

## COMPORTAMENTO DE LIGAÇÕES TIPO T ENTRE RHS E CHS

Gisele R. Affonso<sup>a</sup>, Luciano R. O. deLima<sup>a</sup>, Arlene M. S. Freitas<sup>b</sup>  
Pedro C. G. da S. Vellasco<sup>a</sup> e José G. S. da Silva<sup>a</sup>

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

<sup>b</sup> *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, Eurocode 3, CIDECT.

**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 “T” com perfis tubulares retangulares (RHS) para a corda e perfis circulares (CHS) para o montante efetuado com base na norma europeia, Eurocode 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 o montante circular 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 à 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 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 (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.

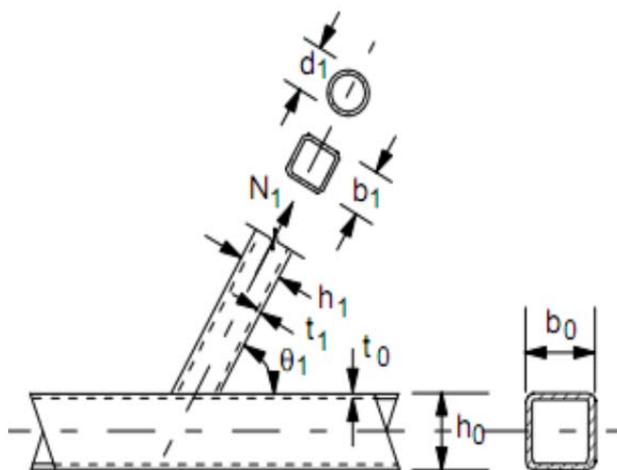
Sendo assim, este artigo apresenta um estudo numérico de ligações tipo T com perfis tubulares retangulares (RHS) para a corda e circulares (CHS) para o montante efetuado com base na norma europeia, Eurocode 3 (2003) e no novo CIDECT (Packer *et al.*, 2009) através de um modelo em elementos finitos desenvolvido no programa Ansys (2010). Nestas ligações, considerou-se a aplicação de esforços de tração no montante sem atuação de esforço normal no banzo. 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 (Eurocode 3, 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 consideradas 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 Eurocode 3 – parte 1.8 (2003) considera o dimensionamento de ligações entre perfis tubulares retangulares (RHS) para os banzos e circulares (CHS) para os 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);



$$0,25 \leq \beta = d_i / b_o \leq 0,85 \text{ (EC3)} \quad (1)$$

$$0,25 \leq \beta = d_i / b_o \leq 0,80 \text{ (CIDECT)} \quad (2)$$

$$d_i / b_o \geq 0,1 + 0,01 b_o / t_o \text{ (CIDECT)} \quad (3)$$

$$2\gamma = d_i / t_i \leq 50 \text{ (CIDECT)} \quad (4)$$

$$0,5 \leq h_o / b_o \leq 2,0 \text{ (EC3)} \quad (5)$$

$$0,5 \leq h_i / b_i \leq 2,0 \text{ (EC3)} \quad (6)$$

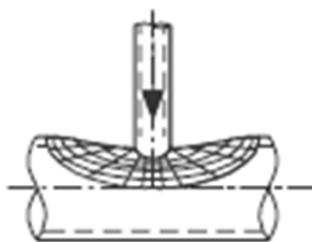
$$2\gamma = h_o / t_o \leq 40 \text{ (CIDECT)} \quad (7)$$

$$2\gamma = b_o / t_o \leq 40 \text{ (CIDECT)} \quad (8)$$

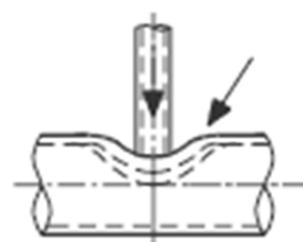
$$b_o / t_o \leq 35 \text{ (EC3)} \quad (9)$$

$$b_i / t_i \leq 35 \text{ (EC3)} \quad (10)$$

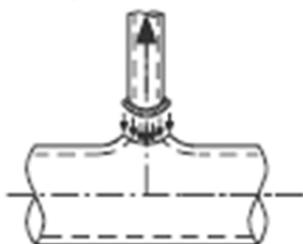
Figura 2. Parâmetros geométricos – Ligação tipo T entre RHS (banzo) e CHS (montantes)



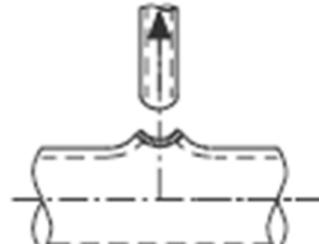
a) ruína plástica da face do banzo



b) ruína da parede lateral do banzo



c) ruína por punção da parede da seção da corda



d) ruína do braço com largura efetiva reduzida

Figura 3. Modos de ruína para ligações tipo T

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. (11), a seguir:

$$N_{1,Rd} = \left( \frac{k_n f_{y0} t_o^2}{(1-\beta) \sin \theta_1} \left( \frac{2\beta}{\sin \theta_1} + 4\sqrt{1-\beta} \right) / \gamma_{M5} \right) \times \frac{\pi}{4} \quad (11)$$

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

$k_n$  é tomado igual a 1,0 para cargas de tração no banzo e igual a  $1,3-0,4n/\beta$  para

cargas de compressão sendo  $n$  dado pela Eq. (13);

$f_{y0}$  é a tensão de escoamento igual a 456MPa (neste caso, deve-se multiplicar a resistência da ligação por 0,90);

$\beta$  é igual a  $d_i/b_0$ ;

$\gamma_{M5}$  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, 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  $0.5-0.5\beta$  ( $C_1 \geq 0,10$ ) 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.

$$N_i^* = \left( Q_u Q_f \frac{f_{y0} t_0^2}{\sin \theta_1} \right) \times \frac{\pi}{4} \quad \text{com} \quad Q_u = \frac{2\beta}{(1-\beta)\sin \theta_1} + \frac{4}{\sqrt{1-\beta}} \quad \text{e} \quad Q_f = (1-|n|)^{C_1} \quad (12)$$

$$n = \frac{N_0}{N_{pl,0}} + \frac{M_0}{M_{pl,0}} \quad (13)$$

### 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 montante-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 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.

## 5 DESCRIÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

O modelo numérico proposto neste trabalho para caracterização de ligações tubulares tipo T entre banzos retangulares (RHS) e montante circular (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.

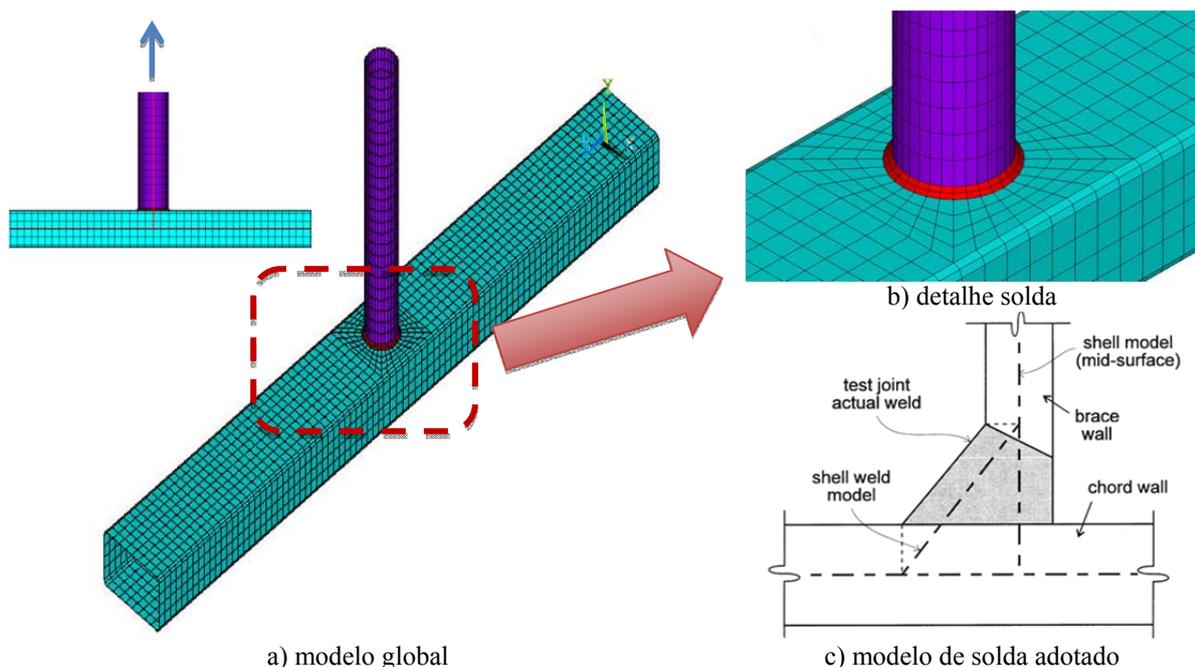


Figura 1. Malha de elementos finitos do modelo numérico.

As propriedades do material utilizado foram: módulo de elasticidade  $E= 205\text{GPa}$ , coeficiente do Poisson  $\nu=0,3$ , tensão de escoamento do aço do perfil do banzo de  $456\text{MPa}$  para o montante de  $250\text{MPa}$  e solda com tensão de escoamento de  $600\text{MPa}$ . Adotou-se um comportamento bilinear elasto-plástico perfeito para os materiais. Para a geometria utilizada, efetuou-se uma análise não-linear completa 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 no que diz respeito ao Estado Limite Último (ELU) da ligação.

## 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  $110\times 60\times 4,8$  e montante  $38,1\times 3,2$  ensaiada experimentalmente (Mendes, 2008). Entretanto, ressalta-se que nesta ligação, não foi considerado esforço normal atuante no banzo e o esforço aplicado no montante foi de compressão. De acordo com ensaios de tração de corpos-de-prova extraídos dos espécimes ensaiados, a tensão de escoamento considerada foi de  $456\text{MPa}$  para o banzo. Para o montante, foi considerado o valor de  $250\text{MPa}$ , representando, neste caso, o valor nominal. Para esta ligação, os valores de  $\beta$  e  $\gamma$  foram  $0,35$  e  $11,90$ , respectivamente.

Desta forma, apresenta-se na Fig. 5, a comparação entre as curvas carga *versus* deslocamento obtidas no ensaio de Mendes (2008), bem como a obtida numericamente além da representação dos limites referentes ao critério de deformação limite.

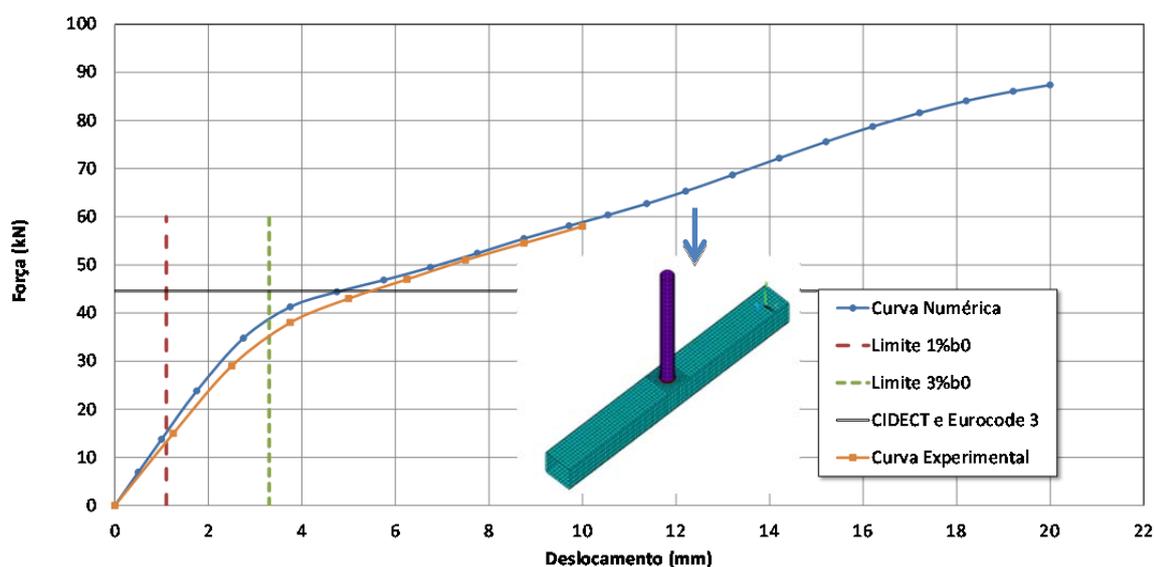


Figura 5. Malha de elementos finitos do modelo numérico.

Aplicando-se as eq. (11) a (13) referentes às recomendações do Eurocode 3 (2003) e do CIDECT (Packer et al. 2009), respectivamente, obtém-se uma resistência para a ligação,  $N_{l,Rd}= 44,61\text{kN}$  e  $N_I^*= 44,61\text{kN}$ . Além disso, pelo critério de deformação limite, obtém-se  $N_s=15,11\text{kN}$  e  $N_u= 38,34\text{ kN}$ . Como a razão  $N_u/N_s = 2,5 > 1,5$ ,  $N_s$  controla o dimensionamento. Desta forma, aplicando-se o critério de deformação limite apresentado anteriormente, a ligação teria uma resistência  $N_{def} = 15,11\text{kN}$ . Sendo assim, tanto o dimensionamento feito pelo Eurocode 3 (2003), bem como o dimensionamento pelo CIDECT (Packer et al. 2009)

fornecem um dimensionamento contra a segurança – ver Fig. 5.

## 7 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 (2002). Conforme apresentado na Tab. 1, foram adotados seis perfis diferentes para os banzos e três ou quatro montante diferentes, dependendo do caso. Os parâmetros geométricos foram verificados e atenderam às limitações impostas pelo Eurocode 3 (2003) e pelo CIDECT (Packer *et al.*, 2009). Para esta análise paramétrica, a lei constitutiva do material foi considerada com um comportamento bilinearelasto-plástico perfeito, sendo a tensão de escoamento do banzo de 456MPa e do montante de 250MPa 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.

Tabela 1. Modelos analisados de ligações tipo T entre RHS (banzo) e CHS (montante).

Banzo [RHS]					Montante [CHS]				$\beta = \frac{d_1}{b_0}$
$b_0$	$h_0$	$t_0$	$b_0/t_0$	$h_0/t_0$	$d_1$	$t_1$	$d_1/t_1$	$\theta_1$	
110	60	4,8	22,92	12,50	55,7	3,7	15,05	90	0,51
					60,3	3,9	15,46	90	0,55
					73	4,8	15,21	90	0,66
150	120	6,4	23,44	18,75	73	4,8	15,21	90	0,49
					88,9	5,5	16,16	90	0,59
170	130	6,4	26,56	20,31	73	4,8	15,21	90	0,43
					88,9	5,5	16,16	90	0,52
					101,6	6,4	15,88	90	0,60
200	150	6,4	31,25	23,44	88,9	5,5	16,16	90	0,44
					101,6	6,4	15,88	90	0,51
					114,3	6,4	17,86	90	0,57
240	200	7,1	33,80	28,17	101,6	6,4	15,88	90	0,42
					114,3	6,4	17,86	90	0,48
					141,3	6,6	21,41	90	0,59
280	240	8,2	34,15	29,27	114,3	6,4	17,86	90	0,41
					141,3	6,6	21,41	90	0,50
					168,3	6,4	26,30	90	0,60

Dimensões em [mm] e ângulos em [°]

Aplicando-se as equações de dimensionamento do Eurocode 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 Tab. 2. Nesta tabela,  $N_{1,Rd}$  e  $N_1^*$  representam a resistência da ligação pelo Eurocode 3 e pelo CIDECT, respectivamente;  $N_s$  e  $N_u$  representam as resistências referentes aos estados limites de utilização e 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 os dimensionamentos de acordo com o Eurocode 3 e o CIDECT fornecem valores contra a da segurança caracterizados pela razão  $N_{1,Rd}/N_{def} \geq 1,0$  e  $N_1^*/N_{def} \geq 1,0$ , respectivamente.

Todavia, Zhao (2000) avaliou que para os casos de ligações T entre RHS onde o critério de deformação limite estivesse sendo controlado pelo estado limite de serviço, ou seja,  $N_s$ , a

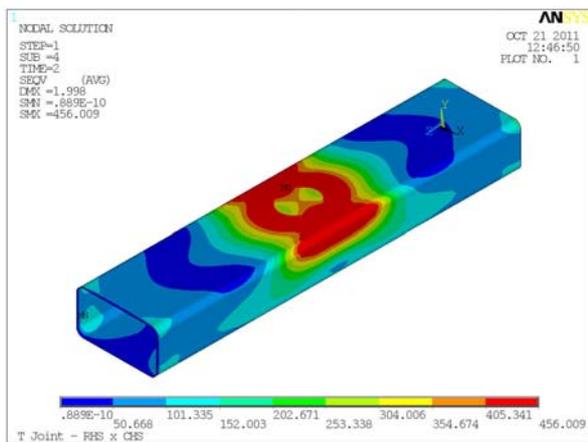
resistência seria sempre muito inferior a obtida através das equações de dimensionamento do Eurocode e do CIDECT, respetivamente. Desta forma, Zhao (2000) propõe que nestas situações, o valor de  $N_s$  seja multiplicado por 1,5. Após a realização desta consideração, obtém-se os valores apresentados na última coluna da Tab. 2 onde pode-se verificar que, com esta modificação, os valores encontrados estão mais compatíveis com os encontrados através da utilização das equações do Eurocode 3 e do CIDECT.

Tabela 2. Comparação de resultados – análise paramétrica

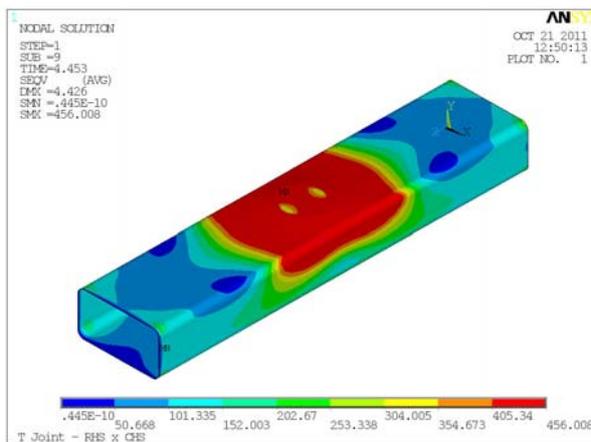
$b_0$	$h_0$	$t_0$	$d_i$	$t_i$	$N_{1,Rd}$	$N_1^*$	$N_s$	$N_u$	$N_{def}$	$(N_{1,Rd}; N_1^*) / N_{def}$	$(N_{1,Rd}; N_1^*) / (1.5N_{def})$
110	60	4,8	55,7	3,7	57,52	57,52	37,95	67,44	37,95	1,52	1,01
110	60	4,8	60,3	3,9	62,21	62,21	40,14	73,52	40,14	1,55	1,03
110	60	4,8	73	4,8	80,52	80,52	59,85	95,94	59,85	1,35	0,90
150	120	6,4	73	4,8	98,74	98,74	65,53	115,10	65,53	1,51	1,00
150	120	6,4	88,9	5,5	121,16	121,16	89,48	144,68	89,48	1,35	0,90
170	130	6,4	73	4,8	89,78	89,78	54,82	103,26	54,82	1,64	1,09
170	130	6,4	88,9	5,5	105,40	105,40	72,10	124,61	72,10	1,46	0,97
170	130	6,4	101,6	6,4	122,48	122,48	91,67	146,94	91,67	1,34	0,89
200	150	6,4	88,9	5,5	91,98	91,98	54,31	107,38	54,31	1,69	1,13
200	150	6,4	101,6	6,4	102,55	102,55	66,32	122,20	66,32	1,55	1,03
200	150	6,4	114,3	6,4	115,89	115,89	79,82	139,64	79,82	1,45	0,97
240	200	7,1	101,6	6,4	109,44	109,44	61,55	129,44	61,55	1,78	1,19
240	200	7,1	114,3	6,4	119,36	119,36	71,27	143,60	71,27	1,67	1,12
240	200	7,1	141,3	6,6	147,87	147,87	100,50	182,28	100,50	1,47	0,98
280	240	8,2	114,3	6,4	142,60	142,60	80,31	173,58	80,31	1,78	1,18
280	240	8,2	141,3	6,6	167,34	167,34	105,61	210,39	105,61	1,58	1,06
280	240	8,2	168,3	6,4	202,57	202,57	140,39	258,68	140,39	1,44	0,96

Conforme citado anteriormente, para a ligação T entre perfis retangulares (RHS) para o banzo e circular (CHS) para o montante, estudada neste trabalho, o estado limite último que controla o dimensionamento está associado à plastificação da face superior do banzo caracterizado pelas Eqs. (11) a (13). Dentro desta perspectiva, apresenta-se na Fig. 6, a distribuição de tensões de *Von Mises* para a ligação RHS110x60x4,8 com CHS55,7x3,7 para quatro níveis de carga aplicada. Pode-se verificar então, através da observação da Fig. 6 que realmente este estado limite último de plastificação da face superior do banzo está controlando o dimensionamento da ligação.

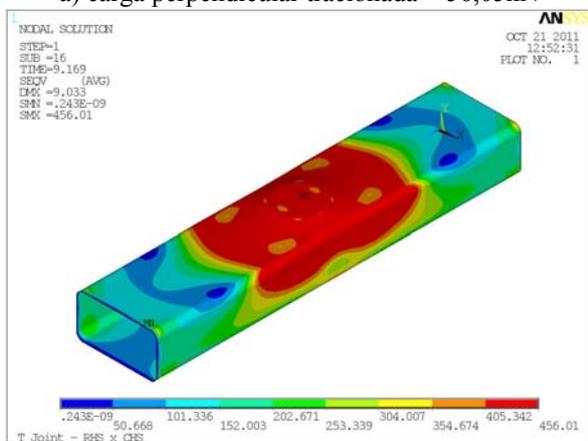
Apresentam-se ainda, na Fig. 7, as curvas carga *versus* deslocamento para todos os modelos avaliados na análise paramétrica desenvolvida neste trabalho. Nesta figura, pode-se observar a curva da ligação cuja distribuição de tensões *Von Mises* foi apresentada na Fig. 6.



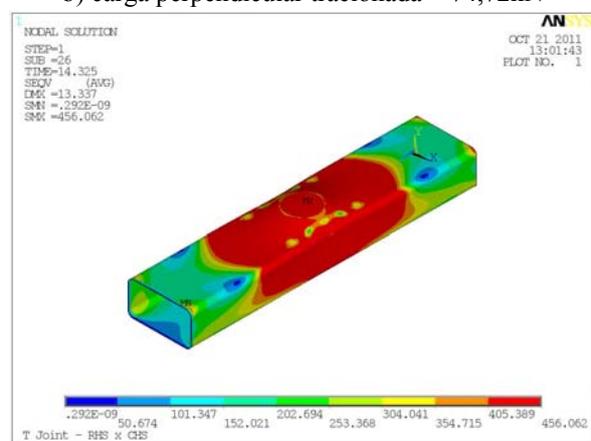
a) carga perpendicular tracionada = 56,05kN



b) carga perpendicular tracionada = 74,72kN



c) carga perpendicular tracionada = 106,69kN



d) carga perpendicular tracionada = 138,47kN

Figura 6. Distribuição de tensões de Von Mises – RHS110x60x4,8 com CHS55,7x3,7[em MPa]

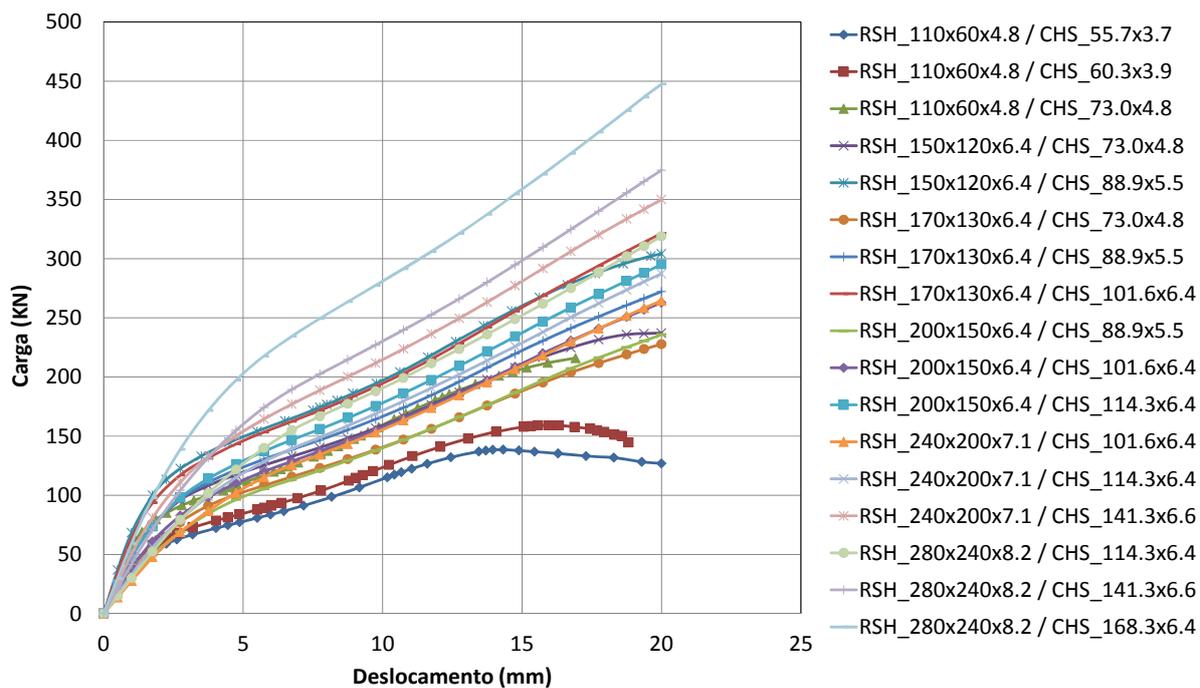


Figura 7. Curvas carga *versus* deslocamento – modelos numéricos

## 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 RHS e CHS, foram apresentadas as equações propostas pelo Eurocode 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 T entre perfis RHS (banzo) e CHS (montante).

O modelo numérico desenvolvido neste trabalho foi calibrado com resultados experimentais realizados por Mendes (2008) 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 Eurocode 3 e no CIDECT forneceram valores compatíveis com os obtidos na análise numérica após a modificação do critério de deformação limite proposto por Zhao (2000). 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. 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, *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.
- Mendes, F. C., Análise Teórica-Experimental de Ligações Tipo "T", "K" e "KT" com Perfis

- Metálicos Tubulares, Dissertação de Mestrado, UFOP – Universidade Federal de Ouro Preto – PPEC, 2008.
- Packer, J.A. Moment Connections between Rectangular Hollow Sections, *Journal of 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 profils 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](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.