COMPORTAMENTO DE LIGAÇÕES TIPO K ENTRE RHS E CHS SUJEITAS A ESFORÇOS AXIAIS NO BANZO

Marcela L. Santos^a, Luciano R. O. de Lima ^a, Arlene M. S. Freitas^b, Pedro C. G. da S. Vellasco^a e José G. S. da Silva^a

^a Departamento de Estruturas e Fundações - UERJ - Rio de Janeiro - Brasil Rua São Francisco Xavier, 524, sala 5016A, Maracanã, RJ

^b 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 perfís 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 para o uso de perfis tubulares, este trabalho apresenta uma análise de ligações tipo "K" com perfis tubulares retangulares (RHS) para o banzo e perfis circulares (CHS) as diagonais efetuada com base na norma europeia, Eurocode 3, e no CIDECT através de um modelo em elementos finitos desenvolvido no programa Ansys. Nestas análises verificou-se a influência do esforço axial atuante no banzo no comportamento global das ligações. 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 tri-linear de forma a exibir um comportamento elasto-plástico com 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 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, V&M (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 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, Eurocode (2003) que também aborda este tema com equações baseadas nos manuais da primeira versão do CIDECT, Packer *et al.* (1993b), 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 o banzo e perfis circulares (CHS) para as diagonais efetuado com base na norma europeia, Eurocódigo 3, e no CIDECT (Packer *et al.*, 2009) através de um modelo em elementos finitos desenvolvido no programa Ansys (2010). Esta ligação foi utilizada na construção da nova sede administrativa da Vallourec & Mannesmann situada em Belo Horizonte, Brasil e serviu como 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 onde verificou-se a influência do esforço axial atuante no banzo no comportamento global das ligações que atendem aos limites de geometria impostos pelo Eurocódigo 3 (2003) e pelo CIDECT (Packer *et al.*, 2009).

2 RECOMENDAÇÕES DO EUROCÓDIGO 3 – PARTE 1.8

Na parte 1.8 do Eurocódigo 3 (2003), referente ao dimensionamento de ligações entre elementos metálicos, encontra-se apresentada uma metodologia de dimensionamento específica para ligações entre perfis tubulares denominada 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 (banzo e diagonais), não descurando obviamente a sua capacidade de deformação. O Eurocódigo 3 – parte 1.8 (2003) considera o dimensionamento de ligações entre perfis tubulares retangulares (RHS) para os banzos e circulares (CHS) para as diagonais, mas impõe determinados limites de geometria que devem ser verificados e que são apresentados da Eq. (1) a Eq. (9) considerando-se as propriedade geométricas mostradas na Fig. 2.

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

- ruína plástica da face do banzo, Fig. 3(a);
- ruína da parede lateral do banzo por escoamento, esmagamento ou instabilidade devido carga axial de compressão no membro, Fig. 3(b);
- plastificação do banzo (ruptura plástica da seção transversal do banzo);
- ruína do banzo por cisalhamento, Fig. 3(c);
- ruína por punção da parede da seção do banzo, Fig. 3(d);

- ruína da diagonal com largura efetiva reduzida, Fig. 3(e);
- ruína por flambagem local da diagonal ou do banzo no ponto de ligação com o braço, Fig. 3(f).



Figura 2. Representação geométrica da Ligação tipo K entre RHS (banzo) e CHS (diagonais), Packer et al (2009).

A partir das definições de geometria apresentadas na Fig. 2, é possível definir os parâmetros geométricos que determinam a validação da ligação, isto é, os limites de geometria anteriormente mencionados:

$$0,25 \le \beta = d_i / b_0 \le 0,80 \tag{1}$$

$$d_i / b_0 \ge 0.1 + 0.01 b_0 / t_0 \tag{2}$$

$$2\gamma = d_i / t_i \le 50 \tag{3}$$

$$0,5 \le h_i / b_i \le 2,0 \tag{4}$$

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

$$g \ge t_1 + t_2 \tag{6}$$

$$2\gamma = h_0 / t_0 \le 40 \tag{7}$$

$$2\gamma = b_0 / t_0 \le 40 \tag{8}$$

$$se \, e \le 0,25h_0 \Longrightarrow M_0 = N_0 \left(e + \frac{h_0}{2} \right) \tag{9}$$



a) ruína plástica da face do banzo



c) ruína do banzo por cisalhamento



e) ruína da diagonal com largura efetiva reduzida



b) ruína da parede lateral do banzo



d) ruína por punção da parede do banzo



f) ruína por flambagem local

Figura 3. Modos de ruína para ligações tipo K, Eurocode (2003)

Entretanto, conforme recomendações do Eurocódigo 3 (2003), 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. (10), a seguir:

$$N_{1,Rd} = \frac{8.9\pi\gamma^{0.5}k_n f_{y0} t_0^2}{4\sin\theta_1} \left(\frac{d_1 + d_2}{2b_0}\right) / \gamma_{M5}$$
(10)

onde N_{1,Rd} é a resistência plástica da face superior da diagonal,

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

- k_n é tomado igual a 1,0 para cargas de tração no banzo e igual a 1,3 -0,4n/ β para cargas de compressão, sendo n dado pela Eq. (12),
- f_{y0} é a tensão de escoamento do banzo, para o presente trabalho tomado igual a $_{\ensuremath{395\text{MPa}}}$,
- d₁ e d₂ são os diâmetros das diagonais,

 γ_{M5} é um fator de segurança tomado igual a 1,0.

3 RECOMENDAÇÕES DO CIDECT – DESIGN GUIDE 3, PACKER ET AL (2009)

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 (Packer *et al.*, 2009), 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 $\beta e \gamma$) e de Q_f (influência do parâmetro n). Nestas equações, o parâmetro C_1 é tomado igual a 0.5-0.5 β ($C_1 \ge 0,10$) para banzos com tensões de compressão e igual a 1,0 para tensões de tração. Para diferenciar da formulação presente na 1^ª edição do CIDECT (Packer *et al.*, 1993b) e adotada em diversos regulamentos ao redor do mundo, as equações apresentadas a seguir, consideram pequenas diferenças nas notações utilizadas.

$$N_{i}^{*} = Q_{u}Q_{f} \frac{f_{y0}t_{0}^{2}}{\sin\theta_{1}} \qquad \text{como} \qquad Q_{u} = 14\beta\gamma^{0,3} \qquad \text{e} \qquad Q_{f} = (1 - |n|)^{C_{1}}$$
(11)

$$n = \frac{N_0}{N_{pl,0}} + \frac{M_0}{M_{pl,0}}$$
(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 (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 Choo et al. (2003) 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 o autor, se a razão N_u/N_s for maior que 1,5, o dimensionamento da ligação deve ser baseado no estado limite de serviço. Caso a razão N_u/N_s seja menor que 1,5, o estado limite último controla o dimensionamento. No caso das ligações onde a razão 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.

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 (2010) 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 (Lee, 1999).

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° ensaiada experimentalmente (Mayor, 2010). Ressalta-se que nesta ligação, não foi considerado esforço normal atuante no banzo. De acordo com ensaios de tração de corpos-de-prova extraídos dos espécimes ensaiados, a tensão de escoamento considerada foi de 456 MPa para o banzo. Para as diagonais, foi considerado o valor de 250 MPa, representando, neste caso, o valor nominal. Para esta ligação, os valores de β e 2 γ 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, K02-B e K03-B, respectivamente. Pode-se verificar uma boa concordância entre os valores numéricos e os experimentais.





a) roseta 1 – parede lateral do banzo – linha média

b) roseta 2 - face superior banzo - linha média



Figura 5. Distribuição de tensões de Von Mises - experimental versus numérico.

Desta forma, apresenta-se na Fig. 6, a curva carga *versus* deslocamento obtida numericamente para esta ligação a ser utilizada na calibração. Neste gráfico, podem ser observados os limites de 1% e 3%, respectivamente, de acordo com o critério de deformação limite proposto por Lee (1999). 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.

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 N₀ 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, obtémse o parâmetro n = 0,774 que fornecerá um k_n igual a 0,59 - ver Eq. (11) 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 (2003). Todavia, aplicando-se as eq. (11) e (12) referentes às recomendações do CIDECT (Packer et al. 2009), considerando-se a presença de esforço normal no banzo, obtém-se uma resistência para a ligação, N1* = 119,6 kN. Como a razão $N_u/N_s = 1,3 < 1,5$, N_u controla o dimensionamento. Desta forma, aplicando-se o critério de deformação limite apresentado anteriormente, a ligação teria uma resistência $N_u = 116,9$ kN. Consequentemente, o dimensionamento feito pelo Eurocódigo 3 (2003), apresenta-se antieconômico, enquanto que o dimensionamento pelo CIDECT fornece uma resistência para a ligação praticamente igual à obtida através do modelo numérico – ver Fig. 6.



Figura 6. Curva carga versus deslocamento – RHS 110x60x4,8 e CHS 48,3x3,7 (θ 1= θ 2=47,7°).

7 ANÁLISE PARAMÉTRICA

A análise paramétrica desenvolvida neste trabalho consistiu na análise de 14 modelos numéricos realizados sobre duas configurações de dimensões diferentes, selecionadas de acordo com a gama de perfis tubulares disponíveis comercialmente no Brasil através do catálogo da Vallourec & Mannesmann (2002), a partir de uma análise paramétrica anterior, (Santos *et al.*, 2011). Para os modelos selecionados e apresentados na Tabela 1, foram aplicados diferentes percentuais da carga de plastificação no banzo compreendendo os esforços sob a condição de tração e compressão. Os percentuais aplicados equivalem a 10%, 30% e 50% de N_{pl} considerando N_{0,Ed} de compressão e 10%, 30%, 50% e 70% para tração. Para percentuais acima dos considerados, a ligação apresenta uma configuração próxima a plastificação e, portanto, não é possível submetê-la a acréscimos significativos de condições solicitantes.

Para a lei constitutiva do material, considerou-se um comportamento bilinear elastoplástico perfeito, sendo a tensão de escoamento 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.

b ₀	h ₀	t_0	d ₁	t_1	$\theta_1 = \theta_2$	A_0	f _{y0}	N _{pl}
(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(°)	(mm^2)	(MPa)	(kŇ)
150	120	6,4	101,6	6,4	37,5	3292,16	395	1300,40
170	130	6,4	114,3	6,4	37,5	3676,16	395	1452,08

Tabela 1: Características dos Modelos Numéricos

A proposta da análise consistiu em aplicar, inicialmente, carregamentos axiais no banzo - a fim de simular uma condição real de uma estrutura, e posteriormente, deslocamentos nas diagonais. A opção de aplicar deslocamentos como condição inicial decorre da necessidade de obter os esforços resistentes, bem como compreender o comportamento da ligação a cada acréscimo de solicitação. Verificações anteriores apresentaram um retorno satisfatório para essa condição. Foram considerados deslocamentos nos eixos das diagonais visando gerar esforços de tração e compressão nas mesmas – ver Fig. 4.

Como resposta destas análises, apresentam-se nas Fig. 7 e Fig. 8, as seguintes famílias de curvas:

- a) curvas carga na diagonal comprimida versus deslocamento ligação com montante de 150x120x6,4 – Fig. 7(a);
- b) curvas carga na diagonal tracionada versus deslocamento ligação com montante de 150x120x6,4 – Fig. 7(b);
- c) curvas carga na diagonal comprimida versus deslocamento ligação com montante de 170x130x6,4 – Fig. 8(a);
- d) curvas carga na diagonal tracionada versus deslocamento ligação com montante de 170x130x6,4 – Fig. 8(b).



a) Diagonal comprimida

b) Diagonal tracionada

Figura 7. Curva carga versus deslocamento - análise numérica para ligação K1.



Figura 8. Curva carga versus deslocamento – análise numérica para ligação K2.

Aplicando-se as equações de dimensionamento do Eurocódigo 3 e do CIDECT bem como o critério de deformação limite de 1%b₀ e 3%b₀, respectivamente, obtêm-se os resultados apresentados na Tabela 2 e na Tabela 3. 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 .

N _{0,Ed}	N _{1,Rd}	N _{1*}	Ns	N _u	N _{def}	$N_{1,Rd}/N_{def}$	N _{1*} /N _{def}
0	363.03	373.00	370.40	458.10	458.10	0.79	0.81
-130.04	270.13	372.77	318.50	391.90	391.90	0.69	0.95
-390.12	244.29	372.77	314.00	388.90	388.90	0.63	0.96
-650.2	218.45	372.77	312.00	384.70	384.70	0.57	0.97
130.04	295.96	372.77	313.40	391.70	391.70	0.76	0.95
390.12	321.80	372.77	312.00	380.20	380.20	0.85	0.98
650.2	347.64	372.77	283.30	337.70	337.70	1.03	1.10
910.28	373.47	372.77	217.30	207.60	207.60	1.80	1.80

Tabela 2: Características dos Modelos Numéricos para Ligação K1(Resistência em kN)

Tabela 3: Características dos Modelos Numéricos para Ligação K2 (Resistência em kN)

N _{0,Ed}	N _{1,Rd}	N _{1*}	Ns	Nu	N _{def}	$N_{1,Rd}/N_{def}$	N1*/Ndef
0	520.55	515.05	389.60	493.50	493.50	1.05	1.04
-145.21	293.09	384.18	325.00	423.10	423.10	0.69	0.91
-435.62	264.97	384.18	322.70	415.50	415.50	0.64	0.92
-726.04	236.86	384.18	308.30	405.90	405.90	0.58	0.95
145.21	321.20	384.18	314.00	412.90	412.90	0.78	0.93
435.62	349.31	384.18	302.60	406.00	406.00	0.86	0.95
726.04	377.42	384.18	270.90	353.50	353.50	1.07	1.09
1016.46	405.53	235.77	230.60	234.70	234.70	1.73	1.00

Observando-se as curvas da Fig. 7 e da Fig. 8 e os valores apresentados na Tabela 2 e na Tabela 3, pode-se verificar que o dimensionamento de acordo com o Eurocódigo 3 apresenta-se antieconômico caracterizado pela razão $N_{1,Rd}/N_{def} < 1,0$. Todavia, o dimensionamento pelo CIDECT fornece uma resistência para a ligação praticamente igual a obtida através do modelo numérico de acordo com as novas equações propostas correspondente a valores de $N_{1*}/N_{def} \approx 1,0$.

Verificou-se ainda que, para os casos em que o banzo estava sujeito a um esforço de tração equivalente a 70% da carga de plastificação do banzo, o dimensionamento do Eurocódigo 3 mostrou-se a contra a segurança ($N_{1,Rd}/N_{def} > 1,0.$).

8 CONCLUSÕES

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).

O modelo numérico desenvolvido neste trabalho foi calibrado com resultados experimentais realizados por Mayor (2010) apresentando uma boa concordância entre os mesmos.

Os resultados obtidos evidenciaram que o dimensionamento realizado através das equações propostas no Eurocódigo 3 fornece valores antieconômicos, para a maioria dos casos, em comparação com os resultados obtidos com as equações de dimensionamento do CIDECT. 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 do banzo. Observou-se também a influência do esforço axial atuante no banzo no comportamento global das ligações. Considerando a condição de compressão do banzo, quanto menor o percentual do esforço de plastificação aplicado, maior é a capacidade de resistência da ligação.

Cabe esclarecer neste ponto que ambas as equações utilizadas para dimensionamento de ligações K entre perfis tubulares RHS e CHS (Eurocódigo 3 - Eq. 10 e CIDECT - Eq.11) são equações que consideram o mecanismo de formação de charneiras plásticas baseadas na geometria deformada da ligação. Isto é, ambas as equações consideram para o estado limite último de ruína por plastificação da face do banzo (Fig. 3a), a espessura do perfil elevada ao quadrado.

Outro parâmetro comum é a consideração dos esforços atuantes do banzo por meio de n, sendo que esta contribuição é tratada de maneira distinta nos dois regulamentos, ou seja, este parâmetro não é considerado para os casos onde se aplica esforço axial de tração no banzo, quando são usadas as equações de dimensionamento do Eurocódigo 3. Já a formulação do CIDECT contempla ambas as situações fornecendo valores mais coerentes quando comparados com os obtidos na análise numérica desenvolvida no presente trabalho.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem a UERJ, ao CNPq e a CAPES, pelo apoio financeiro. Agradecimentos também são devidos ao LABCIV - Laboratório de Computação da Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da UERJ pelo suporte computacional.

REFERENCES

Ansys 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 Xjoints - 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.