

Estudo teórico experimental de ligações “T” e “KT”, em perfis tubulares de aço

Theoretical and experimental study on “T” and “KT” tubular steel joints

Francisco Canazart Mendes

M.Sc. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Construção Metálica DECIV/EM/UFOP
canazartmendes@yahoo.com.br

Marcilio Sousa da Rocha Freitas

Prof. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Construção Metálica DECIV/EM/UFOP
marcilio@em.ufop.br

Arlene Maria Sarmanho Freitas

Profª. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Construção Metálica DECIV/EM/UFOP
arlene@em.ufop.br

Resumo

Nesse trabalho, é apresentado um estudo de ligações soldadas dos tipos K e KT, com barras afastadas, formadas por perfis tubulares de aço estrutural, sem costura, de seção transversal retangular no banzo e circular para demais membros. Para esse estudo, foram desenvolvidas análise analítica e análise numérica das ligações. Também foram desenvolvidos ensaios experimentais em protótipos em escala real e ensaios de tensões residuais no perfil retangular do banzo. Os ensaios dos protótipos das ligações visaram à obtenção do comportamento, carga última e modo de colapso da ligação. A análise numérica em elementos finitos envolveu a geração, a análise e a calibração, a partir dos resultados obtidos nos ensaios experimentais. O modelo foi constituído de forma que representasse o comportamento e a capacidade de carga das ligações ensaiadas experimentalmente. Os resultados foram apresentados de modo a comparar os dados obtidos experimentalmente com os diversos modelos numéricos gerados, com e sem o cordão de solda e sem as imperfeições geométricas. As análises realizadas apresentam boa correlação com os resultados experimentais.

Palavras-chave: Estruturas metálicas, estruturas tubulares, ligações.

Abstract

This work presents a study of welded T and KT gap joints, formed by a seamless hollow section with rectangular hollow chord sections and circular hollow sections for the members. The developed study considers theoretical and numerical analyses for the joints, experimental tests in full scale prototypes, and tests for residual stress in the rectangular hollow section. The experimental results were used in order to obtain the overall joint behavior, ultimate load, and collapse mode. The numerical analysis using finite elements methods involved the generation, testing and calibration of the experimental results. The model represents the behavior and load capacity of the tested joints. The numerical models considered or not the welding and geometric imperfections and the results were compared with the experimental data. The accomplished analyses present good correlation with the experimental results.

Keywords: Steel structures, tubular structures, connections.

1. Introdução

Entre os diversos tipos de perfis de aço empregados na construção civil, têm-se os perfis tubulares de seção transversal circular, quadrada e retangular. A eficiência estrutural desses perfis está relacionada à geometria de sua seção transversal, com capacidade de resistir às altas solicitações de esforços axiais, torção e efeitos combinados de maneira eficiente. No Brasil, diversas pesquisas, utilizando perfis tubulares, têm sido desenvolvidas recentemente (Freitas & Requena, 2009).

Entre as estruturas construídas com perfis tubulares, pode-se destacar as treliças, isto em função de elas apresentarem excelente desempenho estrutural. As

treliças projetadas, a partir de perfis tubulares, apresentam uma capacidade de vencer maiores vãos com menor número de nós, o que torna o custo de fabricação reduzido (Wardenier, 2001). O tipo de ligação, entre as diagonais e o banzo, tem grande importância, no desempenho estrutural da treliça de perfis tubulares. As ligações podem ser de vários tipos. Entre elas, pode-se destacar a do tipo "T" e a do tipo "KT". A Figura 1 apresenta uma treliça e em destaque algumas tipologias existentes das ligações que são identificadas pelas letras T, K e KT.

Uma aplicação mais recente das estruturas tubulares, no Brasil, é a treliça

de piso. Nesse sistema misto, é possível utilizar várias composições diferentes de perfis tubulares, para se compor a treliça. As ligações apresentadas, nesse trabalho, fazem parte de um sistema treliçado composto de perfis tubulares circulares nas diagonais e montantes. O bom desempenho desses elementos é aproveitado, quando tais elementos são submetidos a carregamentos axiais e a perfis tubulares retangulares no banzo. Os referidos perfis propiciam maior facilidade de execução da união das diagonais e montantes com os banzos e, ainda, facilitam a colocação de conectores de cisalhamento, na face superior da treliça.

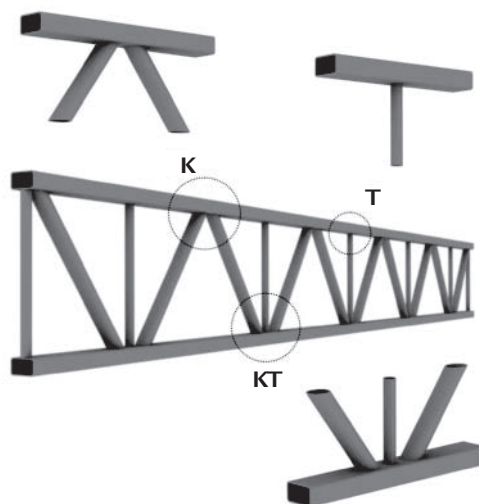


Figura 1
Ligações T, K e KT, em treliças tubulares (Mendes, 2008).

2. Avaliação teórica

Para ligações confeccionadas com perfis tubulares de aço, diferentes modos de falha podem ocorrer, sendo estes dependentes da geometria da ligação, das dimensões das peças componentes do nó e das condições de carregamento. O colapso pode ocorrer em diferentes partes componentes da ligação, como na solda, nos membros (diagonais e montantes) e

no banzo. Esses modos de falha, representados pela Figura 2, são:

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

nal ou ruptura da solda.

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

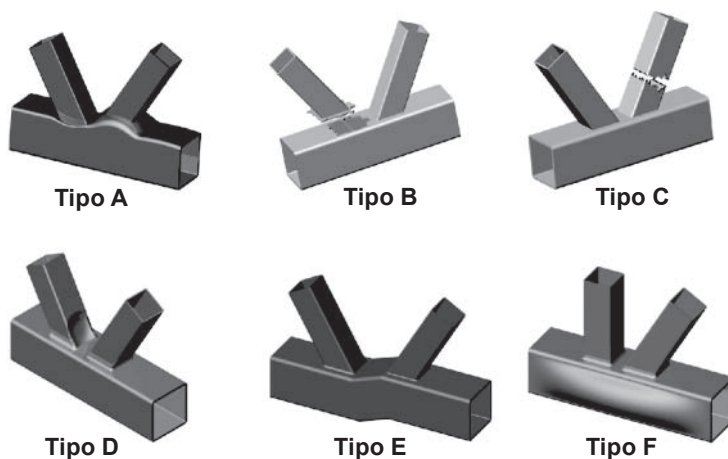


Figura 2
Modos de falha (Requena & Santos, 2007).

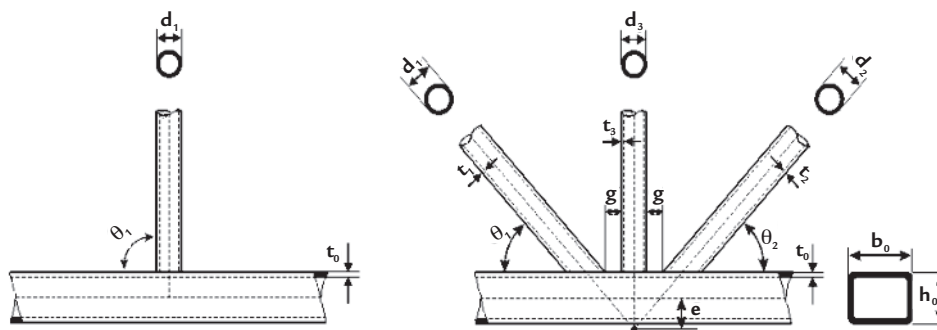
Para ligações “T”, formadas por perfis retangulares no banzo e circulares no montante, o Eurocode 3 recomenda que sejam considerados apenas os mo-

dos de falha A, B, C e F. Na Figura 3, tem-se a nomenclatura utilizada para os parâmetros geométricos de uma ligação T e de uma ligação KT, parâmetros estes

considerados nas formulações dos modos descritos anteriormente.

Para as ligações T e KT, o modo de falha predominante, para o dimensiona-

Figura 3
Parâmetros geométricos dos nós tipo T e KT.



mento é a plastificação da face do banzo. O valor da resistência última, para esse

modo, foi obtido pela Equação 1, para a ligação T e, para a ligação KT, esse valor

foi obtido pela Equação 2 (EUROCODE 3, 2005).

$$N_{1,Rd} = \frac{\pi k_n f_{y0} t_0^2}{4(1-\beta) \sin \theta_1} \left(\frac{2\beta}{\sin \theta_1} + 4\sqrt{1-\beta} \right) \quad (1)$$

$$N_{1,Rd} = \frac{8,9\pi k_n f_{y0} t_0^2 \sqrt{\gamma}}{4 \sin \theta_1} \left(\frac{d_1 + d_2 + d_3}{3b_0} \right) \quad (2)$$

sendo:

$$k_n = 1,3 - \frac{0,4n}{\beta} \quad \text{se } n > 0 \text{ e}$$

$k_n = 1,0$ se $n \leq 0$, com os valores positivos e negativos de n relacionados, respectiva-

mente, à compressão e à tração.

f_{y0} - tensão de escoamento do aço do banzo.

t_0 - espessura da parede do banzo.

b_0 - largura do banzo.

d_i - diâmetro dos membros.

β - razão entre o diâmetro do montante e/ou diagonais e a largura do banzo.

θ_1 - ângulo formado entre o montante e/ou diagonais e o banzo.

$\gamma = b_0/2t_0$.

3. Metodologia

Devido ao processo de conformação a frio do perfil retangular do banzo, foi realizado o levantamento da distribuição das tensões residuais por meio do Método do Seccio-

namento em tiras desenvolvido pelo Structural Stability Research Council – SSRC (1981). Tal distribuição foi considerada, nas análises numéricas da ligação T. Contudo o nível de ten-

sões residuais medido não influencia, significativamente, o comportamento da ligação e pode, no nível medido, ser desprezado (Freitas et al., 2008).

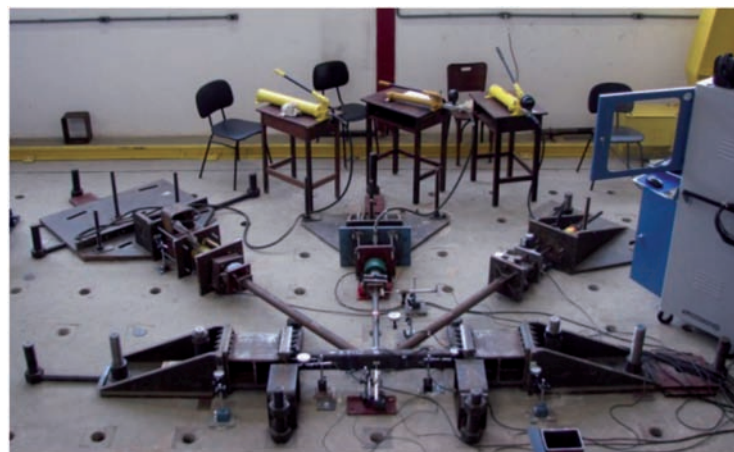
Ensaio experimental

Foram realizados quatro ensaios, denominados de T02, T03, KT02 e KT03, em protótipos em escala real de ligações T e KT. Na Figura 4 tem-se o es-

quema montado para o ensaio da ligação KT. Na Tabela 1, têm-se as dimensões da seção transversal e as propriedades mecânicas dos perfis.

Para os ensaios, realizados na horizontal, foram desenvolvidas peças para a fixação do banzo e para a aplicação do carregamento nas diagonais e montante.

Figura 4
Esquema geral da montagem para a ligação “KT” (Mendes, 2008).



Tais peças foram devidamente dimensionadas para se adequarem à magnitude dos carregamentos aplicados. Além disso, foram colocados anteparos na região da ligação do banzo com a peça que faz sua fixação na laje de reação e nas peças de fixação dos atuadores hidráulicos responsáveis pela aplicação do carregamento. Tais anteparos foram colocados com o objetivo de eliminar uma possível movimentação do conjunto.

Os ensaios tiveram, como um dos objetivos, a avaliação do comportamento das ligações, considerando-se as defor-

mações e os deslocamentos ocorridos para cada etapa do carregamento. Para a aquisição dos deslocamentos, foram utilizados LVDT's (Linear Variable Displacement Transducers) com os deslocamentos medidos por sistema de aquisição de dados automático. No caso das deformações, a instrumentação foi realizada por extensômetros, que foram colados em regiões com maiores níveis de tensões do protótipo, o que foi obtido, previamente, através de simulações numéricas.

A aplicação dos carregamentos de compressão no montante, para as

ligações T e KT, e de compressão em uma das diagonais e de tração na outra, para a ligação KT, foi realizada por meio de atuadores hidráulicos. O monitoramento das cargas aplicadas foi feito por células de carga. Em cada ensaio, a aplicação da carga foi dividida em vários passos de carga, os quais foram devidamente medidos pelo sistema de aquisição de dados. Os ensaios foram finalizados, quando foi verificada a formação de um mecanismo de colapso, no caso a plastificação da face do banzo.

	Largura (mm)	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	f_y (MPa)	f_u (MPa)	Alongamento (%)
Banzo	110	60	-	4,8	456	555	32
Montante	-	-	38,1	3,2	250	325	35
Diagonais	-	-	60,3	5,5	442	570	33

Modelo numérico

Para a geração dos modelos computacionais analisados, utilizou-se o software ANSYS (2007), que trabalha com o Método dos Elementos Finitos para fazer a modelagem das ligações propostas. E, por meio dos ensaios dos protótipos, calibrado-se o modelo, para que, de forma satisfatória, ele pudesse representar o comportamento estrutural das ligações em estudo.

Para a modelagem, foram utilizadas as mesmas diretrizes empregadas por Mendanha et al. (2007), que analisaram ligações do tipo "K" e "KT", com tipologias e técnicas de ensaio similares com as das ligações do presente trabalho. Entre as principais diretrizes do modelo numérico, pode-se citar:

- Utilização do elemento de casca SHELL181 para a geração da malha de elementos finitos, o qual apresenta

quatro nós com seis graus de liberdade por nó, translação nas direções x, y, z e rotações em x, y, z.

- Consideração da curvatura no vértice dos perfis retangulares componentes do banzo, sendo adotado o raio de curvatura igual a duas vezes a espessura da parede do perfil.
- Modelagem do cordão de solda, de forma a aproximar o máximo possível o modelo numérico do modelo real (Lee & Wilmschurst, 1995). Na modelagem da solda, utilizou-se a perna do cordão da solda perpendicular à face dos elementos constituintes da ligação e igual a 1,5t, para os modelos da ligação T e 1,0t, para os modelos da ligação KT; sendo t a espessura do montante ou da diagonal ou do banzo.

Na análise dos modelos, foi uti-

Tabela 1

Dimensões nominais e propriedades mecânicas dos perfis componentes da ligação.

lizado material com relação tensão x deformação não linear, inelástico, com diagrama bilinear. Esse diagrama foi elaborado a partir dos dados de análise do aço em laboratório.

Assim, foram obtidos cinco modelos numéricos para a ligação T: MN1(T02) e MN1(T03) modelados sem o cordão de solda; MN2(T02) e MN2(T03), modelados com o cordão de solda; MN3, modelado com o cordão de solda, mas sem considerar as imperfeições geométricas dos protótipos. Analogamente, para a ligação KT, os cinco modelos são denominados: MN1(KT02) e MN1(KT03) modelados sem o cordão de solda; MN2(KT02) e MN2(KT03), modelados com o cordão de solda; MN4, modelado com o cordão de solda, mas sem considerar as imperfeições geométricas dos protótipos.

4. Comparação dos resultados

Para a ligação T, analisada nesse trabalho, tem-se, na Figura 5, a configuração deformada do modelo numérico, obtida no programa ANSYS. Tem-se, ainda, a distribuição da tensão de von Mises. Observa-se que o banzo, na região da ligação com o montante, encontra-se completamente plastificado, para o nível de carga aplicada (45kN). Dessa forma, quando se observam as deformações e o nível de tensão na zona da ligação, verifica-se que o modo de colapso preponderante é a plas-

tificação da face superior do banzo, assim como no ensaio experimental.

De acordo com o Eurocode 3, para as dimensões e propriedades dos perfis apresentados na Tabela 1, a resistência última ($N_{1,Rd}$), calculada por meio da Equação 1, é de 49,57kN.

A Figura 6 apresenta o gráfico carga x tensão comparativo entre os resultados experimentais dos protótipos T02 e T03 e numéricos para os modelos MN1, MN2 e MN3, no ponto de

fixação da roseta 2, para a ligação T. A roseta está localizada na linha média da largura do banzo (55 mm) e a 20mm da parede externa do montante longitudinalmente ao banzo.

Observa-se que o modelo MN2 apresenta uma boa correlação com os dados experimentais. Já o MN1, que não apresenta a modelagem do cordão de solda, apresenta uma mudança brusca de resistência, caracterizando uma plastificação prematura da parede do banzo.

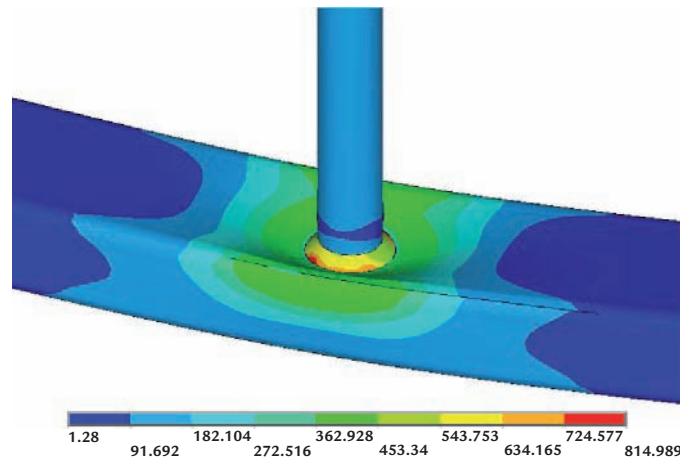


Figura 5
Configuração deformada e
distribuição da tensão de von Mises
para o modelo MN2(T02) (MPa).

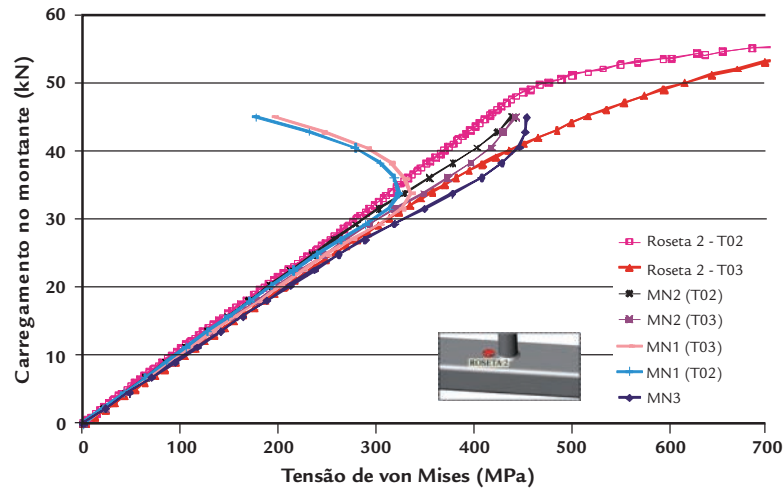


Figura 6
Comparação dos resultados
experimentais com os modelos
numéricos MN1, MN2 e MN3,
na roseta 2, para a ligação T.

Portanto a modelagem do cordão de solda mostrou-se bastante importante na representação da distribuição das tensões na parede do banzo, com maior convergência em relação ao real.

Observa-se, também, que os modelos com o cordão de solda apresentam uma boa correlação com os resultados experimentais. Contudo o modelo MN2, referente aos protótipos T02 e T03, apresenta uma melhor correlação com os dados experimentais que o modelo MN3, que não considera as imperfeições geométricas dos protótipos.

Para a ligação KT, nos modelos numéricos, foi aplicada uma carga de 60kN, tanto na diagonal comprimida, quanto na tracionada, e no, montante, uma carga com um valor de 75% do va-

lor aplicado às diagonais (45kN).

A Figura 7 apresenta o gráfico carga x tensão comparativo entre os resultados experimentais dos protótipos KT02 e KT03 e numéricos para os modelos MN1 e MN2, no ponto de fixação da roseta 3, para a ligação KT. A roseta está localizada entre o montante e a diagonal tracionada deslocada de 27,5mm da linha média da largura do banzo e a 15mm da parede externa do montante transversalmente ao banzo.

Observa-se que o modelo MN2 apresenta uma boa correlação com os dados experimentais. Já o MN1, que não apresenta a modelagem do cordão de solda, apresenta uma distribuição de tensões bem diferente da apresentada nos ensaios experimentais e a dos modelos

com o cordão de solda. Portanto, também no caso da ligação KT, a modelagem do cordão de solda mostrou-se bastante importante para representar a real distribuição das tensões na parede do banzo obtidas nos resultados experimentais. Na mesma figura, tem-se a comparação entre os resultados experimentais e numéricos, para os modelos MN2 e MN4. Observa-se que todos os modelos que apresentam a modelagem da solda têm uma boa correlação com os resultados experimentais, tanto os que consideram as imperfeições geométricas, (MN2), quanto o que não as considera (MN4). Tal fato pode ser justificado pelas imperfeições, relativamente pequenas, em relação ao posicionamento dos membros no que diz respeito ao banzo.

5. Considerações finais

O estudo das ligações apresentadas é parte integrante do desenvolvimento de um sistema treliçado misto de piso, composto por treliças de perfis tubulares circulares nas diagonais/montantes e retangulares no banzo. A esse sistema fixados conectores em sua parte superior, para que se faça a ligação entre a treliça e

a laje de concreto.

Esse trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um modelo numérico representativo de uma ligação T e de uma ligação KT, em perfis tubulares, com consideração do cordão de solda na ligação montante/banzo e consideração da curvatura no vértice dos perfis retan-

gulares. Por meio dos resultados obtidos, pode-se fazer algumas observações:

- A metodologia experimental utilizada conduziu a bons resultados e possibilitou a avaliação dos efeitos localizados do carregamento no comportamento da ligação.
- A partir da comparação entre o

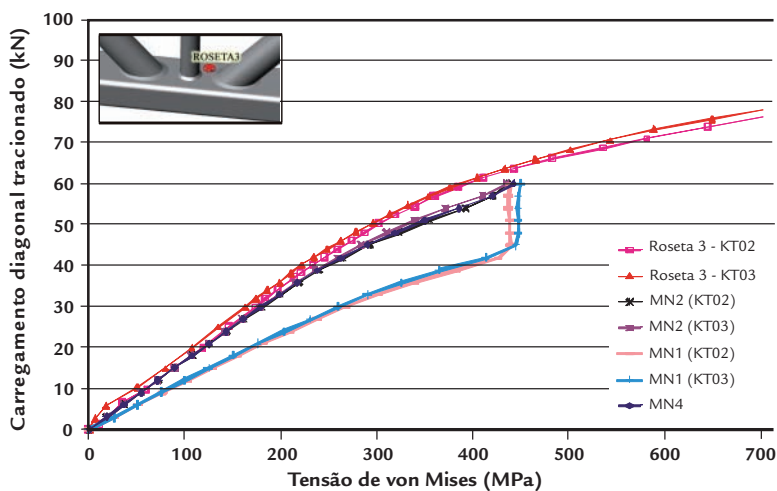


Figura 7
Comparação dos resultados experimentais com o modelo numérico MN1, MN2 e MN4, na roseta 3, para a ligação "KT".

modelo numérico e os resultados experimentais, observa-se que os modelos que consideram o cordão de solda são mais adequados para representar, numericamente, a situação real, tanto nas ligações T, quanto nas ligações KT.

- Para a ligação T, quando se compara o modelo numérico MN3 com os modelos MN2, pode-se observar que

a modelagem que considera as imperfeições geométricas mostrou-se, ainda, eficaz na representação do comportamento da ligação T estudada. O mesmo fato não pode ser observado em relação a ligação KT, devido aos protótipos desse tipo de ligação, os quais apresentam imperfeições pequenas no posicionamento dos membros em relação ao banzo.

- O modelo numérico que considera as diretrizes citadas mostrou-se adequado ao simular a situação real, apresentando uma boa correlação com o ensaio experimental. Pode ser, portanto, uma ferramenta importante no estudo das ligações T e KT formadas por perfis tubulares retangulares nos banzos e circulares nos montantes e diagonais.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem a V&M do BRASIL, ao CNPq, a CAPES, a

FAPEMIG e a Fundação Gorceix.

7. Referências bibliográficas

- ANSYS, Inc. Theory Reference (version 11.0), 2007.
- EUROCODE 3 - European Committee for Standardisation. Design of steel structures – part 1.8: Design of joints, 2005.
- FREITAS, A. M. S., MENDES, F. C., PEREIRA, S. E. P. Análise numérica de ligações T em perfis tubulares de aço com consideração das tensões residuais. In: JORNADAS SULAMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 23. *Anais...* Santiago. Chile, 2008.
- FREITAS, A. M. S., REQUENA, J. A. V. Ligações em estruturas metálicas tubulares. In: _____. *Novos estudos e pesquisas em construção metálica*. Passo Fundo: UPF Editora, 2009. 221p. cap. 1, p. 7-29.
- LEE, M. M. K., WILMSHURST, S. R. Numerical modeling of CHS Joints with multiplanar double-K configuration. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 32. p. 281-30, 1995.
- MENDANHA, F. O., FREITAS, A. M. S., FREITAS, M. S. R., MUNIZ, C. F. D. G. Análise de ligações de perfis tubulares em aço do tipo K e KT com afastamento entre as diagonais e o montante. *REM - Revista Escola de Minas*, v. 60, n. 2, p419-425, 2007.
- MENDES, F. C. *Análise teórico-experimental de ligações tipo "T", "K" e "KT" com perfis metálicos tubulares*. Ouro Preto: PROPEC/EM - Universidade Federal de Ouro Preto, 2008. (Dissertação de Mestrado).
- REQUENA, J. A. V., SANTOS, A. L. E. F. *Dimensionamento de ligações em barras tubulares de estruturas metálicas planas*. Belo Horizonte: Coleção Técnico-Científica V&M do Brasil, 2007. 30p. (vol. 1)
- SSRC. *Determination of residual stresses in structural shapes*. In: STRUCTURAL STABILITY RESEARCH COUNCIL, v. 5, n. 3, p. 4-7, 1981. 98p.
- WARDENIER, J. *Hollow sections in structural applications*. Paris: CIDECT, 2001.

Artigo recebido em 11 de agosto de 2009. Aprovado em 19 de março de 2012.