

## Análise de ligações em perfis tubulares de aço do Tipo K e KT com afastamento entre as diagonais e o montante

(Analysis of tubular gap K - and KT - joints)

Fabiano Oliveira Mendanha

*Laboratório de Mecânica Computacional. DECIV/EM/UFOP. E-mail: fabianomendanha@yahoo.com.br*

Arlene Maria Sarmanho Freitas

*Laboratório de Estruturas Prof. Altamiro Tibiriçá Dias. DECIV/EM/UFOP. E-mail: arlene@em.ufop.br*

Marcílio Sousa da Rocha Freitas

*Laboratório de Mecânica Computacional. DECIV/EM/UFOP. E-mail: marcilio@em.ufop.br*

Cereno de Freitas Diniz Gonçalves Muniz

*Laboratório de Estruturas Prof. Altamiro Tibiriçá Dias. DECIV/EM/UFOP. E-mail: cerenomuniz@hotmail.com*

### 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 as diagonais e montante. O estudo envolve geração, análise e calibração de modelos numéricos em elementos finitos, a partir de resultados obtidos em ensaios experimentais, realizados anteriormente, com protótipos em escala real. Foram analisados diversos modelos com elementos de casca, avaliando a influência do raio de dobramento dos perfis retangulares, bem como algumas alternativas de modelagem da solda das ligações. As análises realizadas apresentam boa correlação com os resultados experimentais.

**Palavras-chave:** Perfis tubulares, treliças planas, elementos finitos, ligações tubulares.

### Abstract

*This work presents a study of welded gap K- and KT-joints formed by seamless steel hollow structural sections with rectangular hollow section for the chords and circular hollow section for the members. The study involves the generation, analysis and calibration of numerical models based on the finite element method, by comparison with experimental results previously obtained with full-scale prototypes. Several models were analyzed with shell elements, evaluating the radius of corner influence on the rectangular hollow section, as well as some modeling alternatives of the welds in the connections. The results of the computational analysis are in good agreement with the experimental results.*

**Keywords:** Structural hollow section, plane trusses, finite elements, tubular joints.

## 1. Introdução

Os perfis tubulares são largamente utilizados em estruturas offshore e condutores de fluidos. Na construção civil, os perfis metálicos tubulares são utilizados, por exemplo, em sistemas de cobertura e pisos, sendo o sistema estrutural treliçado o mais usual.

Treliças produzidas a partir de tubos de seção circular apresentam uma melhor distribuição de tensões nas seções, quando comparadas com perfis tubulares de seção tubular retangular. Em contrapartida, a ligação soldada, entre perfis tubulares circulares, exige cortes adequados nas extremidades das barras, de modo a ajustar as superfícies de contato antes da soldagem. Nos perfis tubulares retangulares, a execução das ligações é mais simples, já que é feita em superfície plana, fazendo com que o produto final apresente menos imperfeições geométricas oriundas da fabricação.

No Brasil, o uso de perfis tubulares, na construção civil, teve importante crescimento, recentemente, através de sistemas treliçados espaciais. Trabalhos de pesquisa recentes têm estudado a aplicação desses perfis em outros tipos de sistemas estruturais, como as estruturas mistas, treliças de piso, etc.

Análises experimentais e/ou numéricas podem ser realizadas para avaliar o comportamento de sistemas e elementos estruturais, sendo o método dos elementos finitos o mais difundido entre os métodos numéricos.

No presente trabalho, resultados de análise numérica e resultados experimentais são comparados, tendo como objetivo determinar a melhor modelagem para ligações soldadas do tipo K e KT, com perfis tubulares circulares para diagonais/montantes e retangular para os banzos.

## 2. Programa experimental

O programa experimental foi realizado no Laboratório de Estruturas “Prof. Altamiro Tibiriçá Dias” do PROPEC/EM/

UFOP, no âmbito do convênio UFOP/V&M do Brasil (Freitas et al., 2006), e utilizado para a calibração do modelo de elementos finitos. Foram realizados ensaios em nove protótipos diferentes, de ligações tipo K e KT. Nesse trabalho, foram analisadas quatro tipologias diferentes de protótipos.

Durante os ensaios, foram obtidas as deformações entre as diagonais ou destas com o montante. O esquema geral do ensaio é apresentado na Figura 1. As extremidades do banzo foram conectadas através de parafusos, ligando-os a peças de apoio, que foram fixadas na laje de reação.

### 2.1 Protótipos ensaiados

Os protótipos ensaiados foram fabricados em escala real, preservando, assim, parâmetros como imperfeições de fabricação. Peças de apoio e aplicação de carga foram projetadas de modo a viabilizar o esquema estrutural previsto. Esse esquema é composto de banzos engastados, montante comprimido (para ligações KT) e uma diagonal tracionada e outra comprimida.

Na Figura 2, têm-se os parâmetros geométricos das ligações e na, Tabela 1, os valores das dimensões dos protótipos ensaiados, sendo o protótipo N2 do tipo K e os protótipos N5, N7 e N8 do tipo KT. Na mesma figura, observamos, igualmente, os valores-limite das tensões de escoamento,  $f_y$ , e de ruptura na tração,  $f_u$ .

De acordo com o cálculo de limite teórico de flambagem, feito com base na formulação apresentada pelo EUROCODE 3 (2003), o carregamento último das ligações estudadas se caracteriza pela flambagem por plastificação da superfície do banzo, conectada às diagonais. Packer (1997) relata que nós tipo K e N com afastamento entre diagonais e montante, de seção transversal quadrada, necessitam de ser examinados apenas por esse modo de falha.

Segundo o EUROCODE 3 (2003), as ligações analisadas, nesse trabalho, apresentam carregamento nominal de dimensionamento de 327,20 kN, 136,60 kN, 125,40 kN e 420,00 kN, aplicados na diagonal para as ligações N2, N5, N7 e N8, respectivamente.



Figura 1 - Montagem experimental.

## 2.2 Instrumentação

Foram medidos deslocamentos a partir de deflectômetros de haste, em vários pontos dos protótipos, para monitoramento dos mesmos. Para medição de deformações específicas do material, foram usados extensômetros elétricos de resistência. Os extensômetros, tipo roseta, foram colados entre as diagonais e montante, para as ligações KT, entre diagonais para a ligação K, e na lateral do banzo, para todos os protótipos. A Figura 3 ilustra uma região instrumentada.

Para medição do carregamento aplicado a partir dos atuadores hidráulicos, foram utilizadas células de carga de diversas capacidades, de acordo com o carregamento aplicado em cada diagonal/montante. Para o controle do carregamento e obtenção das deformações específicas, foi usado um sistema automático de aquisição de dados.

## 3. Modelo numérico

Muitos programas comerciais, tais como PATRAN, FENGEN, ANSYS e ABAQUS/PRE, têm a capacidade de geração de malhas complexas de interseções de perfis tubulares. Dexter (1996), em um estudo sobre ligações do tipo K, comparou vários programas e concluiu ser o ANSYS o mais flexível e de mais fácil utilização. Para a geração dos modelos computacionais analisados, nesse trabalho, utilizou-se o programa ANSYS, versão 9.0 (Ansys, 2004).

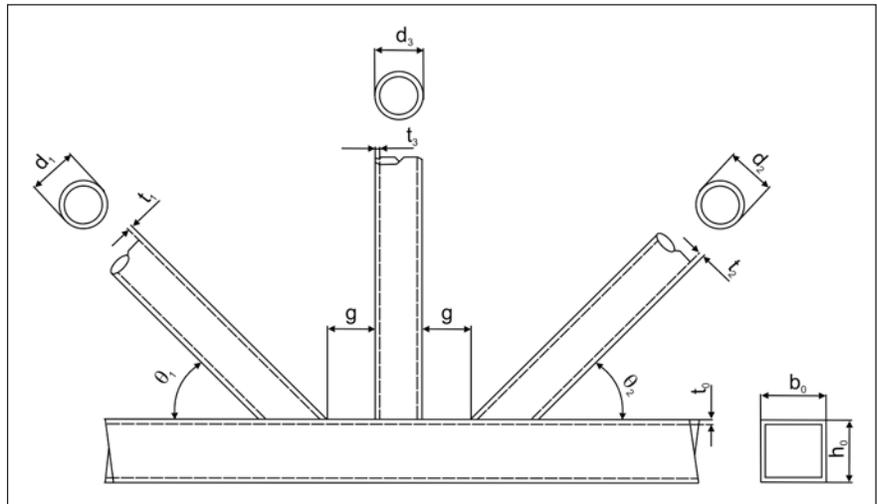


Figura 2 - Parâmetros geométricos.



Figura 3 - Região instrumentada.

Tabela 1 - Parâmetros geométricos e físicos.

	Diagonais			Montante		Banzo			Gap	$f_y$ (MPa)		$f_u$ (MPa)	
	$d_1$ e $d_2$ (mm)	$t_1$ e $t_2$ (mm)	$\theta_1$ e $\theta_2$ (°)	$d_3$ (mm)	$t_3$ (mm)	$h_0$ (mm)	$b_0$ (mm)	$t_0$ (mm)	$g$ (mm)	C	R	C	R
<b>N2</b>	101,6	6,4	37,5	----	----	120	150	6,4	56	340	395	480	500
<b>N5</b>	60,3	6,4	39,1	60,3	3,9	100	120	4,8	30	388	441	532	545
<b>N7</b>	60,3	6,4	37,8	60,3	3,9	120	150	4,8	47	350	390	467	501
<b>N8</b>	88,9	6,4	40,1	88,9	4,8	150	200	9,5	55,6	320	420	471	510

C – perfil tubular circular; R – Perfil tubular retangular

### 3.1 Geração do modelo computacional

Para a geração da malha através do método dos elementos finitos, foi realizada análise com elementos de casca de 4 e 8 nós por elemento. Foi observado que, para as ligações em questão, os resultados apresentaram-se muito próximos, não justificando o uso do elemento de 8 nós, que, apesar de adaptar-se melhor às superfícies curvas, apresenta um elevado custo computacional. Dessa forma, foi escolhido o elemento de casca "Shell 181", de quatro nós, com seis graus de liberdade por nó: translação nas direções x, y, e z e rotações em x, y, e z. Diversos pesquisadores têm utilizado esse elemento para a modelagem numérica com perfis tubulares (Morgan & Lee, 1998, Michillo, 2003, Lima et al., 2005, Mendanha et al., 2006, Mendanha, 2006).

### 3.2 Modelos numéricos

Foram feitas análises em diferentes modelos numéricos das ligações estudadas. Serão apresentados resultados de algumas dessas análises, com justificativas para sua adoção ou não na calibração do modelo.

1) Modelo RI - Esse modelo consiste na modelagem mais simples das analisadas, em que o banzo, composto com o perfil tubular retangular, foi modelado sem consideração da curvatura nas bordas oriundas da conformação mecânica do perfil.

2) Modelo PI - Esse modelo se difere do modelo "RI" por considerar a curvatura da borda do perfil retangular. AASTMA500(1998) limita o raio externo de dobramento em três vezes a espessura do perfil. Nesse modelo, foi usado o raio externo de duas vezes a espessura do perfil que é compatível com as medições realizadas nos protótipos ensaiados.

Mais três modelos foram desenvolvidos, a partir do modelo PI, na tentativa de simulação da solda. São eles:

3) Modelo PIGap - Esse modelo refere-se ao modelo "PI" com aproximação das diagonais em uma vez a espessura do perfil. Esse artifício foi utilizado para simular o cordão de solda existente, baseado no estudo de Lalani (1993) para ligações tipo K com todos os perfis tubulares circulares.

4) Modelo PIS1 - Nesse modelo, foi feita a modelagem do cordão de solda a partir de elementos de casca, com geometria baseada em proposição feita por Lee e Wilmschurst (1995), para ligações multiplanares com afastamento, formada por perfis tubulares retangulares (Figura 4(a)). Para a modelagem da solda em questão, foi feita a geometria triangular proposta com comprimentos da perna de  $1,5t_i \cos\theta$  e altura igual a  $1,5t_o$ , sendo que  $t_i$  é a espessura da diagonal/montante,  $t_o$ , a espessura do banzo e  $\theta$ , o ângulo de inclinação da diagonal/montante, que foi extrudada no en-

torno elíptico e formada pela ligação da diagonal/montante com o banzo (Figura 4(b)). Na casca formada, foram aplicadas propriedades mecânicas intrínsecas da solda.

5) Modelo PIS2 - Para esse modelo, a solda foi simulada através da introdução de elementos inclinados, onde foram consideradas as características mecânicas da solda e suas dimensões. (Figura 5).

Na análise de todos os modelos numéricos, foi utilizado material com relação tensão x deformação representado por diagrama bilinear, com endurecimento isotrópico. Esse diagrama foi elaborado a partir dos resultados dos ensaios de caracterização do aço dos protótipos testados. As condições de contorno consideram a restrição de todos os graus de liberdade dos nós nas extremidades do banzo.

## 4. Análise numérica experimental

Em todas as análises realizadas, constata-se que os maiores valores de tensões estão localizados na face superior do banzo e entre as diagonais, o que é ilustrado na Figura 6 relativa a análise do modelo PI da ligação N2. Observa-se, também, na face lateral do banzo, variação de tensões menos importante do que aquela observada na superior.

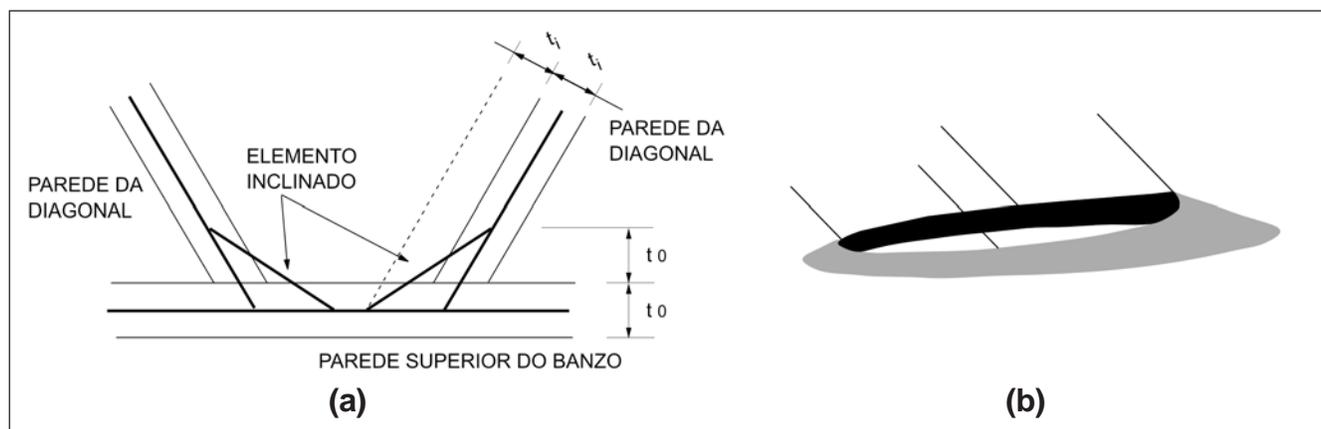


Figura 4 - Modelagem da Solda.

A partir dos resultados obtidos, foram realizadas comparações com os resultados experimentais dos protótipos apresentados na Tabela 1. Para exemplificar as comparações, foram traçados gráficos, relacionando o carregamento aplicado na diagonal tracionada e a tensão de von Mises, nos três pontos onde foram medidas as deformações por extensômetros.

Os gráficos apresentados referem-se aos protótipos N8 e N5, sendo o primeiro aquele com maior nível de carregamento na diagonal tracionada e o segundo com a menor espessura da parede do banzo. Os gráficos referentes aos protótipos N2 e N7, assim como os demais gráficos referentes ao Protótipo N5, tiveram o mesmo comportamento.

Para o protótipo N8, têm-se, nas Figuras 7 e 8, os valores do carregamento na diagonal tracionada em função da tensão de von Mises entre as diagonais e montantes e, na Figura 9, em função da tensão de von Mises na lateral do banzo.

Pode-se observar que a modelagem da curvatura da borda do perfil retangular, modelo PI, leva a uma melhor aproximação com os resultados experimentais. Observa-se, também, que a tentativa de simulação da solda, através do modelo PIgap, conforme proposto por Lalani (1993) para ligações formadas por perfis tubulares circulares, não apresentou bons resultados para as ligações analisadas nesse trabalho, onde o banzo tem forma retangular. Entre os modelos relacionados, observa-se que o modelo PIS1 apresentou os melhores resultados.

Na Figura 8, para o ponto relativo à localização da roseta 2, todos os modelos apresentaram a mesma tendência linear ao longo de quase todo o carregamento. A análise computacional foi interrompida em todos os modelos, devido a um deslocamento excessivo do modelo. Esse deslocamento provocou um ponto de inflexão acentuado no gráfico, em função de as características mecânicas do material serem rígidas, no modelo, por um diagrama tensão x deformação bilinear. Assim, quando toda a região, entre uma diagonal e o montante, atinge o limite de escoamento, a região

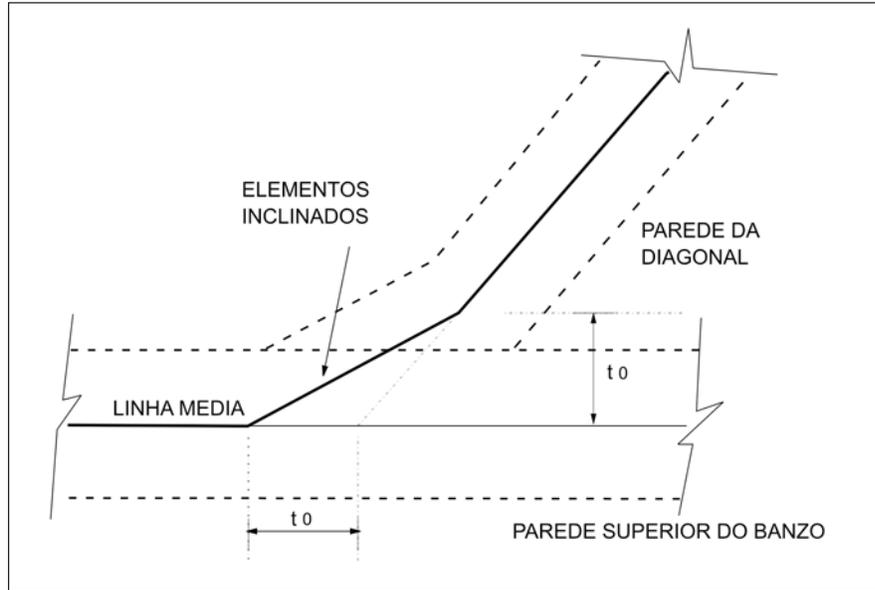


Figura 5 - PIS2 - Detalhe da região da solda.

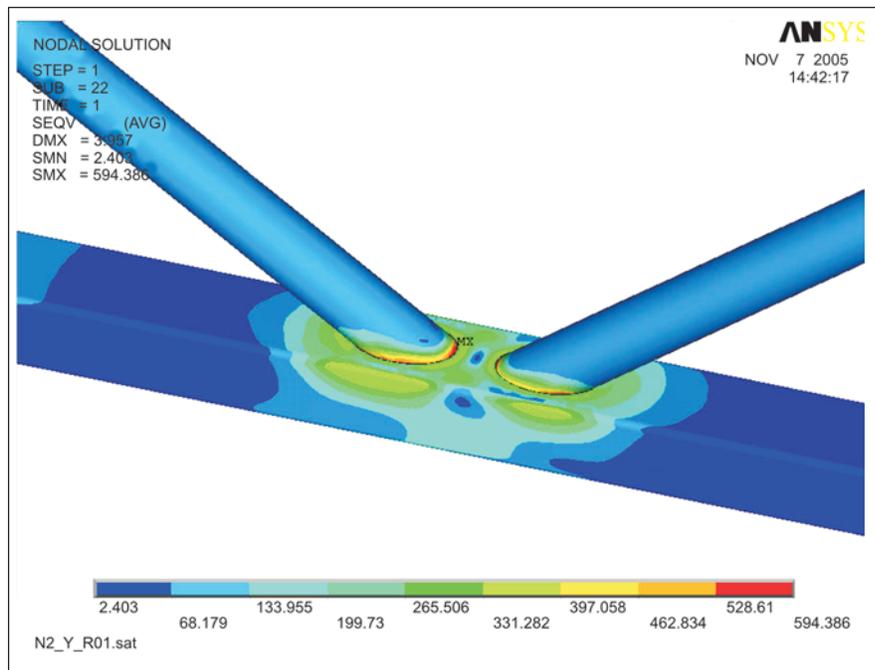


Figura 6 - Distribuição de tensão para o protótipo N2, modelo PI.

perde rigidez e a diagonal gira em torno da face superior do banzo, ocasionando alívio de tensões.

Para o ponto localizado na face lateral do banzo, correspondente à roseta 3, os resultados computacionais apresentaram boa correlação com os resultados experimentais, para todos os protótipos, podendo-se perceber até o nível de carregamento que ocasiona a plastificação da face superior do banzo (Figura 9).

Observa-se, na Figura 10, referente ao protótipo N5, que os resultados experimentais apresentam-se, inicialmente, próximos aos resultados dos modelos numéricos. Em seguida, a curva referente aos resultados experimentais tem maior inclinação e a tensão no ponto aumenta rapidamente, caracterizando o escoamento do material, distanciando-se, gradativamente, das curvas referentes aos modelos numéricos. O escoamento

do material foi observado para uma tensão inferior ao limite de escoamento, obtido da caracterização do material, devido ao banzo apresentar menor espessura e a ligação apresentar o menor “gap”. Sendo assim, os fatores que alteram as propriedades do material, nos locais da solda, como o tempo e a temperatura de soldagem, são mais significativos para essa ligação.

O modelo PIS2, que tem a interface entre as diagonais/montante e o banzo representada por um elemento de ligação, apresentou resultados próximos ao experimental até, aproximadamente, 60% do carregamento, para as ligações analisadas experimentalmente, seguindo a mesma trajetória do modelo PIS1 até esse ponto. Adicionalmente, o modelo PIS2 apresenta uma modelagem mais simples e com uma economia, no número de nós, na malha de elementos finitos, em comparação com o modelo PIS1.

## 5. Conclusões

O presente trabalho teve, como objetivo principal, o desenvolvimento de um modelo numérico representativo de ligações tubulares de treliças, assim como a avaliação da metodologia de ensaio experimental, contribuindo, assim, para o desenvolvimento da linha de pesquisa sobre ligações de estruturas metálicas tubulares.

Verifica-se que a comparação dos resultados numéricos com os experimentais, em relação à distribuição de tensões, mostrou uma boa correlação, indicando que os modelos numéricos utilizados são adequados e a modelagem do cordão de solda exerce papel fundamental na distribuição de tensões na face superior do banzo.

A modelagem do raio de dobramento do perfil de seção retangular mostrou-se necessária para modelos de paredes mais espessas, o que está associado à distribuição de tensões residuais oriundas da conformação a frio dos perfis retangulares. As tensões na parede lateral do banzo da ligação pouco se alteram nos diferentes modelos analisados, in-

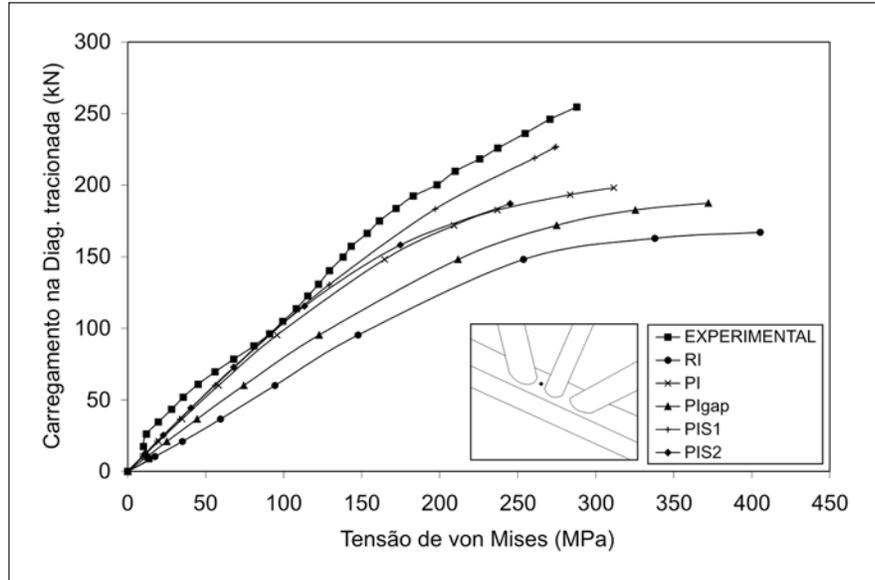


Figura 7 - Protótipo N8 (Roseta 1).

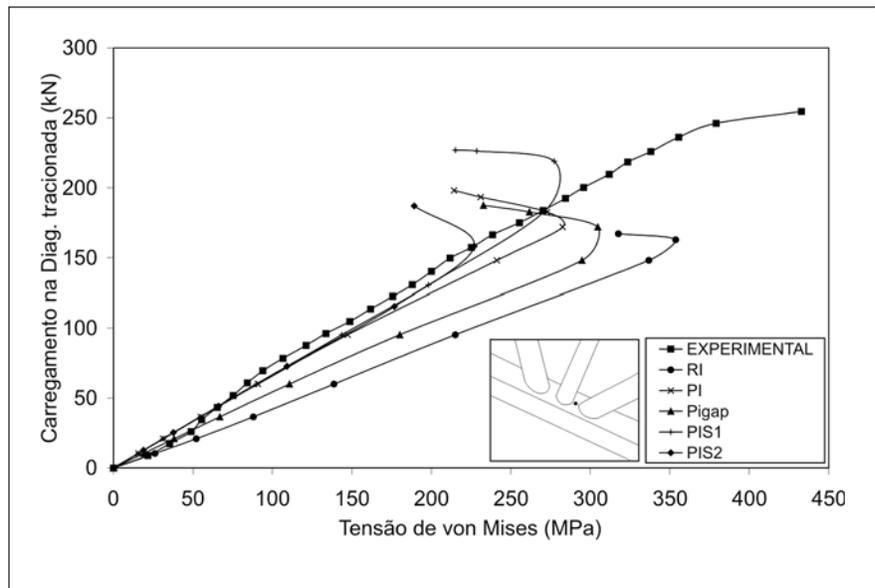


Figura 8 - Protótipo N8 (Roseta 2).

dependentemente da distribuição de tensões na face superior.

Os elementos de casca de 4 e 8 nós, usados na geração de um modelo de ligação tipo K, apresentaram um comportamento muito próximo, sendo que o modelo formado por elementos de 8 nós demandou um custo computacional bem mais alto.

Entre os modelos analisados, destacou-se o modelo PIS1, que considerou o cordão de solda com comprimentos da

perna de  $1,5t_1 \cos \theta$  e altura igual a  $1,5t_o$ , sendo  $t_1$  a espessura da diagonal/montante,  $t_o$  a espessura do banzo e  $\theta$ , o ângulo de inclinação da diagonal/montante, além das diagonais/montante estarem em contato com o banzo.

Nas análises das ligações denominadas N5, N7 e N8, que apresentam grande excentricidade, ressalta-se a importância da consideração das condições de contorno na extremidade das diagonais/montante e banzo para distribuição

de tensões na face do banzo e melhor monitoramento dessa região.

## 6. Agradecimentos

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

## 7. Referências bibliográficas

- ANSYS, Inc. *Theory Reference* (version 9.0), 2004.
- American Society for Testing and Materials - ASTM. *Standard specification for cold-formed welded and seamless carbon steel structural tubing in rounds and shapes*. A 500 - 1998.
- DEXTER, E. M. *Effects of overlap on behavior and strength of steel circular hollow section joints*. Swansea: University of Wales, 1996. (PhD thesis).
- EUROCODE 3. *Design of steel structures - part 1.8: Design of joints ("final draft")*, CEN, European Committee for Standardization, Brussels. prEN 1993-1.8. 2003.
- FREITAS, A. M. S., MUNIZ, C. F. D. G., MORAES, C. S. *Relatório interno de projeto*. Vallourec & Mannesman/UFOP. 2006.
- LALANI, M. *Post-yield and post-peak behaviour of tubular joints in offshore structures*. Proceedings of the 5th International Symposium of Tubular Structures, Nottingham, UK. p.265-286. 1993.
- LEE, M. M. K., WILMSHURST, S. R. Numerical modelling of CHS Joints with multiplanar double-K configuration. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 32, p.281-30, 1995.
- LIMA, L. R. O., NEVES, L. F. C., SILVA, J. G. S., VELLASCO, P. C. G. S. Análise paramétrica de ligações "T" com perfis tubulares em aço através de um modelo de elementos finitos. *Anais... CILAMCE* 2005. Guarapari, Espírito Santo, 2005.
- MENDANHA, F. O. *Análise de ligações de perfis tubulares em aço do tipo K e KT*. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2006. (Dissertação de Mestrado).
- MENDANHA, F. O., FREITAS, A. M. S., FREITAS, M. S. R. Análise numérico experimental de ligações de treliças planas mistas do tipo KT com afastamento entre as diagonais e o montante. *Anais... CILAMCE* 2006, Belém, Pará, Brasil, 2006.

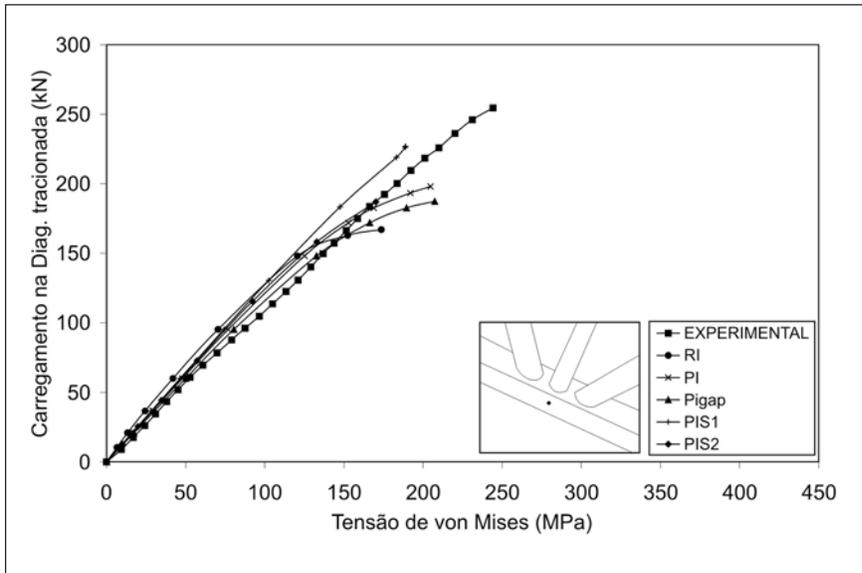


Figura 9 - Protótipo N8 (Roseta 3).

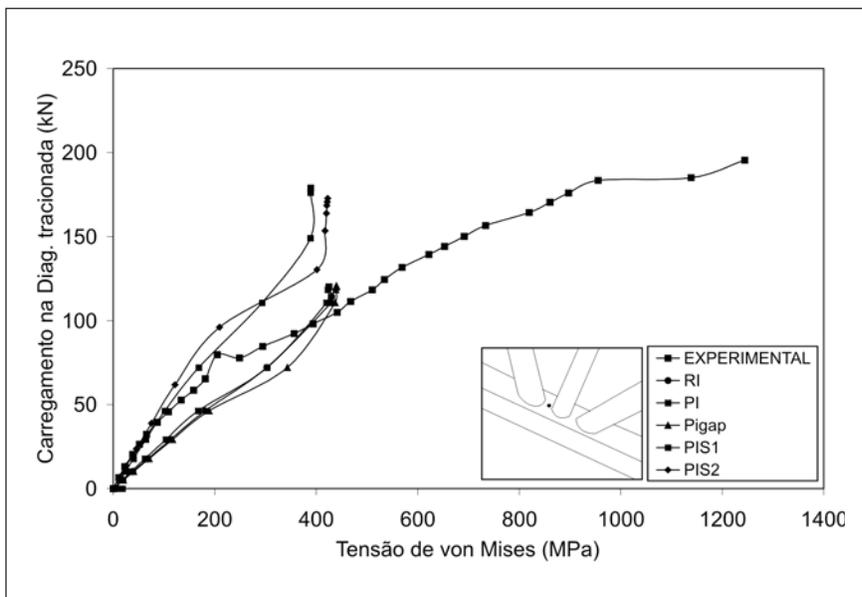


Figura 10 - Protótipo N5 (Roseta 1).

MICHILLO, D. G. V. *Estudo de comportamento de ligações de placa de base para estruturas metálicas tubulares*. Campinas: Unicamp, 2003. (Dissertação de mestrado).

MORGAN, M. R., LEE, M. M. K. Prediction of stress concentrations and degrees of bending in axially loaded tubular K-joints. *Journal of Constructional Steel Research*. v. 45, n.1, p.67-97, 1998.

PACKER, J. *Design guide for rectangular hollow section (RHS) joints under predominantly static loading*. Köln:Verl, TÜV Rheinland, 102p. 1997.

Artigo recebido em 04/10/2006 e aprovado em 28/11/2006.



REM - Revista Escola de Minas  
71 anos divulgando CIÊNCIA.