

COMPORTAMENTO DE LIGAÇÕES TUBULARES TIPO KT ENTRE PERFIS RHS E CHS

Nívia dos S. Lima^a, Luciano R. O. de Lima^b, Arlene M. S. Freitas^c e
Pedro C. G. da S. Vellasco^b, José G. S. da Silva^b

^a*PGECIV – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UERJ - Rio de Janeiro - Brasil
Rua São Francisco Xavier, 524, sala 5025E, Maracanã, RJ*

^b*Departamento de Estruturas e Fundações, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rua São
Francisco Xavier, 524, Maracanã, 20550-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil*

^c*Departamento de Engenharia Civil - UFOP - Ouro Preto - Brasil
Campus Universitário, Morro do Cruzeiro, Minas Gerais*

Palavras-Chave: Ligações Tubulares, Método dos Elementos Finitos, Análise Não-Linear.

Resumo. Os perfis tubulares sem costura são largamente utilizados em diversos países, porém, no Brasil, o uso desses perfis na construção civil era bastante limitado, restringindo-se praticamente a coberturas espaciais. Considerando uma nova realidade com o incremento do uso de perfis tubulares, este trabalho apresenta uma análise de ligações tipo “KT” com perfis tubulares retangulares (RHS) para a corda e perfis circulares (CHS) para o montante e diagonais, efetuada com base na norma europeia, Eurocode 3, através de um modelo em elementos finitos desenvolvido no programa Ansys. As não-linearidades físicas e geométricas foram incorporadas aos modelos, a fim de se mobilizar totalmente a capacidade resistente dessa ligação. A não-linearidade do material foi considerada através do critério de plastificação de von Mises através de uma lei constitutiva tensão versus deformação bi-linear de forma a exibir um comportamento elasto-plástico com um encruamento. A não-linearidade geométrica foi introduzida no modelo através da Formulação de Lagrange Atualizado. Os resultados numéricos são avaliados para a ligação em estudo quanto aos modos de falha, a distribuição de tensões e a influência das relações geométricas entre as diagonais e montante circulares e o banzo retangular.

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos últimos anos, um incremento substancial do uso e aplicação dos perfis tubulares como elementos estruturais tem sido notado. Muitos exemplos na natureza mostram o uso dos perfis tubulares não somente como tubos para transmissão de fluidos, mas também por suas excelentes propriedades de resistência à compressão, torção e flexão nas diversas direções.

As seções tubulares circulares (CHS) possuem forma favorável e apresentam uma distribuição de tensões muito eficiente em relação ao centróide da seção transversal, porém, exigem mão-de-obra extremamente especializada quando ligações com outras seções de perfis tubulares circulares são necessárias. Como consequência, seções tubulares retangulares (RHS) ou quadradas (SHS) apresentam-se como alternativas bastante viáveis devido a facilidade de execução das ligações em superfícies planas sendo muito populares em colunas e treliças planas.

A situação do mercado brasileiro começou a se alterar em razão da oferta de perfis tubulares estruturais sem costura pela Vallourec & Mannesmann do Brasil (2002). Diante da novidade da tecnologia, impõe-se a necessidade de divulgação e implementação do uso desse tipo de perfil para fins estruturais, além de uma ampliação do número de trabalhos de pesquisa para melhor compreensão de seu comportamento estrutural. Muitos são os exemplos de aplicações de perfis tubulares em estruturas existentes no Brasil conforme apresentado na Fig. 1. Todavia, cabe ressaltar que ainda encontra-se em desenvolvimento a norma de dimensionamento de perfis tubulares no Brasil que considera o dimensionamento de ligações entre perfis tubulares.



a) Passarela – Rio de Janeiro – ligações CHS



b) Edifício Sede V&M – Belo Horizonte – ligações RHS/CHS



c) Passarela – Rio de Janeiro – ligações CHS



d) Parque Aquático Maria Lenk – Rio de Janeiro – ligações CHS

Figura 1. Exemplos de estruturas com perfis tubulares no Brasil.

Desta forma, a necessidade de se obter soluções para os diversos problemas estruturais na engenharia associado ao amplo crescimento da construção metálica fez surgir, por volta dos anos 60, os perfis tubulares e por isso estes são considerados um dos grupos estruturais mais

recentes dos perfis metálicos. Seu surgimento e difusão motivaram a fundação do CIDECT (International Comittee for the Development and Study of Tubular Structures), sendo uma das maiores organizações internacionais de fabricantes de perfis tubulares.

No âmbito de normas de dimensionamento e verificação de ligações entre perfis tubulares, ainda pode-se citar o Eurocode 3 – Parte 1.8 (2003) que também aborda este tema. Com o aumento da utilização e o aprofundamento dos estudos destes tipos de estruturas, encontra-se em desenvolvimento no Brasil, uma norma específica para o dimensionamento das estruturas em perfis tubulares e suas ligações. Desta forma, espera-se dar o respaldo necessário aos projetistas de estruturas de aço com procedimentos de análise consistentes para utilização de perfis tubulares, sobretudo no que tange as ligações, consideradas como sendo um ponto vulnerável nesse tipo de estrutura.

Sendo assim, este artigo apresenta um estudo numérico de ligações tipo KT com perfis tubulares retangulares (RHS) para a corda e perfis circulares (CHS) para as diagonais e montante, efetuado com base na norma europeia, Eurocode 3 (2003) e nos manuais do CIDECT (Packer *et al.*, 2009) através de um modelo em elementos finitos desenvolvido no programa Ansys. As não-linearidades físicas e geométricas foram incorporadas aos modelos, a fim de se mobilizar totalmente a capacidade resistente dessa ligação. Este estudo compreendeu uma fase inicial de calibração seguida de uma análise paramétrica com uma abrangência satisfatória dentro da gama de perfis tubulares possíveis existentes no Brasil que atendem aos limites de geometria impostos pelo Eurocode 3.

2 RECOMENDAÇÕES DO EUROCODE 3 – PARTE 1.8 (2003)

Na parte 1.8 do Eurocode 3 (2003), referente ao dimensionamento de ligações entre elementos metálicos, encontra-se uma metodologia de dimensionamento específica para ligações entre perfis tubulares que se destaca do denominado método das componentes para a generalidade das ligações metálicas. A metodologia existente para este tipo de ligação assenta no pressuposto que estas singularidades podem ser consideradas como rotuladas, e que como tal, a característica fundamental que garante a adequabilidade da ligação é a resistência dos seus elementos individuais (corda, diagonais e montante), não descurando obviamente a sua capacidade de deformação. O Eurocode 3 – parte 1.8 (2003) considera o dimensionamento de ligações entre perfis tubulares retangulares (RHS) para os banzos e circulares (CHS) para as diagonais e montantes, mas impõem determinados limites de geometria que devem ser verificados e que são apresentados na Fig. 2.

Para o dimensionamento destas ligações, diversos estados limites últimos são considerados a saber:

- ruína plástica da face da corda, Fig. 3(a);
- ruína da parede lateral da corda por escoamento, esmagamento ou instabilidade devido carga axial de compressão no membro, Fig. 3(b);
- plastificação da corda (ruptura plástica da seção transversal da corda);
- ruína da corda por cisalhamento, Fig. 3(c);
- ruína por punção da parede da seção da corda, Fig. 3(d);
- ruína do braço com largura efetiva reduzida, Fig. 3(e);
- ruína por flambagem local do braço ou da corda no ponto de ligação com o braço, Fig. 3(f).

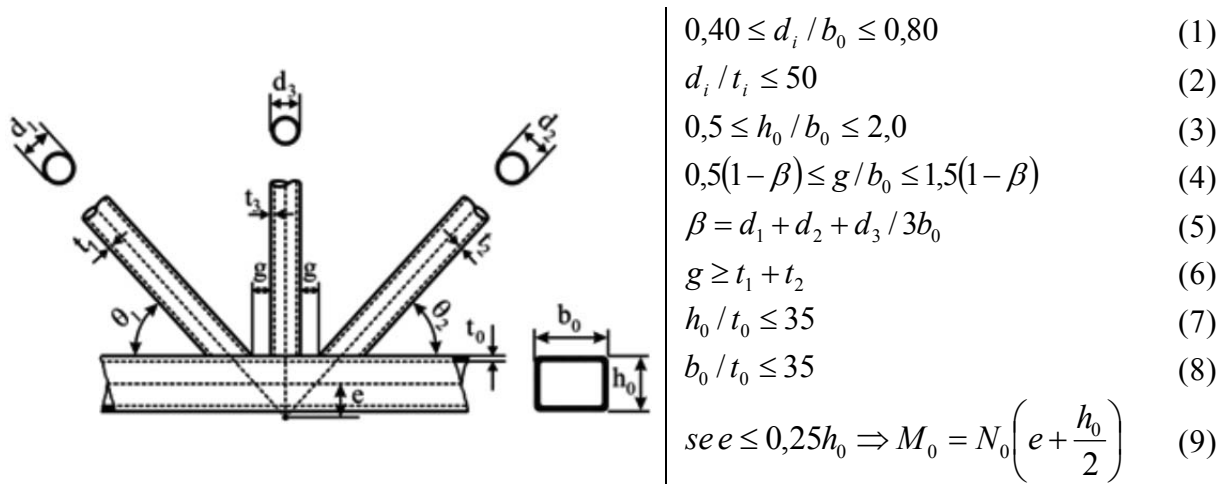


Figura 2: Parâmetros geométricos – Ligação tipo KT entre RHS (banzo) e CHS (diagonais e montantes)

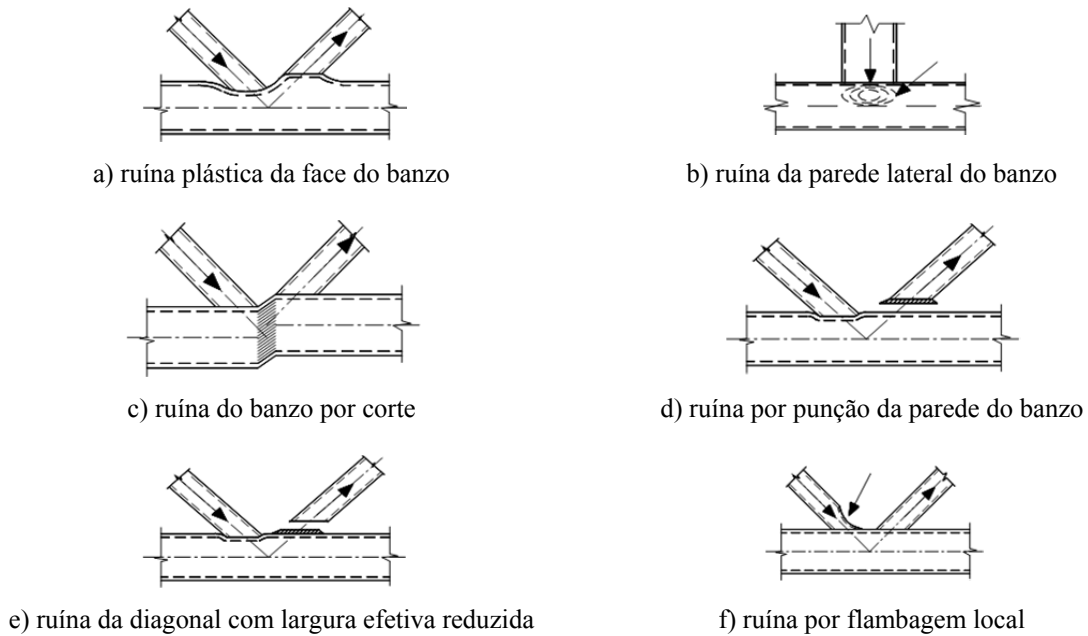


Figura3: Modos de ruína

Entretanto, conforme recomendações do Eurocode3 (2003), para o tipo de ligação estudado neste trabalho, o estado limite último de plastificação da face superior do banzo controla o dimensionamento. Esta resistência é obtida através da Eq. (10), a seguir:

$$N_{1,Rd} = \frac{\pi}{4} \frac{8,9 \gamma^{0,5} k_n f_{y0} t_0^2}{\sin \theta_1} \left(\frac{d_1 + d_2 + d_3}{3b_0} \right) / \gamma_{M5} \quad (10)$$

onde,

$N_{1,Rd}$ é a resistência plástica da face superior do montante,

γ é um parâmetro geométrico de acordo com a Fig. 2,

k_n é tomado igual a 1,0 para cargas de tração nas diagonais e igual a $1,3 + 0,4n/\beta$ para

cargas de compressão, sendo $n = \frac{N_{0,Sd}}{A_0 f_{y0}} + \frac{M_{0,Sd}}{W_{el} f_{y0}}$

f_{y0} é a tensão de escoamento do banzo,
 d_1 e d_2 são os diâmetros das diagonais e d_3 o diâmetro do montante,
 γ_{M5} é um fator de segurança tomado igual a 1,0.

3 CRITÉRIOS DE DEFORMAÇÃO LIMITE

As normas de projeto de ligações de perfis tubulares em aço são normalmente baseadas numa análise plástica, ou em critérios de deformações limites (Kosteski *et al.*, 2003; Zhao, 2000). Na análise plástica pelo método dos mecanismos, a cada mecanismo de colapso cinematicamente admissível, está associado um multiplicador das cargas da estrutura que é igual ou maior do que o seu multiplicador de colapso. A solução encontrada é, portanto dependente do mecanismo adotado, e será tão mais exata quanto mais adequado for aquele mecanismo. Como exemplos, os casos estudados por Cao *et al.* (1998), Packer (1993a), Packer *et al.* (1993b) e Kosteski *et al.* (2003) podem ser referenciados. Os critérios de limites de deformação usualmente associados ao estado limite último da face de um perfil tubular solicitada perpendicularmente ao seu plano correspondem à máxima deformação desta componente naquela direção.

A justificativa para se utilizar o critério de deformação limite é que, para faces do banzo esbeltas, a rigidez da ligação não se anula depois do escoamento completo, mas pode assumir valores elevados devido ao efeito de membrana. Este fenômeno pode ser observado nas curvas obtidas através da análise geométrica e materialmente não-linear a ser discutida em seções futuras do presente trabalho. É evidente que se a máxima carga é obtida através de curvas experimentais, a ausência de um “cotovelo” na curva pode dificultar a identificação do ponto referente ao estado limite último. Desta forma, comparações de resultados experimentais com resultados referentes a uma análise plástica, podem, nestes casos, ser baseadas nos critérios de deformação.

O limite de deformação proposto por Lu *et al.* (1994) e descrito por Zhao. (2000) pode ser usado na avaliação das cargas axiais e/ou rotação de uma ligação submetida a esforços axiais e flexão. A resistência da ligação é baseada numa comparação da deformação na interseção diagonais-banzo para dois níveis de carregamento: a resistência última, N_u que corresponde a uma endentação do banzo, $\Delta_u = 0,03b_0$, e o limite de serviço é dado por $\Delta_s = 0,01b_0$. Lu *et al.* (1994) determinou que o primeiro ponto com perda de rigidez na curva carga-deslocamento pode ser considerado caso o deslocamento corresponda a um limite menor que $\Delta_u = 0,03b_0$. De acordo com Zhao (2000), se a razão N_u/N_s for menor que 1,5, o dimensionamento da ligação deve ser baseado no estado limite último. Caso a razão N_u/N_s seja maior que 1,5 a resistência limite de serviço controla o dimensionamento. No caso das ligações onde a razão do banzo $N_u/N_s < 1,5$, a deformação limite apropriada para determinar a resistência última da ligação deve ser igual a $0,03b_0$. A utilização deste critério será melhor detalhada em seções posteriores do presente trabalho.

4 DESCRIÇÃO DO ENSAIO EXPERIMENTAL

Para efeitos de calibração do modelo numérico apresentado neste trabalho, este item apresenta os modelos experimentais de ensaios realizados por Mayor (2010) com ligações tipo KT, com afastamento, formadas por perfis tubulares sem costura fabricados pela empresa Vallourec & Mannesmann do Brasil (2002), sendo utilizados perfis com seções transversais circulares nas diagonais/montantes e retangulares no banzo. Foram feitos dois ensaios (protótipos KT-01-B e KT02-B) com as mesmas dimensões de perfis tubulares e também com o mesmo ângulo entre as diagonais e o banzo. Na Tabela 1 são apresentadas as dimensões da ligação ensaiada, e na Fig. 4, seu esquema geral.

Tabela1: Dimensões das ligações ensaiadas (Mayor, 2010)

Banzo			Diagonais			Montante		Gap
h_0 (mm)	b_0 (mm)	t_0 (mm)	d_1/d_2 (mm)	t_1/t_2 (mm)	θ (°)	d_3 (mm)	t_3 (mm)	g (mm)
60	110	4,8	48,3	3,7	47,7	38,1	4,3	33

Banzo			Diagonais			Montante		Gap
h_0 (mm)	b_0 (mm)	t_0 (mm)	d_1/d_2 (mm)	t_1/t_2 (mm)	θ (°)	d_3 (mm)	t_3 (mm)	g (mm)
60	110	4,8	48,3	3,7	47,7	38,1	4,3	33

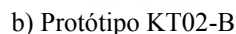
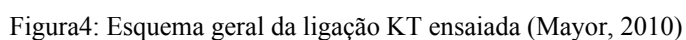


Figura5: Posição das rosetas nos ensaios das ligações tipo KT (Mayor, 2010)

5 CALIBRAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

O modelo numérico proposto neste trabalho para caracterização de ligações tubulares tipo KT entre banzos RHS e diagonais/montantes CHS foi desenvolvido no programa de elementos finitos Ansys (2010) utilizando elementos tipo casca, SHELL181 e SHELL281, existentes na biblioteca de elementos do referido programa. O elemento SHELL181 com quatro nós, possui seis graus de liberdade por nó – translações x, y e z e rotações x, y e z, considera esforços de flexão, corte e efeito de membrana. O elemento SHELL281 com oito nós, possui as mesmas características do SHELL181. Para definição da malha apropriada, no intuito de realizar a calibração e validação da análise numérica, fez-se um teste de densidade de malha. Procedeu-se a análise de três diferentes malhas, a saber:

- NKT-1 – Utilizando elemento SHELL181;
- NKT-2 – Utilizando elemento SHELL181 e o dobro de divisões do modelo NKT-1;
- NKT-3 – Utilizando elemento SHELL281 com a mesma divisão do modelo NKT-1.

Confrontou-se para os três modelos citados acima, a distribuição de tensões de Von Mises em função da carga aplicada na diagonal tracionada, com os dois ensaios realizados citados anteriormente (Protótipos KT01-B e KT02-B). Observando-se as Figs. 6 a 8, pode-se verificar uma melhor concordância entre os valores numéricos e os experimentais no modelo NKT-3, sendo este, então, o adotado para a continuidade das análises desenvolvidas neste trabalho.

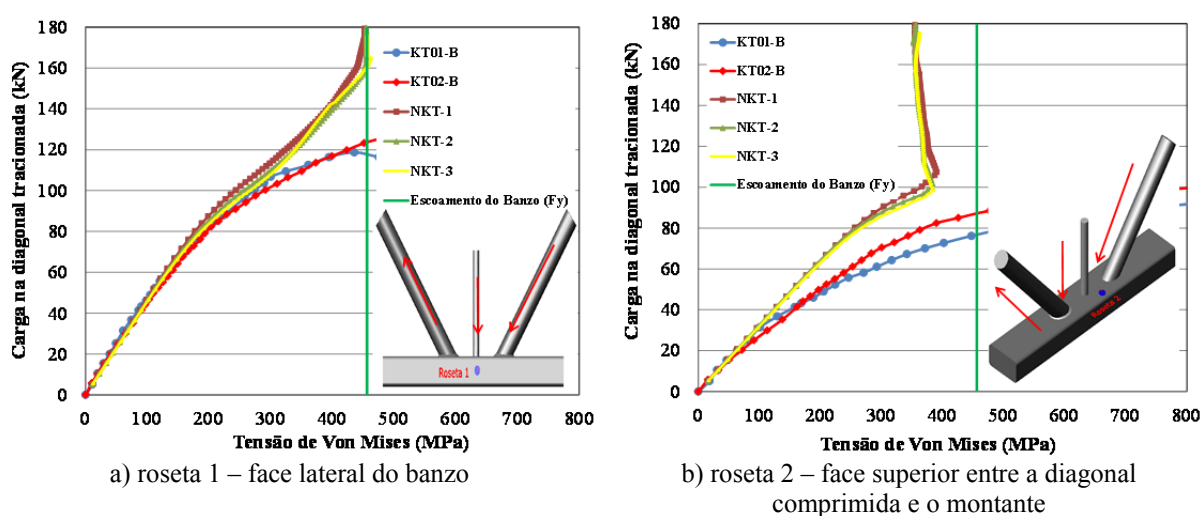


Figura 6: Comparação resultados numéricos versus experimentais – rosetas 1 e 2 (Mayor, 2010)

Apresenta-se na Fig. 9(a), a malha utilizada para a continuidade do presente trabalho para a melhor situação descrita anteriormente. Observa-se na Fig. 9a, que a malha encontra-se mais refinada na região da solda (onde concentrações de tensões são esperadas) e o mais regular possível com proporções adequadas entre elementos, no intuito de evitar problemas numéricos.

A solda foi considerada com elementos de casca conforme apresentado na Fig. 9(b) e Fig. 9(c). Esta solução já foi testada anteriormente para outros tipos de ligações tubulares sem prejuízo para o resultado final.

Com o objetivo de se obter o comportamento global destas ligações em termos de rigidez, resistência e capacidade de deformação, efetuou-se uma análise não linear geométrica e de material. A lei constitutiva do material adotada foi bi-linear com comportamento elasto-plástico perfeito.

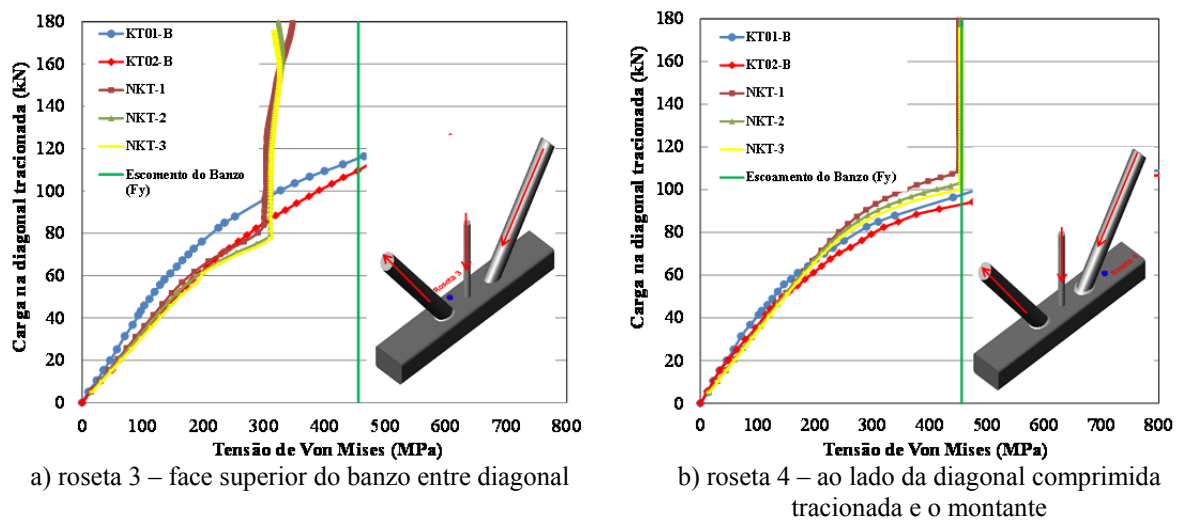


Figura 7: Comparação resultados numéricos versus experimentais – rosetas 3 e 4 (Mayor, 2010)

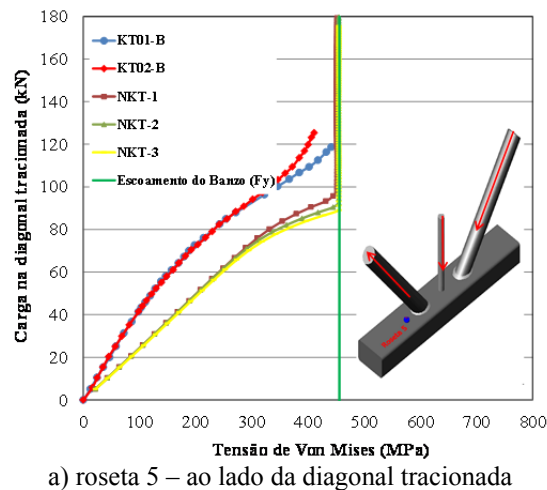


Figura 8: Comparação resultados numéricos versus experimentais – roseta 5 (Mayor, 2010)

De forma a exemplificar a aplicação do critério de deformação limite apresentado anteriormente, são apresentadas na Fig. 10, as curvas carga *versus* deslocamento obtidas numericamente para a ligação utilizada na calibração.

Neste gráfico, podem ser observados os limites de $1\%b_0$ e $3\%b_0$, obtendo-se $N_s = 74,8$ kN e $N_u = 99,1$ kN, respectivamente, de acordo com o critério de deformação proposto por Lee *et al.* (1999) para atendimento dos estados limites último e de utilização.

Como a razão $N_u/N_s = 1,32 < 1,5$, N_u controla o dimensionamento. Desta forma, aplicando-se o critério de deformação limite apresentado anteriormente, a ligação teria uma resistência $N=99,1$ kN.

De acordo com a Eq. (10) preconizada pelo Eurocode 3 (2003), a carga máxima a ser aplicada nas diagonais de forma que não provoque plastificação na face superior do banzo é $N_{l,Rd} = 45$ kN, já considerando o momento fletor gerado pela excentricidade “e” – ver Fig. 2.

Desta forma, o dimensionamento feito pelo Eurocode 3 (2003) apresenta-se a favor da segurança.

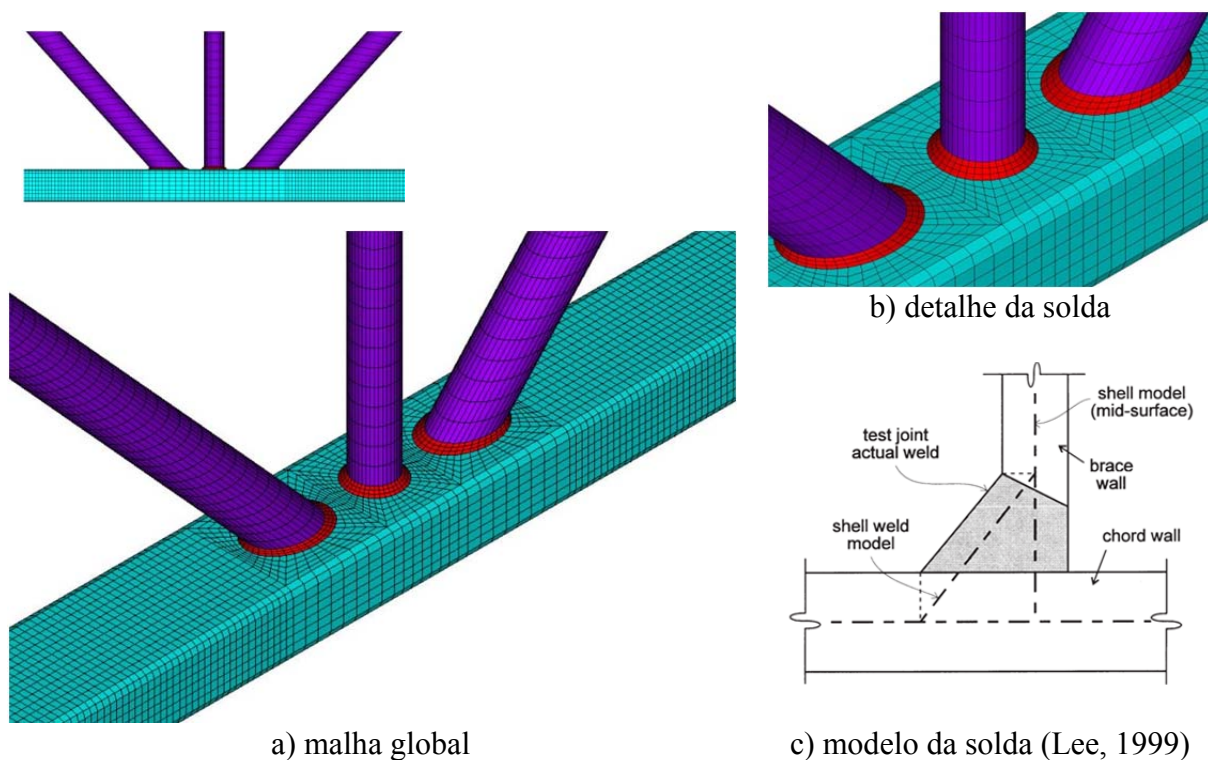


Figura 9: Malha de elementos finitos do modelo numérico

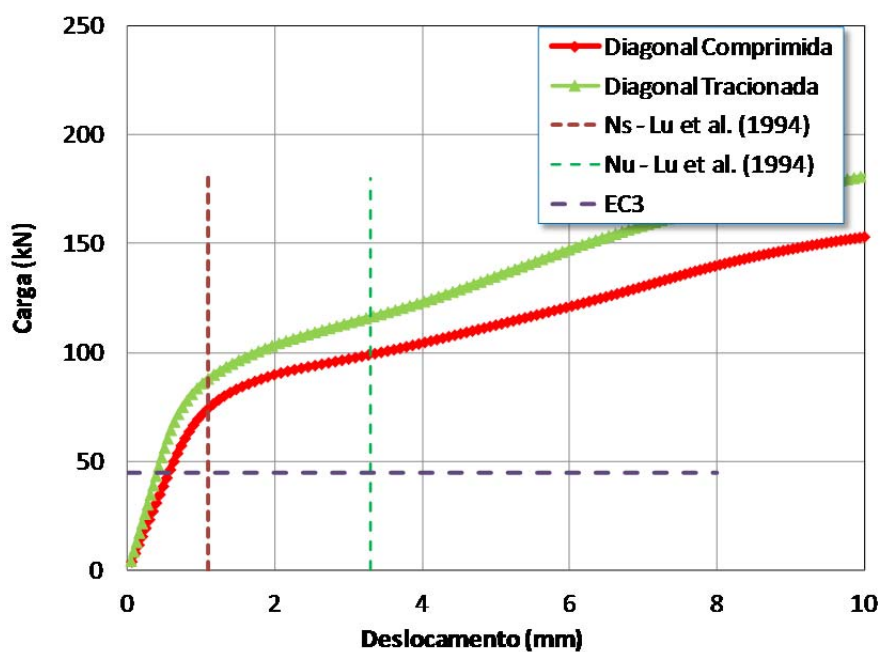


Figura10: Curva carga *versus* deslocamento – modelo de calibração

6 ANÁLISE PARAMÉTRICA

A análise paramétrica desenvolvida neste trabalho compreendeu a análise de 17 modelos diferentes buscando uma maior abrangência de acordo com a gama de perfis tubulares disponíveis comercialmente no Brasil através do catálogo da Vallourec & Mannesmann. Conforme apresentado na Tabela 2, foram adotados oito perfis diferentes para os banzos e

entre uma e três diagonais diferentes, dependendo do caso. Manteve-se o ângulo de 47,7° entre o montante e as diagonais, e gap de 33 mm. Os parâmetros geométricos foram verificados e atenderam as limitações impostas pelo Eurocode3 (2003). Para a lei constitutiva do material, considerou-se um comportamento bi-linear elasto-plástico perfeito, sendo a tensão de escoamento do banzo de 456MPa, das diagonais de 442MPa e do montante de 250 MPa, com módulo de elasticidade de 200000MPa. Este procedimento teve como objetivo identificar se o estado limite último que controla o dimensionamento destas ligações continuava a ser a plastificação da face superior do banzo.

Tabela 2: Modelos analisados de ligações tipo KT - Dimensões em [mm] e ângulos em [°]

BANZO (RHS)						DIAGONAIS(CHS)					MONTANTE (CHS)				g = 33	
b ₀	h ₀	t ₀	b ₀ /t ₀	h ₀ /t ₀	h ₀ /b ₀	d ₁	t ₁	d ₁ /t ₁	d ₁ /b ₀	e	d ₃	t ₃	d ₃ /t ₃	d ₃ /b ₀	β	g/b ₀
100	80	4,5	22,22	17,78	0,80	60,3	4	15,08	0,60	69,09	51	4,5	11,33	0,51	0,57	0,330
120	60	5	24,00	12,00	0,50	60,3	4	15,08	0,50	92,88	76,1	4,5	16,91	0,63	0,55	0,275
120	60	5	24,00	12,00	0,50	76,1	4,5	16,91	0,63	104,62	76,1	4,5	16,91	0,63	0,63	0,275
140	80	5	28,00	16,00	0,57	88,9	4	22,23	0,64	118,14	101,6	4,5	22,58	0,73	0,67	0,236
140	80	5	28,00	16,00	0,57	101,6	4	25,40	0,73	127,58	101,6	4,5	22,58	0,73	0,73	0,236
150	100	5	30,00	20,00	0,67	76,1	4,5	16,91	0,51	98,63	101,6	4,5	22,58	0,68	0,56	0,220
150	100	5	30,00	20,00	0,67	88,9	4,5	19,76	0,59	108,14	101,6	4,5	22,58	0,68	0,62	0,220
150	100	5	30,00	20,00	0,67	101,6	4,5	22,58	0,68	117,58	101,6	4,5	22,58	0,68	0,68	0,220
160	90	5	32,00	18,00	0,56	88,9	4,5	19,76	0,56	120,12	114,3	4,5	25,40	0,71	0,61	0,206
160	90	5	32,00	18,00	0,56	114,3	4,5	25,40	0,71	138,99	114,3	4,5	25,40	0,71	0,71	0,206
180	100	5,6	32,14	17,86	0,55	101,6	5	20,32	0,56	138,51	139,7	4,5	31,04	0,78	0,64	0,183
200	120	6,3	31,75	19,05	0,60	127	5,6	22,68	0,64	154,36	152,4	4,5	33,87	0,76	0,68	0,165
200	120	6,3	31,75	19,05	0,60	139,7	5,6	24,95	0,70	163,79	152,4	4,5	33,87	0,76	0,72	0,165
200	120	6,3	31,75	19,05	0,60	152,4	5,6	27,21	0,76	173,23	152,4	4,5	33,87	0,76	0,76	0,165
220	120	7,1	30,99	16,90	0,55	152,4	6,3	24,19	0,69	176,86	159	4,5	35,33	0,72	0,70	0,150
220	120	7,1	30,99	16,90	0,55	159	6,3	25,24	0,72	181,76	159	4,5	35,33	0,72	0,72	0,150
220	120	7,1	30,99	16,90	0,55	168,3	6,3	26,71	0,77	188,67	159	4,5	35,33	0,72	0,75	0,150

Aplicando-se as equações de dimensionamento do Eurocode 3 (2003) bem como o critério de deformação limite de 1% b_0 e 3% b_0 , obtêm-se os resultados apresentados na Tabela 3. Nesta tabela, $N_{I,Rd}$ representa a resistência da ligação pelo Eurocode 3, (obtida pelo esforço atuante na diagonal comprimida no momento em que a ligação atinge a deformação adotada como critério limite); N_s e N_u representam respectivamente, as resistências referentes ao estado limite de utilização e estado limite último, de acordo com o critério de deformação limite; N_{def} a resistência adotada de acordo com a razão N_u/N_s . Observando-se os valores obtidos, pode-se verificar que a maior parte dos modelos analisados de acordo com o dimensionamento pelo Eurocode 3 fornece valores a favor da segurança caracterizados pela razão $N_{I,Rd}/N_{def} \leq 1,0$.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo dos últimos anos, um incremento substancial do uso e aplicação dos perfis tubulares como elementos estruturais tem sido notado devido suas excelentes propriedades de resistência à compressão, torção e flexão nas diversas direções. Para o dimensionamento de ligações tipo KT entre perfis tubulares RHS e CHS, foram apresentadas as equações propostas pelo Eurocode 3(2003). Levando-se em consideração que se encontra em desenvolvimento no Brasil, uma norma para perfis tubulares e suas respectivas ligações, este trabalho apresentou

um estudo comparativo entre as normas citadas anteriormente referentes ao dimensionamento de ligações tipo KT entre perfis RHS (banzo) e CHS (diagonais).

Tabela 3: Análise paramétrica comparativa – dimensões em [mm] e resistências em [kN]

b_0	h_0	t_0	d_1	t_1	d_3	t_3	$N_{1,Rd}$	N_s	N_u	N_{def}	$N_{1,Rd}/N_{def}$
100	80	4,5	60,3	4	51	4,5	89	97,136	118,41	118,41	0,75
120	60	5	60,3	4,5	76,1	4,5	54	96,499	121,669	121,67	0,44
120	60	5	76,1	4,5	76,1	4,5	11	130,606	156,958	156,96	0,07
140	80	5	88,9	4	101,6	4,5	111	131,233	163,972	163,97	0,68
140	80	5	101,6	4	101,6	4,5	68	170,181	203,947	203,95	0,33
150	100	5	76,1	4,5	101,6	4,5	170	95,73	133,365	133,37	1,27
150	100	5	88,9	4,5	101,6	4,5	169	117,353	155,095	155,10	1,09
150	100	5	101,6	4,5	101,6	4,5	157	147,304	185,052	185,05	0,85
160	90	5	88,9	4,5	114,3	4,5	157	107,4	147,426	147,43	1,06
160	90	5	114,3	4,5	114,3	4,5	119	163,888	204,034	204,03	0,58
180	100	5,6	101,6	5	139,7	4,5	192	145,651	199,122	199,12	0,96
200	120	6,3	127	5,6	152,4	4,5	236	230,191	303,116	303,12	0,78
200	120	6,3	139,7	5,6	152,4	4,5	204	272,383	345,476	345,48	0,59
200	120	6,3	152,4	5,6	152,4	4,5	148	333,019	407,172	407,17	0,36
220	120	7,1	152,4	6,3	159	4,5	167	357,382	447,863	447,86	0,37
220	120	7,1	159	6,3	159	4,5	119	388,86	480,978	480,98	0,25
220	120	7,1	168,3	6,3	159	4,5	83	446,177	539,446	539,45	0,15

O modelo numérico desenvolvido neste trabalho foi calibrado com resultados experimentais realizados por Mayor (2010) apresentando uma boa concordância entre os mesmos. Após a calibração do modelo numérico, 17 ligações foram analisadas de forma a cobrir a gama de perfis RHS disponibilizados pela Vallourec&Mannesmann no Brasil.

Os resultados obtidos evidenciaram que o dimensionamento realizado através das equações propostas no Eurocode3 (2003) fornecem, em sua maioria, valores a favor da segurança. Vale ressaltar que a validação destes resultados foi efetuada considerando-se o critério de deformação limite de $1\%b_0$ e $3\%b_0$, respectivamente, para deslocamentos para fora do plano da face superior da corda. A continuidade deste trabalho dar-se-á através da análise de outras condições de carregamento e geometrias buscando dar subsídios necessários para a implementação da Norma Brasileira de Perfis Tubulares.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem a UERJ, a FAPERJ, ao CNPq e a CAPES, pelo apoio financeiro para desenvolvimento do presente projeto de pesquisa.

REFÊRENCIAS

- Anslys 12.0 ®, ANSYS - Inc. Theory Reference, 2010.
- Cao, J.J. , Packer, J.A., Young, G.J., Yield line analysis of RHS connections with axial loads, *J. Constructional Steel Research*, vol. 48, nº 1, pp 1-25, 1998.
- Choo, Y. S., Qian, X. D., Liew, J. Y. R, Wardenier, J., Static strength of thick-walled CHS X-joints - Part I. New approach in strength definition, *Journal of Constructional Steel Research*, vol.59, pp. 1201-1228, 2003.

- Eurocode 3, ENV 1993-1-1, 2003: *Design of steel structures - Structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*. CEN, European Committee for Standardisation, Brussels, 2003.
- Kosteski, N., Packer, J.A., Puthli, R.S., A finite element method based yield load determination procedure for hollow structural section connections, *Journal Constructional Steel Research*, vol. 59, nº 4, pp. 427-559, 2003.
- Lee, M.M.K., "Strength, stress and fracture analyses of offshore tubular joints using finite elements", *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 51, pp 265-286, 1999.
- Lu, L.H., de Winkel, G.D., Yu, Y., Wardenier, J., Deformation limit for the ultimate strength of hollow section joints, *6th International Symposium on Tubular Structures*, Melbourne, Australia, pp 341-347, 1994.
- Mayor, I. M. S., Análise Teórica-Experimental de Ligações Tipo “K” e “KT” Compostas por Perfis Tubulares de Seção Retangular e Circular, Dissertação de Mestrado, UFOP – Universidade Federal de Ouro Preto – PPEC, 2010.
- Packer, J.A. Moment Connections between Rectangular Hollow Sections, *Journal Constructional Steel Research* 25, pp 63-81, 1993a.
- Packer, J.A., Wardenier, J., Kurobane, Y., Dutta, D., Yeomans, N., *Assemblages de sections creuses rectangulaires sous chargement statique predominant*, Série CIDECT "Construire avec des profiles creux", Verlag TUV Rheinland, Koln, 1993b.
- Packer, J.A. , Wardenier, J. , Zhao, X.-L., G.J. van der Vegte and Y. Kurobane, Design Guide - *For Rectangular Hollow Section (RHS) Joints Under Predominantly Static Loading* - 2nd Edition, CIDECT, 2009.
- Santos, M. L., Lima, L. R. O. de, Freitas, A. M. S., Vellasco, P. C. G. da S., Silva, J. G. S. da, Neves, L. F. da C., Modelagem Numérica de Ligações K Tubulares entre RHS e CHS, In CMNE - *Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia*, Coimbra, Portugal, 2011.
- Technical Information No. 1: *Structural hollow sections (MSH) circular, square, rectangular*. Valourec & Mannesmann (http://www.vmtubes.de/content/vmtubes/vmtubes000522/S_MSH1_p.pdf), 2002.
- Zhao, X., "Deformation limit and ultimate strength of welded T-joints in cold-formed RHS sections", *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 53, pp 149-165, 2000.