COMPORTAMENTO DE LIGAÇÕES TIPO T ENTRE PERFIS CHS SUJEITAS A ESFORÇOS AXIAIS NO BANZO

Aimée E. C. de Oliveira^a, David S. Nobre^a, Luciano R. O. de Lima^a, Pedro C. G. da S. Vellasco^a, 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

Palavras-chave: Ligações tubulares, Método dos elementos finitos, Análise não-linear, Eurocode 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 "T" com perfis tubulares circulares (CHS) para a corda e o montante efetuada com base na norma europeia, Eurocode 3, 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 nãolinearidade 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 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 o montante e o banzo.

1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos últimos anos, um grande aumento 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 mãode-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.

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.



c) Passarela - Rio de Janeiro

d) Estádio do Maracanã - Rio de Janeiro

Figura 1: Exemplos de estruturas com perfis tubulares no Brasil

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.

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 (Packer *et al.*, 1993), 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 equações baseadas nos manuais do CIDECT (Packer *et al.*, 1993) 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 T com perfis tubulares circulares (CHS) para a corda e para o montante efetuado com base na norma europeia, Eurocode 3 (2003) e no novo CIDECT (Packer et al., 2009) através de um modelo em elementos finitos desenvolvido no programa Ansys (2010). 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 (2003) e pelo CIDECT (Packer et al., 2009).

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 ligações assenta no pressuposto que estas singularidades podem ser consideraradas como rotuladas, e que como tal, a característica fundamental que garante a adequabilidade da ligaçõe, é a resistência dos seus elementos individuais (corda 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 circulas (CHS) para os banzos 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, 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 por punção da parede da seção da corda, Figura 3(c);
- ruína do braço com largura efetiva reduzida, Figura 3(d);



$$0,2 \le \beta = d_1 / d_0 \le 1$$
 (1)

$$2\gamma = d_0 / t_0 - \le 50$$
 (2)

$$10 \le \mu = d_1 / t_1 \ \le 50 \tag{3}$$

$$10 \le \mu = d_0 / t_0 \le 50 \tag{4}$$

Figura 2. Parâmetros geométricos - Ligação tipo T entre perfis CHS (banzo e montante).



a) ruína plástica da face do banzo



c) ruína por punção da parede do banzo



b) ruína da parede lateral do banzo



d) ruína da solda com largura efetiva reduzida

Figura 3: Modos de ruína para ligações tipo T (Eurocode 3, 2003)

Entretanto, conforme recomendações do Eurocode 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. (5), a seguir:

$$N_{1,Rd} = \frac{\gamma^{0.2} k_p f_{y0} t_0^2}{\sin \theta_1} (2,8 + 14,2\beta^2) / \gamma_{M5}$$
(5)

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_p é tomado igual a 1,0 para cargas de tração no banzo e tomado igual a 1+0,3n-0,3n² para cargas de compressão no banzo sendo n dado pela Eq. (7);

 f_{y0} é a tensão de escoamento igual a 250MPa;

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

3 RECOMENDAÇÕES DO CIDECT – DESIGN GUIDE 3 (Packet *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, 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 (Packer *et al.*, 2009) é expressa em termos de 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 0.45-0.25 β para banzos com tensões de compressão e igual a 0,20 para tensões de tração. Para diferenciar da formulação presente na 1^a edição do CIDECT (Packer *et al.*, 1993) e adotada em diversos regulamentos ao redor do mundo, as equações apresentadas a seguir, consideram pequenas diferenças nas notações utilizadas.

$$N_{i}^{*} = Q_{u}Q_{f} \frac{f_{y0}t_{0}^{2}}{\sin\theta_{1}} \quad \text{com} \quad Q_{u} = 2,6\gamma^{0,2}(1+6,8\beta^{2}) \quad \text{e} \quad Q_{f} = (1-|n|)^{C_{1}}$$
(6)

$$n = \frac{N_0}{N_{pl,0}} + \frac{M_0}{M_{pl,0}} \tag{7}$$

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 citado 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, $\Delta_u = 0,03d_0$, e o limite de serviço é dado por $\Delta_s = 0,01d_0$. 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 $\Delta_u = 0,03d_0$. De acordo com o autor, 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. A utilização deste critério será melhor detalhada em seções posteriores do presente trabalho.

5 DESCRIÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

O modelo numérico desenvolvido neste trabalho para caracterização de ligações tubulares tipo T entre banzos e montantes circulares (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 e apresentado na Fig. 3. 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. Esta solução já foi testada anteriormente para outros tipos de ligações tubulares sem prejuízo para o resultado final (Lee, 1999).

As propriedades do material utilizado foram: módulo de elasticidade E= 200 GPa, coeficiente do Poisson v=0,3, tensão de escoamento do aço de 355MPa e solda com tensão de escoamento de 600 MPa. Adotou-se um comportamento bi-linear elasto-plástico perfeito para os materiais. Para a geometria utilizada, efetuou-se uma análise não-linear considerando-se a não-linearidade geométrica e do material. Este tipo de análise possibilita obter uma resposta global da ligação efetuando uma comparação coerente entre os resultados obtidos através do Eurocode 3 (2003), o CIDECT (Packer *et al.*, 2009) e o numérico.



Figura 3: Geometria do Elemento SHELL181



Figura 4: Malha de elementos finitos com detalhe da solda

6 CALIBRAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO – CRITÉRIO DE DEFORMAÇÃO LIMITE E EQUAÇÕES DE DIMENSIONAMENTO

6.1 Ligação T somente com carga axial no montante

Apresenta-se na Fig. 5, a curva carga *versus* deslocamento obtida numericamente para a ligação T constituída de um banzo CHS 141,4x5,6 e um montante CHS 42,2x3,6, utilizada na calibração e verificação da aplicação do critério de deformação limite. Neste gráfico, podem ser observados os limites de $1\%d_0$ e $3\%d_0$, respectivamente, de acordo com o critério de deformação limite proposto por Lu *et al.* (1994) para atendimento dos estados limites último e de utilização. De acordo com a Eq. (5), a carga máxima a ser aplicada no montante de forma a não provocar falha no banzo é de 52,9 kN.



Figura 5: Gráfico carga versus deslocamento - CHS sem esforço normal no banzo

Aplicando-se as Eqs. (6) e (7) referentes às recomendações do CIDECT (Packer *et al.*, 2009), obtém-se uma resistência para a ligação, $N_1^* = 54.4$ kN. Como a razão $N_u/N_s = 2.7 > 1.5$, N_s controla o dimensionamento. Desta forma, aplicando-se o critério de deformação limite apresentado anteriormente, a ligação teria uma resistência de 25 kN. Observando-se os resultados obtidos, verifica-se que, comparando-se com os valores encontrados com as normas de dimensionamento, Eurocode 3 (2003) e CIDECT (Packer *et al.*, 2003), estas fornecem valores a favor da segurança, porém, anti-econômicos.

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 fato, apresenta-se na Fig. 6, a distribuição de tensões de Von Mises, para três níveis de carregamento, obtidas através da análise numérica.



Figura 6: Distribuição de tensões de Von Mises (em MPa) – ligação CHS_141,3x5,6 com 42,2x3,6

6.2 Ligação T com carga axial no montante e no banzo

De forma a avaliar o efeito do esforço normal atuante no banzo no comportamento global da ligação, apresenta-se na segunda parte deste artigo, o modelo onde foi considerado um nível de esforço normal aplicado no banzo equivalente a 80% da resistência plástica do banzo, ou seja, 80% de N_{pl} =7632,5 kN. Debe-se ressaltar que neste caso, primeiro aplicou-se o esforço normal no banzo para gerar um estado de carregamento inicial e depois, aplicou-se a carga de tração no montante. Desta forma, apresenta-se na Fig. 7, a curva carga *versus* deslocamento da ligação em estudo com a indicação dos valores de resistência da mesma obtidos com base nas equações preconizadas pelo Eurocode 3 (2003), pelo CIDECT (Packer *et al.*, 2009) e pelo critério de deformação limite (Lu *et al.*, 1994).



Figura 7: Gráfico carga versus deslocamento – CHS com esforço normal no banzo (+80%N_{pl})

De acordo com o observado na Fig. 7, foram obtidos os seguintes valores para a resistência da ligação: $N_u = 1148,73$ kN, $N_s = 918,908$ kN, $N_{I,Rd} = 1885,97$ kN e N₁^{*} = 1193,63 kN. Como $N_u/N_s = 1,25$, verifica-se que N_u controla o valor de resistência da ligação utilizando-se o critério de deformação limite. Desta forma, a resistência da ligação obtida na análise numérica vale $N_u = 1148,73$ kN. Comparando-se este valor com os obtidos pelo Eurocode 3 e pelo CIDECT, pode-se concluir que tanto o Eurocode 3 quanto o CIDECT fornecem valores superiores aos obtidos através da análise numérica realizada neste trabalho, utilizando-se o criterio de deformação limite. É importante ressaltar que a grande diferença encontrada para o valor do Eurocode 3 ocorreu tendo em vista que o fator k_p apresentado na Eq. (5) não considera diminuição da resistência da ligação para esforço normal de tração aplicado no banzo. Já na Eq. (6) do CIDECT, esforços normais de tração aplicados no banzo fazem com que a resistência da ligação seja minorada. Maiores detalhes sobre esta análise serão apresentados no ítem da análise paramétrica desenvolvida no presente trabalho.

Novamente, de forma a evidenciar que o estado limite último que controla o dimensionamento desta ligação é a plastificação da parte superior do banzo, apresenta-se na Fig. 8, a evolução das tensões de *Von Mises* para três níveis de carregamento. Observou-se então, a plastificação da parte superior do banzo ao redor da solda, sendo este o estado limite último que controla o dimensionamento desta ligação.





b) carga aplicada: 1165,0 kN



c) carga aplicada: 1230,0 kN

Figura 8: Distribuição de tensões de Von Mises (em MPa) - ligação CHS_298,5x25 com 114,3x16

7 ANÁLISE PARAMÉTRICA

Foram desenvolvidas duas análises paramétricas neste trabalho. A primeira análise compreendeu uma série de 20 modelos buscando uma maior abrangência de acordo com a gama de perfis tubulares disponíveis comercialmente no Brasil através do catálogo da

Vallourec & Mannesmann (2002). Utilizaram-se três perfis para o banzo, que são: perfil com seção circular com diâmetro de 141,3mm e espessura de 5,6 mm; perfil com diâmetro de 219,7 mm e espessura de 7,9mm; e por último, perfil com diâmetro de 273mm e espessura de 7,8mm. Os perfis utilizados para o montante foram escolhidos de forma que não violassem os limites de geometria para esta ligação de acordo com o Eurocode 3 (2003) e o CIDECT (Packer *et al.*,2009) apresentados na Fig. 2 anteriormente. Todos os perfis que atenderam a estas limitações são apresentados na Tab. 1.

Banzo			Montante		0	N _{L,Rd}	N_I^*	N _u	N_s	N/ /N	N		NT */NT	
d_0	t_0	γ	d_I	t_I	γ	р	(EC3)	(CIDECT)	ANSYS		IN_u/IN_s	IV	/V _{1,Rd} //V	N ₁ */N
141,3	5,6	12,6	42,2	3,6	5,9	0,30	52,9	54,4	61,0	23,0	2,65	23.0	0.87	0.89
			48,3	3,7	6,5	0,34	58,0	60,7	62,0	23,0	2,70	23.0	0.94	0.98
			60,3	3,6	8,4	0,43	70,1	75,8	68,0	25,0	2,72	25.0	1.03	1.11
			73,0	4,0	9,1	0,52	85,8	95,3	71,0	26,0	2,73	26.0	1.21	1.34
219,7	7,9	13,9	48,3	3,7	6,5	0,22	92,1	91,2	138,0	92,0	1,50	92.0	0.67	0.66
			60,3	3,6	8,4	0,27	102,2	103,9	163,8	98,8	1,66	98.8	0.62	0.63
			73,0	4,0	9,1	0,33	115,4	120,2	195,0	110,0	1,77	110.0	0.59	0.62
			88,9	4,4	10,1	0,40	135,4	145,1	217,5	122,5	1,78	122.5	0.62	0.67
			101,6	4,0	12,7	0,46	154,2	168,5	232,0	130,0	1,78	130.0	0.66	0.73
			114,3	4,0	14,3	0,52	175,5	195,1	250,0	140,0	1,79	140.0	0.70	0.78
			141,3	5,6	12,6	0,64	229,1	261,8	285,0	162,5	1,75	162.5	0.80	0.92
			168,3	4,8	17,5	0,77	294,1	342,7	180,0	295,0	0,61	180.0	1.00	1.16
273,0	7,8	17,5	60,3	3,6	8,4	0,22	94,2	93,3	163,5	117,0	1,40	163.5	0.81	0.80
			73,0	4,0	9,1	0,27	102,9	104,2	210,0	131,3	1,60	131.3	0.49	0.50
			88,9	4,4	10,1	0,33	116,1	120,6	243,0	147,0	1,65	147.0	0.48	0.50
			101,6	4,0	12,7	0,37	128,5	136,1	262,5	160,0	1,64	160.0	0.49	0.52
			114,3	4,0	14,3	0,42	142,6	153,7	285,0	175,0	1,63	175.0	0.50	0.54
			141,3	5,6	12,6	0,52	178,1	197,8	335,0	210,0	1,60	210.0	0.53	0.59
			168,3	4,8	17,5	0,62	221,0	251,3	390,0	245,0	1,59	245.0	0.57	0.64
			219,7	7,9	13,9	0,80	322,1	377,1	472,5	340,0	1,39	472.5	0.95	1.11

Tabela 1: Modelos analisados de ligações tipo T entre banzos e montantes CHS - 1ª série

Aplicando-se as equações de dimensionamento do Eurocode 3 (2003) e do CIDECT (Packer *et al.*,2009) bem como o critério de deformação limite de 1%d₀ e 3%d₀, respectivamente, obtêm-se os resultados apresentados na Tab. 1 e na Tab. 2, respectivamente. Nestas tabelas, $N_{1,Rd}$ e N_1^* representam a resistência da ligação pelo Eurocode 3 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 (Lu *et al*, 1994); N a resistência adotada de acordo com a razão N_u/N_s . Observando-se os valores obtidos para a primeira série, Tab. 1, pode-se verificar que o dimensionamento de acordo com

o Eurocode 3 (2003) fornece valores a favor da segurança para a maioria dos casos estudados, nomeadamente, 95% destes, caracterizados pela razão $N_{1,Rd}/N \leq 1,0$. Já quando o dimensionamento da ligação é feito de acordo com as novas equações propostas pelo CIDECT (Packer *et al.*,2009), o dimensionamento apresenta-se contra a segurança em 20% dos casos, tendo em vista valores de $N_1^*/N \geq 1,0$.

A segunda análise considerou escolher uma ligação analisada na primeira série variando-se o esforço normal atuante no banzo e cargas de compressão ou tração no montante. Nesta segunda análise, escolheu-se a ligação constituída pelo banzo CHS 298,5x25 e pelo montante CHS 114,3x16. As diversas combinações para estes casos são apresentadas na Tab. 2.

N_{pl}	P _{montante}	N_{LRd}	N_I^*	N_u	N_s	N _u /N _s	Ν	$N_{I,Rd}/N$	N ₁ */N
(LS1)	(LS2)	(EC3)	(CIDECT)	AN	SYS				
0	Tração	1885,97	1646,89	1696,53	1704,53	1,00	1704,53	1,11	0,97
+10%	Tração	1885,97	1612,55	1708,63	1635,89	1,04	1635,89	1,15	0,99
-10%	Tração	1823,73	1586,55	1709,11	1656,95	1,03	1656,95	1,10	0,96
+40%	Tração	1885,97	1486,94	1701,35	1502,19	1,13	1502,19	1,26	0,99
-40%	Tração	1569,13	1374,26	1709,31	1661,00	1,03	1661,00	0,94	0,83
+60%	Tração	1885,97	1371,12	1630,63	1288,01	1,27	1288,01	1,46	1,06
-60%	Tração	1342,81	1190,38	1692,60	1536,51	1,10	1536,51	0,87	0,77
+80%	Tração	1885,97	1193,63	1148,73	918,91	1,25	918,91	2,05	1,30
-80%	Tração	1071,23	931,19	856,07	845,00	1,01	845,00	1,27	1,10
0	Compressão	1885,97	1646,89	1770,00	1630,00	1,09	1630,00	1,16	1,01
+10%	Compressão	1885,97	1612,55	1780,00	1640,00	1,09	1640,00	1,15	0,98
-10%	Compressão	1823,73	1586,55	1760,00	1610,00	1,09	1610,00	1,13	0,99
+40%	Compressão	1885,97	1486,94	1780,00	1660,00	1,07	1660,00	1,14	0,90
-40%	Compressão	1569,13	1374,26	1680,00	1440,00	1,17	1440,00	1,09	0,95
+60%	Compressão	1885,97	1371,12	1710,00	1550,00	1,10	1550,00	1,22	0,88
-60%	Compressão	1342,81	1190,38	1410,00	1220,00	1,16	1220,00	1,10	0,98
+80%	Compressão	1885,97	1193,63	1020,00	896,00	1,14	896,00	2,10	1,33
-80%	Compressão	1071,23	931,19	891,00	837,00	1,06	837,00	1,28	1,11

Tabela 2: Modelos analisados de ligações tipo T entre banzos e montantes CHS - 2ª série

Na Tab. 2, pode-se observar que os níveis de esforço normal aplicados ao banzo no primeiro caso de carga (LS1) foram de 10%, 40%, 60% e 80%, tanto para compressão quanto para tração. E ainda, para cada combinação, considerou-se esforço atuante no montante, segundo caso de carga (LS2), de compressão e tração.

Observando-se a Tab. 2, pode-se verificar que na maioria dos casos, tanto para os valores obtidos pelo Eurocode 3 quanto pelo CIDECT, as razões $N_{1,Rd}/N e N_1^*/N$ alcançaram valores maiores do que 1,0, representado um dimensionamento que precisa ser verificado com mais detalhes.

A Fig. 9 apresenta as curvas cargas *versus* deslocamentos dos nove casos analisados para a aplicação de uma carga de tração no montante. Já a Figura 10 apresenta as curvas cargas *versus* deslocamentos dos nove casos analisados para a aplicação de uma carga de compressão no montante. Mais uma vez, ressalta-se que nestes modelos, variou-se o nível de esforço axial aplicado ao banzo tanto para valores de compressão quanto de tração.

Para os casos onde foi aplicada carga de tração no montante, verifica-se que somente a partir de um esforço normal no banzo equivalente a +60%N_{pl}, ocorre uma perda de resistência significativa da ligação conforme pode ser observado na Fig. 9 Como era de se esperar, os valores mais baixos de resistência da ligação foram obtidos com níveis de 80%N_{pl} de esforço normal atuante no banzo.

Observando-se a Fig. 10, pode-se concluir que para os casos onde foi aplicada carga de compressão no montante, para os casos de esforço normal atuante no banzo superiores a $60\%_{pl}$, ocorreu uma diminuição significativa na resistência da ligação, diminuição esta mais acentuada do que os casos onde foi aplicada carga de tração no montante.



Figura 9: Curvas carga x deslocamento - esforço axial no banzo e carga de tração no montante

De acordo com as Figs. 11 e 12 pode-se verificar que ocorreu uma diminuição na resistência da ligação tanto para cargas de tração como para cargas de compressão aplicadas no montante. Com base nos gráficos pode-se perceber que para uma resistência de $80\%N_{pl}$ já ocorreu a plastificação quase que total da ligação e este tipo de análise não é recomendado pois fica fora da segurança para a análise feita pelo Eurocode 3.



Figura 10: Curvas carga x deslocamento - esforço axial no banzo e carga de compressão no montante



Figura 11: Comparação de resistências - esforço axial no banzo e carga de tração no montante

As diferenças encontradas entre o dimensionamento feito pelos dois regulamentos utilizados devem-se ao fato de que o Eurocode 3 não considera o efeito de esforços axiais de tração aplicados no banzo através do fator k_p presente na Eq. (5). Isto fica claramente evidenciado na observação das curvas em azul nas Figs. 11 e 12. Já as curvas em magenta, que fornecem os valores obtidos através das equações de dimensionamento do CIDECT que levam em consideração o esforço axial aplicado no banzo tanto para compressão quanto para tração, fornecem valores mais coerentes quando comparados com os obtidos através da análise numérica desenvolvida no presente trabalho.



Figura 12: Comparação de resistências - esforço axial no banzo e carga de compressão no montante

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 T entre perfis tubulares CHS, foram apresentadas as equações propostas pelo Eurocode 3 – Parte 1.8 (2003) e pelos manuais do CIDECT (Packer *et al.*, 2009). Levando-se em consideração que se encontra em desenvolvimento no Brasil, uma norma para perfis tubulares e suas respectivas ligações, este trabalho teve como principal objetivo, apresentar um estudo do comportamento de uma ligação T entre perfis tubulares CHS.

Após a calibração do modelo numérico, 22 ligações foram analisadas além da análise de esforços de tração e compressão aplicados no banzo e no montante de forma a cobrir a gama

de perfis CHS disponibilizados pela Vallourec&Mannesmann no Brasil (2002).

Observando-se os valores obtidos para a primeira série onde não foi considerado esforço axial aplicado no banzo, pode-se verificar que o dimensionamento de acordo com o Eurocode 3 (2003) fornece valores a favor da segurança para a maioria dos casos estudados, nomeadamente, 95% destes, caracterizados pela razão $N_{1,Rd}/N \leq 1,0$. Já quando o dimensionamento da ligação é feito de acordo com as novas equações propostas pelo CIDECT (Packer *et al.*,2009), o dimensionamento apresenta-se contra a segurança em 20% dos casos, tendo em vista valores de $N_1*/N \geq 1,0$.

Vale ressaltar que a validação destes resultados foi efetuada considerando-se o critério de deformação limite de $1\%d_0$ e $3\%d_0$, respectivamente, para deslocamentos para fora do plano da face superior da corda.

Para a segunda série considerada no presente trabalho onde aplicou-se esforço axial no banzo, verificou-se que a consideração destes esforços afetam diretamente o comportamento global da ligação, bem como a resistência das mesmas no que diz respeito, o estado limite de plastificação da face superior do banzo. Nestas análises, pode-se verificar que ocorreu uma diminuição na resistência da ligação tanto para cargas de tração como para cargas de compressão aplicadas no montante.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem a UERJ, a FAPERJ, 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.

REFERÊNCIAS

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, JCSR, 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, JCSR, 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, ECCS, Brussels, 2003.
- Kosteski, N., Packer, J. A., Puthli, R.S., "A finite element method based yield load determination procedure for hollow structural section connections", J. of Constructional Steel Research, vol. 59, pp 453-471, 2003.
- Kosteski, 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.
- 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.

- Packer, J.A. Moment Connections between Rectangular Hollow Sections, J.Constructional Steel Research 25, pp 63-81, 1993.
- 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.
- Packer, J.A., Wardenier, J., Zhao, X.-L., van der Vegte, G.J. and Kurobane, Y., Design Guide - For Rectangular Hollow Section (RHS) Joints Under Predominantly Static Loading - 2nd Edition, CIDECT, 2009.
- 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.