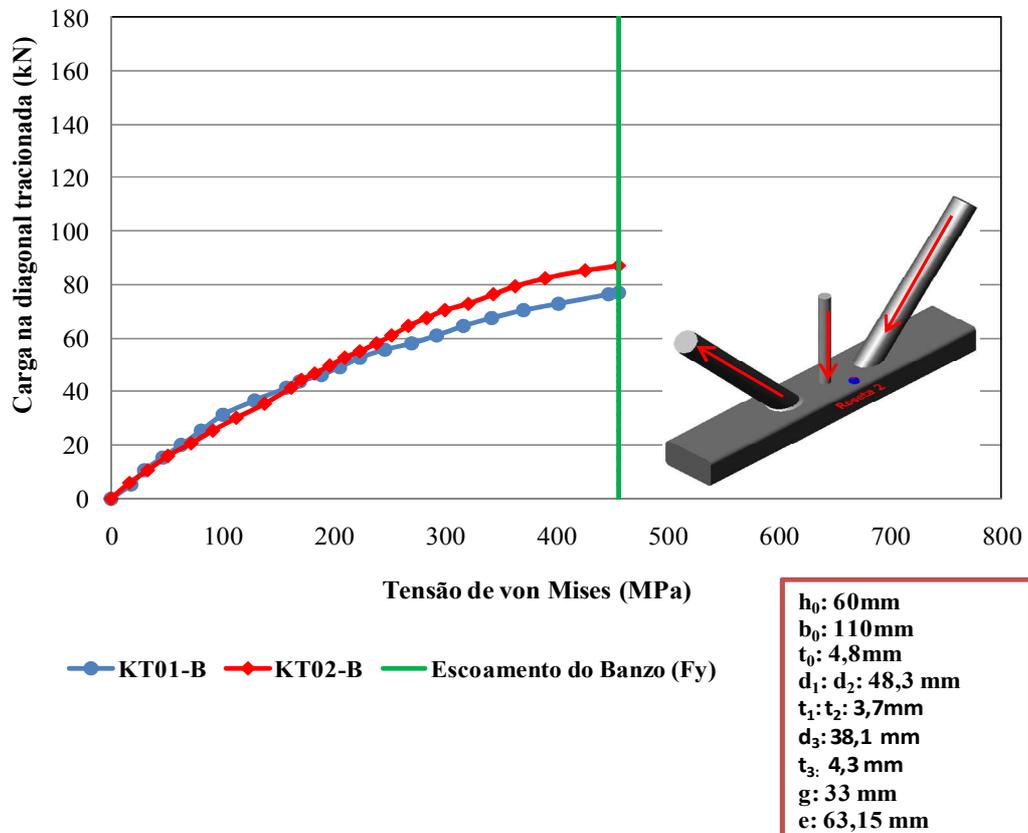


Figura 4.9 – Carga x Tensão de von Mises para as ligações tipo “KT” – Roseta 2.

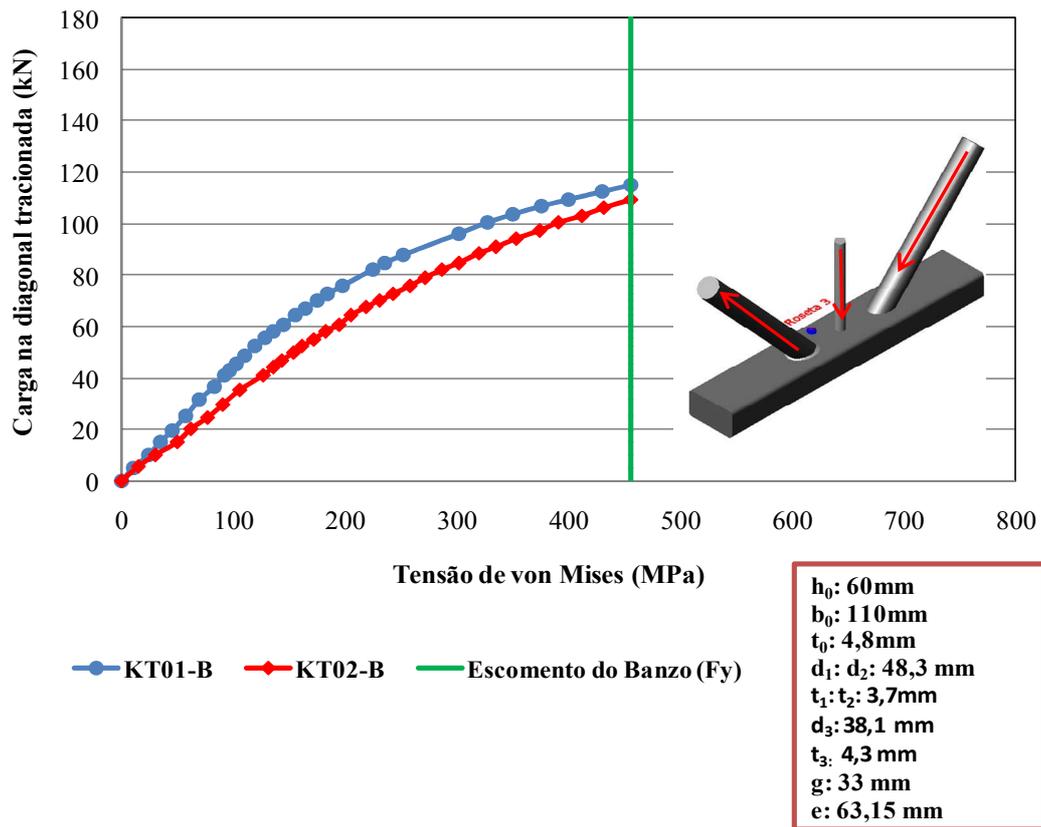


Figura 4.10 – Carga x Tensão de von Mises para as ligações tipo “KT” – Roseta 3.

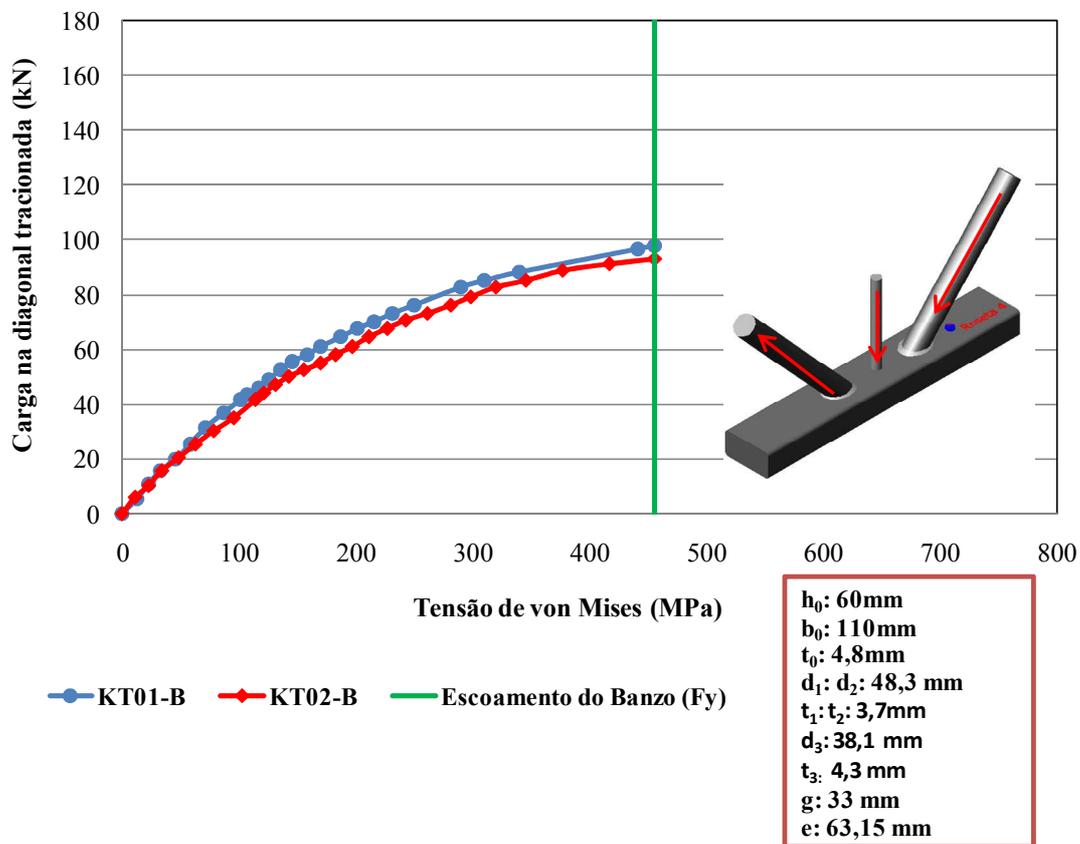


Figura 4.11 – Carga x Tensão de von Mises para ligações tipo “KT” – Roseta 4.

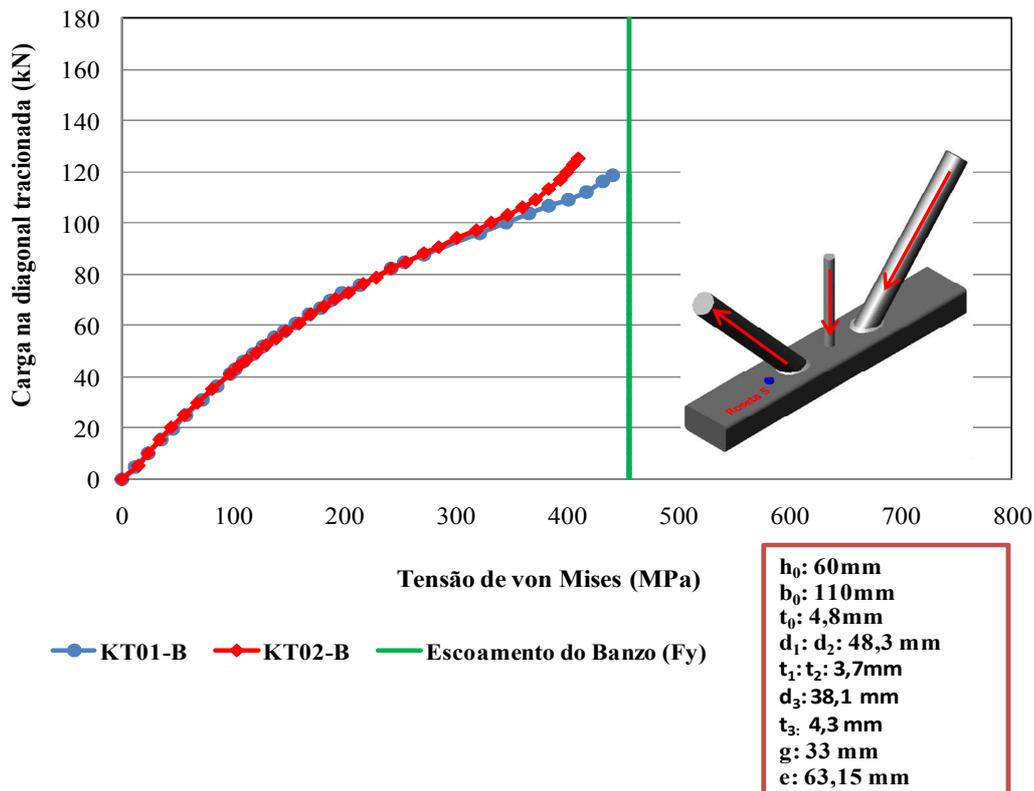


Figura 4.12 – Carga x Tensão de von Mises para ligações tipo “KT” – Roseta 5.

Nota-se pelas Figuras 4.8 a 4.12 uma boa correlação entre os ensaios dos protótipos “KT01-B” e “KT02-B”. Observa-se também pelas Figuras 4.9 e 4.11 que o escoamento do banzo ocorre primeiro nas rosetas 2 e 4, que são as rosetas mais próximas à diagonal comprimida, configurando o modo de falha como a plastificação da face do banzo.

As relações entre a tensão normal no extensômetro 16, localizado na diagonal tracionada, e o carregamento estão representadas na Figura 4.13, que apresenta uma boa correlação entre os dois protótipos KT01-B e o KT02-B. Pode-se observar também que o aço das diagonais não chegou ao escoamento, pois a deformação ocorrida durante o ensaio voltou à zero após o descarregamento, representando a face elástica do material.

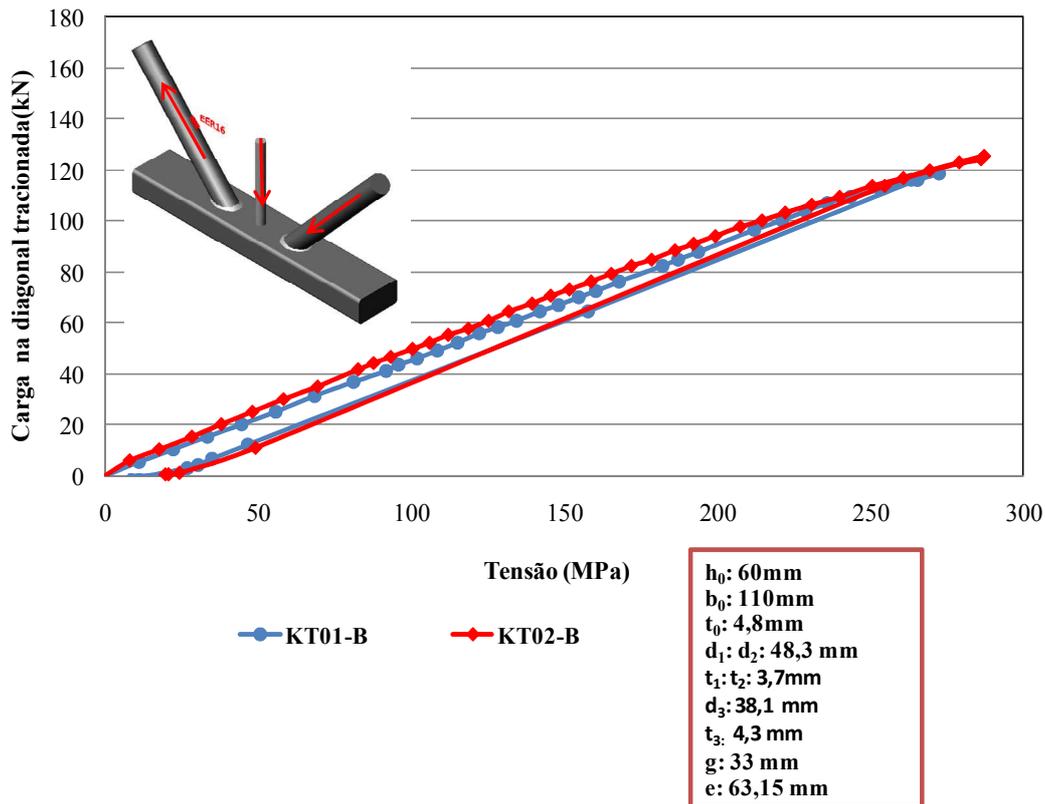


Figura 4.13 - Carga x Tensão normais para as ligações tipo “KT” – Extensômetro 16.

Os deslocamentos obtidos através dos LVDT's foram muito pequenos, sendo considerados desprezíveis.

#### 4.4. Análise dos resultados

##### 4.4.1. Resultados Experimentais

Após os ensaios, pode-se observar que para as ligações tipo “K” e “KT” o modo de falha foi o mesmo: a “Plastificação da face ou de toda a seção transversal do banzo, junto a diagonais ou montantes” (Modo A), descrita no capítulo 2.

Na Tabela 4.3, estão representados os resultados dos ensaios, ou seja, a carga de escoamento experimental ( $P_y$ ), a carga última experimental ( $P_{últ.}$ ) e seus respectivos modos de falha para as ligações tipo “K” e “KT” ensaiadas neste trabalho, bem como os resultados de Mendes (2008).

Tabela 4.3 – Resultados obtidos das cargas experimentais aplicadas nos elementos considerando os efeitos na face superior do banzo.

Tipo de ligação	Protótipo	Elemento	Cargas Experimentais (kN)		Modo de Falha
			$P_y$	$P_{ult.}$	
K	K01-B	Diag. Tractionada	115,35	136,34	A
		Diag. Comprimida	-115,32	-136,93	A
	K02-B	Diag. Tractionada	98,56	142,93	A
		Diag. Comprimida	-97,39	-142,83	A
	K03-B	Diag. Tractionada	111,33	144,13	A
		Diag. Comprimida	-111,48	-143,80	A
KT	KT01-B	Diag. Tractionada	76,72	118,73	A
		Diag. Comprimida	-76,76	-117,43	A
		Montante	-11,71	-17,61	A
	KT02-B	Diag. Tractionada	87,04	125,43	A
		Diag. Comprimida	-86,78	-123,70	A
		Montante	-13,05	-18,67	A
<b>Mendes (2008)</b>					
K	K01	Diag. Tractionada	136,00	170,00	A
		Diag. Comprimida	-136,00	-170,00	A
	K02	Diag. Tractionada	121,30	170,00	A
		Diag. Comprimida	-121,30	-170,00	A
KT	KT 01	Diag. Tractionada	45,00	108,90	A
		Diag. Comprimida	-42,50	-89,05	A
		Montante	-31,20	-66,00	A
	KT02	Diag. Tractionada	60,00	97,60	A
		Diag. Comprimida	-59,00	-85,90	A
		Montante	-43,60	-63,60	A
	KT03	Diag. Tractionada	60,00	106,80	A
		Diag. Comprimida	-58,90	-90,00	A
		Montante	-43,60	-66,90	A

## CAPÍTULO 5

### **5. MODELAGEM COMPUTACIONAL E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM OS RESULTADOS TEÓRICOS DE NORMA.**

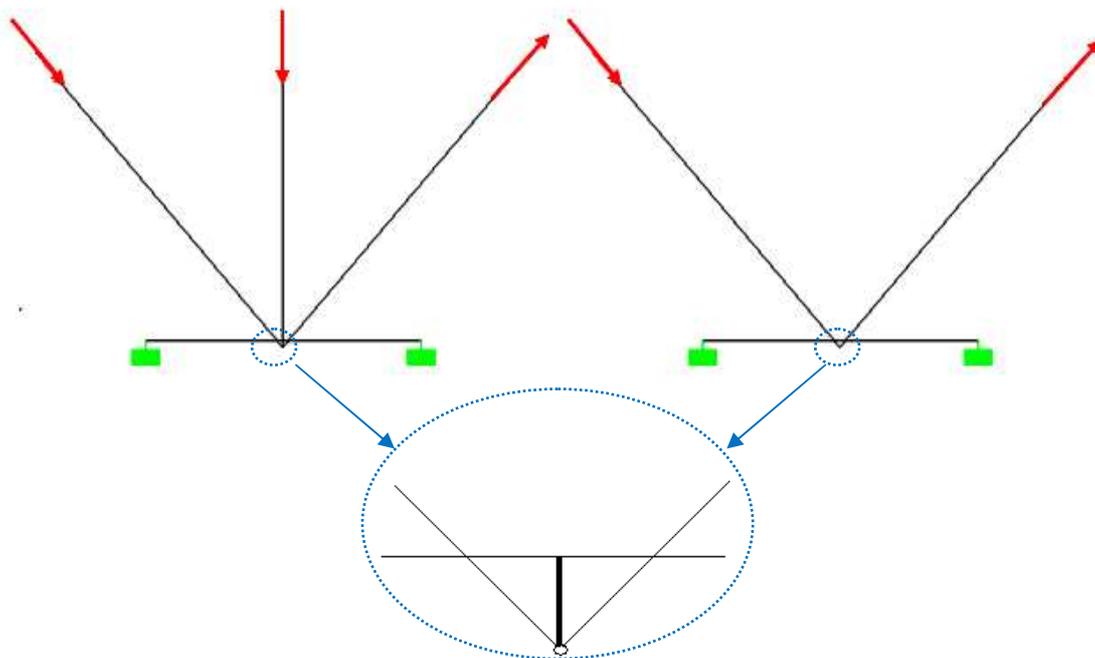
#### **5.1. Considerações iniciais**

Nos itens seguintes será apresentada a comparação entre os resultados experimentais com os modelos numéricos e as cargas de projeto ( $N_{i,Rd}$ ) calculada com base nas prescrições do Eurocode 3 (2005) e bem como os respectivos modos de falha para cada um dos protótipos.

Será mostrada também uma análise da influência da altura do banzo, na qual variou-se a altura e a espessura do perfil do banzo para cada tipo de ligação, deixando constante a relação de  $h_0/t_0$  do perfil do banzo.

#### **5.2. Comparação entre os resultados experimentais e as cargas de projeto**

Para a determinação da carga de projeto segundo o item 5.1.5 (6) do Eurocode 3 (2005) e o CIDECT (1996) foram obtidos os esforços a partir do esquema das ligações apresentado na Figura 5.1. Neste esquema, conforme Packer (2007), a consideração da excentricidade das ligações do tipo “KT” e “K” possibilita a redistribuição de momentos entre as barras da ligação, conforme apresentado no capítulo 2. Neste esquema os esforços são obtidos na face superior do banzo conforme previsto no item 7.5.2 do Eurocode 3 (2005).



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

Na tabela 5.1, têm-se a comparação entre as cargas de projeto ( $N_{i,Rd}$ ) calculada com base nas prescrições do Eurocode 3 (2005) e os resultados experimentais, bem como os respectivos modos de falha para cada um dos protótipos ensaiados neste trabalho. Na tabela 5.2 estão os resultados de Mendes (2008) com as mesmas comparações.

**Tabela 5.1 - Resultados obtidos dos limites teóricos e das cargas experimentais aplicadas nos elementos considerando os efeitos na face superior do banzo.**

Tipo de ligação	Protótipo	Elemento	Cargas Experimentais (kN)		$N_{i,Rd}$ (kN)	$\frac{P_y}{N_{i,Rd}}$	Modo de falha	
			$P_y$	$P_{ult.}$			Exp.	Eurocode
KT	KT01-B	Diag. Trac.	76,72	118,73	51,79	1,48	A	A
		Diag. Comp.	-76,76	-117,43	-51,79	1,48	A	A
		Montante	-11,71	-17,61	-	-	A	A
	KT02-B	Diag. Trac.	87,04	125,43	51,79	1,68	A	A
		Diag. Comp.	-86,78	-123,70	-51,79	1,68	A	A
		Montante	-13,05	-18,67	-	-	A	A
K	K01-B	Diag. Trac.	115,35	136,34	87,70	1,32	A	A
		Diag. Comp.	-115,33	-136,93	-87,70	1,32	A	A
	K02-B	Diag. Trac.	98,56	142,93	87,70	1,12	A	A
		Diag. Comp.	-97,39	-142,83	-87,70	1,11	A	A
	K03-B	Diag. Trac.	111,33	144,13	87,70	1,27	A	A
		Diag. Comp.	-111,48	-143,80	-87,70	1,27	A	A

Observa-se pela Tabela 5.1, que as cargas de projeto calculadas são menores que a carga de escoamento experimental, para as duas ligações. Observa-se que os valores para as ligações tipo “KT” são mais conservadores que os das ligações tipo “K”.

**Tabela 5.2 - Resultados obtidos por Mendes (2008) dos limites teóricos e das cargas experimentais aplicadas nos elementos considerando os efeitos na face superior do banzo.**

Tipo de ligação	Protótipo	Elemento	Cargas Experimentais (kN)		$N_{i,Rd}$ (kN)	$\frac{P_y}{N_{i,Rd}}$	Modo de falha	
			$P_y$	$P_{ult.}$			Exp.	Eurocode
KT	KT 01	Diag. Trac.	45,00	108,9	98,12	0,46	A	A
		Diag. Comp.	-42,50	-89,05	-98,12	0,43	A	A
		Montante	-31,20	-66,00	-	-	A	A
	KT02	Diag. Trac.	60,00	97,60	98,12	0,61	A	A
		Diag. Comp.	-59,00	-85,90	-98,12	0,60	A	A
		Montante	-43,60	-63,60	-	-	A	A
	KT03	Diag. Trac.	60,00	106,80	98,12	0,61	A	A
		Diag. Comp.	-58,90	-90,00	-98,12	0,60	A	A
		Montante	-43,60	-66,90	-	-	A	A
K	K01	Diag. Trac.	136,00	170,00	115,00	1,18	A	A
		Diag. Comp.	-136,00	-170,00	-115,00	1,18	A	A
	K02	Diag. Trac.	121,30	170,00	115,00	1,05	A	A
		Diag. Comp.	-121,30	-170,00	-115,00	1,05	A	A

Já na Tabela 5.2 pode-se observar uma diferença nos resultados obtidos das ligações tipo “KT”, ensaiadas por Mendes (2008), ou seja, para essas ligações a carga de projeto ( $N_{i,Rd}$ ) obtida é maior que a carga de escoamento experimental ( $P_y$ ). Nas ligações tipo “K” as cargas de projeto calculadas são menores que a carga de escoamento experimental, analogamente aos resultados obtidos neste trabalho.

Comparando-se as Tabelas 5.1 e 5.2 observa-se que a variação da resistência da ligação tipo “KT” dos ensaios de Mendes e os deste trabalho estão associadas a diferença na carga aplicada no montante. Nos ensaios de Mendes, o valor da carga no montante é de 75% da carga aplicada nas diagonais, e neste trabalho utilizou-se a relação de 15%. Assim, a consideração da influência da carga do montante na resistência da ligação deve ser melhor avaliada nas prescrições utilizadas neste estudo.

### 5.3. Metodologia da análise numérica

Foram gerados um total de sete modelos numéricos, sendo quatro do tipo “K”, no qual três representam os protótipos ensaiado com suas imperfeições reais K01-B, K02-B e K03-B e um representa o modelo nominal, sendo denominados de NK01-B, NK02-B, NK03-B e NK60 respectivamente, e três do tipo “KT”, dois que representam os protótipos ensaiados com suas imperfeições reais KT01-B e KT02-B e um representado um modelo nominal, sendo denominados por NKT01-B, NKT02-B e NKT60 respectivamente.

Inicialmente foi feita uma pré-modelagem em 3D das ligações no software AutoCAD (2006). Essa modelagem foi realizada a partir das linhas médias das espessuras de cada perfil, devido à modelagem no Ansys tomar como base, para a espessura do elemento de casca a superfície média, e considerando também as imperfeições das ligações.

Na Figura 5.2 está representada a modelagem de uma ligação tipo “KT” no AutoCAD (2006).

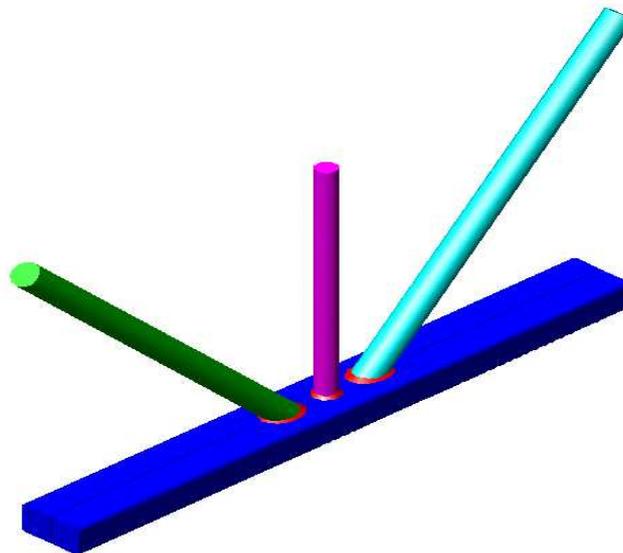


Figura 5.2 – Sólido 3D gerado no AutoCAD 2006.

A modelagem do raio de curvatura foi baseada nos trabalhos de Mendanha (2006) e Mendes (2008), em que consideraram a curvatura do vértice do perfil retangular do banzo igual a duas vezes a espessura da parede do perfil ( $2.t_0$ ). Contudo, neste trabalho o raio de curvatura adotado do perfil retangular foi igual a uma vez e meia a espessura da parede do mesmo ( $1,5.t_0$ ), conforme avaliações feitas nas ligações ensaiadas.

Já a modelagem do cordão de solda inicialmente foi baseada no trabalho de Lee e Wilmschurts (1995), no qual os autores estudaram diversas modelagens de solda utilizando elementos de cascas em ligações duplo “K” com diagonais afastadas, em perfis tubulares. Três ligações com diferentes dimensões da solda foram analisadas (Figura 5.3). Um quarto tipo de modelagem da solda, utilizando um elemento sólido prismático superposto à interseção do elemento de casca também foi analisado. Os resultados mostraram que o modelo com elemento sólido elevou a valor da carga última muito pouco em relação ao elemento de casca, não justificando seu uso. Os autores compararam um modelo sem solda com os outros três modelos de diferentes tamanhos de solda, com isso pode-se observar que o modelo com maior tamanho da “garganta de solda”, representado na Figura 5.3 pelo número um, apresentou melhores resultados. Esse modelo foi utilizado na simulação em elementos finitos para as ligações ensaiadas por Mendanha (2006) e Mendes (2008).

No entanto Lee e Wilmschurts (1995), mencionados acima, utilizaram a perna da solda perpendicular à face dos elementos constituintes da ligação igual a  $1,0 \times t$ , sendo  $t$  a espessura da diagonal ou no banzo. Mas para os protótipo ensaiados foi necessário depois de algumas modelagens utiliza  $1,25 \times t$  como medida para a perna de solda, com a finalidade de se fazer uma melhor aproximação do protótipo real, devido às imperfeições no protótipo.

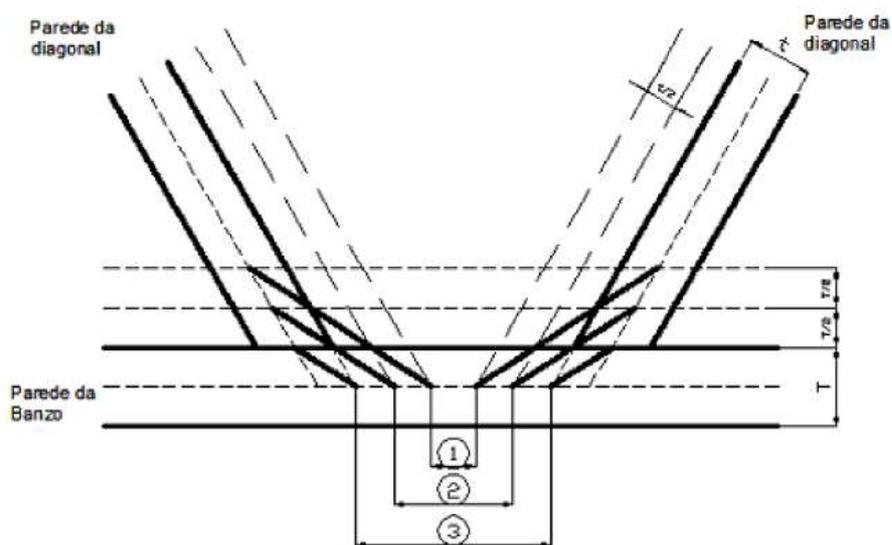
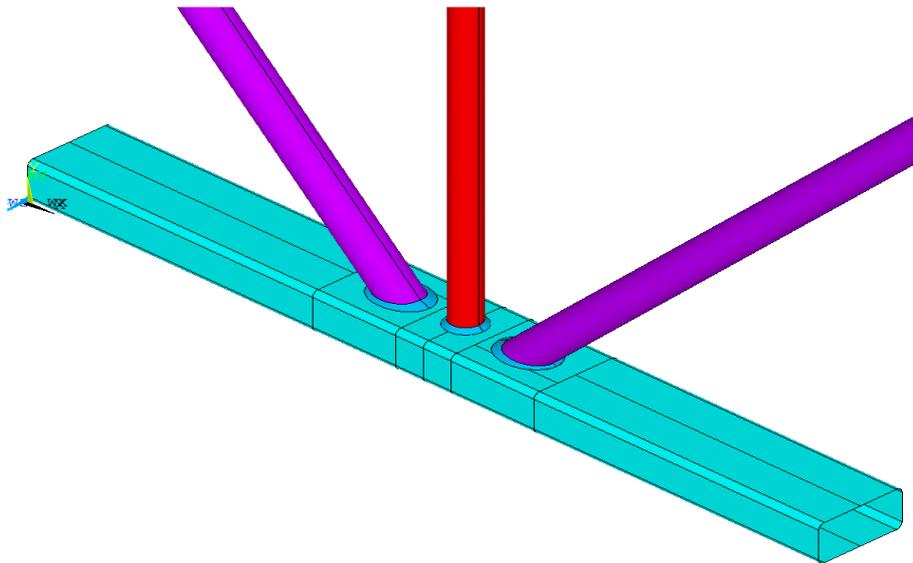


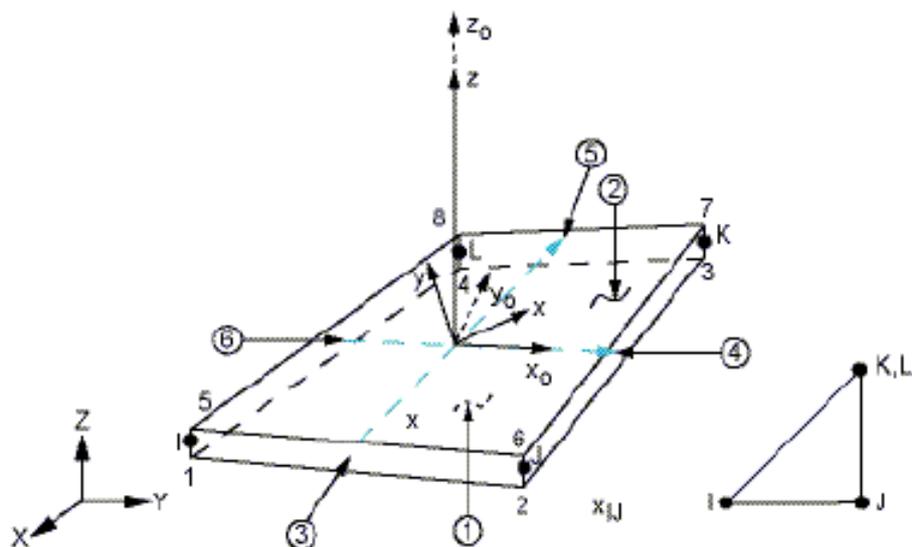
Figura 5.3 - Modelagem da solda (Lee e Wilmschurts, 1995).

Após a pré-modelagem foi necessário dividir o perfil do banzo, de forma que tivesse nós da malha de elementos finitos nos mesmos pontos de localização das rosetas, tornando esses evidenciados a fim de facilitar posteriormente a análise dos dados nos respectivos nós. Na Figura 5.4 pode-se observar algumas linhas produzidas pela divisão mencionada acima.



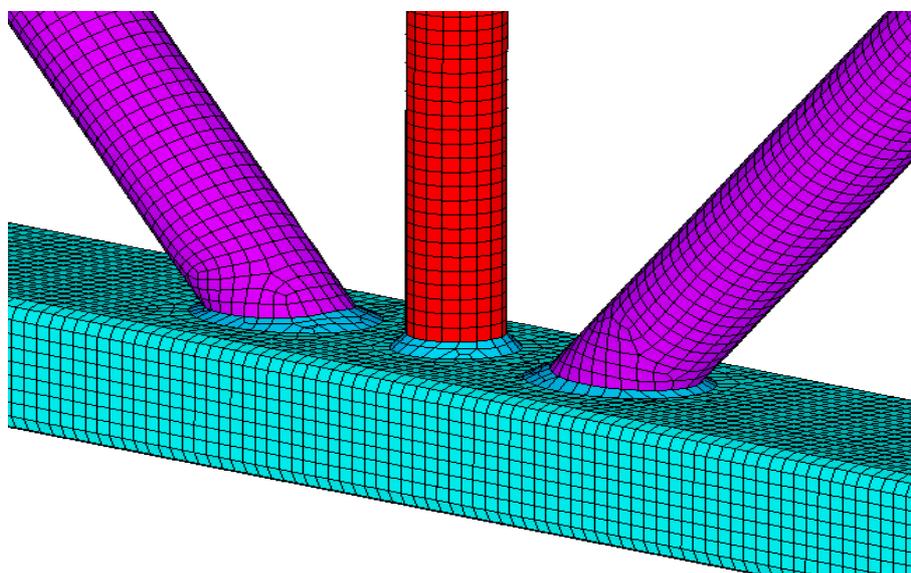
**Figura 5.4 – Modelo 3D de uma ligação tipo “KT”**

Para a geração da malha em elementos finitos foi utilizado o elemento de casca “Shell 181”, no qual apresenta quatro nós por elemento com seis graus de liberdade por nó, translação nas direções X, Y e Z e rotações em X, Y, e Z (Figura 5.5). Esse elemento foi escolhido levando em consideração alguns trabalhos anteriores, bem como a capacidade de adaptação aos contornos dos perfis, como por exemplo, o raio de curvatura do banzo, o custo computacional e o refinamento da malha utilizada. (Mendes, 2008)



**Figura 5.5 – Elemento de casca Shell 181 (Programa Ansys).**

Na Figura 5.6 temos representado um modelo numérico de uma ligação tipo “KT” onde pode-se observar a modelagem do raio de curvatura, o cordão de solda e a malha em elementos finitos gerada com o elemento de casca “Shell 181”.



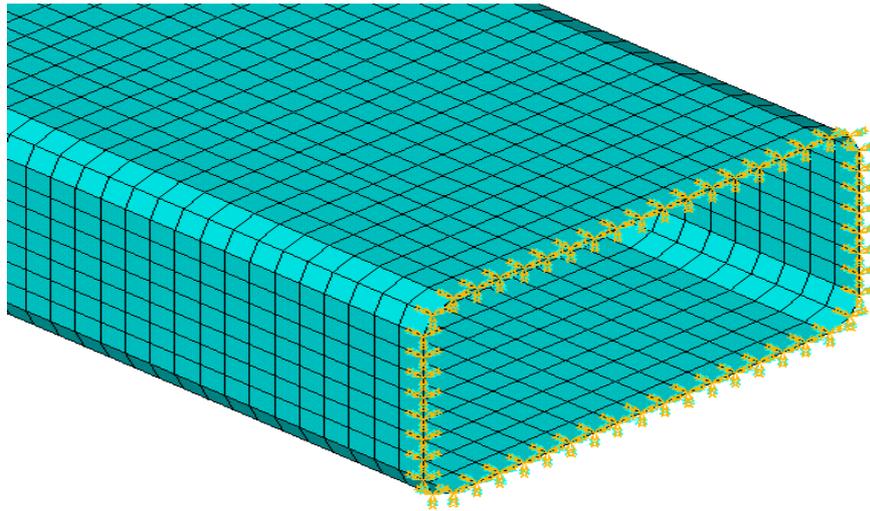
**Figura 5.6 - Modelo Numérico de uma ligação “KT”.**

Para a análise numérica foi utilizado o diagrama bi-linear com material não linear e inelástico, 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,  $E = 200000 \text{ MPa}$ ;
- ✓ Coeficiente de Poisson,  $\nu = 0,3$ ;
- ✓ Limite de escoamento do aço para os banzos,  $f_y = 456 \text{ MPa}$ ;
- ✓ Limite de escoamento do aço para as diagonais,  $f_y = 442 \text{ MPa}$ ;
- ✓ Limite de escoamento do aço para os montantes,  $f_y = 250 \text{ MPa}$ ;
- ✓ Módulo tangente para o banzo de  $720 \text{ MPa}$ ;
- ✓ Módulo tangente para as diagonais de  $930 \text{ MPa}$ ;
- ✓ Módulo tangente para os montantes de  $765 \text{ MPa}$ ;

Para o modelo numérico representar, da melhor forma possível o modelo real, foi necessário também inserir condições de contorno, ou seja, os nós localizados nas extremidades do banzo foram restringidos em todos os graus de liberdade (Figura 5.7), representando o comportamento da peça de fixação.

Já os nós localizados nas extremidades das diagonais foram restringidos nas direções de X e Z em relação às coordenadas locais, e os montantes apenas na direção de X, simulando as condições de contorno das rótulas e das peças de apoio dos atuadores hidráulicos.



**Figura 5.7 – Condições de Contorno no banzo.**

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

#### **5.4. Análise comparativa entre os modelos numéricos e os resultados experimentais**

##### **5.4.1. Ligações tipo “K”**

Como descrito anteriormente, os modelos numéricos das ligações tipo “K” estão representados como NK01-B, NK02-B, NK03-B e NK60 e os modelos experimentais como K01-B, K02-B e K03-B.

Nos modelos numéricos NK01-B, NK02-B e NK03-B foram aplicada uma carga de 115 kN nas diagonais comprimidas e tracionadas. Nos três modelos o escoamento do material do banzo ocorreu primeiro na roseta 2 com uma carga aproximadamente de 104 kN aplicada nas diagonais tracionada e comprimida, ocorrendo o modo de falha da plastificação da face do banzo (Modo A).

Nas Figuras 5.8 a 5.11 tem-se os gráficos da carga na diagonal tracionada versus a tensão de von Mises comparativo entre os modelos numéricos e os experimentais para cada roseta posicionada no banzo.

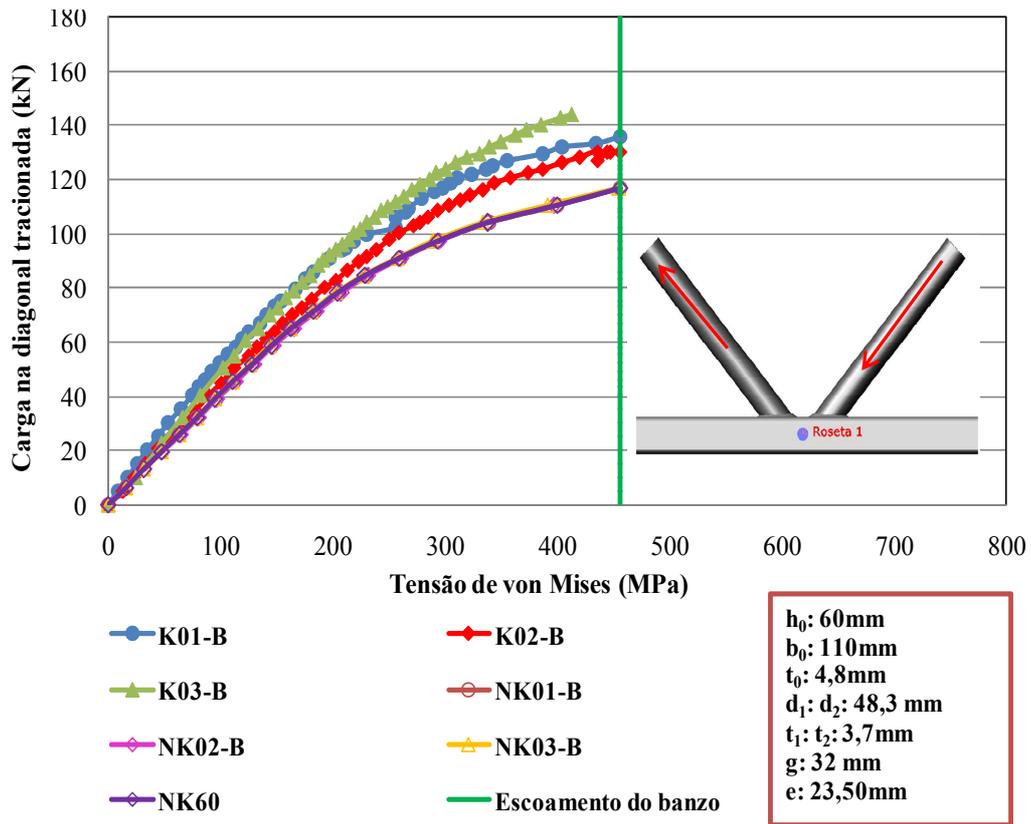


Figura 5.8 – Carga x Tensão de von Mises das Ligações tipo “K” – Roseta 1.

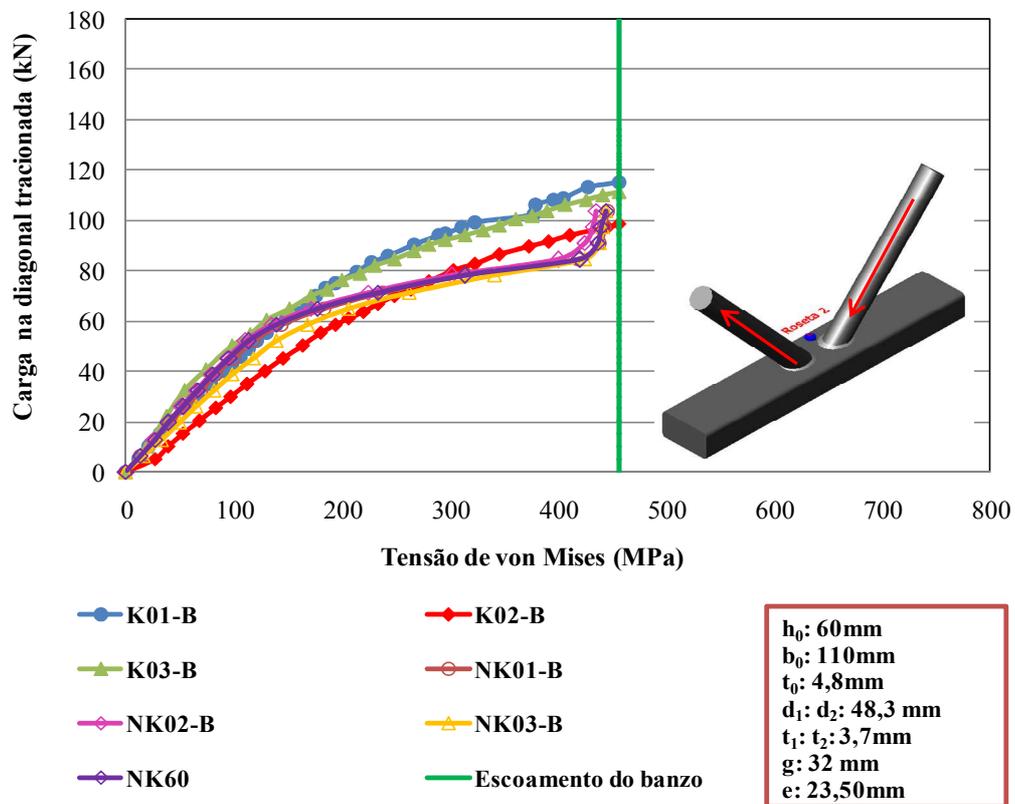


Figura 5.9 – Carga x Tensão de von Mises das Ligações tipo “K” – Roseta 2.

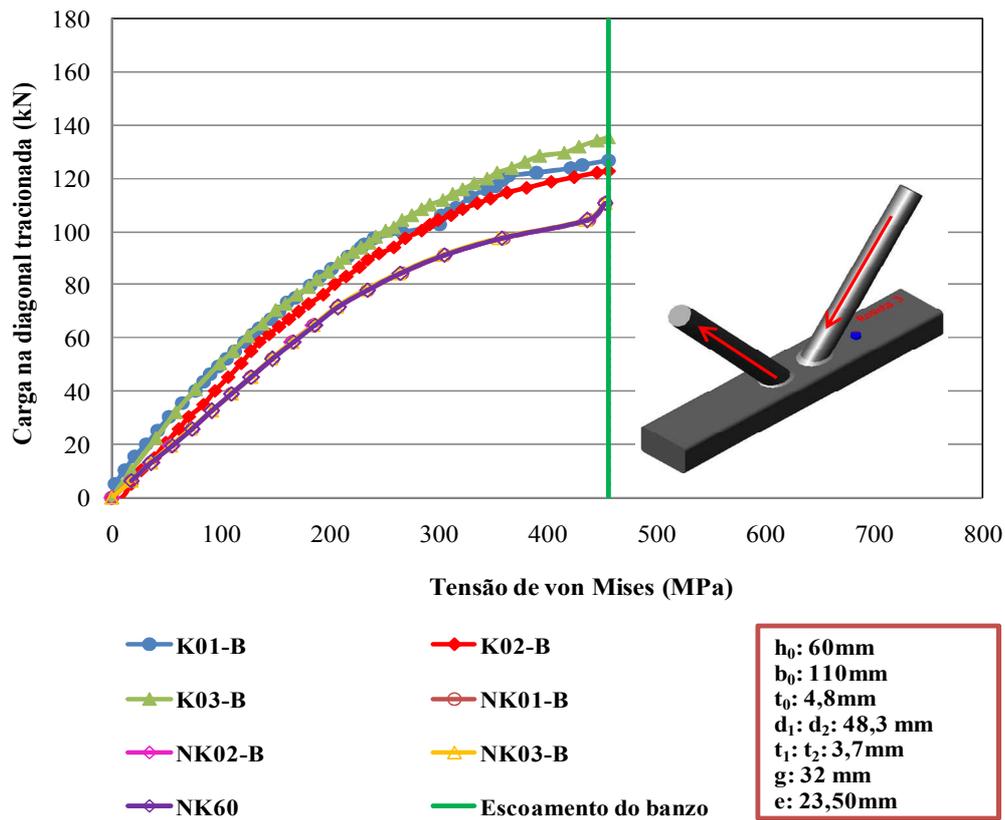


Figura 5.10 – Carga x Tensão de von Mises das Ligações tipo “K” – Roseta 3.

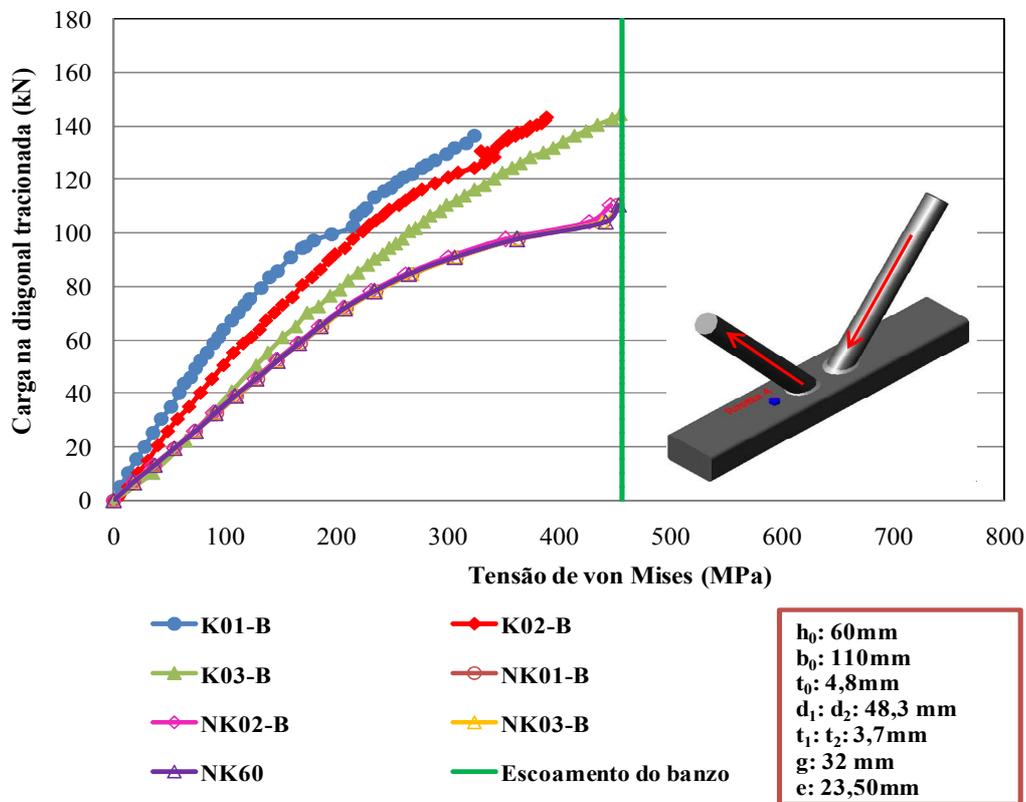
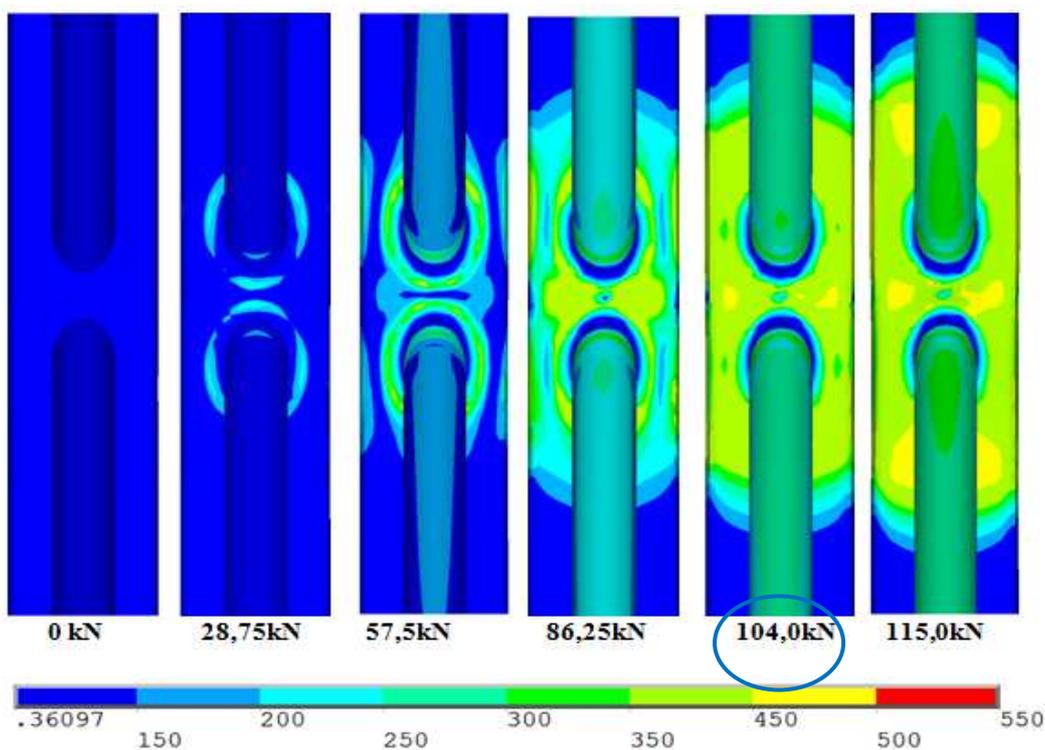


Figura 5.11 – Carga x Tensão de von Mises das Ligações tipo “K” – Roseta 4.

Observa-se pela análise numérica que as roseta 1 e 3 apresentam uma boa correlação com a análise experimental. Já na roseta 2 a curva de tensão se inicia bem próxima a curva experimental mas se modifica a partir da carga de 70 kN, chegando a plastificação com uma carga aplicada nas diagonais próxima a 104 kN. No caso da roseta 4 observa-se uma maior divergência devido ao seu posicionamento estar muito próximo a área afetada pela carga de tração, podendo nesse local ter ocorrido o abaulamento da superfície.

Nas Figuras 5.12, 5.13 e 5.14 tem-se a distribuição de tensões de von Mises das ligações com um fator de escala igual a dois dos protótipos NK01-B, NK02-B e NK03-B, lembrando que a tensão de escoamento do perfil das diagonais é 250MPa e do banzo é de 456MPa. Pode-se observar nestas figuras, como nos gráficos anteriores, que o escoamento do banzo ocorre com um carga aplicada na diagonal aproximadamente de 104 kN, caracterizando o modo de falha da plastificação da face do banzo (Modo A).



**Figura 5.12 - Distribuição de tensão de von Mises da ligação NK01-B.**

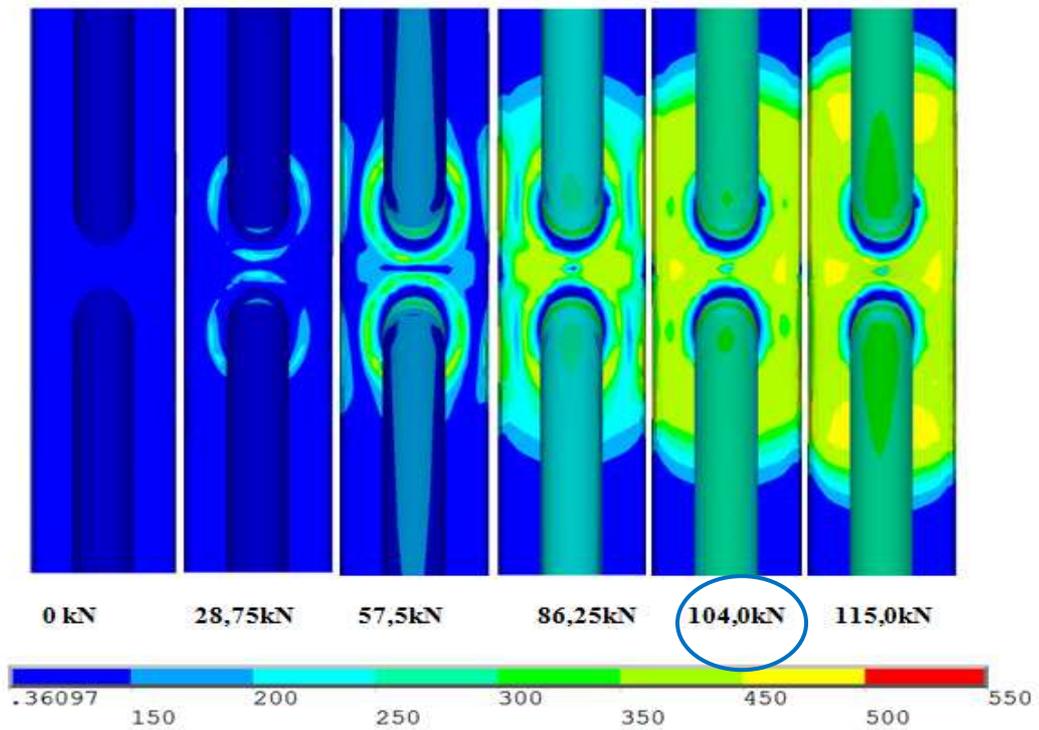


Figura 5.13 - Distribuição de tensão de von Mises da ligação NK02-B.

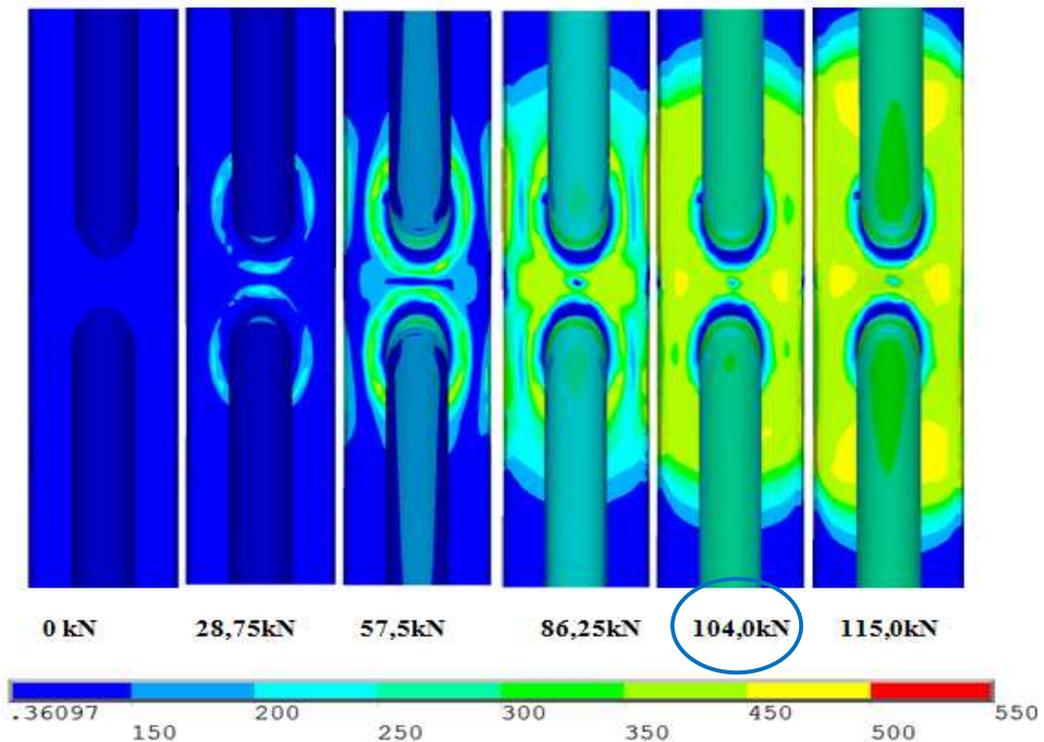


Figura 5.14 - Distribuição de tensão de von Mises da ligação NK03-B.

Na Tabela 5.3 tem-se a comparação entre os resultados experimentais e a análise numérica das ligações tipo “K”.

**Tabela 5.3 - Resultados obtidos pela análise numérica e das cargas experimentais aplicadas nos elementos considerando os efeitos na face superior do banzo das ligações tipo “K”.**

Tipo de ligação	Protótipo	Elemento	Cargas Experimentais (kN)		Carga de Escoamento Numérica (kN)	$\frac{P_y}{P_{ynum.}}$	Modo de Falha	
			$P_y$	$P_{ult.}$	$P_{ynum.}$		Exp.	Num.
K	K01-B	Diag. Trac.	115,3	136,3	104	1,11	A	A
		Diag. Comp.	-115,3	-136,9	-104	1,11	A	A
	K02-B	Diag. Trac.	98,56	142,9	104	0,95	A	A
		Diag. Comp.	-97,39	-142,8	-104	0,94	A	A
	K03-B	Diag. Trac.	111,3	144,1	104	1,07	A	A
		Diag. Comp.	-111,4	-143,8	-104	1,07	A	A

Pode-se observar pela Tabela 5.3 que houve uma boa correlação entre os resultados experimentais e numéricos com relação à carga de escoamento. Já o modo de falha foi o mesmo, a “Plastificação da face ou de toda a seção transversal do banzo, junto a diagonais ou montantes” (Modo A), para os resultados experimentais, numéricos e para a carga de projeto.

#### 5.4.2. Ligações tipo “KT”

Os modelos numéricos das ligações tipo “KT” estão representados como NKT01-B, NKT02-B e NKT60 e os modelos experimentais como KT01-B, KT02-B.

Como nas ligações tipo “K”, a dimensão do cordão de solda nas ligações tipo “KT” também foram inicialmente baseada nos estudo de Lee e Wilmshurts (1995), sendo necessário depois de algumas modelagens utilizar  $1,25 \times t$  como medida para a dimensão do cordão de solda, com a finalidade de se fazer uma melhor aproximação do protótipo real, devido às imperfeições no protótipo.

Nos modelos numéricos NKT01-B e NKT02-B foram aplicados uma carga de 120 kN nas diagonais comprimidas e tracionadas e no montante uma carga no valor de 15% da carga aplicada nas diagonais, ou seja, 18,0 kN. Nos dois modelos o escoamento do material do banzo ocorreu primeiro na roseta 2 com uma carga aproximada de 97,75 kN aplicada nas diagonais tracionada e comprimida e de 15,05 kN no montante, ocorrendo o modo de falha da plastificação da face do banzo (Modo A).

Nas Figuras 5.15 à 5.19 tem-se os gráficos da carga na diagonal tracionada versus a tensão de von Mises comparativo entre os modelos numéricos e os experimentais para cada roseta posicionada no banzo.

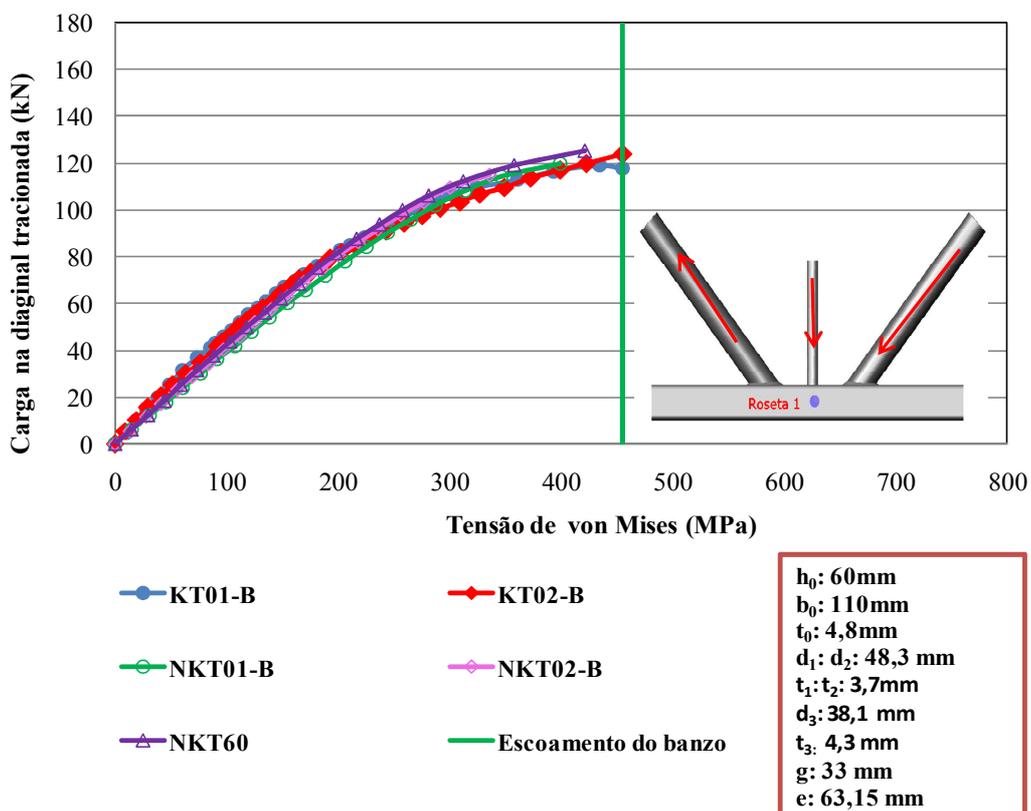


Figura 5.15 – Carga x Tensão de von Mises das Ligações tipo “KT”– Roseta 1.

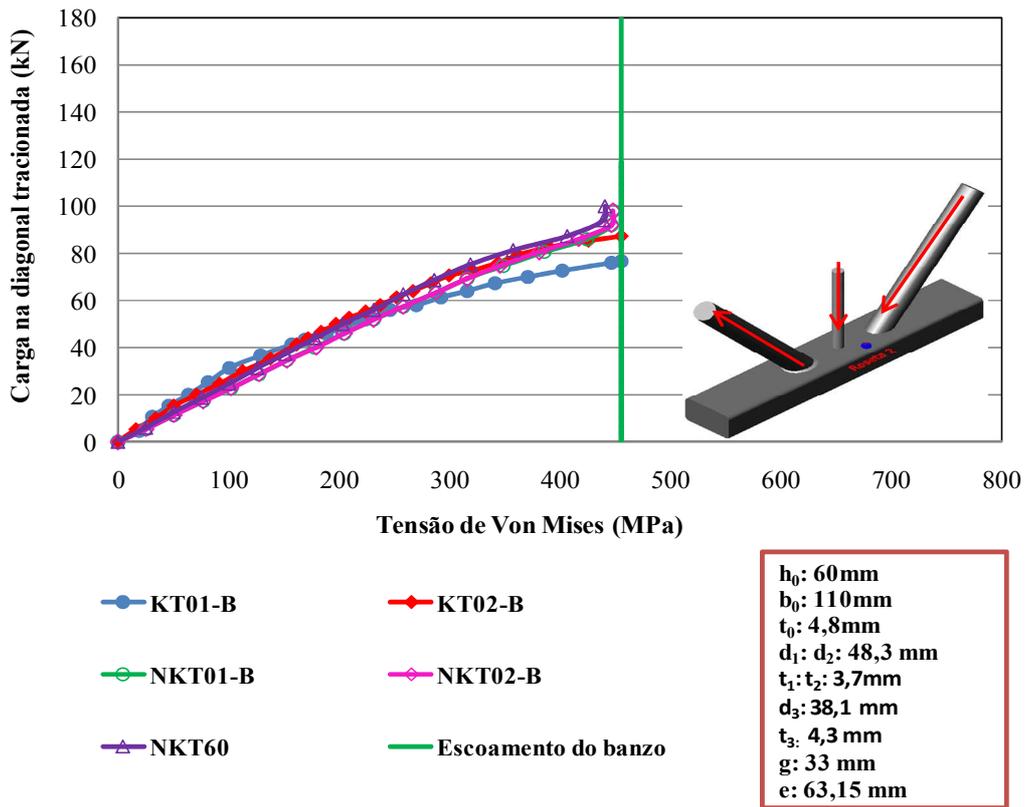


Figura 5.16 – Carga x Tensão de von Mises das Ligações tipo “KT”– Roseta 2.

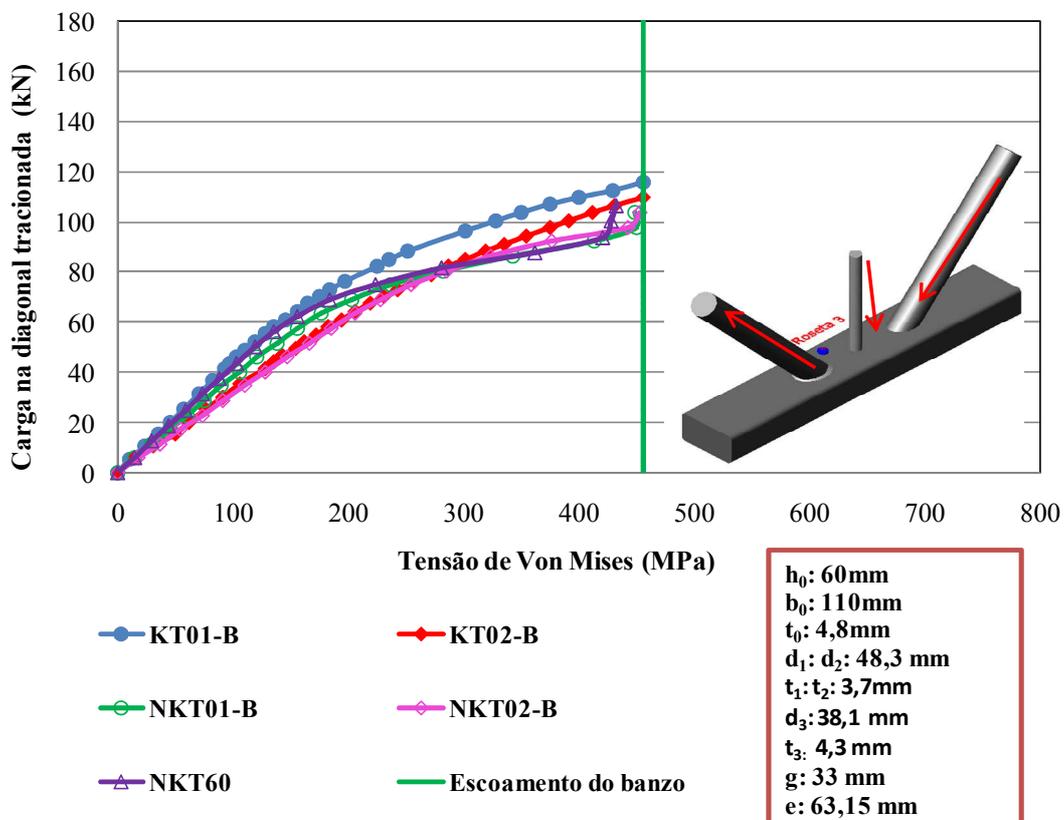


Figura 5.17 – Carga x Tensão de von Mises das Ligações tipo “KT”– Roseta 3.

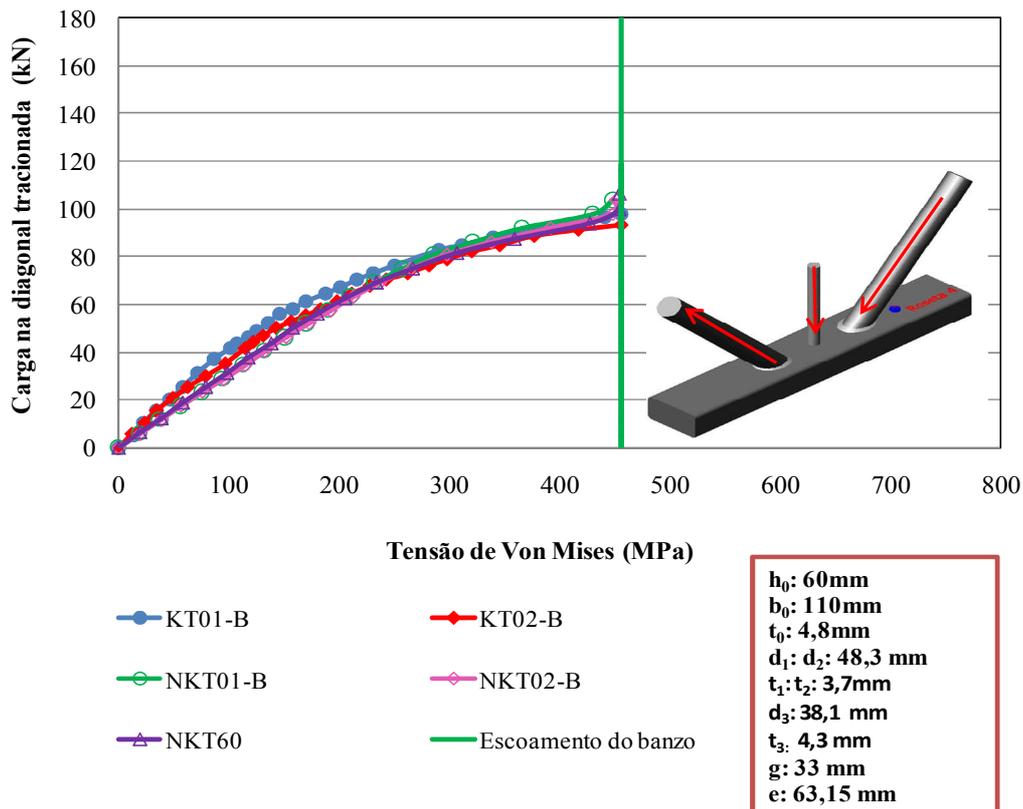


Figura 5.18 – Carga x Tensão de von Mises das Ligações tipo “KT” – Roseta 4.

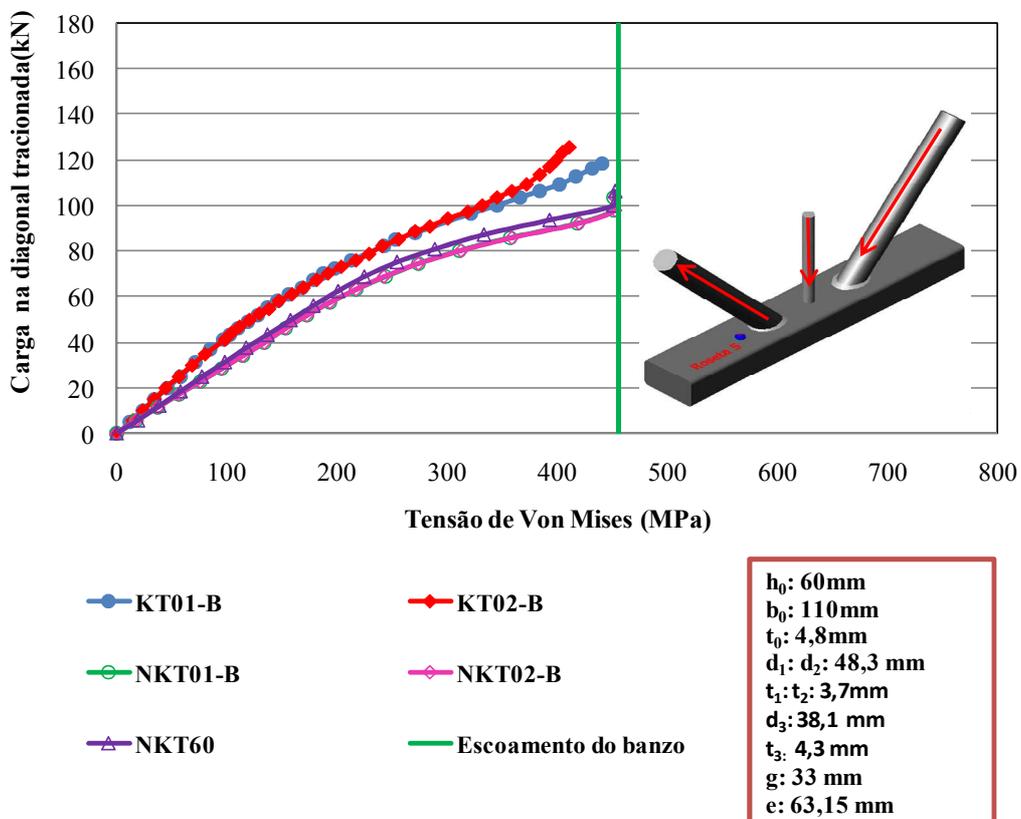


Figura 5.19 – Carga x Tensão de von Mises das Ligações tipo “KT” – Roseta 5.

Observa-se pelos gráficos acima que os modelos numéricos das ligações tipo “KT” apresentam uma boa correlação com os resultados experimentais.

Nas Figuras 5.20 e 5.21 tem-se a distribuição de tensões de von Mises das ligações com um fator de escala igual a dois dos protótipos NKT01-B e NKT02-B, lembrando que a tensão de escoamento do perfil das diagonais é 250MPa do banzo é de 456MPa. Pode-se observar nestas figuras, como nos gráficos anteriores, que o escoamento do banzo ocorre com um carga aplicada na diagonal de aproximadamente 97,75 kN, caracterizando o modo de falha da plastificação da face do banzo (Modo A).

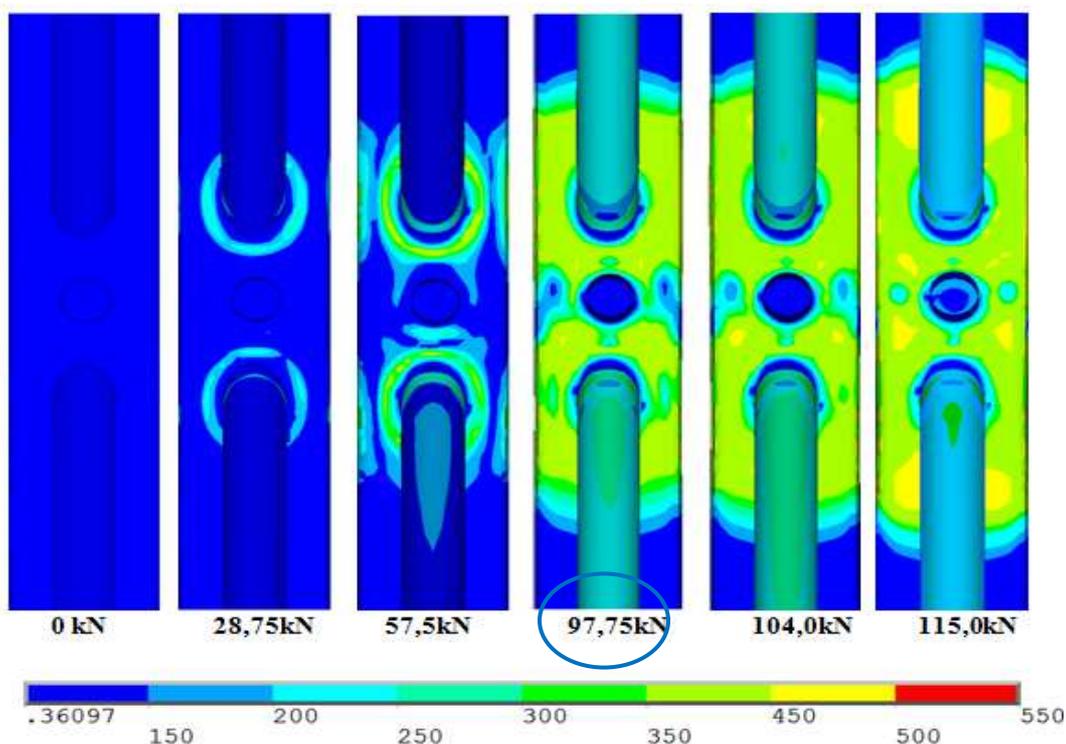


Figura 5.20 – Distribuição de tensão e configuração deformada da ligação NKT01-B.

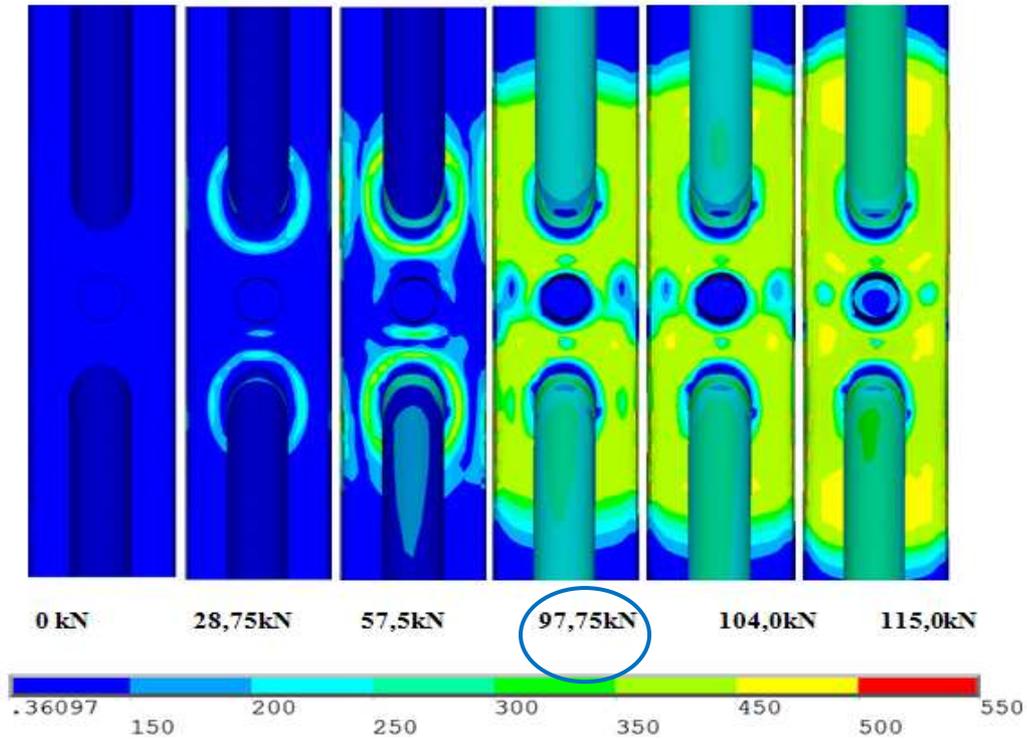


Figura 5.21 – Distribuição de tensão e configuração deformada da ligação NKT02-B.

Na Tabela 5.4 tem-se a comparação entre os resultados experimentais e a análise numérica das ligações tipo “KT”.

Tabela 5.4 - Resultados obtidos pela análise numérica e das cargas experimentais aplicadas nos elementos considerando os efeitos na face superior do banzo das ligações tipo “KT”.

Tipo de ligação	Protótipo	Elemento	Cargas Experimentais (kN)		Carga de Escoamento Numérica (kN)	$\frac{P_y}{P_{y\text{num.}}}$	Modo de Falha	
			$P_y$	$P_{\text{ult.}}$	$P_{\text{y\text{num.}}}$		Exp.	Num.
			KT	NKT01-B	Diag. Trac.	76,7	118,7	97,75
Diag. Comp.	-76,8	-117,4			-97,75	0,79	A	A
Montante	-11,7	-17,6			-15,05	0,78	A	A
NKT02-B	Diag. Trac.	87,0		124,0	97,75	0,89	A	A
	Diag. Comp.	-86,8		-122,7	-97,75	0,89	A	A
	Montante	-13,0		-17,89	-15,05	0,86	A	A

Pode-se observar pela Tabela 5.4 que não houve uma boa correlação entre os resultados experimentais e numéricos com relação à carga de escoamento.

Já o modo de falha também foi o mesmo, a “Plastificação da face ou de toda a seção transversal do banzo, junto a diagonais ou montantes” (Modo A), para os resultados experimentais, numéricos e para a carga de projeto.

### 5.5. Análise da influência da altura do banzo

Considerando-se os resultados obtidos nos itens anteriores novos modelos numéricos foram gerados com a finalidade de se estudar a influência da altura do banzo no comportamento desses tipos de ligações. Nestes modelos foi variada a altura do perfil do banzo e sua espessura, deixando constante a largura do banzo e a relação  $h_0/t_0$ . Esta análise foi realizada visando analisar o limite do modo de falha da ligação, a influência da excentricidade e consequentemente do momento.

Segundo o Eurocode 3 (2005) e o CIDECT (1996), a relação entre a altura e a largura do banzo deve estar dentro dos limites estabelecido pela equação 5.1. Já a relação entre a altura do banzo e sua espessura, indicando o índice de esbeltez está dentro do limite estabelecido pela equação 5.2, e a relação entre a excentricidade e altura do banzo esta descrita na equação 5.3, expostas a seguir e no capítulo 2.

$$0,5 \leq \frac{h_0}{b_0} \leq 2,0 \quad (5.1)$$

$$\frac{h_0}{t_0} \leq 35 \quad (5.2)$$

$$-0,55 \leq \frac{e}{h_0} \leq 0,25 \quad (5.3)$$

Como as ligações tipo “K” e “KT” ensaiadas possuem altura do banzo igual a 60 mm, largura de 110 mm, e espessura de 4,8mm, a relação entre a altura e a largura ( $h_0/b_0$ ) é

de 0,54 e a relação  $h_0/t_0$  é igual a 12,5, estando as duas relações dentro do limite estabelecido pela equação 5.1 e 5.2.

Já a relação entre a excentricidade e altura do banzo ( $e/h_0$ ) para as ligações tipo “K” é igual a 0,39 e para as ligações tipo “KT” é de 1,05, não estando dentro do limite estabelecido pela equação 5.3, sendo necessário fazer a distribuição de momento como descrito no capítulo 2.

A seguir tem-se a análise da influência da altura do banzo para cada tipo de ligação estudada.

### 5.5.1. Ligações tipo “K”

A Tabela 5.5 mostra os valores das alturas do banzo estudadas com suas respectivas relações e nomenclaturas, para as ligações do tipo “K”.

**Tabela 5.5 – Valores das relações geométricas analisadas para as ligações tipo “K”**

Nomenclatura	Altura (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	$h_0/b_0$	$h_0/t_0$	$e/h_0$	$b_0/t_0$
NK60	60	110	4,8	0,54	12,5	0,39	22,92
NK70	70	110	5,6	0,63	12,5	0,26	19,64
NK80	80	110	6,4	0,72	12,5	0,16	17,19
NK90	90	110	7,2	0,81	12,5	0,09	15,28
NK100	100	110	8,0	0,90	12,5	0,03	13,75

As modelagens numéricas dos novos modelos apresentam o mesmo padrão dos modelos apresentados no item 5.4, mesmo tipo de malha, mesma características dos materiais e de condições de contorno. A força foi aplicada nas diagonais por passos de cargas, sendo as cargas últimas dos modelos a carga de escoamento desses.

Nas Figuras 5.22 a 5.26 tem-se a distribuição de tensões de von Mises das ligações NK60, NK70, NK80, NK90 e NK100, respectivamente.

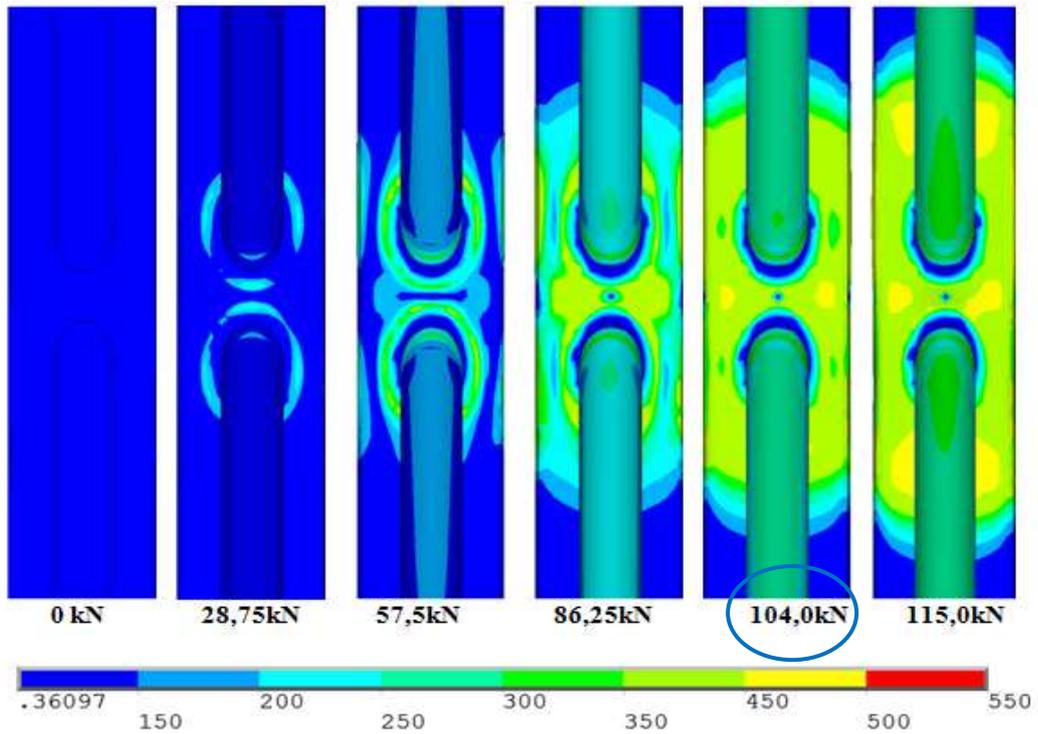


Figura 5.22 – Distribuição de tensão de von Mises da ligação NK60.

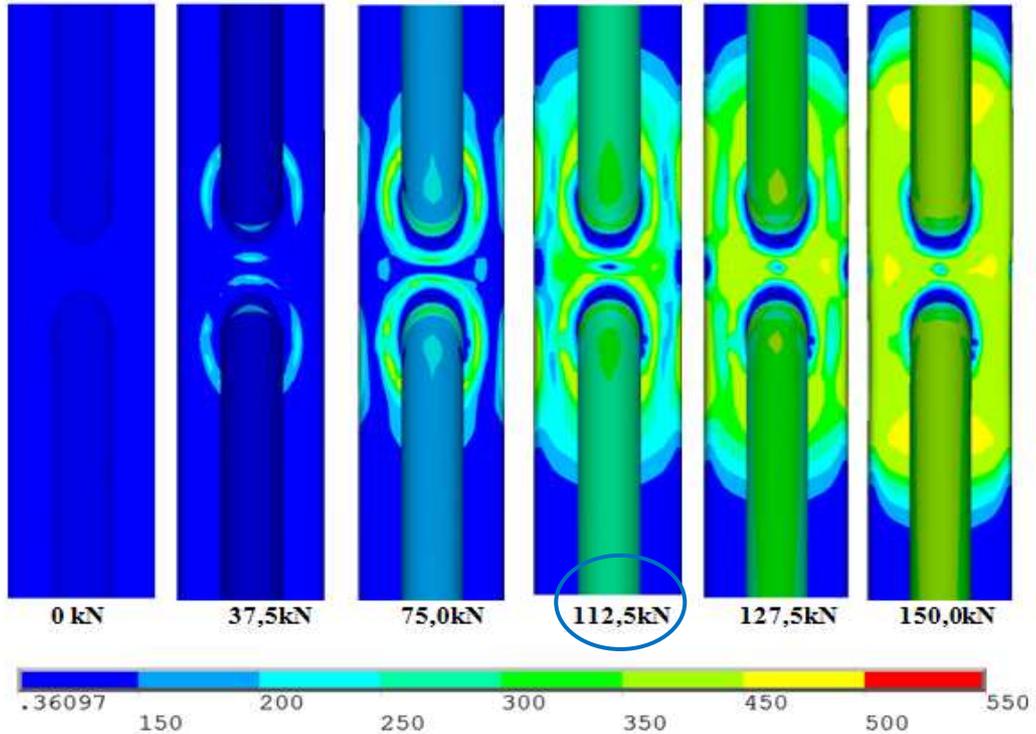


Figura 5.23 – Distribuição de tensão de von Mises da ligação NK70.

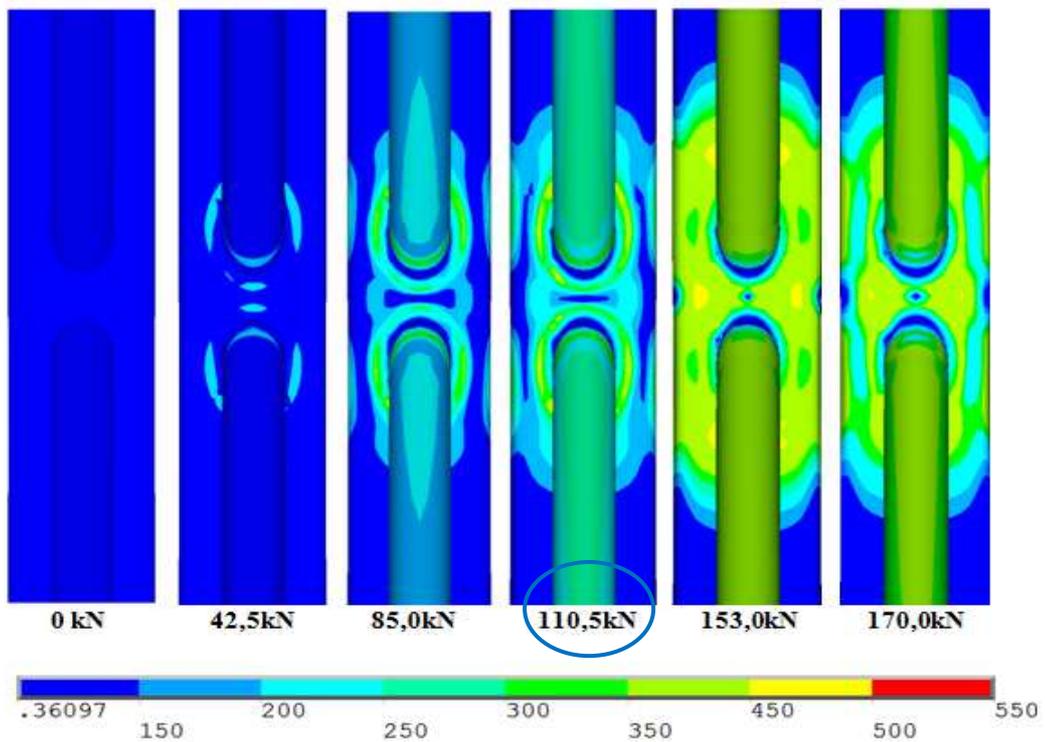


Figura 5.24 – Distribuição de tensão de von Mises da ligação NK80.

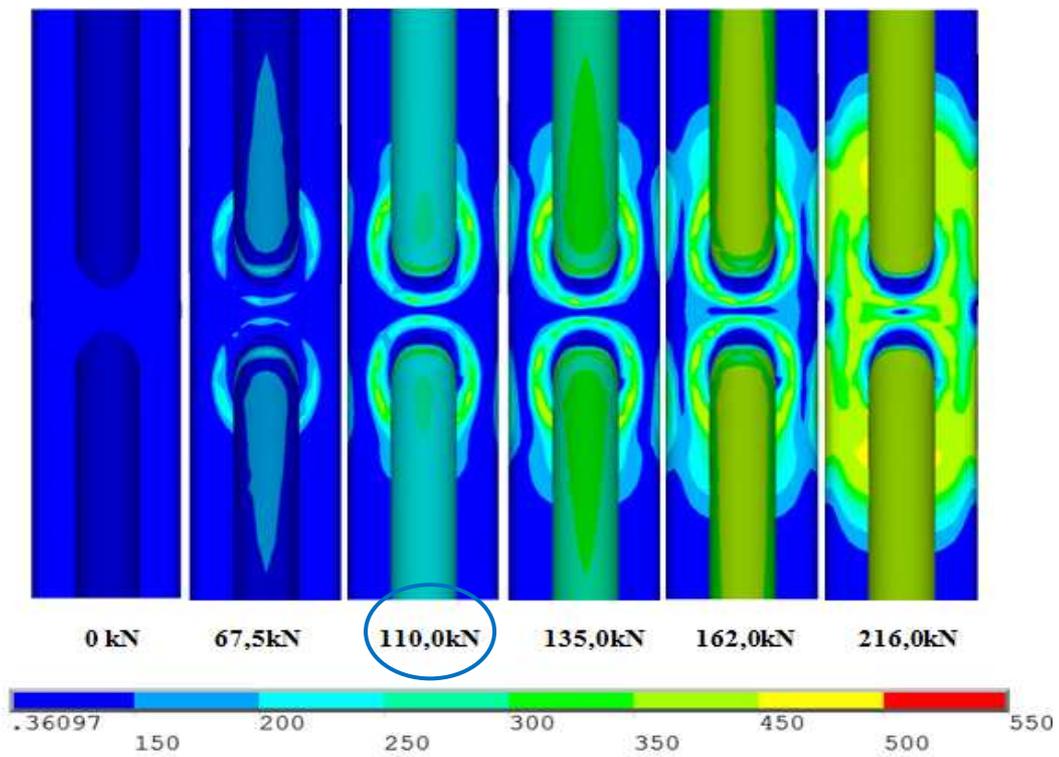


Figura 5.25 – Distribuição de tensão de von Mises da ligação NK90.

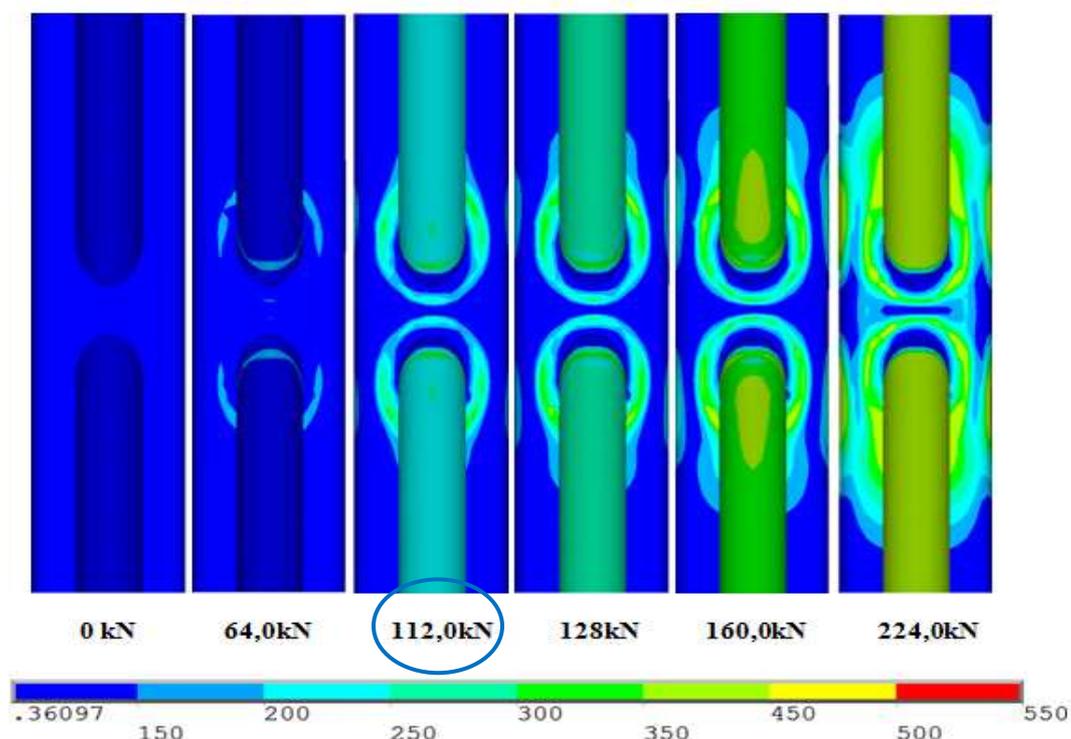


Figura 5.26 – Distribuição de tensão de von Mises da ligação NK100.

Observa-se pelas Figuras 5.22 a 5.26 que o modo de falha obtido para o protótipo NK60 foi a “Plastificação da face ou de toda a seção transversal do banço junto a diagonais ou montantes (Modo A)” e para os demais foi a “Ruptura por concentração de tensão nas diagonais ou montantes na região da solda ou da própria solda (Modo E)”, lembrando que a tensão de escoamento do perfil das diagonais é 250 MPa e do banço é de 456 MPa.

Na Tabela 5.6 tem-se a comparação entre os resultados numéricos e as cargas de projeto e seus modos de falha para as ligações tipo “K”.

Tabela 5.6 - Comparação entre os resultados numéricos e a carga de projeto das ligações tipo “K”.

Nomenclatura	Relação geométrica			Carga de escoamento numérica (kN)	Carga de projeto Eurocode 3 (kN)	Modo de falha	
	$h_0/b_0$	$h_0/t_0$	$e/h_0$	$P_{y,numérico}$	$N_{i,Rd}$	Numérica	Eurocode
NK60	0,545	12,5	0,39	104,00	87,7	A	A
NK70	0,636	12,5	0,26	112,5	129,6	E	E
NK80	0,727	12,5	0,16	110,5	129,6	E	E
NK90	0,818	12,5	0,09	110,0	129,6	E	E
NK100	0,909	12,5	0,03	112,0	129,6	E	E

Observa-se novamente pela Tabela 5.6 uma diferença no modo de falha a partir da altura do banzo de 70 mm para as ligações tipo “K”.

Na Figura 5.27 tem-se o gráfico do carregamento na diagonal tracionada versus a relação geométrica entre a altura e a largura do banzo ( $h_0/b_0$ ) dos modelos numéricos das ligações tipo “K” com diferentes alturas do banzo e das suas respectivas cargas de projeto. Os modelos numéricos estão representados como NK60, NK70, NK80, NK90 e NK100 e as cargas de projeto como K60, K70, K80, K90 e K100. Observa-se também neste gráfico linhas que representam a análise numérica, as cargas de projeto e o limites apresentados no Eurocode 3 (2005).

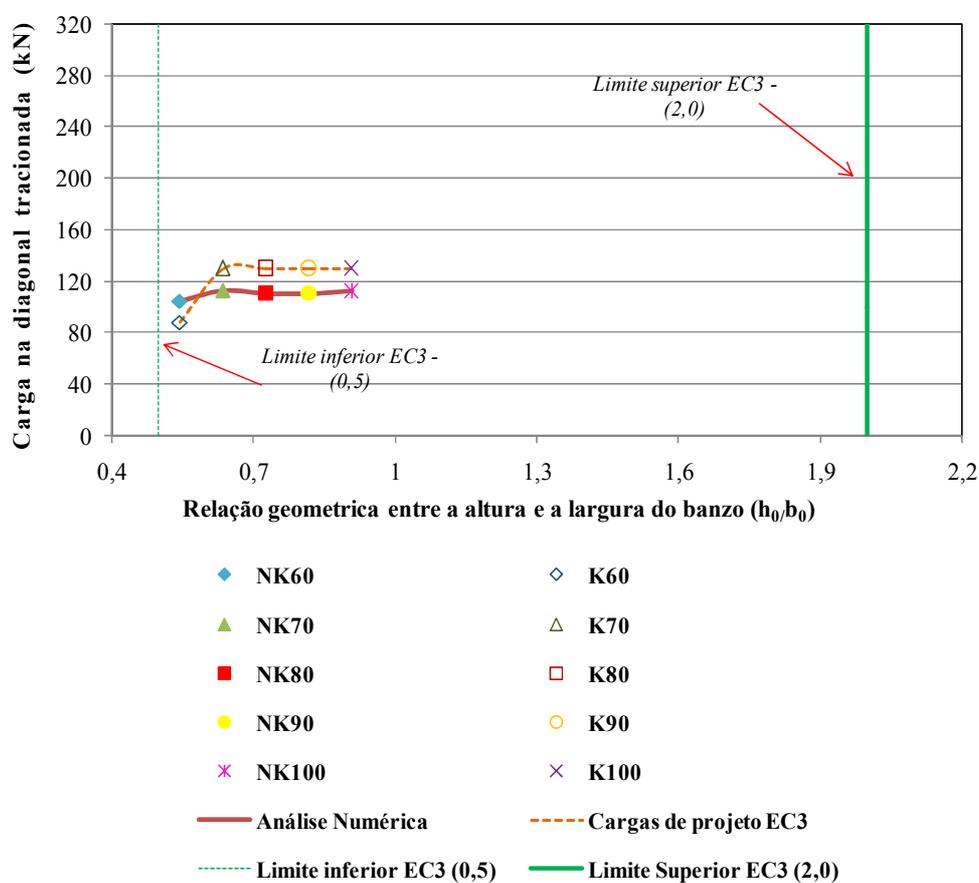


Figura 5.27 – Gráfico Carga x a relação geométrica  $h_0/b_0$  das ligações tipo “K”.

Observa-se pela Figura 5.27 que todos os modelos estão dentro dos limites estabelecidos pelo Eurocode 3 (2005).

Na Figura 5.28 tem-se o gráfico do carregamento na diagonal tracionada versus a relação geométrica entre excentricidade e a altura do banzo ( $e/h_0$ ) dos modelos numéricos das ligações tipo “K” com diferentes alturas do banzo e das suas respectivas cargas de projeto. Os modelos numéricos estão representados da mesma forma que na Figura 5.27.

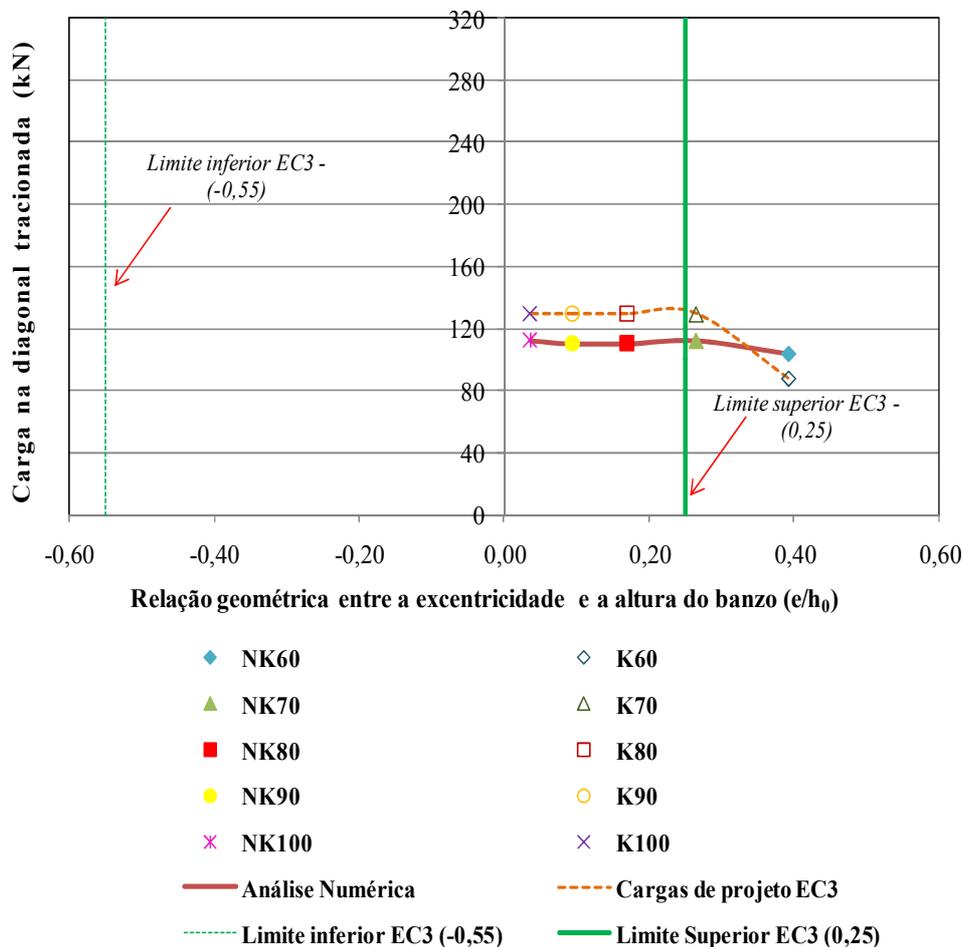


Figura 5.28 – Gráfico Carga x a relação geométrica  $e/h_0$  das ligações tipo “K”.

Pela Figura 5.28 pode-se verificar que os modelos com alturas de 60 mm e 70 mm não estão dentro dos limites estabelecidos pelo Eurocode 3 (2005), sendo necessário realizar para esses modelos a distribuição de momento, como descrito no capítulo 2. Observa-se uma modificação na curvatura da linha que representa a carga de projeto após a altura do banzo igual a 70 mm devido à mudança do modo de falha das ligações tipo “K” descrita anteriormente.

### 5.5.2. Ligações tipo “KT”

A Tabela 5.7 mostra os valores das alturas do banzo estudadas com suas respectivas relações e nomenclaturas, para as ligações do tipo “KT”.

Tabela 5.7 - Valores das relações geométricas analisadas para as ligações tipo “KT”.

Nomenclatura	Altura (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	$h_0/b_0$	$e/h_0$	$h_0/t_0$	$b_0/t_0$
NKT60	60	110	4,8	0,54	1,05	12,5	22,92
NKT70	70	110	5,6	0,63	0,83	12,5	19,64
NKT80	80	110	6,4	0,72	0,66	12,5	17,19
NKT90	90	110	7,2	0,81	0,53	12,5	15,28
NKT100	100	110	8	0,90	0,43	12,5	13,75

Como as ligações tipo “K”, as ligações tipo “KT” também apresentam as modelagens numéricas dos novos modelos estudados iguais aos modelos apresentados no item 5.4, mesmo tipo de malha, mesma características dos materiais e de condições de contorno. A força também foi aplicada nas diagonais por passos de cargas, sendo as cargas últimas dos modelos a carga de escoamento desses.

Nas Figuras 5.29 a 5.33 tem-se a configuração deformada e a distribuição de tensões das ligações NKT60, NKT70, NKT80, NKT90 e NKT100, respectivamente.

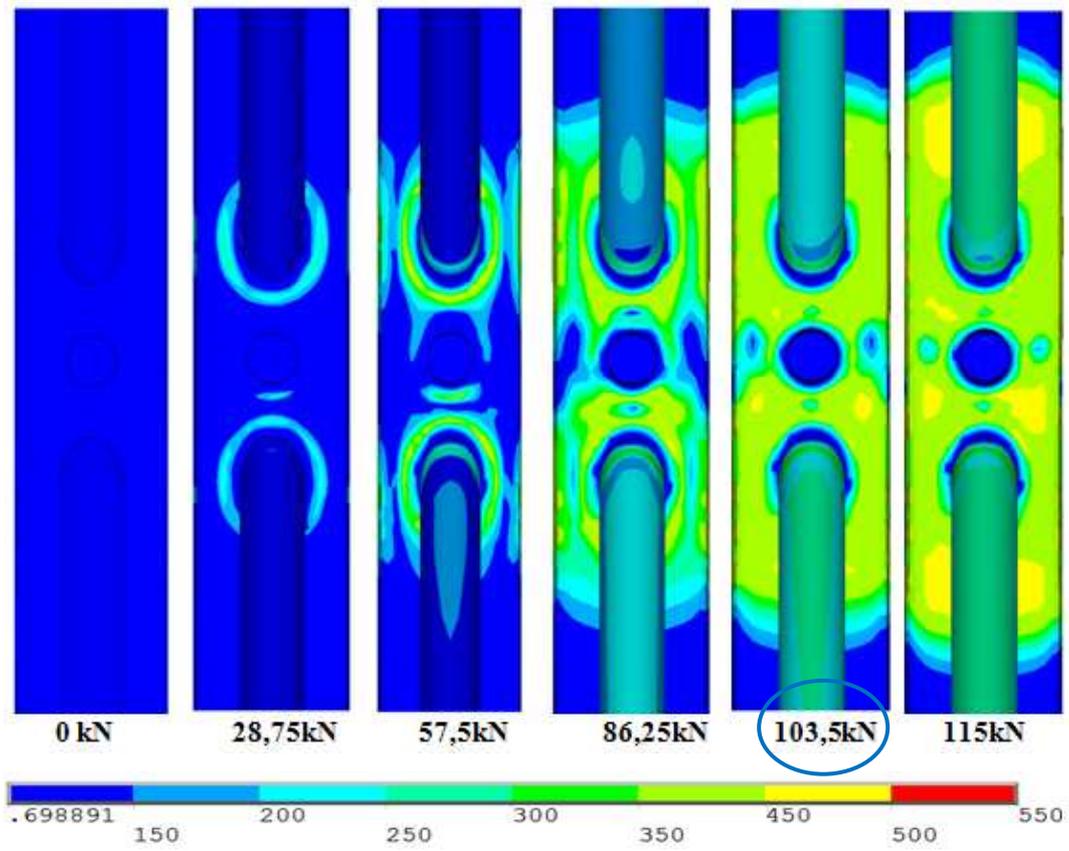


Figura 5.29 – Distribuição de tensão e configuração deformada da ligação NKT60.

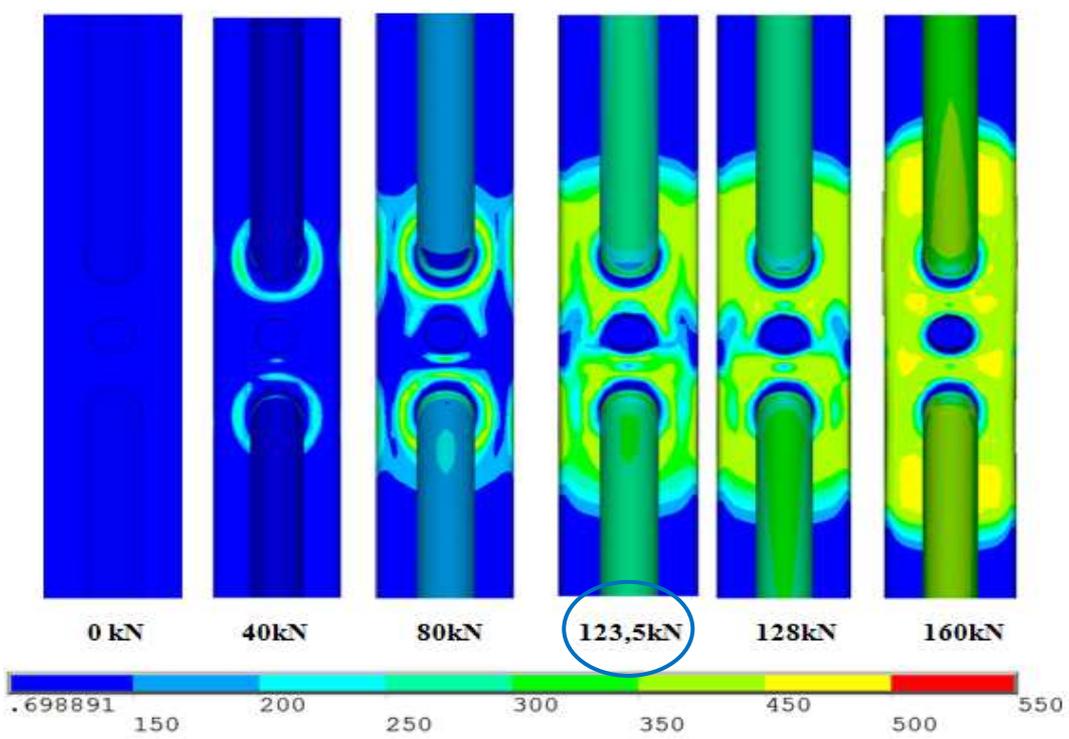


Figura 5.30 – Distribuição de tensão e configuração deformada da ligação NKT70.

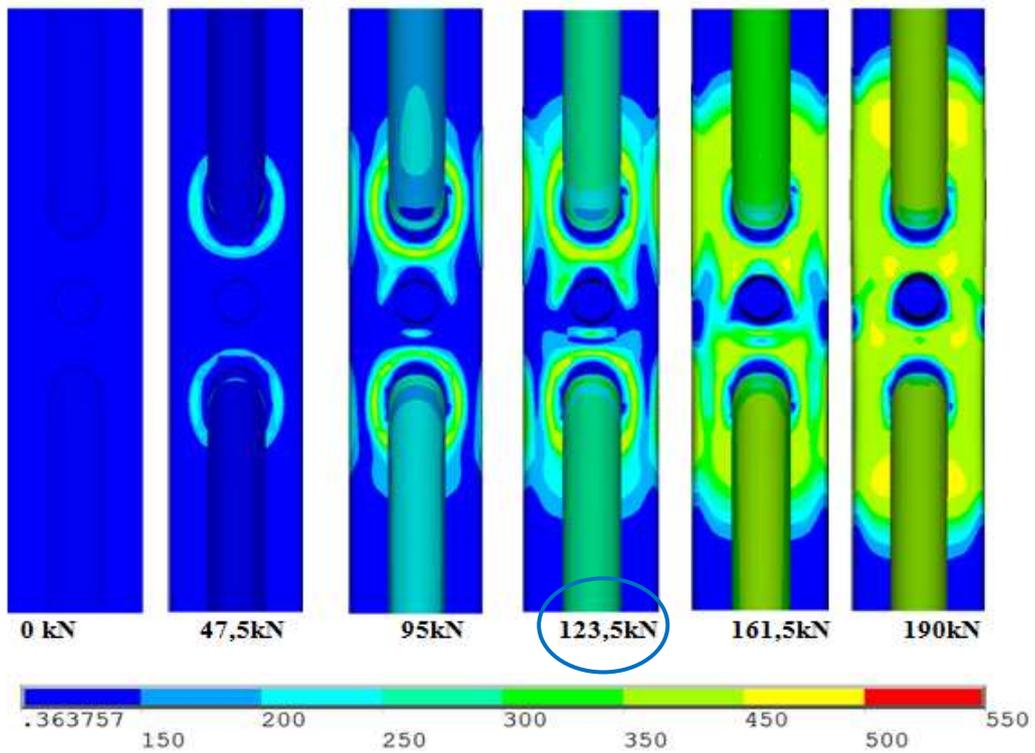


Figura 5.31 – Distribuição de tensão e configuração deformada da ligação NKT80.

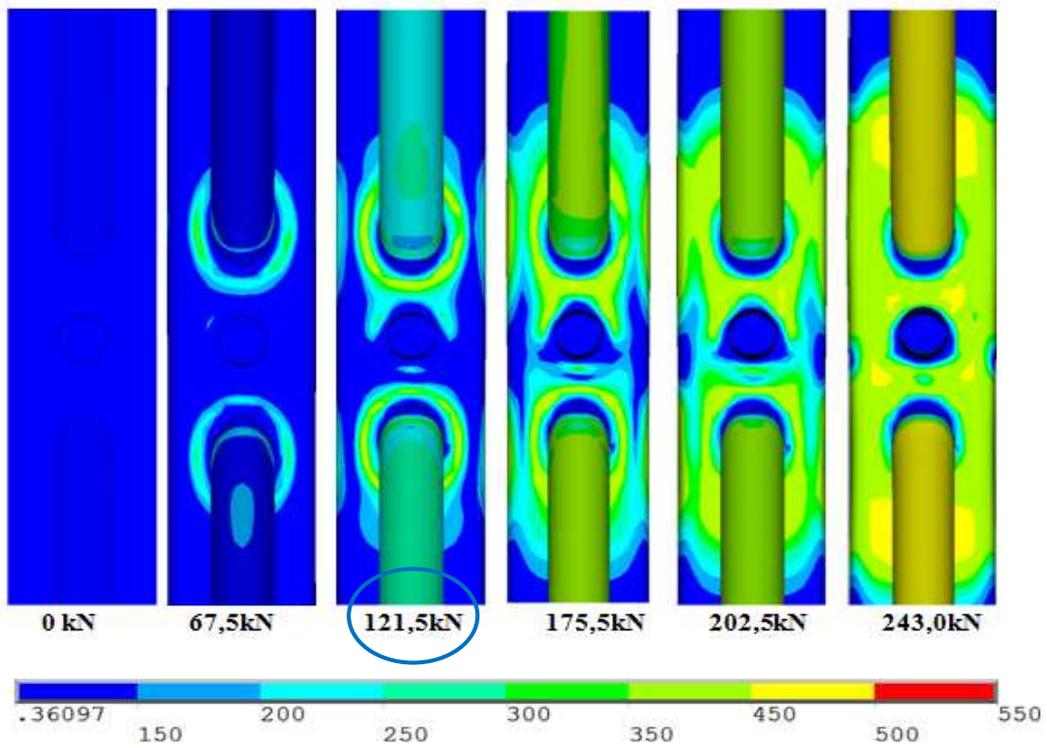
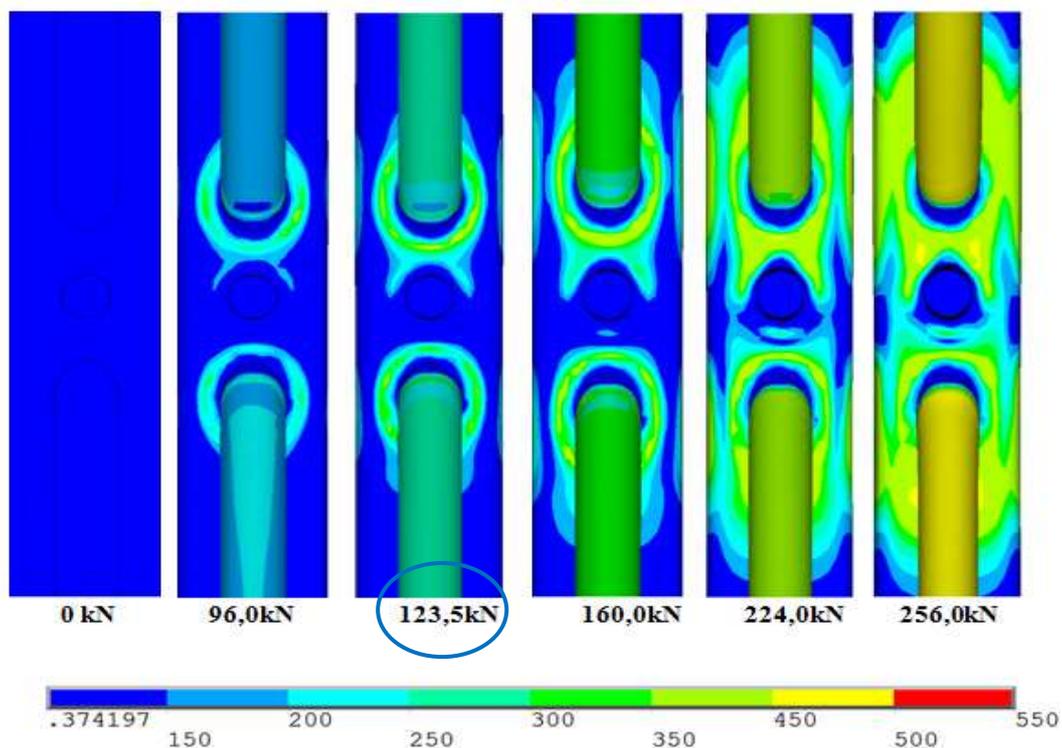


Figura 5.32 – Distribuição de tensão e configuração deformada da ligação NKT90.



**Figura 5.33 – Distribuição de tensão e configuração deformada da ligação NKT100.**

Portanto, observa-se pelas Figuras 5.29 a 5.33 que o modo de falha teórico obtido para os protótipos NKT60 e NKT70 foi a “Plastificação da face ou de toda a seção transversal do banzo, junto a diagonais ou montantes (Modo A)” e para os demais foi a “Ruptura por concentração de tensão nas diagonais ou montantes na região da solda ou da própria solda (Modo E)”. Já para o modo de falha numérico obtido para o protótipo NKT60 foi a “Plastificação da face ou de toda a seção transversal do banzo, junto a diagonais ou montantes (Modo A)” e para os demais foi a “Ruptura por concentração de tensão nas diagonais ou montantes na região da solda ou da própria solda (Modo E)”. Comparando os resultados dos modos de falhas teóricos com os numéricos observamos que para o protótipo com altura do banzo de 70 mm “NKT70” o modo de falha teórico é o “Modo A” e o modo de falha numérico para esse protótipo é o “Modo E”. Assim, é necessário avaliar as prescrições utilizadas neste estudo e o modelo numérico para essa ligação.

Na Tabela 5.8 tem-se a comparação entre os resultados numéricos e as cargas de projeto e seus modos de falha para as ligações tipo “KT”, respectivamente.

**Tabela 5.8 - Comparação entre os resultados numéricos e a carga de projeto das ligações tipo “KT”.**

Nomenclatura	Relação geométrica			Carga de escoamento numérica (kN)	Carga de projeto Eurocode 3 (kN)	Modo de falha	
	$h_0/b_0$	$h_0/t_0$	$e/h_0$	$P_{ynumérico}$	$N_{i,Rd}$	Numérica	Eurocode
NKT60	0,545	12,5	1,05	103,5	51,79	A	A
NKT70	0,636	12,5	0,83	123,5	107,16	E	A
NKT80	0,727	12,5	0,66	123,5	129,6	E	E
NKT90	0,818	12,5	0,53	121,5	129,6	E	E
NKT100	0,909	12,5	0,43	123,5	129,6	E	E

Observa-se novamente pela Tabela 5.8 uma diferença no modo de falha a partir da altura do banzo de 80 mm para as ligações tipo “KT”.

Na Figura 5.34 tem-se o gráfico do carregamento na diagonal tracionada versus a relação geométrica entre a altura e a largura do banzo ( $h_0/b_0$ ) dos modelos numéricos das ligações tipo “KT” com diferentes alturas do banzo e das suas respectivas cargas de projeto, para as ligações tipo “KT”. Os modelos numéricos estão representados como NKT60, NKT70, NKT80, NKT90 e NKT100 e as cargas de projeto como KT60, KT70, KT80, KT90 e KT100. Observa-se também neste gráfico uma linha representando a análise numérica e outra das cargas de projeto calculada com base nos cálculos do Eurocode 3 (2005), representado como a sigla EC3.

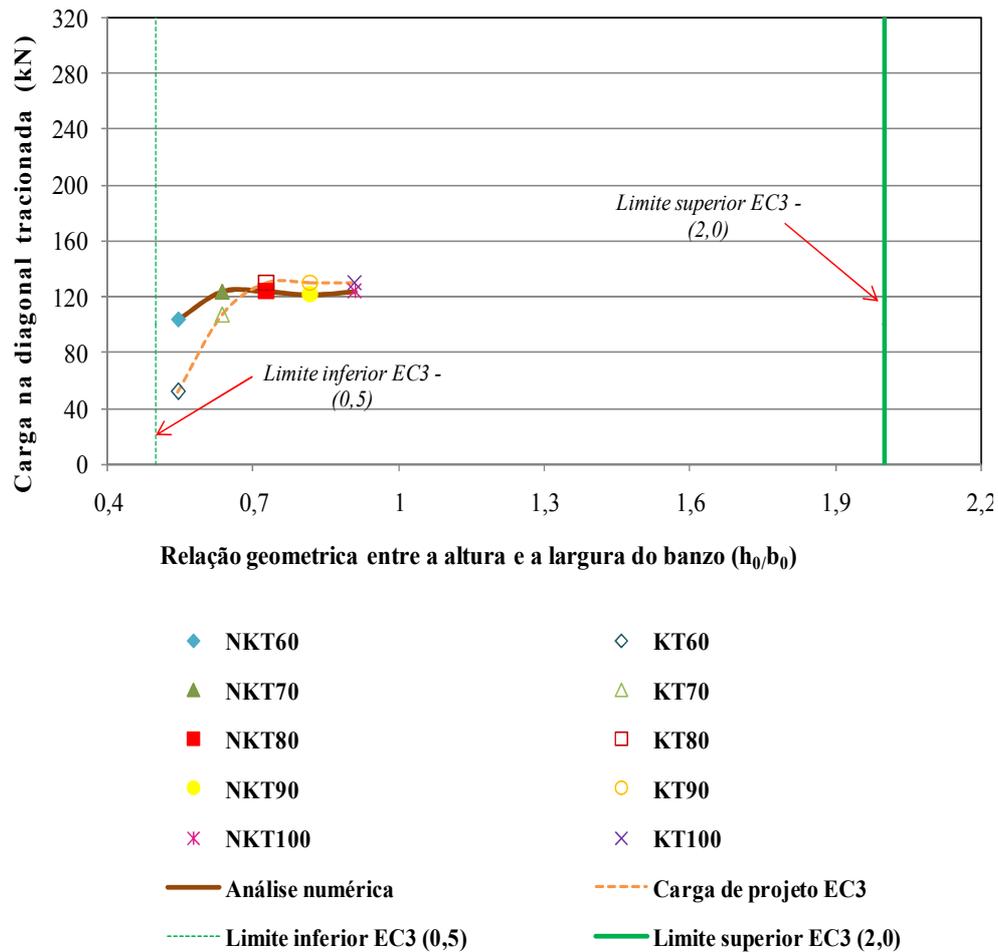


Figura 5.34 – Gráfico Carga x a relação geométrica  $h_0/b_0$  das ligações tipo “KT”.

Pode-se verificar também na Figura 5.34 que todos os modelos estão dentro dos limites estabelecidos pelo Eurocode 3 (2005).

Na Figura 5.35 tem-se o gráfico do carregamento na diagonal tracionada versus a relação geométrica entre excentricidade e a altura do banzo ( $e/h_0$ ) dos modelos numéricos das ligações tipo “KT” com diferentes alturas do banzo e das suas respectivas cargas de projeto. Os modelos numéricos também estão representados da mesma forma da Figura 5.34.

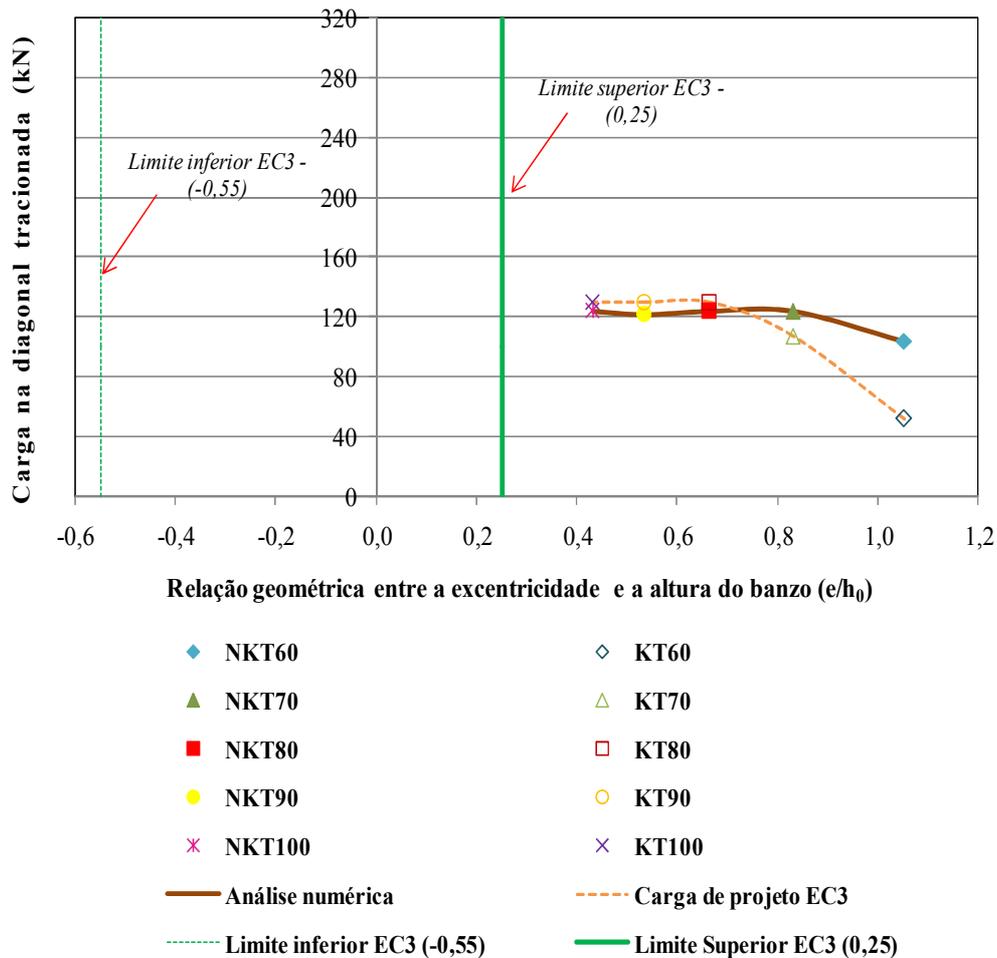


Figura 5.35 - Gráfico Carga x a relação geométrica  $e/h_0$  das ligações tipo “KT”.

Pela Figura 5.35 pode-se verificar que todos os modelos não estão dentro dos limites estabelecidos pelo Eurocode 3 (2005), sendo necessário realizar a distribuição de momento, como descrito no capítulo 2. Observa-se também que ocorre modificação na curvatura da linha que representa a carga de projeto após a altura do banzo igual a 80 mm devido à mudança do modo de falha das ligações tipo “KT” como descrito anteriormente. E para a linha que representa a carga de escoamento numérica à mudança do modo de colapso ocorre a partir da ligação com altura do banzo igual a 70 mm.

Portanto pode-se concluir que a altura do banzo não influenciou na resistência da ligação após o aumento da altura do banzo para 70 mm para as ligações tipo “K”, pois o modo de falha obtido foi a “Ruptura por concentração de tensão nas diagonais ou montantes na região da solda ou da própria solda. (Modo E)”. Isto ocorre também em função da relação  $h_0/t_0$  manteve-se constante gerando aumento da espessura do banzo.

Outra consequência observada nas duas ligações é que com o aumento da altura a excentricidade da ligação diminuiu gerando uma redução no momento, no caso da ligação tipo “K” chega a ser desconsiderado. Esta redução do momento leva a um alívio de tensões no banzo superior e conseqüentemente aumento da resistência e mudança do modo de falha da ligação de Modo A para Modo E.

No caso das ligações tipo “KT” com altura de 70 mm o modo de falha teórico encontrado foi diferente do modo de falha numérico, sendo necessário avaliar as prescrições utilizadas neste estudo e o modelo numérico para essa ligação.

### 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

#### 6.1. Considerações Gerais

Com o crescimento da utilização do aço como elemento estrutural na construção civil, várias pesquisas internacionais e nacionais estão sendo realizadas para o aprimoramento e desenvolvimento de novas técnicas e métodos construtivos nesta área.

No Brasil, o uso dos perfis estruturais tubulares tornou-se mais frequente, sendo necessário o desenvolvimento de pesquisas em relação à utilização do mesmo, como por exemplo, na utilização em treliça, na qual é de suma importância o estudo de suas ligações.

Portanto, este trabalho objetivou a avaliação teórica e experimental de ligações soldadas do tipo “K” e “KT” com barras afastadas, formadas por perfis tubulares em aço, sem costura, com seção transversal retangular no banzo e circular nos demais membros.

Com base em pesquisas anteriores foi necessária a variação de alguns parâmetros geométricos das ligações tipo “K” e “KT”, com finalidade de obter uma nova série de ensaios que atendam as prescrições do Eurocode 3 (2005) e do CIDECT (1996).

A partir dos novos parâmetros geométricos das ligações foi feita uma análise destas por meio de ensaios experimentais, com o objetivo de monitorar seu o comportamento e calibrar um modelo numérico representativo, comparando seus resultados com as prescrições de norma.

Além disso, foi realizado também um estudo da influência da altura do banzo visando à análise do comportamento das ligações para diferentes parâmetros geométricos. Para esta análise variou-se a altura e a espessura do perfil do banzo das ligações, mantendo-se constante a sua largura e a relação  $h_0/t_0$ .

### **6.1. Análise Teórica**

A partir das prescrições normativas do Eurocode 3 (2005) e do CIDECT (1996) foi desenvolvida uma rotina de cálculo no software Mathcad 14 (11.0) para o cálculo da carga de projeto das ligações, bem como seus respectivos modos de falha.

### **6.2. Análise Experimental**

#### **6.2.1. Metodologia experimental**

- A utilização da montagem experimental na horizontal se mostrou eficiente, com grande economia de equipamentos e sistemas de montagem e carregamento, devido ao uso das peças já utilizados em ensaios anteriores, no qual foram necessárias apenas pequenas adaptações;
- A instrumentação dos protótipos através dos extensômetros elétricos, LVDT's e defletômetros, foi adequada para a análise;
- 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.

#### **6.2.2. Comparação entre as resultados experimentais e a análise teórica**

- Verificou-se que os resultados experimentais e a análise teórica foram satisfatórios para os dois tipos de ligações ensaiadas neste trabalho, ou seja, a carga de projeto calculada com base nas prescrições do Eurocode 3(2005) e do CIDECT (1996) é menor que a carga de escoamento experimental. Para as ligações tipo “K” ensaiadas por Mendes (2008) os resultados obtidos também obtiveram uma boa correlação com as cargas de projeto calculadas. Mas no caso das ligações tipo “KT” de Mendes (2008) essa comparação não foi satisfatória.

Essa diferença nos resultados das ligações tipo “KT” ensaiadas por Mendes (2008) com a carga de projeto deve-se ao fato da carga aplicada no montante ser maior em relação às ligações ensaiadas neste trabalho, ou seja, Mendes (2008) utilizou uma carga aplicada no montante de 75% do valor da força aplicada nas diagonais, já neste trabalho esse valor é foi de 15%.

Portanto, pode-se concluir que quanto maior a força no montante menor a resistência da ligação à plastificação da face do banzo. Sendo que, esta influência da força do montante no banzo não está bem representada nas avaliações segundo os modelos do Eurocode 3 (2005), ou seja, as prescrições normativas não consideram níveis altos de punção no banzo devido a força do montante;

- As duas ligações apresentaram como modo de falha a “Plastificação da face ou de toda a seção transversal do banzo, junto com as diagonais ou montantes (Modo A)”.

### **6.3. Análise Numérica**

#### **6.3.1. Modelagem numérica**

- A modelagem seguindo as mesmas diretrizes utilizadas por Mendanha (2006) e Mendes (2008), ou seja, o uso do elemento de casca “Shell 181”, a modelagem da curvatura no vértice do perfil retangular do banzo e a modelagem do cordão de solda, foi bastante eficaz nos modelos numéricos;

- A modelagem do cordão de solda foi de grande importância na análise da distribuição de tensão na face superior do banzo, visto que inicialmente a dimensão do cordão de solda foi baseada no artigo de Lee e Wilmshurst, onde a perna de solda, perpendicular à face dos elementos constituintes da ligação, era igual  $1,0 \times t$ . Mas devido às imperfeições oriundas no processo de soldagem essa medida foi aumentada para  $1,25 \times t$ , representado o modelo numérico, de melhor forma possível com o modelo real;
- Após algumas modelagens foi utilizado para todos os elementos da ligação uma malha como tamanho igual a 6,0 mm;
- As condições de contorno nas diagonais, montantes e banzos visaram a aproximação dos modelos numéricos do modelo real, sendo restringidos as extremidades das diagonais nas direções X e Z em relação às coordenadas locais e nos montante a direção X. No caso das extremidades dos banzos todas as direções foram restringidas, simulado dessa forma um engaste.

### **6.3.2. Comparação entre a análise numérica e os resultados experimentais**

- Os resultados obtidos pelos modelos numéricos das ligações tipo “K” apresentam uma boa convergência quando comparados com os resultados experimentais, indicando que os modelos numéricos utilizados são adequados;
- Os modelos numéricos das ligações tipo “KT” não apresentaram bons resultados comparados com os resultados experimentais, apresentando uma diferença nos resultados na ordem de 10%. Esta dispersão pode ser melhorada com o refino da malha na região da influência das diagonais e montante no banzo, face superior do banzo, pois em trabalhos já realizados indicam que em modelos com melhores refinamentos da malha conduz a melhores resultados;
- Os modos de falha experimentais e numéricos foram os mesmos a “Plastificação da face ou de toda a seção transversal do banzo, junto com as diagonais ou montantes (Modo A)”.

## 6.4. Análise da influência da altura do banzo

### 6.4.1. Modelos numéricos com diferentes alturas e espessuras do banzo

- Novos modelos numéricos foram gerados para estudar o comportamento desses tipos de ligações. Nestes modelos foi variada a altura do perfil do banzo e sua espessura, deixando constante a largura do banzo e a relação  $h_0/t_0$ , com finalidade de verificar a influência destes parâmetros na resistência da ligação;
- Observou-se que o modo de falha obtido para as ligações tipo “K” na análise da influência da altura do banzo foi a “Plastificação da face ou de toda a seção transversal do banzo, junto com as diagonais ou montantes (Modo A)”, para o modelo com altura de 60 mm e para as demais alturas foi a “Ruptura por concentração de tensão nas diagonais ou montantes na região da solda ou da própria solda (Modo E)”.
- No caso das ligações tipo “KT” com altura de 70 mm o modo de falha teórico encontrado foi diferente do modo de falha numérico, sendo necessário avaliar as prescrições utilizadas neste estudo e o modelo numérico para essa ligação. Para as demais ligações os modos de falha numéricos e teóricos obtidos foram iguais.
- Pode-se concluir com essa análise que a altura do banzo não influenciou na resistência da ligação após o aumento da altura do banzo para 70 mm para as ligações tipo “K”. Isto ocorre também em função da relação  $h_0/t_0$  manteve-se constante gerando aumento da espessura do banzo, enrijecendo o mesmo. O comportamento é análogo para as ligações tipo “KT”, mas a partir da ligação com altura de 80 mm.
- Outra consequência observada nas duas ligações é que com o aumento da altura a excentricidade da ligação diminuiu gerando uma redução no momento, no caso da ligação tipo “K” chega a ser desconsiderado. Esta redução do momento leva a um alívio de tensões no banzo superior e conseqüentemente aumento da resistência e mudança do modo de falha da ligação de Modo A para Modo E.

## 6.5. Trabalhos Futuros

É importante, como sugestão para os trabalhos futuros:

- A realização de outras análises experimentais com a variação da altura do banzo e de sua espessura, com a finalidade de se comparar os resultados com as análises da influência da altura do banzo desenvolvida neste trabalho;
- Fazer algumas análises numéricas variando a força no montante com a finalidade de se verificar o limite de validade no modo de falha A do Eurocode 3 (2005);
- Fazer uma análise variando os parâmetros “ $\beta$ ”, “ $\gamma$ ” e o afastamento das diagonais “g”, comparando seus resultados;
- Avaliar a influência da compressão no banzo;
- Avaliar a influência das condições de contorno real com as condições utilizadas no modelo numérico;
- Avaliar o comportamento do modelo real da treliça.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.

1. American Institute of Steel Construction Inc - AISC, 2005. Load and resistance factor design specification for steel hollow structural sections.
2. Ansys, Inc. theory reference (version 11.0), 2007.
3. 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.
4. AutoCAD 2006, Autodesk, Inc., versão 2006.
5. Beke P., Kvocak V. 2008. Analysis of joints created from various types of sections. Eurosteel 2008.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. CIDECT, 1996. Design Guide for Circular Hollow Section (CHS) Joints Under Predominantly Static Loading. Köln:Verl. TÜV Rheinland.
10. 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.

11. European Committee for Standardisation, Eurocode 3, 2005: Design of steel structures: ENV 1993 – 1-1: General rules and rules for buildings.
12. Eurocode 3, 2005. Design of steel structures – part 1.8: Design of joints, CEN, European Committee for Standardisation, Brussels. prEN 1993-1.8
13. Fleischer, O., Puthli, R., 2006. Evaluation of experimental results on slender RHS Kgap joints. Anais do 11º ISTS, International Symposium on Tubular Structures, Québec, Canada..
14. Freitas A. M. S., Mendes F. C., Freitas M.S.R. 2008, Finite Elements Analyses of welded T joints. Eurosteel 2008
15. Freitas, A. M. S., Muniz, C. F. D. G., Moraes, C. S., 2006. Relatório interno de projeto. V&M.
16. Gerken, F. S., 2003. Perfis Tubulares: Aspectos arquitetônicos e estruturais. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto.
17. Hottinger Baldwin Messtechnik, (2003b). Catman 4.5 Operating Manual.
18. Kindman R., Kraus M., Vette J. 2008. On the verification of hollow sections joints resistances. Eurosteel 2008.
19. Kostaski, 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.
20. Lee, M. M. K., & Wilmshurst, S. R., 1995. Numerical modelling of CHS Joints with multiplanar double-K configuration. Journal of Constructional Steel Research, vol. 32. p. 281-30.
21. Lima, L. R. O., Neves, L. F. C., Silva, J. G. S., Vellasco, P. C. G. S., 2005. Análise Paramétrica de Ligações “T” com Perfis Tubulares em Aço através de um Modelo de Elementos Finitos. CILAMCE 2005, Guarapari, Espírito Santo.

22. 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.
23. Manual Vallourec & Mannesmann Tubes. Catálogos com informações técnicas. Tubos estruturais de seção circular (MSH). Dimensões, Propriedades geométricas e materiais.
24. Manual Vallourec & Mannesmann Tubes. Tubos Estruturais, Seção Circular, Quadrada e Retangular.
25. 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.
26. Mathacad, Parametric Technology Corporation (version 14.0), 2007.
27. 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.
28. Mendes, F. C., 2008. Análise teórica-experimental de ligações tipo “T”, “K” e “KT” com perfis metálicos tubulares. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto.
29. Meyer, K. F., 2002. Estruturas Metálicas: estruturas com tubos: projeto e introdução ao cálculo. KM Engenharia. Belo Horizonte, Minas Gerais.
30. Moazed R, Szyszkowski W, Fotouh R, 2009. The in – plane behaviour and FE modeling of a T – joint connection of thin - waled square tubes. Thin – walled structures.
31. 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.

32. Packer, J. A. & Henderson, J. E., 2007. Hollow Structural Section Connections and Trusses: A Design Guide, 2nd edition. Canadian Institute of Steel Construction.
33. Packer, J. A., 1986. Design Examples for HSS Trusses. Canadian Journal of Civil Engineering. Vol. 13, n.4, p. 460-473.
34. Packer, J. A., 1997. Design guide for rectangular hollow section (RHS) joints under predominantly static loading. Köln:Verl, TÜV Rheinland, 102 p.
35. Rautaruukki Oyj, H. V., 1998. Design Handbook for Rautaruukki Structural Hollow Sections. Hämeenlinna.
36. 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.
37. 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.
38. 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.
39. 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.
40. 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.
41. 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.

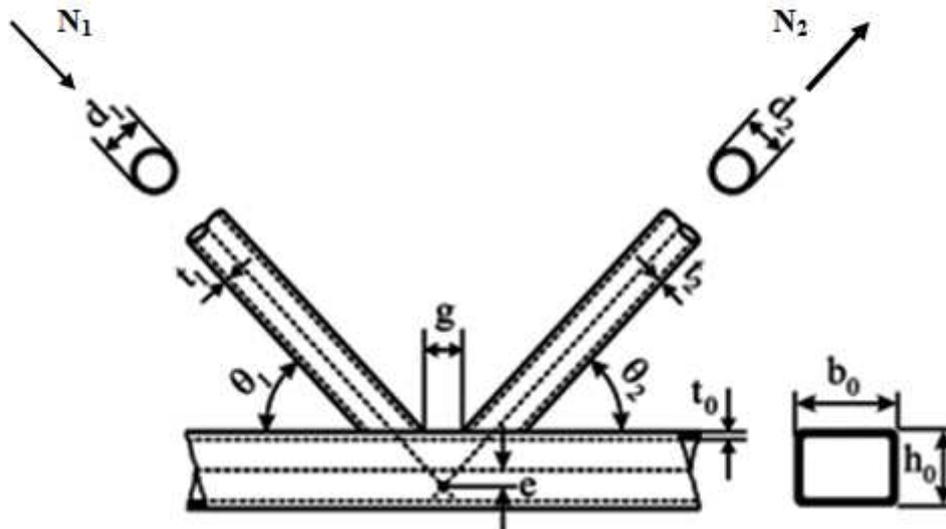
42. Spyros, K., Romeijn, A., Wardenier, J., 2000. Stress Concentrations in Tubular Gap KJoints: Mechanics and Fatigue Design. *Engineering Structures* n.22, p. 4-14.
43. Vegte ,G.J. Van der, Makino, Y., 2006. The ultimate strength of axially loaded CHS uniplanar T-joints subjected to axial chord load. *Anais do 11º ISTS, International Symposium on Tubular Structures, Québec, Canada.*
44. Wardenier, J., 2000. *Hollow Sections in Structural Applications.* Delft University Technology of Netherlands.
45. 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.

## **ANEXOS**

## **ANEXO A**

**ANEXO A – LIMITES TEÓRICOS E CÁLCULO DA RESISTÊNCIA DA LIGAÇÃO TIPO “K” ENSAIADA NESTE TRABALHO.**

**Verificação da ligação tipo “K” com banzo com perfil retangular e diagonal circular.**



• **Dados:**

- Diagonais 1
  - $d_1 = 48,3\text{mm}$
  - $t_1 = 3,7\text{mm}$
  - $\theta_1 = 47,7^\circ$
  - $N_1 = -115\text{kN}$
  - $F_{y1} = 250\text{MPa}$
- Diagonais 2
  - $d_2 = 48,3\text{mm}$
  - $t_2 = 3,7\text{mm}$
  - $\theta_2 = 47,7^\circ$
  - $N_2 = 115\text{kN}$
  - $F_{y2} = 250\text{MPa}$
- Banzo
  - $h_0 = 60,0\text{mm}$
  - $b_0 = 110,0\text{mm}$

- $t_0 = 4,8\text{mm}$
- $A_0 = 14,41\text{mm}^2$
- $S_0 = 27,4\text{cm}^3$
- $F_{y0} = 456\text{MPa}$
- $E = 205000\text{MPa}$
- $N_0 = -77,4\text{kN}$
- $M_0 = 8,2\text{kN.m}$
- $V_0 = -11,72\text{kN}$

Esforços no banzo calculado como indicado no esquema do Capítulo 5 (Figura 5.1).

- Afastamento
  - $g = 32\text{mm}$
- Excentricidade

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

$$e = 23,50\text{mm}$$

• **Limites:**

- A espessura das chapas dos perfis não pode ser inferior a 2,5 mm ou superior a 25 mm.

$$2,5\text{mm} \leq t_i \leq 25\text{mm}$$

- $t_1 = 3,7\text{mm}$       $2,5\text{mm} \leq 3,7\text{mm} \leq 25\text{mm}$      **OK!**
- $t_2 = 3,7\text{mm}$       $2,5\text{mm} \leq 3,7\text{mm} \leq 25\text{mm}$      **OK!**
- $t_0 = 4,8\text{mm}$       $2,5\text{mm} \leq 4,8\text{mm} \leq 25\text{mm}$      **OK!**

- O ângulo entre o banzo e as diagonais não pode ser inferior a 30°.

$$\theta_i \geq 30^\circ$$

- $\theta_1 = 47,7^\circ$       $47,7^\circ \geq 30^\circ$      **OK!**
- $\theta_2 = 47,7^\circ$       $47,7^\circ \geq 30^\circ$      **OK!**

- Afastamento “g”:

$$g \geq t_1 + t_2$$

- $t_1 = 3,7\text{mm}$       $t_1 + t_2 = 14,4\text{mm}$
- $t_2 = 3,7\text{mm}$       $g = 32\text{mm} > 14,4\text{mm}$      **OK!**

- Relação entre o diâmetro da diagonal e a largura do banzo.

$$0,4 \leq \frac{d_i}{b_0} \leq 0,8$$

- $d_1 = 48,3\text{mm}$

$$\frac{d_1}{b_0} = 0,439 \quad \text{OK!}$$

- $d_2 = 48,3\text{mm}$

$$\frac{d_2}{b_0} = 0,439 \quad \text{OK!}$$

- Relação entre o diâmetro e a espessura da diagonal

$$\frac{d_i}{t_i} \leq 50 \quad \text{e} \quad \frac{d_i}{t_i} \leq 0,06 \frac{E}{F_y}$$

- $d_1 = 48,3\text{mm} \quad t_1 = 3,7\text{mm}$

$$\frac{d_1}{t_1} = 13,1 \leq 50 \quad \text{e} \quad \frac{d_1}{t_1} = 13,1 \leq 49,2 \quad \text{OK!}$$

- $d_2 = 48,3\text{mm} \quad t_2 = 3,7\text{mm}$

$$\frac{d_2}{t_2} = 13,1 \leq 50 \quad \text{e} \quad \frac{d_2}{t_2} = 13,1 \leq 49,2 \quad \text{OK!}$$

- Relação entre a altura e largura do banzo

$$0,5 \leq \frac{h_0}{b_0} \leq 2,0$$

- $h_0 = 60,0\text{mm} \quad \text{e} \quad b_0 = 110,0\text{mm}$

$$\frac{h_0}{b_0} = 0,545 \quad \text{OK!}$$

- Relação entre a largura e espessura do banzo.

$$\frac{b_0}{t_0} \leq 35 \quad \text{e} \quad \frac{b_0}{t_0} \leq 1,27 \sqrt{\frac{E}{F_{y0}}}$$

- $h_0 = 60,0\text{mm} \quad \text{e} \quad b_0 = 110,0\text{mm}$

$$\frac{b_0}{t_0} = 22,9 \leq 35 \quad \text{e} \quad \frac{b_0}{t_0} = 22,9 \leq 26,9 \quad \text{OK!}$$

- Relação entre a altura e espessura do banzo.

$$\frac{h_0}{t_0} \leq 35 \quad \text{e} \quad \frac{h_0}{t_0} \leq 1,27 \sqrt{\frac{E}{F_{y0}}}$$

- $h_0 = 60,0\text{mm}$  e  $b_0 = 110,0\text{mm}$

$$\frac{h_0}{t_0} = 12,5 \leq 35 \quad \text{e} \quad \frac{h_0}{t_0} = 12,5 \leq 26,9 \quad \text{OK!}$$

- Valores de  $\beta$  e  $\gamma$ .

$$\beta = \frac{d_1 + d_2}{2b_0} = 0,439 \quad \text{e} \quad \gamma = \frac{b_0}{2t_0} = 11,5$$

- Verificação do afastamento entre as diagonais.

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

- $g = 32\text{mm}$  e  $b_0 = 110,0\text{mm}$

$$0,5(1 - \beta) = 0,28 \leq 0,29 \leq 1,5(1 - \beta) = 0,84 \quad \text{OK!}$$

- Verificação da excentricidade.

$$-0,55 \leq \frac{e}{h_0} \leq 0,25$$

- $e = 23,5\text{mm}$  e  $h_0 = 60,0\text{mm}$

$$\frac{e}{h_0} = 0,392 \leq 0,25 \quad \text{NOK!}$$

Portanto é necessário fazer a redistribuição de momento como descrito no capítulo 2.

- **Verificação dos Estados Limites.**

- **Verificação quanto à plastificação da face ou de toda a seção transversal do banzo, junto com as diagonais e montantes (Modo A).**

$$n = \frac{-N_0}{A_0 F_{y0}} + \frac{M_0}{S_0 F_{y0}} = 0,8$$

Momento gerado devido a excentricidade estar fora dos limites estabelecidos pelo Eurocode 3 (2005) :  $-0,55h_0 \leq e \leq 0,25h_0$ .

$$K_n = 1,3 - \frac{0,4}{\beta} n = 0,59 \leq 1,0$$

$$N_{1,Rd} = \frac{8,9\pi K_n f_{y0} t_0^2 \sqrt{\gamma}}{4 \sin \theta_i} \left( \frac{d_1 + d_2}{2b_0} \right) = 87,7 \text{ kN}$$

$$N_{2,Rd} = \frac{8,9\pi K_n f_{y0} t_0^2 \sqrt{\gamma}}{4 \sin \theta_i} \left( \frac{d_1 + d_2}{2b_0} \right) = 87,7 \text{ kN}$$

- **Verificação quanto à plastificação ou instabilidade por cisalhamento do banzo, junto a diagonais ou montantes (Modo C).**

$$A_v = (2h_0)t_0 = 576,0 \text{ mm}^2 \quad V_p = \frac{F_{y0} A_0}{\sqrt{3}} = 151,6 \text{ kN}$$

$$N_{1,Rd} = \frac{f_{y0} A_v \pi}{4\sqrt{3} \sin \theta_i} = 161,0 \text{ kN}$$

$$N_{2,Rd} = \frac{f_{y0} A_v \pi}{4\sqrt{3} \sin \theta_i} = 161,0 \text{ kN}$$

$$N_{0,Rd} = \frac{\pi}{4} \left[ (A_0 - A_v) f_{y0} + A_v f_{y0} \sqrt{1 - \left( \frac{V_0}{V_{pl,Rd}} \right)^2} \right] = 515,5 \text{ kN}$$

- **Verificação quanto à ruptura por concentração de tensão nas diagonais ou montantes na região da solda ou da própria solda. (Modo E)**

$$b_{eff1} = \frac{10f_{y0} t_0^2 d_1}{b_0 f_{y1} t_1} = 49,9 \text{ mm} \leq d_1 = 48,8 \text{ mm}$$

$$b_{eff2} = \frac{10f_{y0} t_0^2 d_2}{b_0 f_{y2} t_2} = 49,9 \text{ mm} \leq d_2 = 48,8 \text{ mm}$$

$$N_{1,rd} = \frac{\pi f_{y1} t_1}{4} (2d_1 - 4t_1 + d_1 + b_{eff1}) = 129,6 \text{ kN}$$

$$N_{2,rd} = \frac{\pi f_{y2} t_2}{4} (2d_2 - 4t_2 + d_2 + b_{eff2}) = 129,6 \text{ kN}$$

- **Verificação quanto à Ruptura por punção da parede do banzo na área de contato com as diagonais ou montantes; (Modo D)**

$$\beta \leq 1 - \frac{1}{\gamma} \quad \text{OK!}$$

$$b_{e,p1} = \frac{10t_0d_1}{b_0} = 21,1 \leq d_1$$

$$b_{e,p2} = \frac{10t_0d_2}{b_0} = 21,1 \leq d_2$$

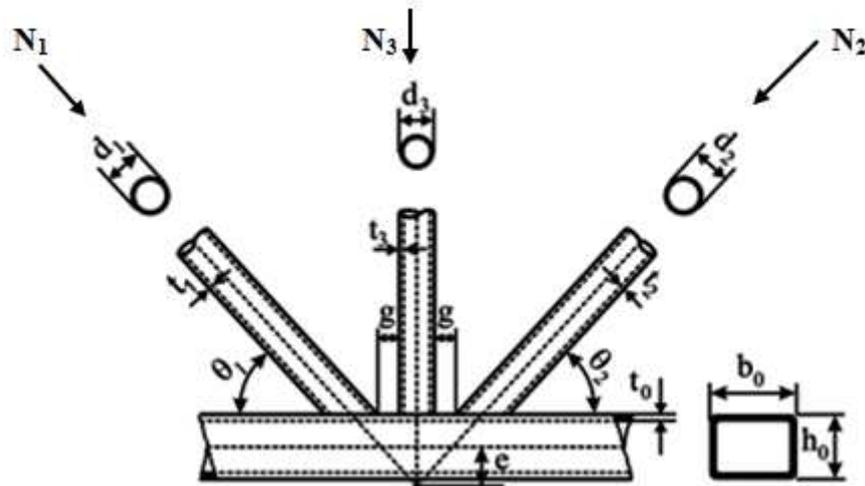
$$N_{1,Rd} = \frac{\pi f_{y0} t_0}{4\sqrt{3}\sin\theta_1} \left( \frac{2d_1}{\sin\theta_1} + d_1 + b_{e,p1} \right) = 268,2\text{kN}$$

$$N_{2,Rd} = \frac{\pi f_{y0} t_0}{4\sqrt{3}\sin\theta_2} \left( \frac{2d_2}{\sin\theta_2} + d_2 + b_{e,p1} \right) = 268,2\text{kN}$$

## **ANEXO B**

**ANEXO B – LIMITES TEÓRICOS E CÁLCULO DA RESISTÊNCIA DA LIGAÇÃO TIPO “KT” ENSAIADA NESTE TRABALHO.**

**Verificação da ligação tipo “KT” com banzo com perfil retangular e diagonal circular.**



• **Dados:**

- Diagonais 1
  - $d_1 = 48,3\text{mm}$
  - $t_1 = 3,7\text{mm}$
  - $\theta_1 = 47,7^\circ$
  - $N_1 = -87\text{kN}$
  - $F_{y1} = 250\text{MPa}$
- Diagonais 2
  - $d_2 = 48,3\text{mm}$
  - $t_2 = 3,7\text{mm}$
  - $\theta_2 = 47,7^\circ$
  - $N_2 = 87\text{kN}$
  - $F_{y2} = 250\text{MPa}$
- Montante
  - $d_3 = 38,1\text{mm}$
  - $t_3 = 4,3\text{mm}$
  - $\theta_3 = 90^\circ$

- $N_3 = -13\text{kN}$
- $F_{y3} = 250\text{MPa}$
- Banzo
  - $h_0 = 60,0\text{mm}$
  - $b_0 = 110,0\text{mm}$
  - $t_0 = 4,8\text{mm}$
  - $A_0 = 14,41\text{mm}^2$
  - $S_0 = 27,4\text{cm}^3$
  - $F_{y0} = 456\text{MPa}$
  - $E = 205000\text{MPa}$
  - $N_0 = -58,55\text{kN}$
  - $M_0 = 10,89\text{kN.m}$
  - $V_0 = -22,07\text{kN}$

Esforços no banzo calculado como indicado no esquema do Capítulo 5 (Figura 5.1).

- Afastamento
  - $g = 33\text{mm}$

- Excentricidade

$$e1 = \frac{\sin(\theta_1) \cdot \sin(\theta_3)}{\sin(\theta_1 + \theta_3)} \left( \frac{d_1}{2 \sin(\theta_1)} + \frac{d_3}{2 \sin(\theta_3)} + g_1 \right) - \frac{h_0}{2} = 63,15\text{mm}$$

$$e2 = \frac{\sin(\theta_2) \cdot \sin(\theta_3)}{\sin(\theta_2 + \theta_3)} \left( \frac{d_2}{2 \sin(\theta_2)} + \frac{d_3}{2 \sin(\theta_3)} + g_2 \right) - \frac{h_0}{2} = 63,15\text{mm}$$

$$e = 63,15\text{mm}$$

- **Limites:**

- A espessura das chapas dos perfis não pode ser inferior a 2,5 mm ou superior a 25 mm.

$$2,5\text{mm} \leq t_i \leq 25\text{mm}$$

- $t_1 = 3,7\text{mm}$       $2,5\text{mm} \leq 3,7\text{mm} \leq 25\text{mm}$      **OK!**
- $t_2 = 3,7\text{mm}$       $2,5\text{mm} \leq 3,7\text{mm} \leq 25\text{mm}$      **OK!**
- $t_3 = 4,3\text{mm}$       $2,5\text{mm} \leq 4,3\text{mm} \leq 25\text{mm}$      **OK!**
- $t_0 = 4,8\text{mm}$       $2,5\text{mm} \leq 4,8\text{mm} \leq 25\text{mm}$      **OK!**

- O ângulo entre o banzo e as diagonais não pode ser inferior a 30°.

$$\theta_i \geq 30^\circ$$

- $\theta_1 = 47,7^\circ$      $47,7^\circ \geq 30^\circ$     **OK!**
- $\theta_2 = 47,7^\circ$      $47,7^\circ \geq 30^\circ$     **OK!**
- $\theta_3 = 90^\circ$      $90^\circ \geq 30^\circ$     **OK!**

- Afastamento “g”:

$$g \geq t_1 + t_3 \quad \text{e} \quad g \geq t_2 + t_3$$

- $t_1 = 3,7\text{mm}$ ,  $t_2 = 3,7\text{mm}$  e  $t_3 = 4,3\text{mm}$   
 $t_1 + t_3 = 8\text{mm}$  e  $t_2 + t_3 = 8\text{mm}$   
 $g = 33\text{mm} > 8\text{mm}$     **OK!**

- Relação entre o diâmetro da diagonal e a largura do banzo.

$$0,4 \leq \frac{d_i}{b_0} \leq 0,8$$

- $d_1 = 48,3\text{mm}$

$$\frac{d_1}{b_0} = 0,439 \quad \text{OK!}$$

- $d_2 = 48,3\text{mm}$

$$\frac{d_2}{b_0} = 0,439 \quad \text{OK!}$$

- $d_3 = 38,1\text{mm}$

$$\frac{d_3}{b_0} = 0,346 \quad \text{NOK!}$$

- Relação entre o diâmetro e a espessura da diagonal

$$\frac{d_i}{t_i} \leq 50 \quad \text{e} \quad \frac{d_i}{t_i} \leq 0,06 \frac{E}{F_y}$$

- $d_1 = 48,3\text{mm}$      $t_1 = 3,7\text{mm}$

$$\frac{d_1}{t_1} = 13,1 \leq 50 \quad \text{e} \quad \frac{d_1}{t_1} = 13,1 \leq 49,2 \quad \text{OK!}$$

- $d_2 = 48,3\text{mm}$      $t_2 = 3,7\text{mm}$

$$\frac{d_2}{t_2} = 13,1 \leq 50 \quad \text{e} \quad \frac{d_2}{t_2} = 13,1 \leq 49,2 \quad \text{OK!}$$

- $d_3 = 38,1\text{mm}$     $t_3 = 4,3\text{mm}$

$$\frac{d_3}{t_3} = 8,86 \leq 50 \quad \text{e} \quad \frac{d_3}{t_3} = 8,86 \leq 49,2 \quad \text{OK!}$$

- Relação entre a altura e largura do banzo

$$0,5 \leq \frac{h_0}{b_0} \leq 2,0$$

- $h_0 = 60,0\text{mm}$  e  $b_0 = 110,0\text{mm}$

$$\frac{h_0}{b_0} = 0,545 \quad \text{OK!}$$

- Relação entre a largura e espessura do banzo.

$$\frac{b_0}{t_0} \leq 35 \quad \text{e} \quad \frac{b_0}{t_0} \leq 1,27 \sqrt{\frac{E}{F_{y0}}}$$

- $h_0 = 60,0\text{mm}$  e  $b_0 = 110,0\text{mm}$

$$\frac{b_0}{t_0} = 22,9 \leq 35 \quad \text{e} \quad \frac{b_0}{t_0} = 22,9 \leq 26,9 \quad \text{OK!}$$

- Relação entre a altura e espessura do banzo.

$$\frac{h_0}{t_0} \leq 35 \quad \text{e} \quad \frac{h_0}{t_0} \leq 1,27 \sqrt{\frac{E}{F_{y0}}}$$

- $h_0 = 60,0\text{mm}$  e  $b_0 = 110,0\text{mm}$

$$\frac{h_0}{t_0} = 12,5 \leq 35 \quad \text{e} \quad \frac{h_0}{t_0} = 12,5 \leq 26,9 \quad \text{OK!}$$

- Valores de  $\beta$  e  $\gamma$ .

$$\beta = \frac{d_1 + d_2 + d_3}{3b_0} = 0,408 \quad \text{e} \quad \gamma = \frac{b_0}{2t_0} = 11,5$$

- Verificação do afastamento entre as diagonais.

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

- $g = 32\text{mm}$  e  $b_0 = 110,0\text{mm}$

$$0,5(1 - \beta) = 0,29 \leq 0,30 \leq 1,5(1 - \beta) = 0,88 \quad \text{OK!}$$

- Verificação da excentricidade.

$$-0,55 \leq \frac{e}{h_0} \leq 0,25$$

- $e = 23,5\text{mm}$  e  $h_0 = 60,0\text{mm}$

$$\frac{e}{h_0} = 1,05 \leq 0,25 \quad \text{NOK!}$$

Portanto é necessário fazer a redistribuição de momento como descrito no capítulo 2.

- **Verificação dos Estados Limites.**

- **Verificação quanto à plastificação da face ou de toda a seção transversal do banzo, junto com as diagonais e montantes (Modo A).**

$$n = \frac{-N_0}{A_0 F_{y0}} + \frac{M_0}{S_0 F_{y0}} = 0,94$$

Momento gerado devido a excentricidade estar fora dos limites estabelecidos pelo Eurocode 3 (2005) :  $-0,55h_0 \leq e \leq 0,25h_0$ .

$$K_n = 1,3 - \frac{0,4}{\beta} n = 0,378 \leq 1,0$$

$$N_{1,Rd} = \frac{8,9\pi K_n f_{y0} t_0^2 \sqrt{\gamma}}{4 \sin \theta_i} \left( \frac{d_1 + d_2 + d_3}{3b_0} \right) = 51,79\text{kN}$$

$$N_{2,Rd} = \frac{8,9\pi K_n f_{y0} t_0^2 \sqrt{\gamma}}{4 \sin \theta_i} \left( \frac{d_1 + d_2 + d_3}{3b_0} \right) = 51,79\text{kN}$$

$$N_{1,sd} \cdot \sin \theta_1 + N_{3,sd} \cdot \sin \theta_3 \leq N_{2,Rd} \cdot \sin \theta_2$$

$$(-87) \sin 47,7^\circ + (-13,3) \sin 90^\circ \leq 51,79 \sin 47,7^\circ$$

$$-77,64 \leq 38,30 \quad \text{OK!}$$

- **Verificação quanto à plastificação ou instabilidade por cisalhamento do banzo, junto a diagonais ou montantes (Modo C).**

$$A_v = (2h_0)t_0 = 576,0\text{mm}^2 \quad V_p = \frac{F_{y0}A_0}{\sqrt{3}} = 151,6\text{kN}$$

$$N_{1,Rd} = \frac{f_{y0}A_v\pi}{4\sqrt{3}\sin\theta_i} = 161,0\text{kN}$$

$$N_{2,Rd} = \frac{f_{y0}A_v\pi}{4\sqrt{3}\sin\theta_i} = 161,0\text{kN}$$

$$N_{0,Rd} = \frac{\pi}{4} \left[ (A_0 - A_v)f_{y0} + A_v f_{y0} \sqrt{1 - \left( \frac{V_0}{V_{pl,Rd}} \right)^2} \right] = 515,5\text{kN}$$

$$\begin{aligned} N_{1,Sd.} \sin \theta_1 + N_{3,Sd.} \sin \theta_3 &\leq N_{2,Rd.} \sin \theta_2 \\ (-87) \sin 47,7^\circ + (-13,3) \sin 90^\circ &\leq 161 \sin 47,7^\circ \\ -77,64 &\leq 119 \quad \text{OK!} \end{aligned}$$

- **Verificação quanto à ruptura por concentração de tensão nas diagonais ou montantes na região da solda ou da própria solda. (Modo E)**

$$b_{eff1} = \frac{10f_{y0}t_0^2d_1}{b_0f_{y1}t_1} = 49,9\text{mm} \leq d_1 = 48,8\text{mm}$$

$$b_{eff2} = \frac{10f_{y0}t_0^2d_2}{b_0f_{y2}t_2} = 49,9\text{mm} \leq d_2 = 48,8\text{mm}$$

$$N_{1,rd} = \frac{\pi f_{y1} t_1}{4} (2d_1 - 4t_1 + d_1 + b_{eff1}) = 129,6\text{kN}$$

$$N_{2,rd} = \frac{\pi f_{y2} t_2}{4} (2d_2 - 4t_2 + d_2 + b_{eff2}) = 129,6\text{kN}$$

$$\begin{aligned} N_{1,Sd.} \sin \theta_1 + N_{3,Sd.} \sin \theta_3 &\leq N_{2,Rd.} \sin \theta_2 \\ (-87) \sin 47,7^\circ + (-13,3) \sin 90^\circ &\leq 129,6 \sin 47,7^\circ \\ -77,64 &\leq 95,85 \quad \text{OK!} \end{aligned}$$

- **Verificação quanto à Ruptura por punção da parede do banzo na área de contato com as diagonais ou montantes; (Modo D)**

$$\beta \leq 1 - \frac{1}{\gamma} \quad \text{OK!}$$

$$b_{e,p1} = \frac{10t_0d_1}{b_0} = 21,1 \leq d_1$$

$$b_{e,p2} = \frac{10t_0d_2}{b_0} = 21,1 \leq d_2$$

$$N_{1,Rd} = \frac{\pi f_{y0} t_0}{4\sqrt{3} \sin \theta_1} \left( \frac{2d_1}{\sin \theta_1} + d_1 + b_{e,p1} \right) = 268,2 \text{ kN}$$

$$N_{2,Rd} = \frac{\pi f_{y0} t_0}{4\sqrt{3} \sin \theta_2} \left( \frac{2d_2}{\sin \theta_2} + d_2 + b_{e,p1} \right) = 268,2 \text{ kN}$$

$$N_{1,Sd} \cdot \sin \theta_1 + N_{3,Sd} \cdot \sin \theta_3 \leq N_{2,Rd} \cdot \sin \theta_2$$

$$(-87) \sin 47,7^\circ + (-13,3) \sin 90^\circ \leq 268,2 \sin 47,7^\circ$$

$$-77,64 \leq 198,3 \quad \text{OK!}$$

## **ANEXO C**

## ANEXO C – DADOS EXPERIMENTAIS DAS LIGAÇÕES TIPO “K”

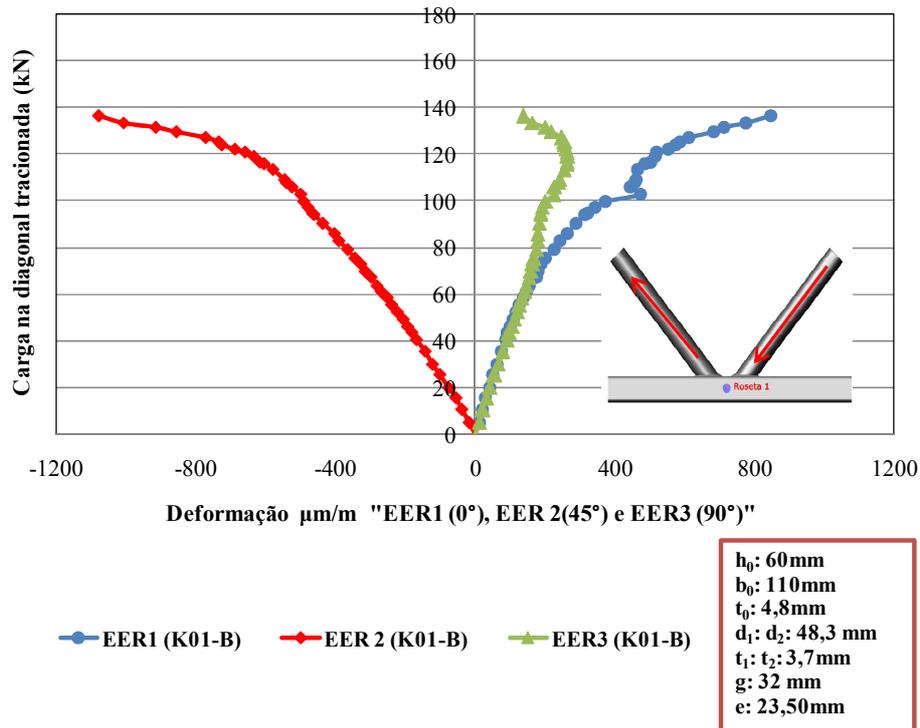


Figura C. 1 - Carga x Deformação para as ligações tipo “K01-B” – Roseta 1 (EER1, EER2 e EER3).

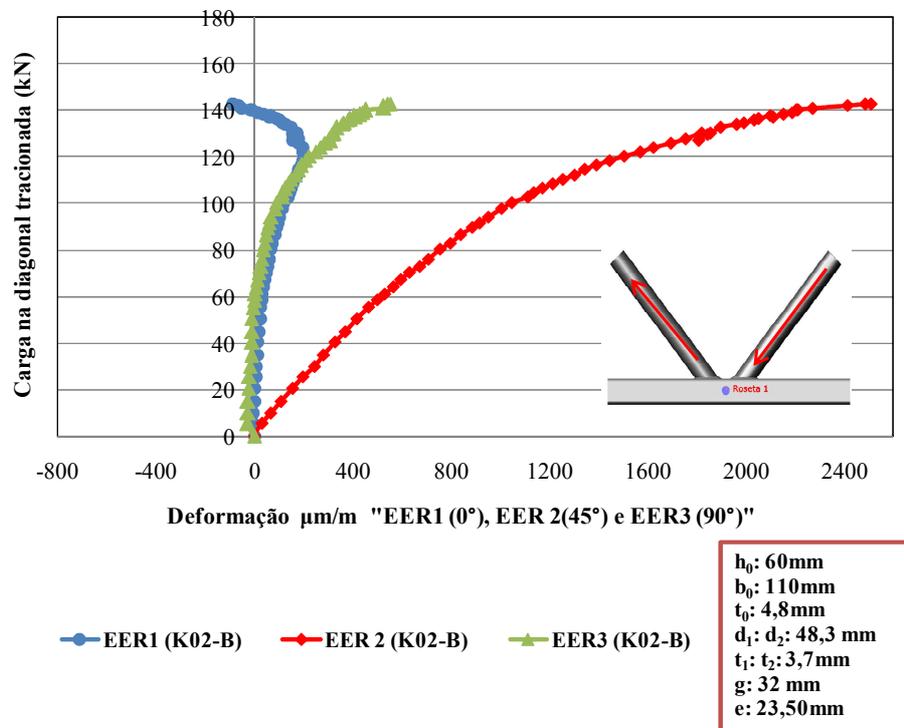


Figura C. 2 - Carga x Deformação para as ligações tipo “K02-B” – Roseta 1 (EER1, EER2 e EER3).

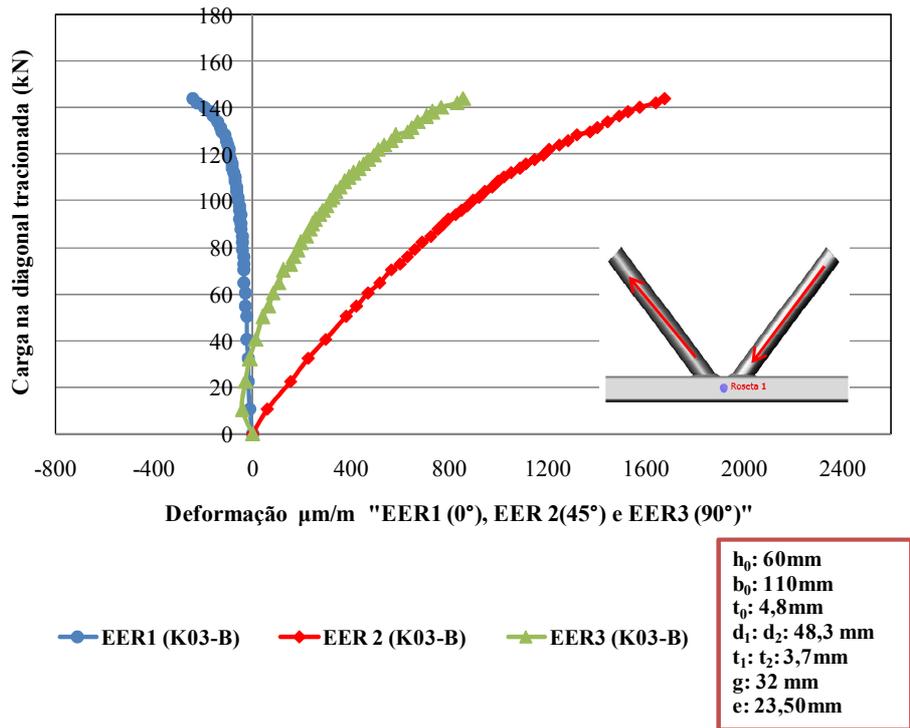


Figura C. 3 - Carga x Deformação para as ligações tipo “K03-B” – Roseta 1 (EER1, EER2 e EER3).

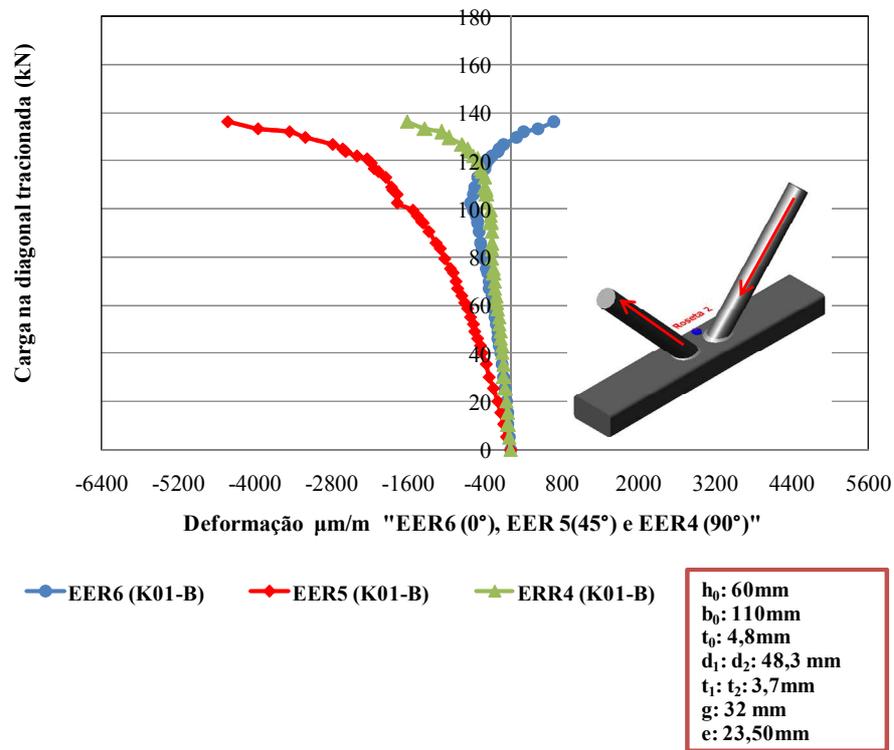


Figura C. 4 - Carga x Deformação para as ligações tipo “K01-B” – Roseta 2 (EER4, EER5 e EER6).

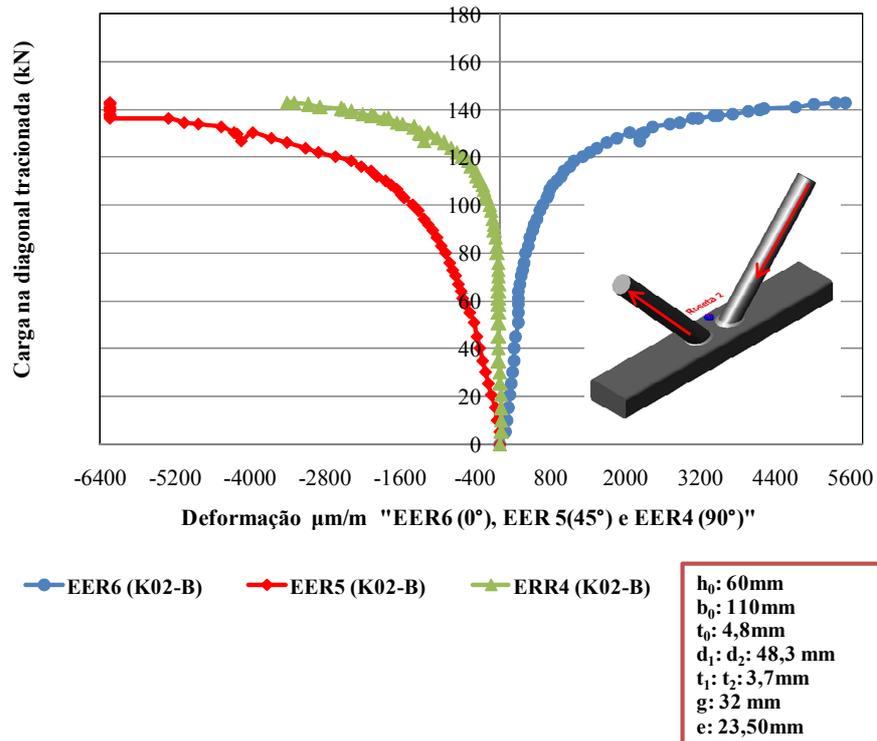


Figura C. 5 - Carga x Deformação para as ligações tipo “K02-B” – Roseta 2 (EER4, EER5 e EER6).

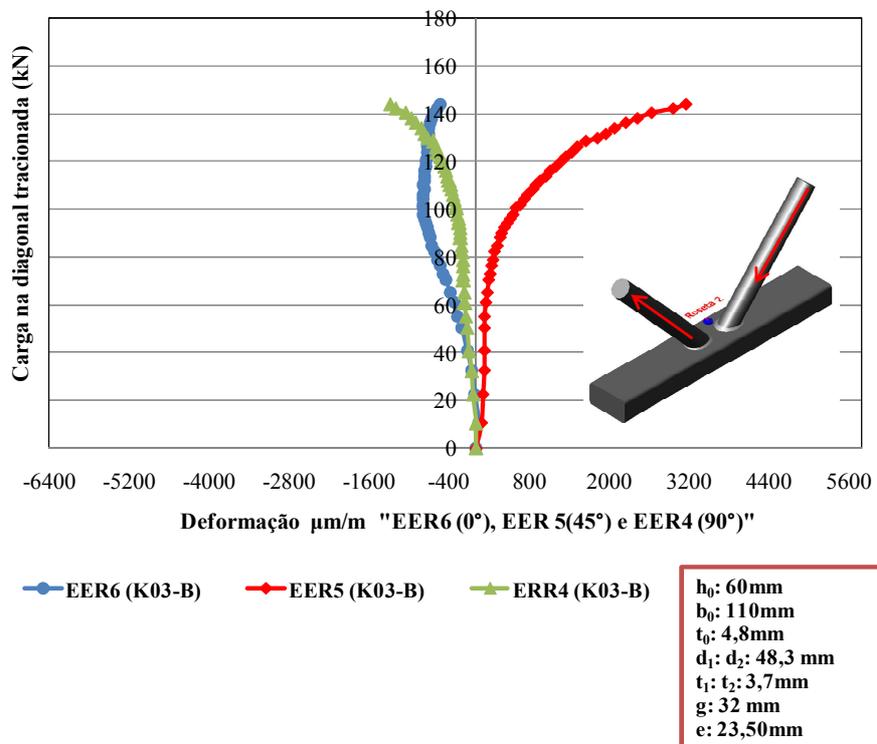


Figura C. 6 - Carga x Deformação para as ligações tipo “K03-B” – Roseta 2 (EER4, EER5 e EER6).

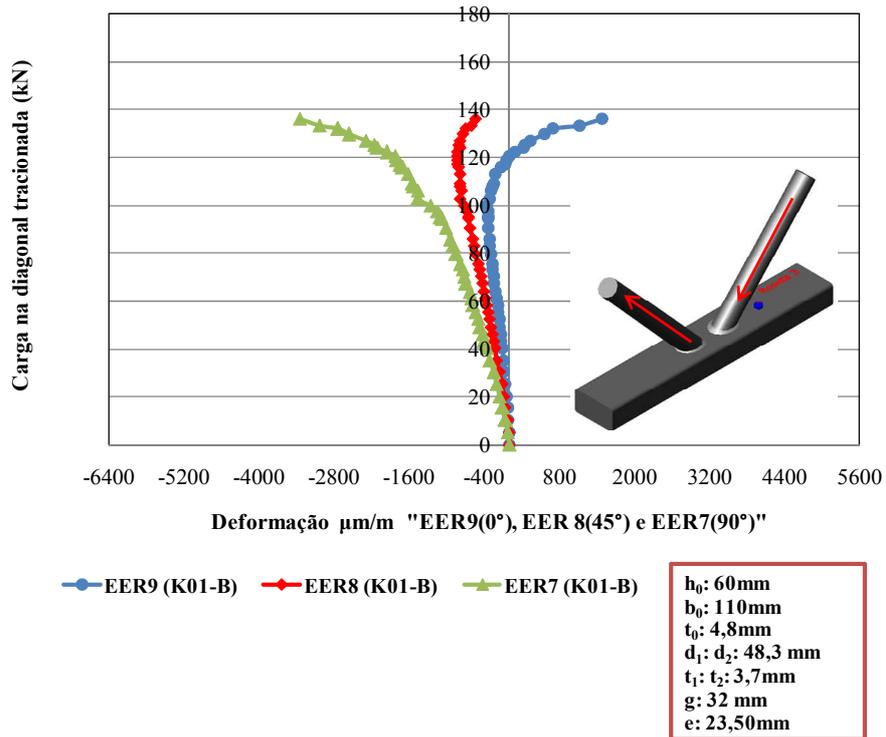


Figura C. 7 - Carga x Deformação para as ligações tipo “K01-B” – Roseta 3 (EER9, EER8 e EER7).

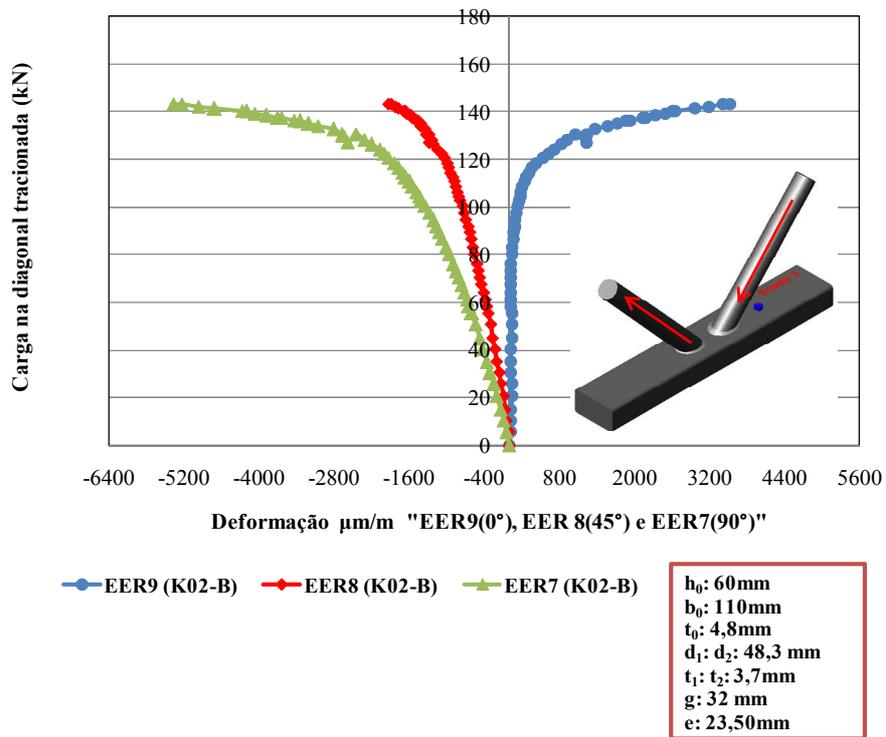


Figura C. 8 - Carga x Deformação para as ligações tipo “K02-B” – Roseta 3 (EER9, EER8 e EER7).

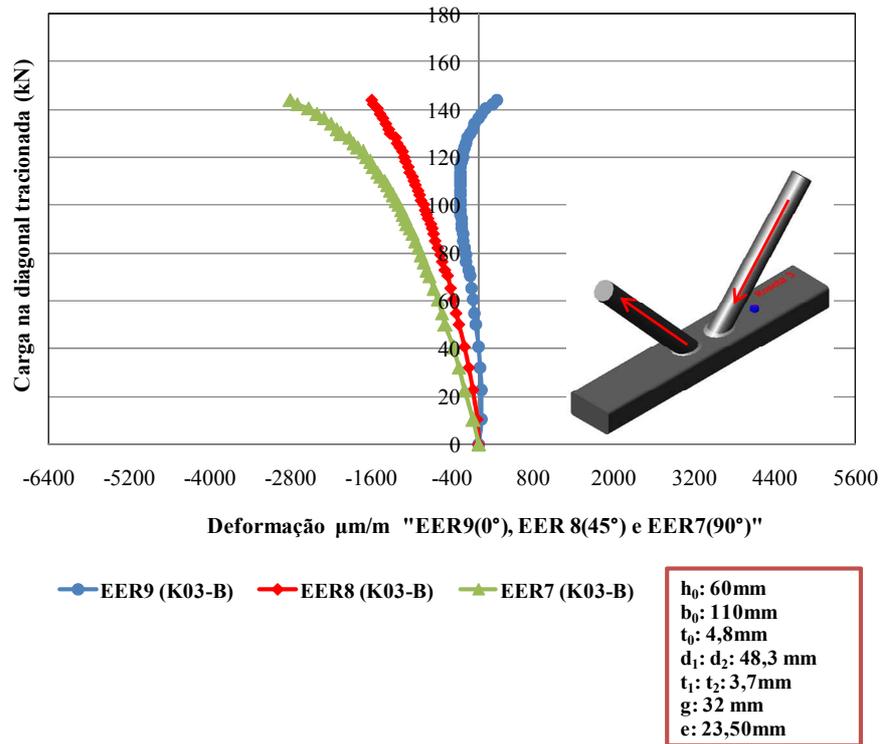


Figura C. 9 - Carga x Deformação para as ligações tipo “K03-B” – Roseta 3 (EER9, EER8 e EER7).

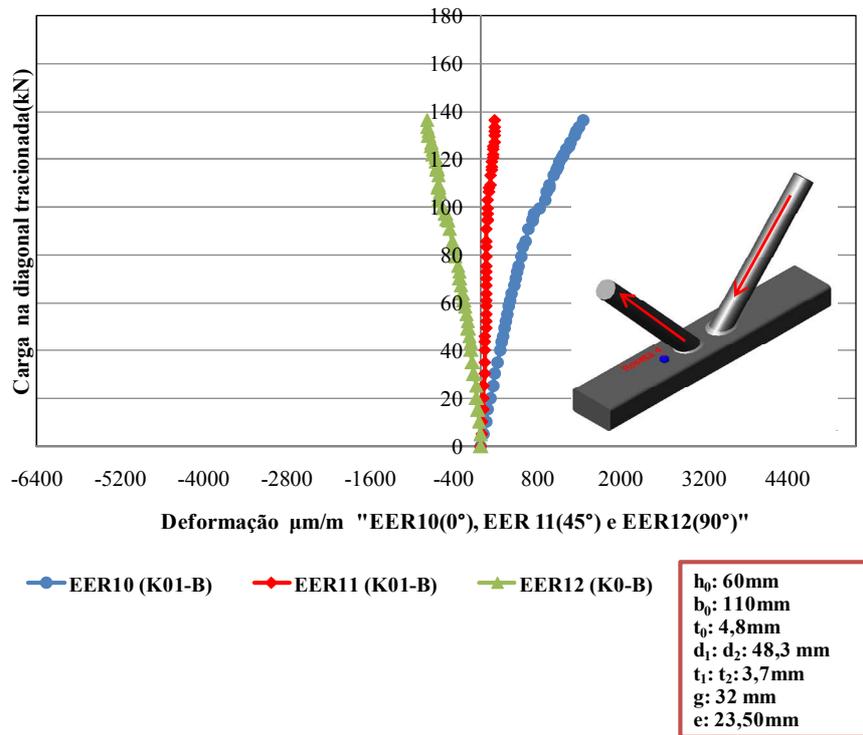


Figura C. 10 - Carga x Deformação para as ligações tipo “K01-B” – Roseta 4 (EER10, EER11 e EER12).

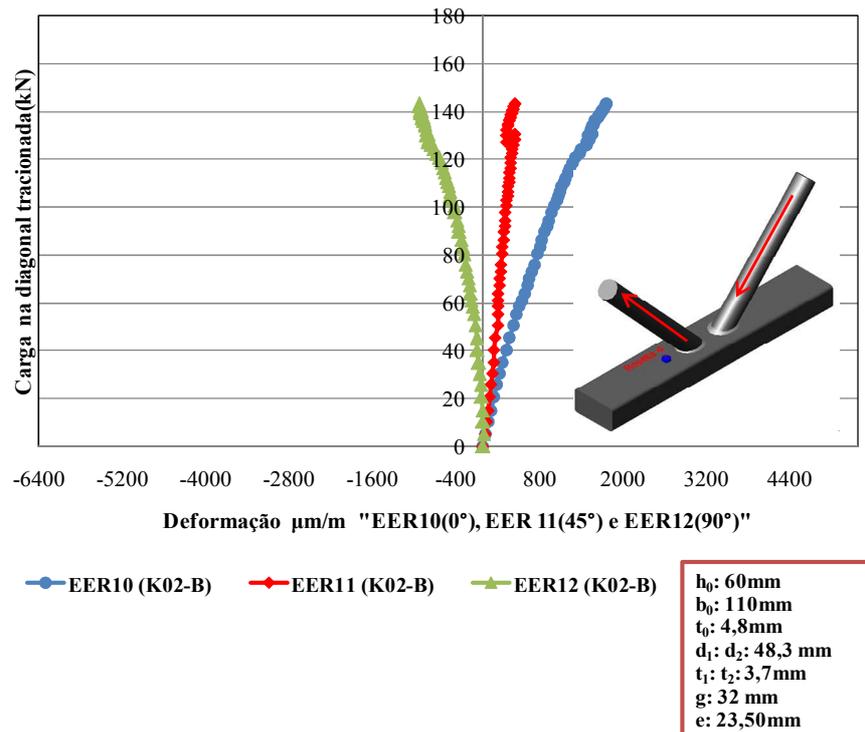


Figura C. 11 - Carga x Deformação para as ligações tipo “K02-B” – Roseta 4 (EER10, EER11 e EER12).

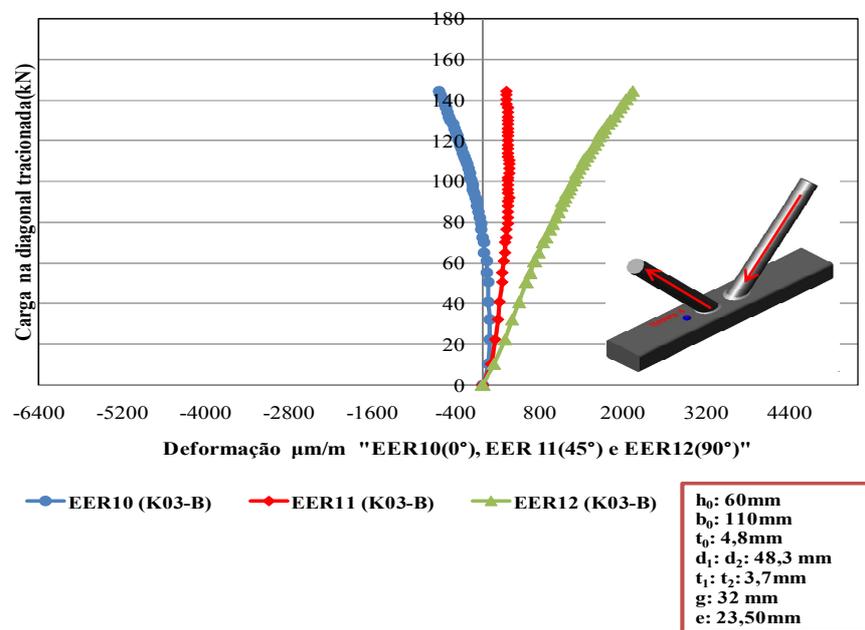


Figura C. 12 - Carga x Deformação para as ligações tipo “K03-B” – Roseta 4 (EER10, EER11 e EER12).

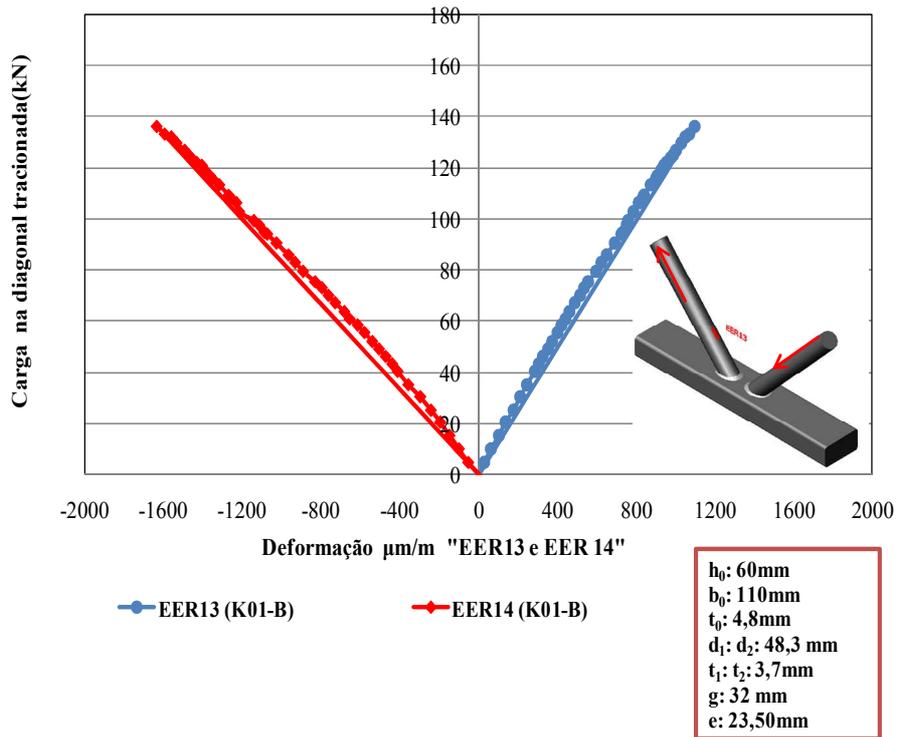


Figura C. 13 - Carga x Deformação para as ligações tipo “K01-B” - EER13 e EER14.

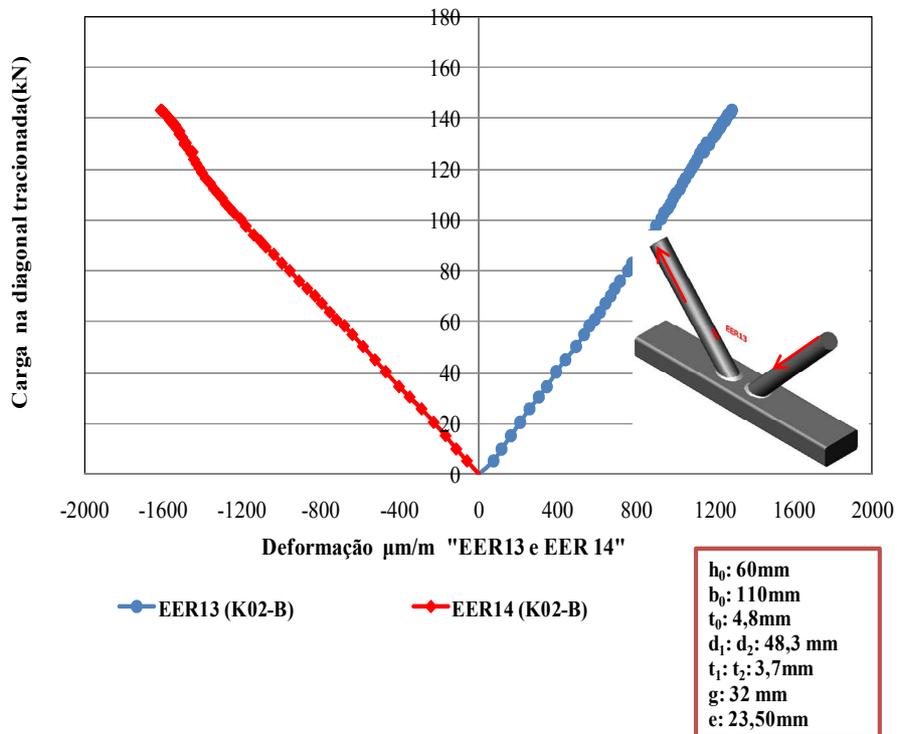


Figura C. 14 - Carga x Deformação para as ligações tipo “K02-B” - EER13 e EER14.

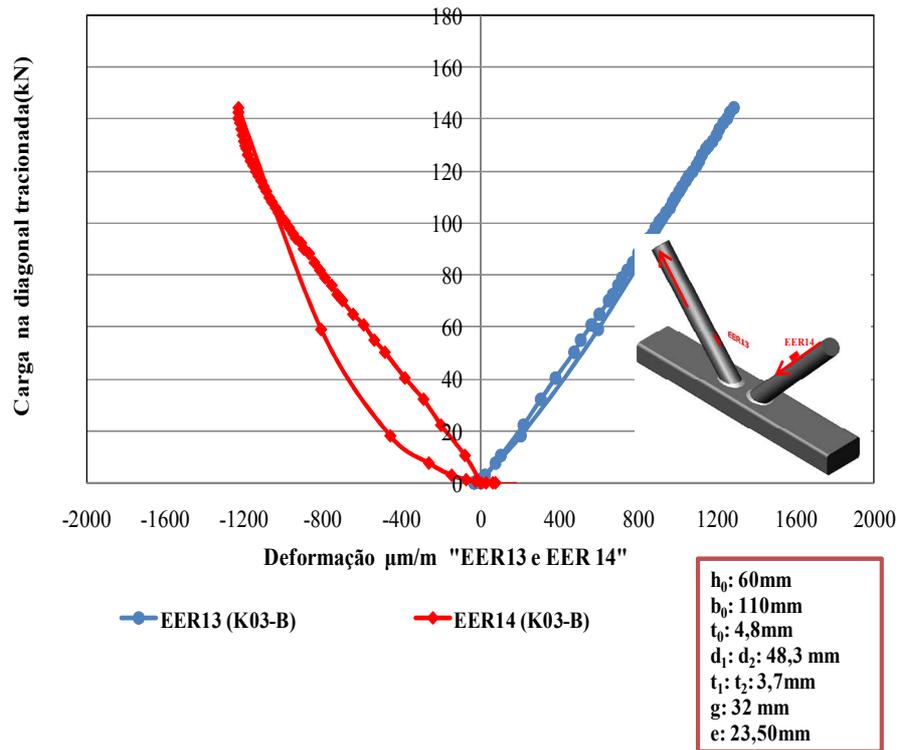


Figura C. 15 - Carga x Deformação para as ligações tipo “K03-B” - EER13 e EER14.

## **ANEXO D**

## ANEXO D – DADOS EXPERIMENTAIS DAS LIGAÇÕES TIPO “KT”

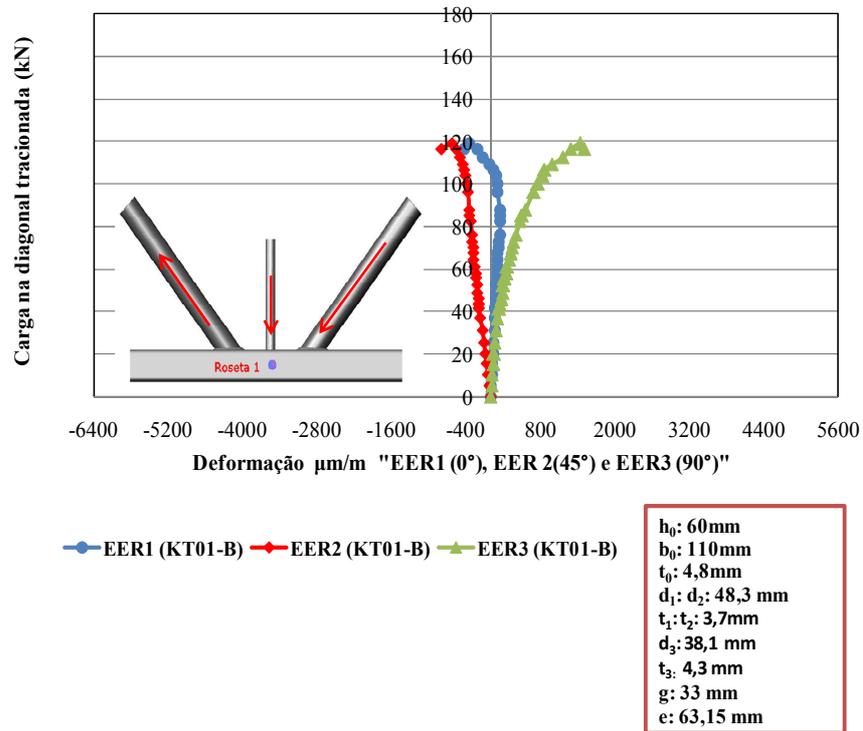


Figura D. 1 - Carga x Deformação para as ligações tipo “KT01-B” – Roseta 1 (EER1, EER2 e EER3).

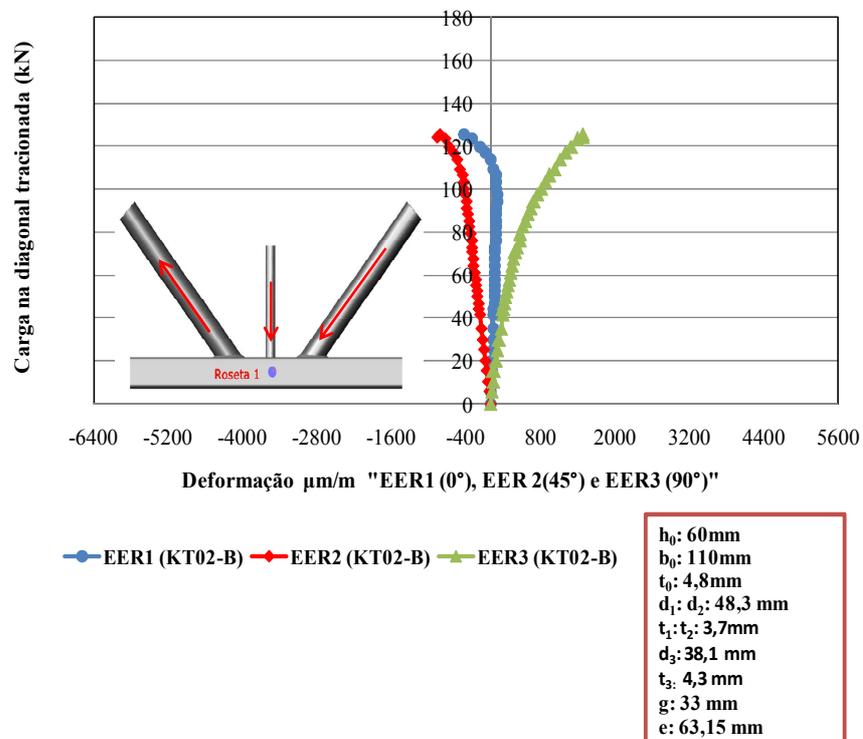


Figura D. 2 - Carga x Deformação para as ligações tipo “KT02-B” – Roseta 1 (EER1, EER2 e EER3).

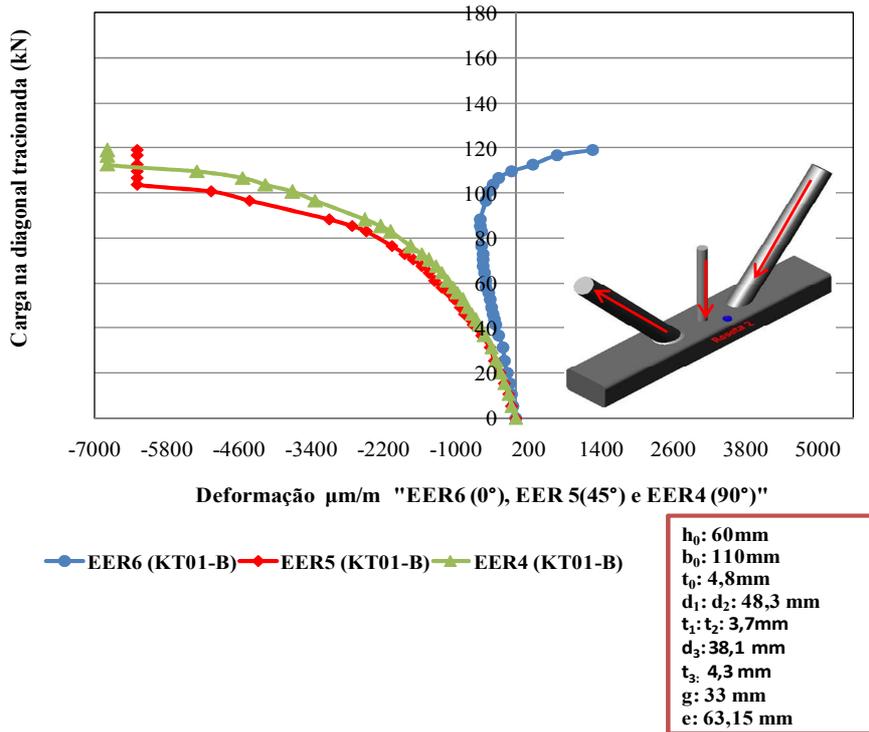


Figura D. 3 - Carga x Deformação para as ligações tipo “KT01-B” – Roseta 2 (EER4, EER5 e EER6).

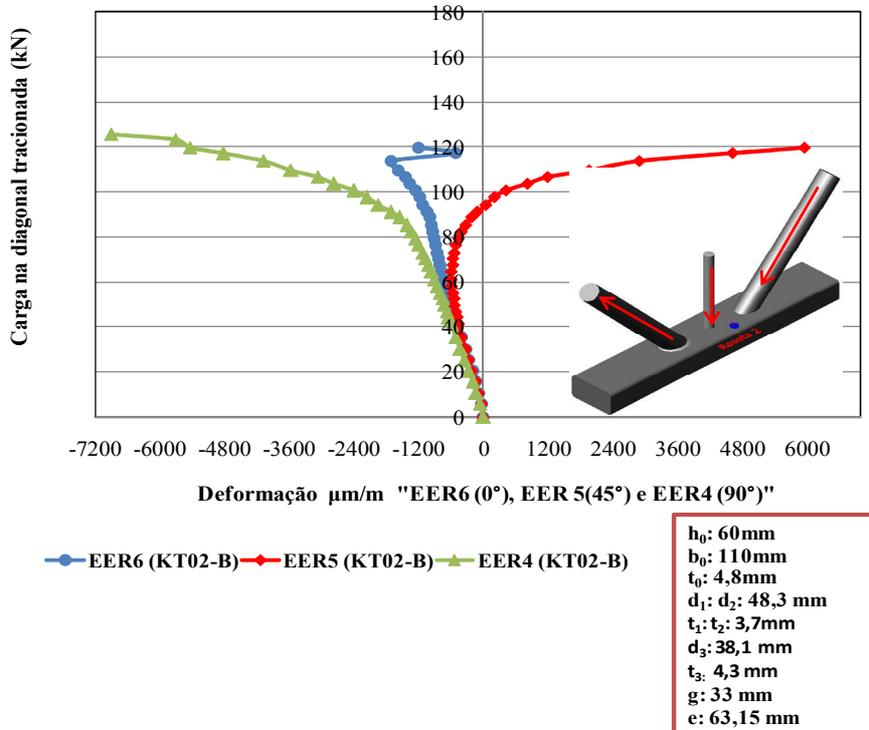


Figura D. 4 - Carga x Deformação para as ligações tipo “KT02-B” – Roseta 2 (EER4, EER5 e EER6).

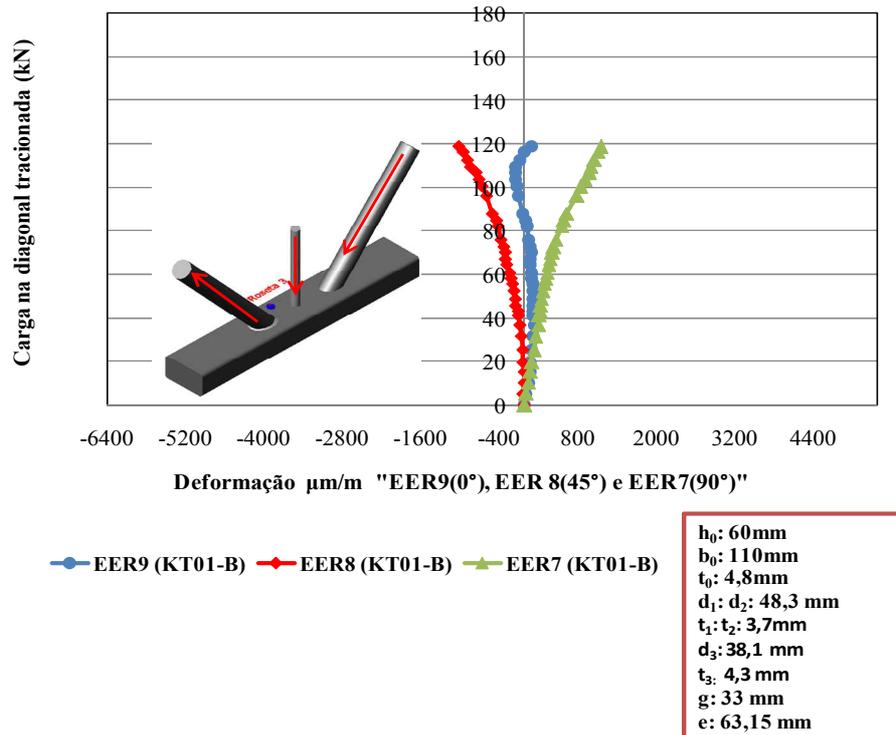


Figura D. 5 - Carga x Deformação para as ligações tipo “KT01-B” – Roseta 3 (EER7, EER8 e EER9).

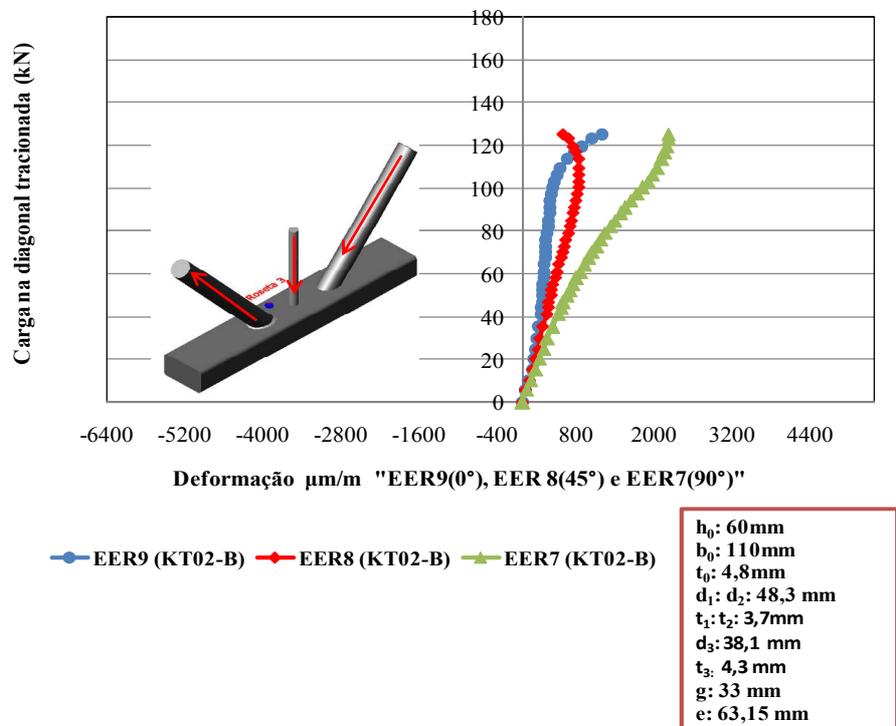


Figura D. 6 - Carga x Deformação para as ligações tipo “KT02-B” – Roseta 3 (EER7, EER8 e EER9).

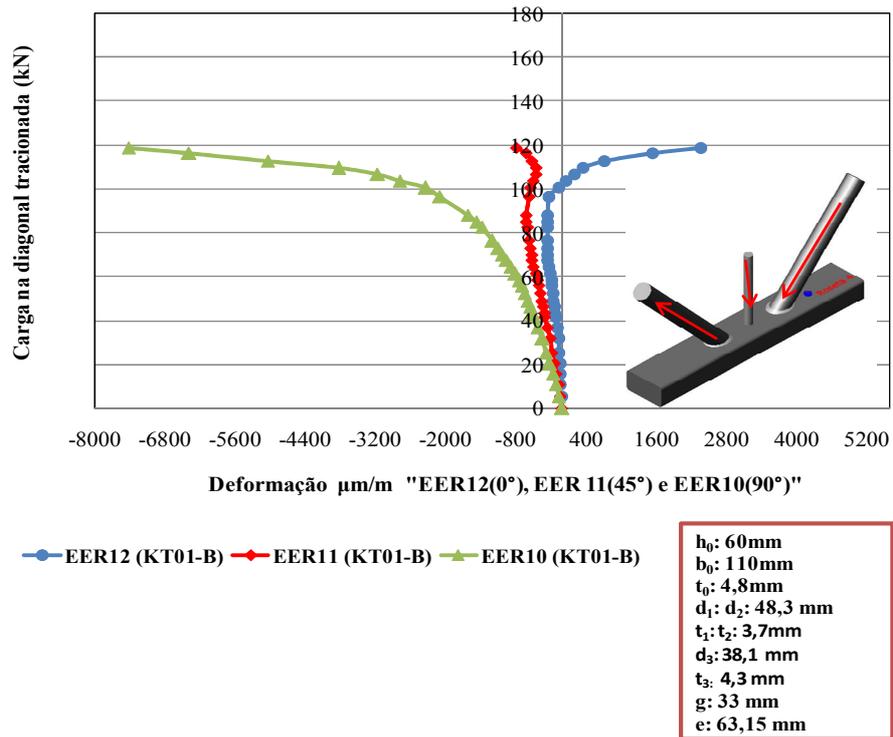


Figura D. 7 - Carga x Deformação para as ligações tipo “KT01-B” – Roseta 4 (EER10, EER11 e EER12).

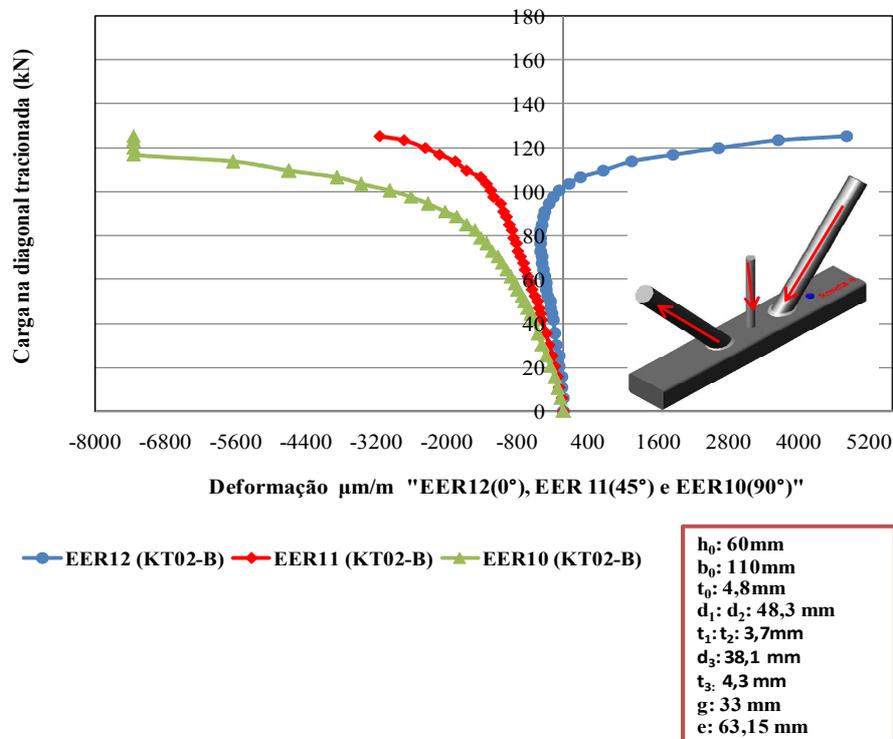


Figura D. 8 - Carga x Deformação para as ligações tipo “KT02-B” – Roseta 4 (EER10, EER11 e EER12).

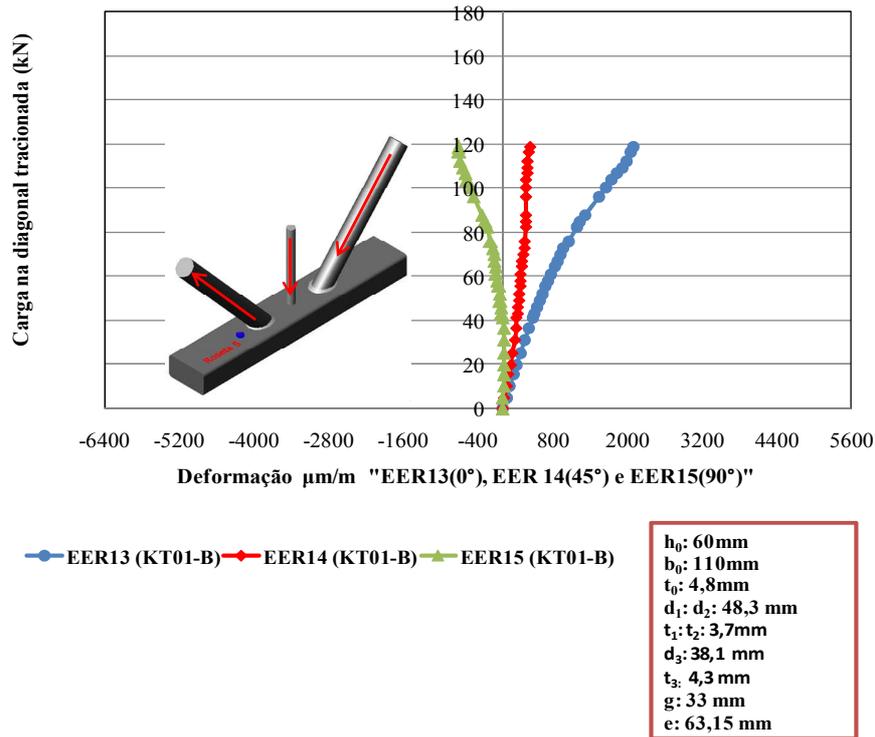


Figura D. 9 - Carga x Deformação para as ligações tipo “KT01-B” – Roseta 5 (EER13, EER14 e EER15).

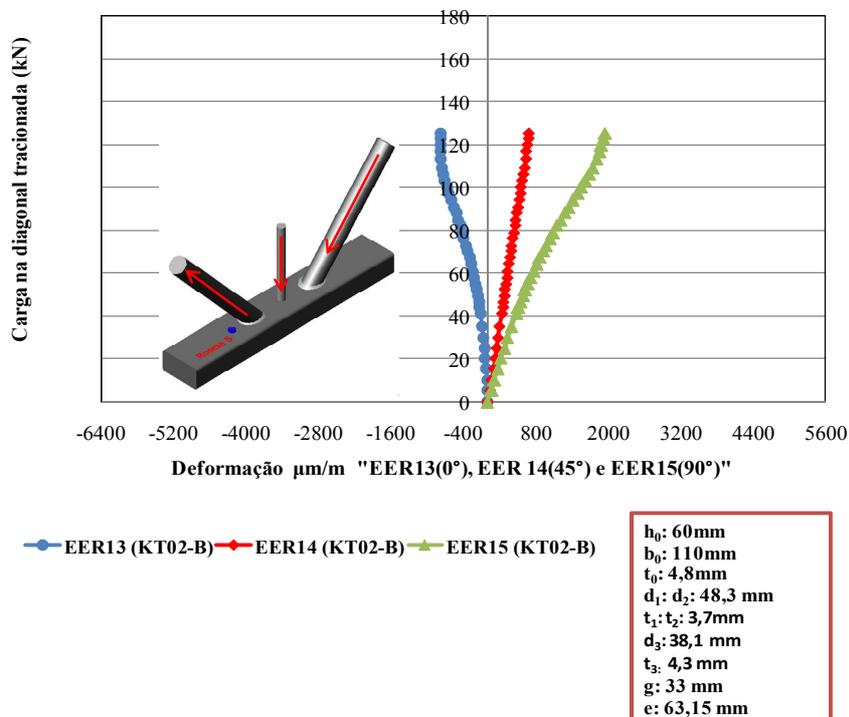


Figura D. 10 - Carga x Deformação para as ligações tipo “KT02-B” – Roseta 5 (EER13, EER14 e EER15).

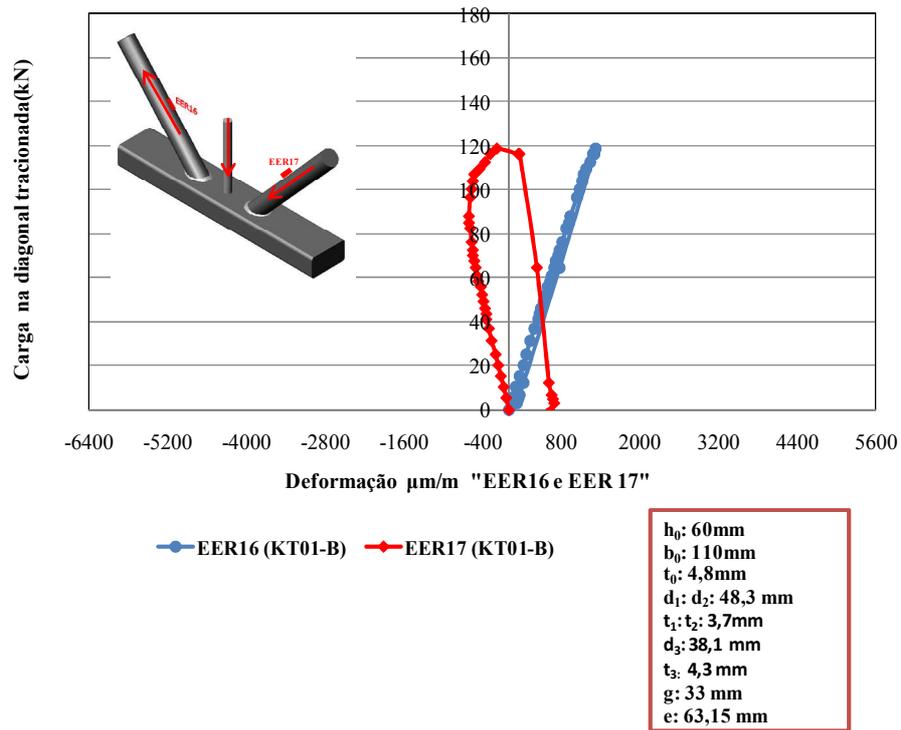


Figura D. 11 - Carga x Deformação para as ligações tipo “KT01-B” – EER16 e EER17.

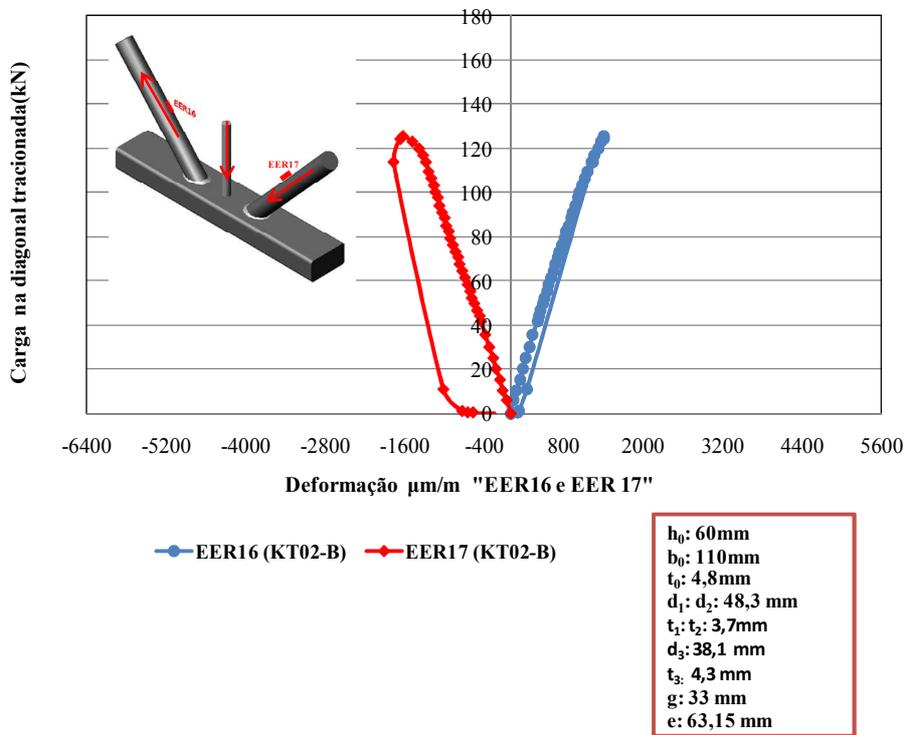


Figura D. 12 - Carga x Deformação para as ligações tipo “KT02-B” – EER16 e EER17.