

MODELAGEM NUMÉRICA DE LIGAÇÕES K TUBULARES ENTRE RHS E CHS

Marcela L. Santos^{1*}, Luciano R. O. de Lima¹, Arlene M. S. Freitas²
Pedro C. G. da S. Vellasco¹, José G. S. da Silva¹ e Luis. F. da C. Neves³

1: Departamento de Estruturas e Fundações - UERJ - Rio de Janeiro - Brasil
Rua São Francisco Xavier, 524, sala 5016A, Maracanã, RJ
e-mail: marcela.lsantos@gmail.com; luciano@eng.uerj.br; vellasco@eng.uerj.br;
jgss@eng.uerj.br

2: Departamento de Engenharia Civil - UFOP - Ouro Preto - Brasil
Campus Universitário, Morro do Cruzeiro, Minas Gerais
e-mail: arlene.freitas@gmail.com

3: ISISE, Departamento de Engenharia Civil
University of Coimbra – Pólo II – Rua Luís Reis Santos, Coimbra
e-mails: luis@dec.uc.pt

Palavras-chave: Ligações Tubulares, Modelagem Numérica, Análise Não-Linear, Eurocódigo 3, CIDECT

Resumo. *Os perfis tubulares sem costura são largamente 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 “K” com perfis tubulares retangulares (RHS) para a corda e perfis circulares (CHS) para as diagonais efetuada com base na norma europeia, Eurocódigo 3, e no CIDECT 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, a influência da excentricidade, e a influência das relações geométricas entre as diagonais 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 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 [1]. 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 nenhuma norma de dimensionamento de perfis tubulares no Brasil considera o dimensionamento de ligações entre perfis tubulares.



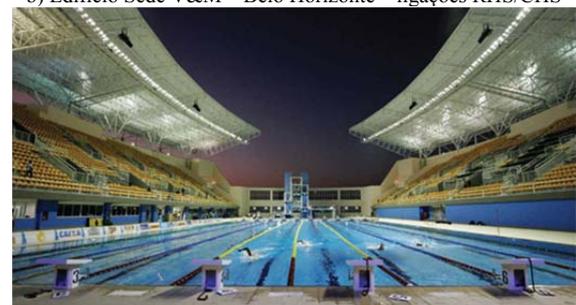
a) Passarela – Rio de Janeiro – ligações CHS



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 Comitee 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 Eurocódigo 3 – Parte 1.8 [2] que também aborda este tema com equações baseadas nos manuais do CIDECT [3] citados anteriormente.

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.

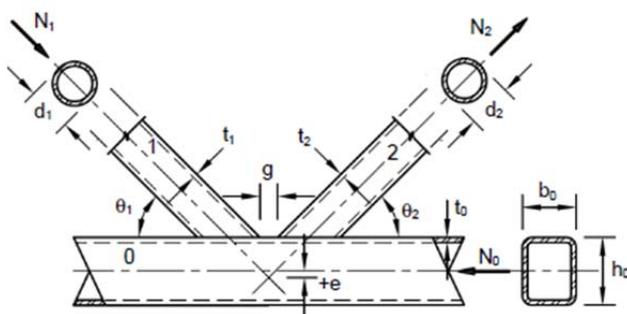
Sendo assim, este artigo apresenta um estudo numérico de ligações tipo K com perfis tubulares retangulares (RHS) para a corda e perfis circulares (CHS) para as diagonais efetuado com base na norma europeia, Eurocódigo 3, e no CIDECT através de um modelo em elementos finitos desenvolvido no programa Ansys. Esta ligação foi utilizada na construção da nova sede administrativa da Vallourec & Mannesmann situada em Belo Horizonte, Brasil e serviu com principal motivação para a realização deste trabalho. 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 Eurocódigo 3 e pelo CIDECT.

2 RECOMENDAÇÕES DO EUROCÓDIGO 3 – PARTE 1.8 [2]

Na parte 1.8 do Eurocódigo 3 [2], 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 ligações assenta no pressuposto que estas singularidades se podem considerar como rotuladas, e que como tal a característica fundamental que garante a adequabilidade da ligação é a resistência dos seus elementos individuais (corda e montante), não descurando obviamente a sua capacidade de deformação. O Eurocódigo 3 – parte 1.8 [2] considera o dimensionamento de ligações entre perfis tubulares retangulares (RHS) para os banzos e circulares (CHS) para as diagonais mas impõem determinados limites de geometria que deve 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, Figura 3(a);
- ruína da parede lateral da corda por escoamento, esmagamento ou instabilidade devido carga axial de compressão no membro, Figura 3(b);
- plastificação da corda (ruptura plástica da seção transversal da corda);
- ruína da corda por cisalhamento, Figura 3(c);
- ruína por punção da parede da seção da corda, Figura 3(d);
- ruína do braço com largura efetiva reduzida, Figura 3(e);
- ruína por flambagem local do braço ou da corda no ponto de ligação com o braço, Figura 3(f).



$$0,25 \leq \beta = d_i / b_0 \leq 0,80 \quad (1)$$

$$d_i / b_0 \geq 0,1 + 0,01 b_0 / t_0 \quad (2)$$

$$2\gamma = d_i / t_i \leq 50 \quad (3)$$

$$0,5 \leq h_i / b_i \leq 2,0 \quad (4)$$

$$0,5(1 - \beta) \leq g / b_0 \leq 1,5(1 - \beta) \quad (5)$$

$$g \geq t_1 + t_2 \quad (6)$$

$$2\gamma = h_0 / t_0 \leq 40 \quad (7)$$

$$2\gamma = b_0 / t_0 \leq 40 \quad (8)$$

$$se e \leq 0,25 h_0 \Rightarrow M_0 = N_0 \left(e + \frac{h_0}{2} \right) \quad (9)$$

Figura 2. Parâmetros geométricos – Ligação tipo K entre RHS (banzo) e CHS (diagonais) [3].

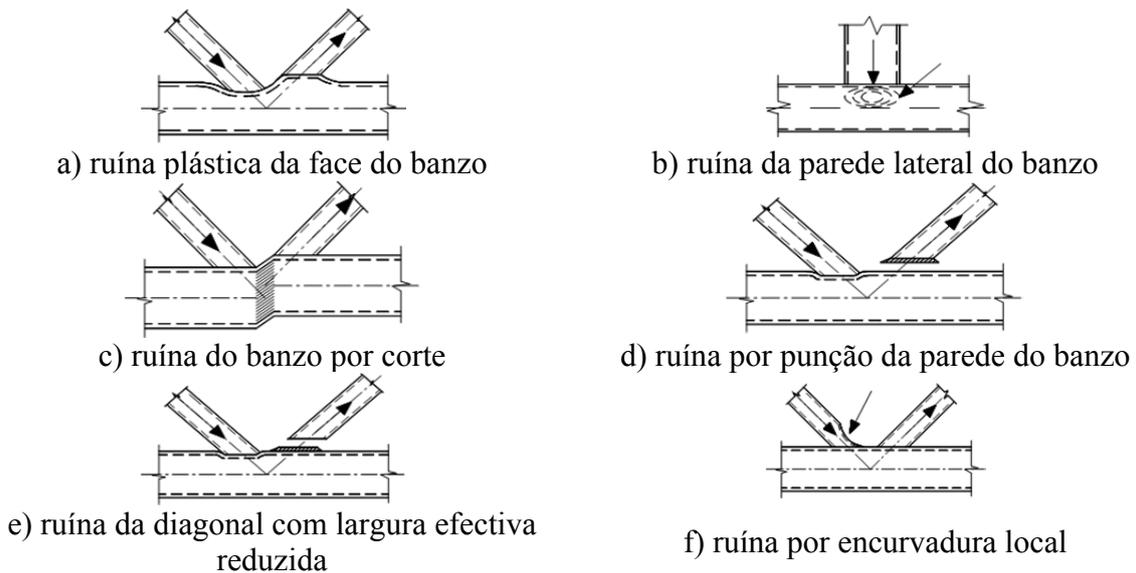


Figura 3. Modos de ruína para ligações tipo K [2]

Entretanto, conforme recomendações do Eurocódigo 3 [2], para o tipo de ligação estudado neste trabalho, o estado limite último de plastificação da face superior do banzo controla o dimensionamento. Logo, esta resistência é obtida através da eq. (4), a seguir:

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

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,
 f_{y0} é a tensão de escoamento igual a 355MPa,
 d_1 e d_2 são os diâmetros das diagonais,
 γ_{M5} é um fator de segurança tomado igual a 1,0.

3 RECOMENDAÇÕES DO CIDECT – DESIGN GUIDE 3 [3]

Conforme comentado anteriormente, para o tipo de ligação estudado neste trabalho, o estado limite último que controla o dimensionamento é a plastificação da face superior do banzo da ligação. De acordo com o CIDECT, as constantes apresentadas nas equações de resistência deste estado limite último foram obtidas através de calibrações com resultados experimentais. A nova equação proposta pelo CIDECT é expressa em termos Q_u (influência dos parâmetros b e g) e de Q_f (influência do parâmetro n). Nestas equações, o parâmetro C_1 é tomado igual a $0,5-0,5\beta$ ($C_1 \geq 0,10$) para banzos com tensões de compressão e igual a 1,0 para tensões de tração. Para diferenciar da formulação presente na 1ª edição do CIDECT e adotada em diversos regulamentos ao redor do mundo, as equações apresentadas a seguir, consideram pequenas diferenças nas notações utilizadas.

$$N_i^* = Q_u Q_f \frac{f_{y0} t_0^2}{\sin \theta_1} \quad \text{com} \quad Q_u = 14\beta\gamma^{0,3} \quad \text{e} \quad Q_f = (1 - |n|)^{C_1} \quad (11)$$

$$n = \frac{N_0}{N_{pl,0}} + \frac{M_0}{M_{pl,0}} \quad (12)$$

4 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 [4], [5]. 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.[6], Packer [7], Packer et al. [8] e Kostas et al. [9] 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 limitação de deformação é que, para faces da corda 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.* [10] e descrito por Choo *et al.* [11] 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.* [10] 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 $\Delta_u = 0,03d_0$. De acordo com o autor, se a razão N_u/N_s for maior que 1,5, o dimensionamento da ligação deve ser baseado no estado limite último. Caso a razão N_u/N_s seja menor 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 $0,03d_0$. A utilização deste critério será melhor detalhada em seções posteriores do presente trabalho.

5 DESCRIÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

O modelo numérico proposto neste trabalho para caracterização de ligações tubulares tipo K entre banzos RHS e diagonais CHS foi desenvolvido no programa de elementos finitos Ansys [12] utilizando elementos tipo casca com quatro nós, SHELL181, existente na biblioteca de elementos do referido programa. Este elemento possui seis graus de liberdade por nó a saber: translações x, y e z e rotações x, y e z. Este elemento considera esforços de flexão, corte e efeito de membrana. A malha adotada apresentada na Fig. 4 encontra-se mais refinada na região da solda onde concentrações de tensões são esperadas e o mais regular quanto possível com proporções adequadas entre elementos de forma a evitar problemas numéricos.

A solda foi considerada com elementos de casca conforme apresentado na Fig. 4(b) e Fig. 4(c), respectivamente. Esta solução já foi testada anteriormente para outros tipos de ligações tubulares sem prejuízo para o resultado final [13].

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.

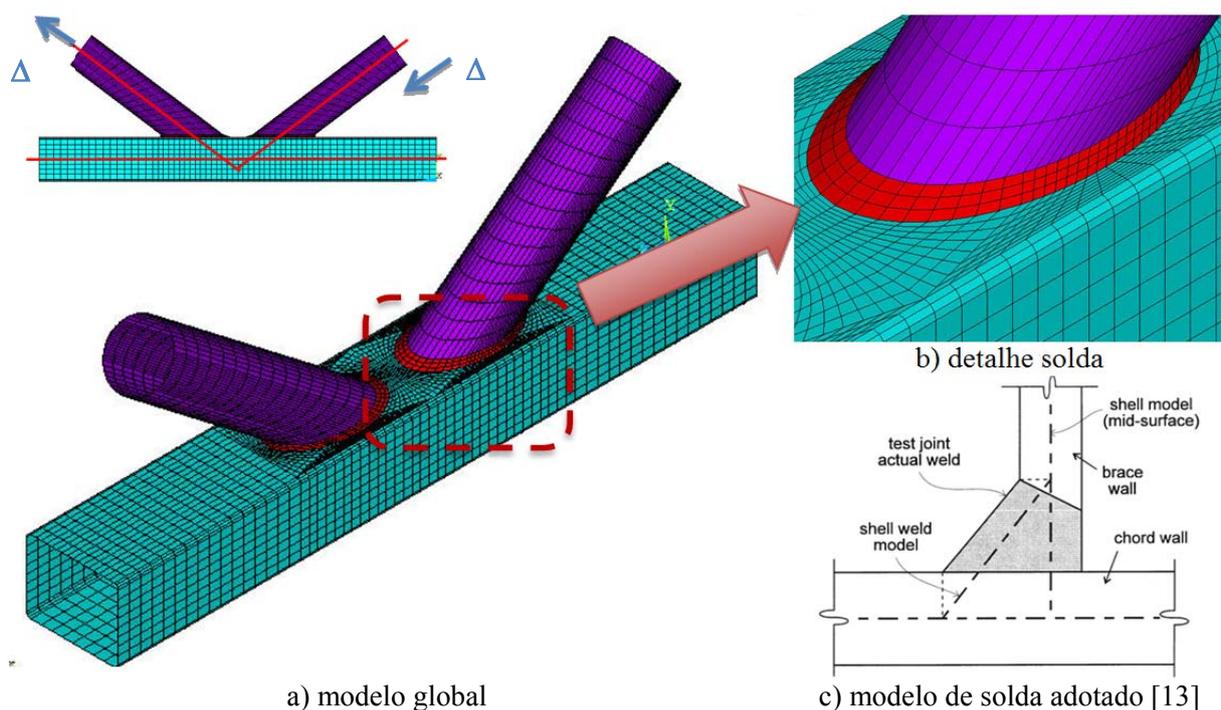


Figura 4. Malha de elementos finitos do modelo numérico.

6 CALIBRAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

De forma a exemplificar a aplicação do critério de deformação limite apresentado anteriormente, bem como a verificação efetuada em termos de resistência das ligações estudadas, considera-se a ligação constituída pelo banzo 110x60x4,8 e diagonais 48,3x3,7 com um ângulo de $47,7^\circ$ ensaiada experimentalmente [14]. De acordo com ensaios de tração de corpos-de-prova extraídos dos espécimes ensaiados, a tensão de cedência considerada para o banzo foi de 456 MPa para o banzo e 250 MPa para as diagonais. Para esta ligação, os valores de β e 2γ foram 0,44 e 11,45, respectivamente. Para esta ligação, o espaçamento horizontal entre as diagonais é igual a 32,0 mm correspondente a uma excentricidade de 23,47 mm.

Para validar a análise numérica desenvolvida neste trabalho, apresenta-se na Fig. 5, a distribuição de tensões de Von Mises em função da carga aplicada na diagonal tracionada para uma série de três ensaios com a mesma tipologia, ou seja, K01-B, K02B e K03-b, respectivamente. Pode-se verificar uma boa concordância entre os valores numéricos e os experimentais.

Desta forma, apresenta-se na Fig. 5, a curva carga *versus* deslocamento obtida numericamente para esta ligação utilizada na calibração. Neste gráfico, podem ser observados os limites de 1% e 3%, respectivamente, de acordo com o critério de deformação proposto por Lee *et al.* para atendimento dos estados limites último e de utilização. De acordo com a eq. (10), a carga

máxima a ser aplicada nas diagonais de forma a não provocar falha no banzo é de 115 kN, desconsiderando-se a presença de cargas axiais no banzo bem como o momento fletor gerado pela excentricidade “e” – ver Figura 2.

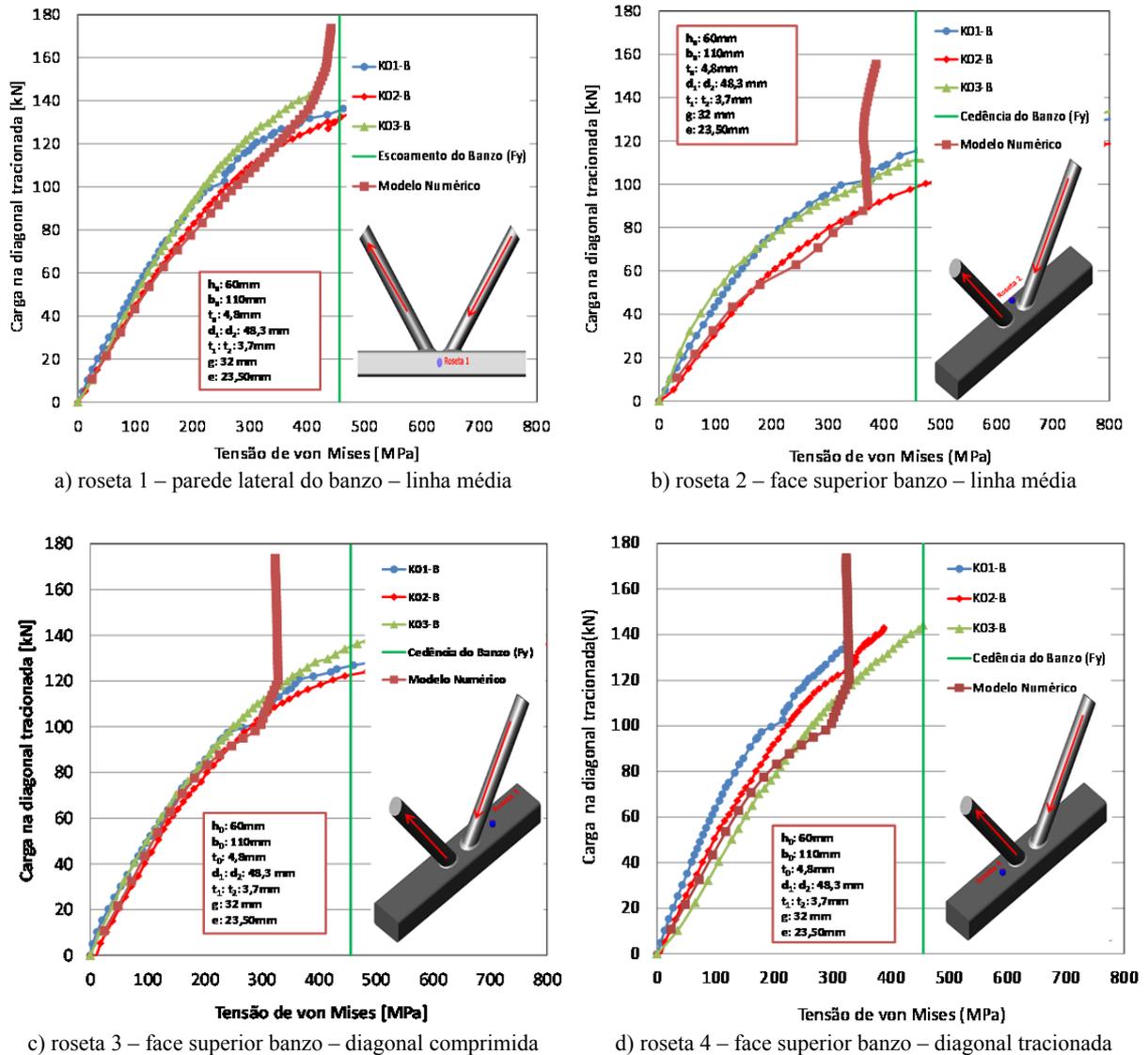


Figura 5. Distribuição de tensões de Von Mises – experimental *versus* numérico.

Todavia, ao considerar-se a excentricidade, tem-se um momento fletor atuante da face superior do banzo dado por esta carga projetada no eixo horizontal multiplicada pela excentricidade “e” acrescida da metade da altura do banzo resultando em 8,24 kN.m. E ainda, considerando-se o modelo estrutural utilizado no ensaio, gera-se um esforço normal no banzo, na região abaixo da diagonal comprimida, resultante do equilíbrio dos nós da treliça. Desta

forma, o esforço normal N_0 no banzo vale $-77,4$ kN. Com este esforço, considerando-se a resistência plástica do banzo de $657,1$ kN e o momento de plastificação de $12,5$ kN.m, obtém-se o parâmetro $n = 0,774$ que fornecerá um k_n igual a $0,59$ - ver eq. (10) a (12). Isto faz com que o esforço normal máximo permitido a ser aplicado nas diagonais de forma que não provoque plastificação na face superior do banzo seja igual a $87,78$ kN de acordo com o Eurocódigo 3 [2]. Todavia, aplicando-se as eq. (11) e (12) referentes às recomendações do CIDECT [3], considerando-se a presença de esforço normal no banzo, obtém-se uma resistência para a ligação, $N_1^* = 119,6$ kN. Como a razão $N_u/N_s = 1,3 < 1,5$, N_s controla o dimensionamento. Desta forma, aplicando-se o critério de deformação limite apresentado anteriormente, a ligação teria uma resistência $N_s = 89,9$ kN. Desta forma, o dimensionamento feito pelo Eurocódigo 3 apresenta-se a favor da segurança enquanto que o dimensionamento pelo CIDECT fornece um dimensionamento contra a segurança – ver Fig. 5.

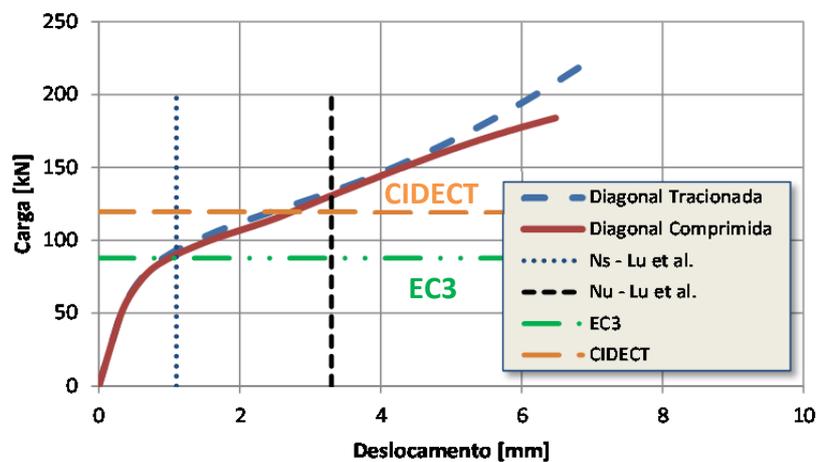


Figura 6. Curva carga *versus* deslocamento – RHS 110x60x4,8 e CHS 48,3x3,7 ($\theta_1 = \theta_2 = 47,7^\circ$).

Conforme mencionado anteriormente, esta ligação tem o seu dimensionamento controlado pelo estado limite último de plastificação da face superior do banzo. De forma a evidenciar este facto, apresenta-se na Fig. 7, a distribuição de tensões de Von Mises para quatro níveis de carregamento obtidas através da análise numérica.

7 ANÁLISE PARAMÉTRICA

A análise paramétrica desenvolvida neste trabalho compreendeu a análise de 23 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 1, foram adotados cinco perfis diferentes para os banzos e quatro ou cinco diagonais diferentes, dependendo do caso. Os parâmetros geométricos foram verificados e atenderam as limitações impostas pelo Eurocódigo 3 e pelo CIDECT. Para a lei

constitutiva do material, considerou-se um comportamento bilinear elasto-plástico perfeito, sendo a tensão de cedência do banzo de 395MPa e das diagonais de 340MPa com módulo de elasticidade de 205000MPa. 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.

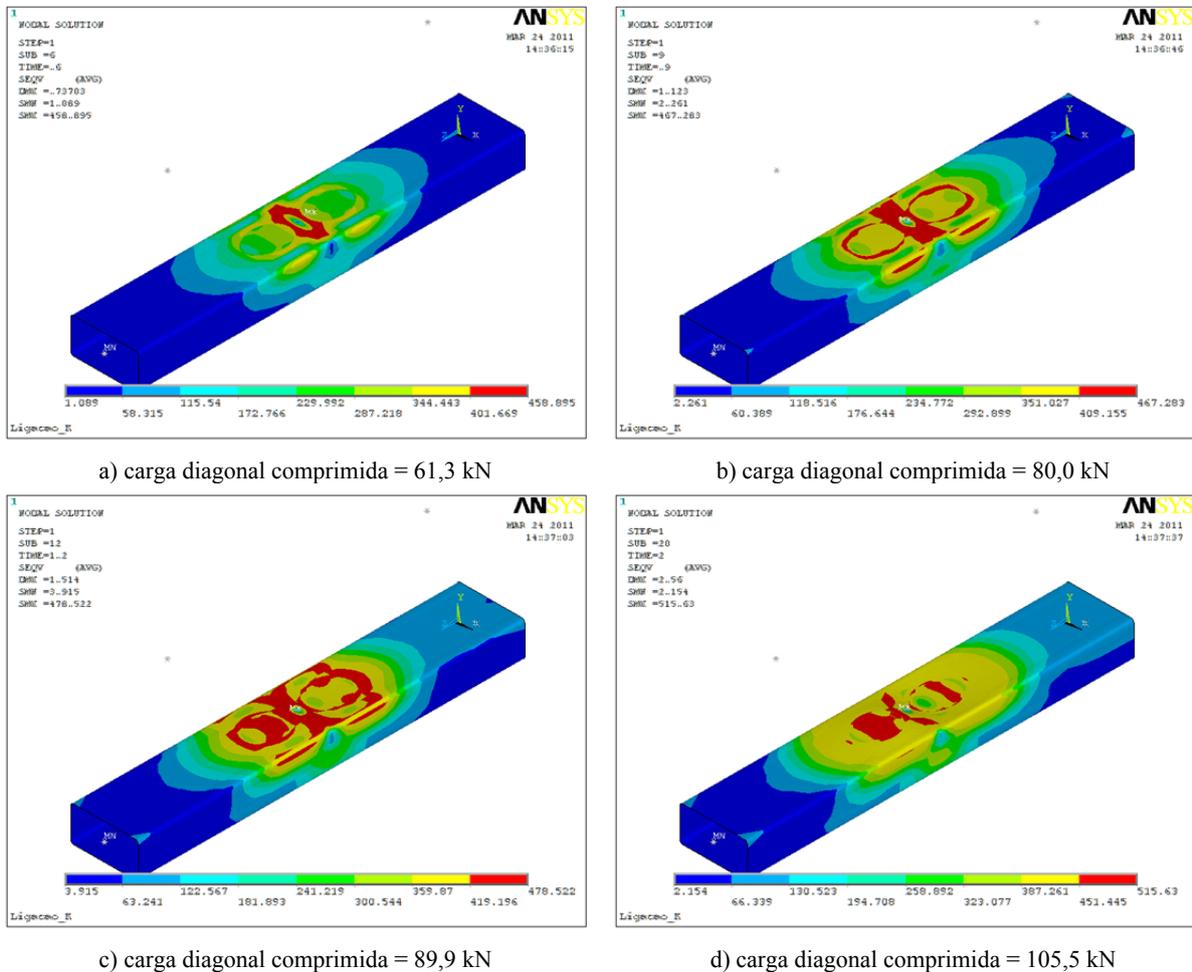


Figura 7. Distribuição de tensões de Von Mises – modelo numérico [em MPa]

Aplicando-se as equações de dimensionamento do Eurocódigo 3 e do CIDECT bem como o critério de deformação limite de $1\%b_0$ e $3\%b_0$, respectivamente, obtêm-se os resultados apresentados na Tabela 2. Nesta tabela, $N_{1,Rd}$ e N_{1}^* representam a resistência da ligação pelo Eurocódigo e pelo CIDECT, respectivamente; N_s e N_u representam 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 o dimensionamento de acordo com o Eurocódigo 3 fornece

valores sempre a favor da segurança caracterizados pela razão $N_{1,Rd}/N_{def} \leq 1,0$. Todavia, quando o dimensionamento da ligação é feito de acordo com as novas equações propostas pelo CIDECT, o dimensionamento apresenta-se contra a segurança tendo em vista que $N_{1^*}/N_{def} \geq 1,0$.

Banzo [RHS]					Diagonais [CHS]				$\beta = \frac{d_1}{b_0}$
b_0	h_0	t_0	b_0/t_0	h_0/t_0	d_1	t_1	d_1/t_1	$\theta_1 = \theta_2$	
130	100	4,8	27,08	20,83	60,3	3,9	15,46	37,5	0,46
					73	4,8	15,21	37,5	0,56
					88,9	4,8	18,52	37,5	0,68
					101,6	4,8	21,17	37,5	0,78
150	120	6,4	23,44	18,75	60,3	3,9	15,46	37,5	0,40
					73	4,8	15,21	37,5	0,49
					88,9	5,5	16,16	37,5	0,59
					101,6	6,4	15,88	37,5	0,68
170	130	6,4	26,56	20,31	114,3	6,4	17,86	37,5	0,76
					73	4,8	15,21	37,5	0,43
					88,9	5,5	16,16	37,5	0,52
					101,6	6,4	15,88	37,5	0,60
200	150	6,4	31,25	23,44	114,3	6,4	17,86	37,5	0,67
					88,9	5,5	16,16	37,5	0,44
					101,6	6,4	15,88	37,5	0,51
					141,3	6,6	21,41	37,5	0,71
240	200	7,1	33,80	28,17	101,6	6,4	15,88	37,5	0,42
					114,3	6,4	17,86	37,5	0,48
					141,3	6,6	21,41	37,5	0,59
280	240	8,2	34,15	29,27	114,3	6,4	17,86	37,5	0,41
					141,3	6,6	21,41	37,5	0,50
					168,3	6,4	26,30	37,5	0,60

Dimensões em [mm] e ângulos em [°]

Tabela 1. Modelos analisados de ligações tipo K entre RHS (banzo) e CHS (diagonais).

8 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 K entre perfis tubulares RHS e CHS, foram apresentadas as equações propostas pelo Eurocódigo 3 – Parte 1.8 e pelos manuais do CIDECT. 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 K entre perfis RHS (banzo) e CHS (diagonais).

h_0	b_0	t_0	d_1	t_1	β	γ	$N_{1,Rd}$	N_1^*	N_s	N_u	N_{def}	$N_{1,Rd}/N_{def}$	N_1^*/N_{def}
100	130	4.8	60.3	3.9	0.46	13.54	96.0	199.7	95.4	134.9	95.4	1.01	2.09
100	130	4.8	73.0	4.8	0.56	13.54	101.9	241.6	130.8	182.7	130.8	0.78	1.85
100	130	4.8	88.9	4.8	0.68	13.54	188.0	295.8	198.9	264.6	198.9	0.95	1.49
100	130	4.8	101.6	4.8	0.78	13.54	236.9	341.6	311.1	359.6	311.1	0.76	1.10
120	150	6.4	60.3	3.9	0.40	11.72	78.0	142.4	142.1	181.3	142.1	0.55	1.00
120	150	6.4	73.0	4.8	0.49	11.72	138.4	378.9	187.9	239.9	187.9	0.74	2.02
120	150	6.4	88.9	5.5	0.59	11.72	235.6	461.4	262.1	332.6	262.1	0.90	1.76
120	150	6.4	101.6	6.4	0.68	11.72	305.6	527.4	370.4	458.1	370.4	0.83	1.42
120	150	6.4	114.3	6.4	0.76	11.72	375.6	593.3	525.3	594.6	525.3	0.72	1.13
130	170	6.4	73.0	4.8	0.43	13.28	107.1	181.5	161.2	222.0	161.2	0.66	1.13
130	170	6.4	88.9	5.5	0.52	13.28	182.1	422.7	215.6	295.8	215.6	0.84	1.96
130	170	6.4	101.6	6.4	0.60	13.28	255.2	483.1	285.3	389.7	285.3	0.89	1.69
130	170	6.4	114.3	6.4	0.67	13.28	321.0	543.5	389.6	493.5	389.6	0.82	1.40
150	200	6.4	88.9	5.5	0.44	15.63	130.6	241.4	178.9	272.6	272.6	0.48	0.89
150	200	6.4	101.6	6.4	0.51	15.63	226.1	235.8	225.1	343.9	343.9	0.66	0.69
150	200	6.4	114.3	6.4	0.57	15.63	254.3	485.1	282.9	417.2	282.9	0.90	1.71
150	200	6.4	141.3	6.6	0.71	15.63	314.4	599.6	540.4	650.0	540.4	0.58	1.11
200	240	7.1	101.6	6.4	0.42	16.90	141.3	332.8	184.0	307.1	307.1	0.46	1.08
200	240	7.1	114.3	6.4	0.48	16.90	310.1	358.5	214.5	350.2	350.2	0.89	1.02
200	240	7.1	141.3	6.6	0.59	16.90	383.4	381.4	311.2	482.5	482.5	0.79	0.79
240	280	8.2	141.3	6.6	0.50	17.07	456.7	513.2	316.6	503.1	503.1	0.42	1.14
240	280	8.2	168.3	6.4	0.60	17.07	544.0	552.6	438.7	648.7	438.7	0.91	1.02
Dimensões em [mm] e resistências em [kN]													

Tabela 2. Análise paramétrica comparativa

O modelo numérico desenvolvido neste trabalho foi calibrado com resultados experimentais realizados por Mayor [14] apresentando uma boa concordância entre os mesmos. Após a calibração do modelo numérico, 23 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 Eurocódigo 3 fornece valores a favor da segurança enquanto que os resultados obtidos com as equações de dimensionamento do CIDECT forneceram valores contra a segurança. Vale ressaltar que a validação destes resultados foi efetuada considerando-se o critério de deformação limite de 1% e 3%, 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.

REFERÊNCIAS

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] J.A. Packer, J. Wardenier, X.-L. Zhao, G.J. van der Vegte and Y. Kurobane, Design Guide - For Rectangular Hollow Section (RHS) Joints Under Predominantly Static Loading - 2nd Edition, CIDECT, 2009.
- [4] N. Kostas, J.A. Packer, R.S. Puthli, "A finite element method based yield load determination procedure for hollow structural section connections", *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 59, pp 453-471, 2003.
- [5] X. Zhao, "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.
- [6] Cao, J.J., Packer, J.A., Young, G.J., Yield line analysis of RHS connections with axial loads, *J. Constructional Steel Research*, vol. 48, n° 1, pp 1-25, 1998.
- [7] Packer, J.A. Moment Connections between Rectangular Hollow Sections, *J. Constructional Steel Research* 25, pp 63-81, 1993.
- [8] 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, 1993.
- [9] Kostas, N., Packer, J.A., Puthli, R.S., A finite element method based yield load determination procedure for hollow structural section connections, *J. Constructional Steel Research*, vol. 59, n° 4, pp. 427-559, 2003.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Ansys 12.0 ®, ANSYS - Inc. Theory Reference, 2010.
- [13] M.M.K. Lee, "Strength, stress and fracture analyses of offshore tubular joints using finite elements", *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 51, pp 265-286, 1999.
- [14] 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.