

## ANÁLISE PARAMÉTRICA DE LIGAÇÕES “T” COM PERFIS TUBULARES EM AÇO ATRAVÉS DE UM MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

**Luciano Rodrigues Ornelas de Lima**

luciano@eng.uerj.br

Departamento de Estruturas e Fundações, UERJ, Brasil

**Luís Filipe da Costa Neves**

luis@dec.uc.pt

Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Portugal

**José Guilherme Santos da Silva**

jgss@eng.uerj.br

Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil

**Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco**

vellasco@uerj.br

Departamento de Estruturas e Fundações, UERJ, Brasil

**Resumo.** *Em países Europeus, Asiáticos e na América do Norte, os perfis tubulares têm sido bastante utilizados contando com uma produção corrente, industrializada e contínua com alto grau de desenvolvimento tecnológico. Já no Brasil, o uso desses perfis na construção civil era bastante limitado, restringindo-se a coberturas espaciais. Com a introdução destes perfis por fabricantes no Brasil, sua utilização tem crescido mas entretanto, as normas brasileiras ainda não se encontram atualizadas para este efeito, principalmente no que tange às ligações de perfis tubulares. Dentro desta perspectiva, este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica de diversos autores que abordam o tema de ligações entre perfis tubulares, seguida de uma análise numérica através do Método dos Elementos Finitos de ligações soldadas entre perfis tubulares quadrados. Esta análise numérica teve como principal objetivo, investigar a formulação proposta no Eurocode 3 verificando assim, a sua aplicabilidade. Os resultados obtidos mostraram que determinados limites considerados neste regulamento podem fornecer valores contra a segurança para ligações de perfis quadrados soldados.*

**Palavras-Chave:** *Estruturas de Aço, Ligações Tubulares, Mecanismos Plásticos, Elementos Finitos e Análise Paramétrica.*

### 1. INTRODUÇÃO

Os perfis tubulares são largamente utilizados na Europa (Figura 1), Sudeste Asiático, América do Norte e na Austrália. Países como Canadá, Inglaterra, Alemanha e Holanda fazem uso intensivo de estruturas tubulares e contam com uma produção corrente, industrializada e contínua com alto grau de desenvolvimento tecnológico. Porém, no Brasil, até cerca de quatro anos atrás, o uso desses perfis na construção civil era bastante limitado, restringindo-se praticamente a coberturas espaciais (Gerken, 2004).

A situação do mercado brasileiro, no entanto, começa a se alterar em razão da oferta de perfis tubulares estruturais pela Vallourec & Mannesmann do Brasil (2004). Diante da novidade da tecnologia, impõe-se a necessidade de divulgação e implementação do uso desse

tipo de perfil em projetos de arquitetura e engenharia, além de se aumentar o número de trabalhos de pesquisa realizados nesta área.

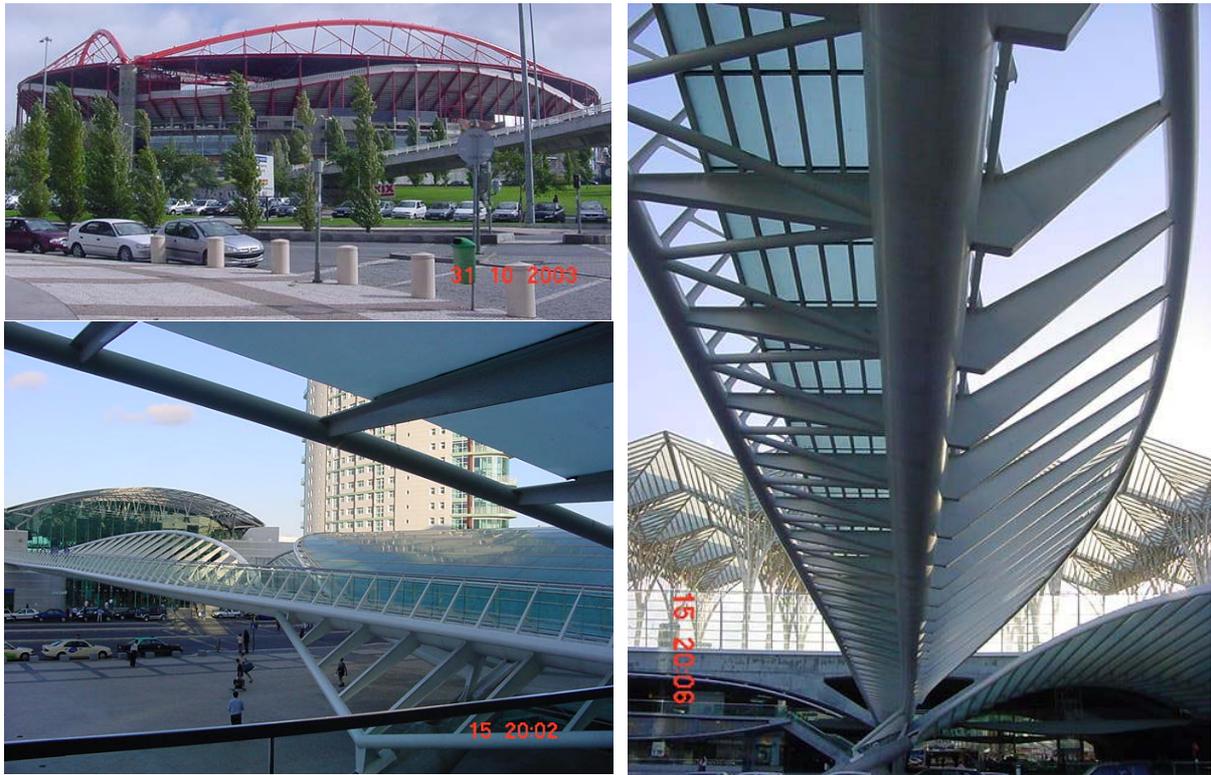


Figura 1 - Exemplos de estruturas com perfis tubulares - Portugal.

Com o aumento da utilização e o aprofundamento dos estudos destes tipos de estruturas, espera-se incluir este tema, de modo apropriado, na NBR 8800 (1986) ou então, que seja elaborada uma norma específica para o dimensionamento das estruturas em perfis tubulares. Desta forma, torna-se necessário respaldar os projetistas de estruturas de aço com procedimentos de análise consistentes para utilização de perfis tubulares, sobretudo no que tange às ligações, consideradas como sendo um ponto vulnerável nesse tipo de estrutura.

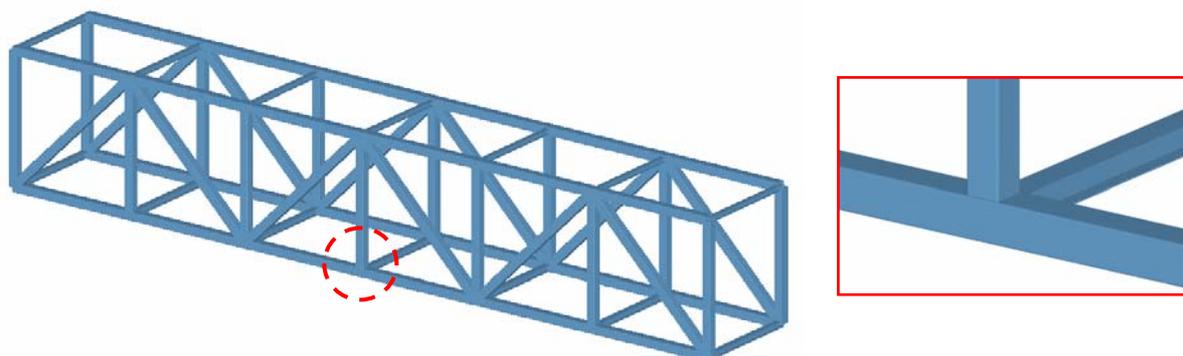
A idéia de avaliar as ligações soldadas de perfis tubulares surgiu no momento da elaboração do projeto da passarela de pedestres representada na Figura 2 (Neves *et al.*, 2005). Depois de efetuada toda a análise da estrutura e o seu dimensionamento, no momento de se verificar as ligações, notou-se que o parâmetro  $\beta$  ( $\beta$  é a razão entre a largura do membro horizontal e do membro vertical - Figura 3), apresentava um valor superior ao limite imposto pelo Eurocode 3, parte 1.8 (2003). Para a ligação apresentada em detalhe na Figura 2, o parâmetro  $\beta$  é igual a 0,88, sendo o limite da norma, para este tipo de ligação, igual a 0,85. Apesar desses valores serem próximos, após o limite de 0,85, tem-se uma variação exponencial da resistência, conforme pode ser verificado na Figura 4(c), que de fato não existe, já que surgem mecanismos de ruína diferentes dos de flexão.

Para uma ligação soldada de perfis tubulares, a correta previsão da carga de ruína da face do perfil terá então, também neste caso, que levar em consideração os efeitos de flexão, de cisalhamento, do punçoamento e ainda do comportamento de membrana.

As normas de projeto de ligações de perfis tubulares em aço são normalmente baseadas numa análise plástica, ou em critérios de deformações limites.

Na análise plástica pelo método cinemático, 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.

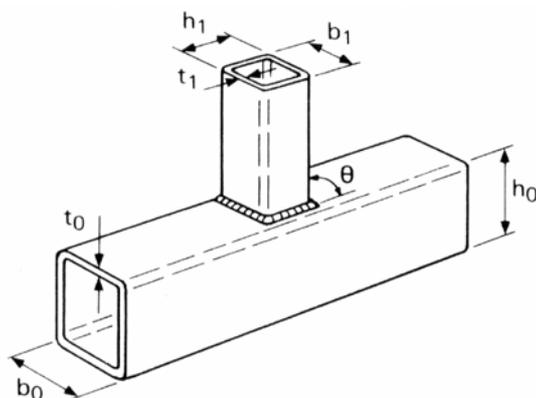


(a) vista da passarela com localização da ligação “T” soldada (b) detalhe da ligação

Figura 2 - Exemplos de ligações viga-coluna em estruturas de aço.

Como exemplos, os casos estudados por Cao *et al.* (1998), Packer (1993), Packer *et al.* (1993) e Kostaski *et al.* (2003) podem ser referenciados. Os mecanismos plásticos consideram a formação de linhas de ruptura (charneiras plásticas) segundo diferentes formatos, podendo ser lineares, retangulares, circulares ou uma combinação destes.

Packer *et al.* (1993) consideraram três formas diferentes de mecanismos, mas entretanto, melhores resultados foram obtidos considerando-se mecanismos de linhas retas com um parâmetro de otimização associado.



$$\beta = \frac{b_1}{b_0} \quad (1)$$

$$\mu_1 = \frac{b_1}{t_1} \quad (2)$$

$$\mu_0 = \frac{b_0}{t_0} \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{b_0}{2t_0} \quad (4)$$

Figura 3 - Geometria e parâmetros de verificação para limites de norma (Eurocode 3, 2003).

Porém, alguns dos autores citados anteriormente consideram que, para valores elevados de  $\beta$ , estes mecanismos podem fornecer valores contra a segurança para a carga última. De fato, as soluções provenientes destes mecanismos tendem ao infinito quando o parâmetro  $\beta$  tende a 1,0 (Figura 4). Packer *et al.* (1993) verificaram que quando  $\beta \geq 0,95$ , o valor teórico obtido para a resistência à flexão pode ser de apenas 12% do valor obtido experimentalmente. Estes autores propuseram também mecanismos de cisalhamento puro verificando que a aplicação destes pode fornecer valores de resistência muito baixos, até apenas 30 % dos valores experimentais.

Davies and Packer (1982) propuseram mecanismos plásticos considerando-se esforços de flexão e punção puro e concluíram que os resultados obtidos conduziam a uma melhoria significativa dos resultados, tendo em conta que previam uma resistência 20% superior à obtida experimentalmente.

Gomes (1990) procedeu à otimização destes mecanismos para ligações segundo o eixo de menor inércia da coluna (considerando-se neste caso, um perfil “I”), adotando mecanismos com trechos retos e funções em espiral logarítmica, conduzindo a uma melhoria significativa dos resultados obtidos através dos mecanismos representados na Figura 4 (linhas retas ou linhas retas e circulares), como se verifica da análise daquela figura.

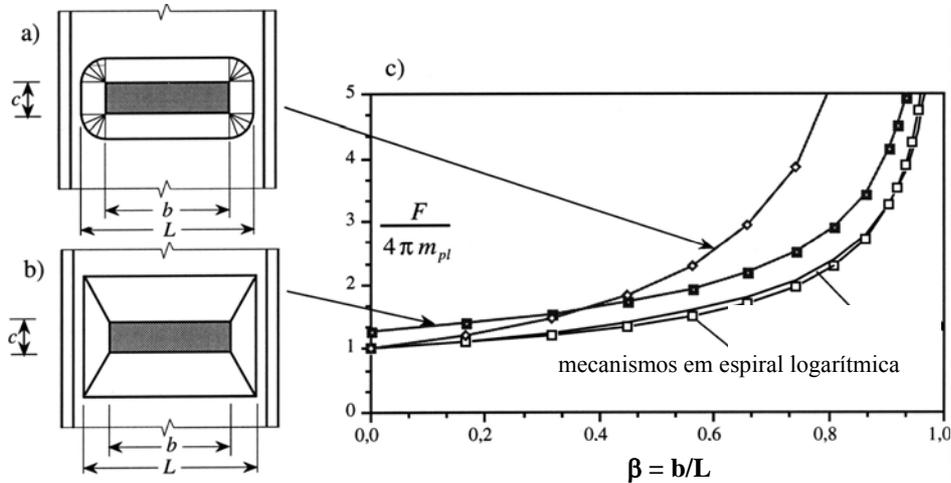


Figura 4 – Resultados de Gomes comparados com linhas de ruptura retas ou retas e circulares

Os critérios de limites de deformação usualmente associados ao estado limite último da face da corda correspondem à máxima deformação para fora do plano desta componente. Korol e Mirza (1982) propuseram que o estado limite deve ser associado ao deslocamento da face da corda correspondente a 1,2 vezes a espessura da mesma. Este valor representa algo em torno de 25 vezes a deformação elástica deste elemento estrutural. Lu *et al* (1994) propuseram que o estado limite último deve estar associado a uma deformação para fora do plano igual a 3% da largura da face da corda, correspondendo a carga máxima atingida em seus ensaios experimentais. Este limite de 3% também foi proposto por Zhao (1991) e é atualmente adotado pelo Instituto Internacional de Soldagem para definir o estado limite último.

Koteski *et al.*(2003) compararam resultados obtidos através de uma análise plástica com o critério da deformação limite de 3% citado acima, e concluíram que se o punçoamento não é o mecanismo governante, a diferença entre os resultados analíticos e experimentais se situa dentro de limites da ordem de 20%.

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

É de notar porém que a consideração completa desta resistência de membrana adicional não é compatível com os deslocamentos permitidos na ligação. Além disso, se a corda está submetida a carregamento cíclico, ou a carga de compressão axial, o acréscimo de resistência devido ao efeito de membrana já não será significativo (Neves, 2004). Como consequência, o modo mais efetivo e correto para se definir o estado limite último desta ligações, além de análise numérica ou experimental adequada, é o modo analítico através da análise plástica, levando também em consideração o punçoamento e fenômenos de instabilidade.

## 2. RECOMENDAÇÕES DE PROJETO – EUROCODE 3, PARTE 1.8

A norma europeia para dimensionamento de ligações em estruturas de aço, Eurocode 3, parte 1.8 (2003) propõe para previsão do comportamento rotacional de ligações viga-coluna, viga-viga ou placas de base, um método geral conhecido como Método das Componentes. Este é baseado em um modelo mecânico constituído de elementos rígidos e molas lineares que representam cada um dos possíveis critérios de deformação caracterizando as componentes de uma ligação. Cada uma destas componentes é então caracterizada separadamente através de uma curva carga *versus* deslocamento e a associação dessas diversas componentes fornece a curva momento *versus* rotação global da ligação. Entretanto, para ligações entre tubos de seções retangulares (TSR) como apresentado na Figura 3 anteriormente, um procedimento diferente é então, adotado. Este baseia-se na consideração de que estas ligações são rotuladas e por esta razão, as características relevantes (juntamente com a capacidade de deformação) são a resistência dos elementos individuais (corda e membro), ambos submetidos primeiramente a cargas axiais.

Estas recomendações do Eurocode 3 para avaliação da resistência de ligações entre perfis tubulares pode assumir os seguintes modos de ruína:

- ruína plástica da face da corda, Figura 5(a);
- ruína da parede lateral da corda por escoamento, esmagamento ou instabilidade devido carga axial de compressão no membro, Figura 5(b);
- plastificação da corda (ruptura plástica da seção transversal da corda);
- ruína da corda por cisalhamento, Figura 5(c);
- ruína por punçoamento da parede da seção da corda, Figura 5(d);
- ruína do braço com largura efetiva reduzida, Figura 5(e);
- ruína por flambagem local do braço ou da corda no ponto de ligação com o braço, Figura 5(f).

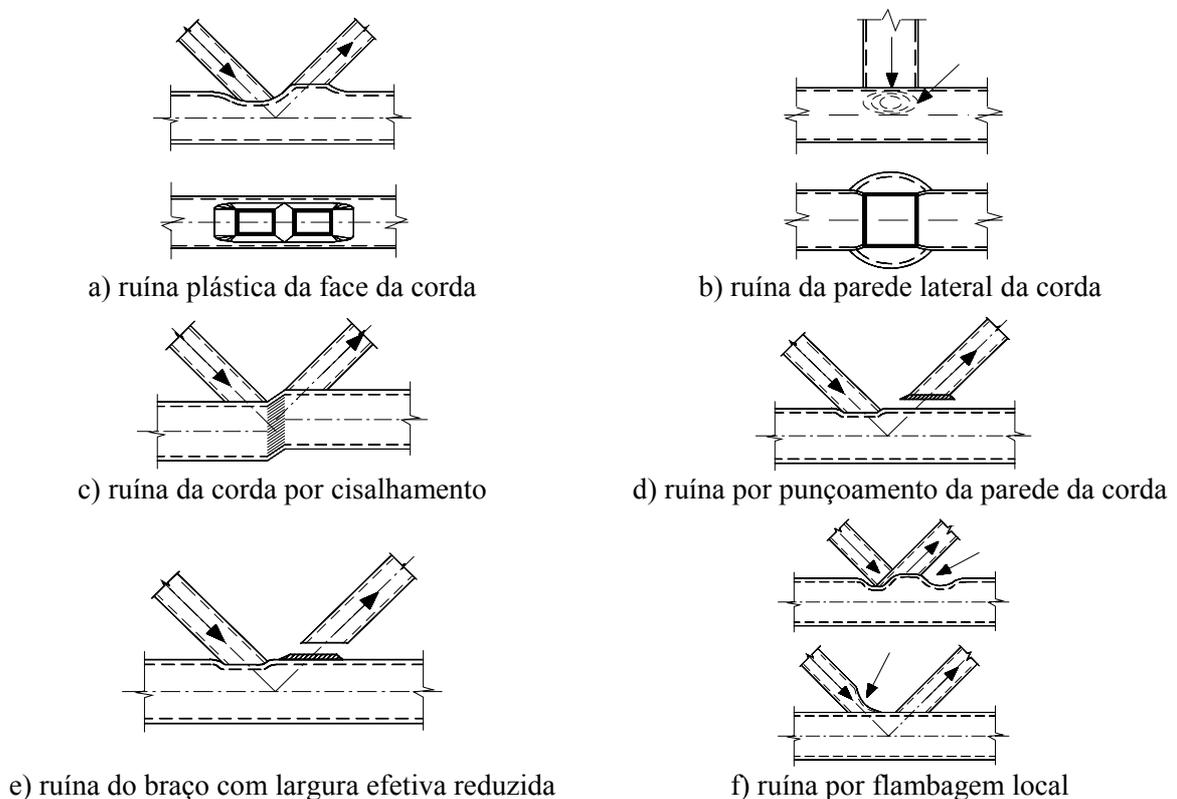


Figura 5 – Modos de ruína – Eurocode 3.

Para uma ligação em “T”, o Eurocode 3 recomenda que sejam considerados os critérios de ruína do perfil tubular através dos mecanismos a, b, d, e ou f conforme apresentado na Figura 5, com os seguintes limites de validade:  $\beta \geq 0,25$ ,  $\mu_1 \leq 35$  e  $\mu_0 \leq 35$ .

Para a ligação em estudo neste trabalho, o estado limite que controla o dimensionamento é a ruína plástica da face da corda obtida através da equação a seguir, tomando-se  $\gamma_{M5} = 1,0$ , e cujos parâmetros geométricos foram determinados na Figura 3. Vale ressaltar que  $N_{1,Rd}$  representa a carga a ser aplicada no braço que provoca a plastificação da face da corda.

$$N_{1,Rd} = \frac{k_n f_{y0} t_0^2}{(1 - \beta) \text{sen} \theta_1} \left( \frac{2\beta}{\text{sen} \theta_1} + 4\sqrt{1 - \beta} \right) / \gamma_{M5} \quad (5)$$

onde  $k_n$  é igual a 1,0 para membros submetidos a tração,  $f_{y0}$  representa a tensão de escoamento da corda,  $t_0$  a espessura do perfil da corda,  $\beta$  é um parâmetro geométrico definido anteriormente,  $\theta_1$  é o ângulo entre a corda e o braço e  $\gamma_{M5}$  é um coeficiente de segurança, neste caso, tomado igual a 1,0.

### 3. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

O modelo de elementos finitos utilizado neste artigo para avaliação de uma ligação “T” de perfis tubulares de seção quadrada foi constituído de elementos de casca espessa com quatro nós (SHELL181 - *Ansys Manual Reference*, 2003) levando-se em consideração os efeitos de flexão, cisalhamento e de membrana. A malha utilizada foi escolhida de forma que os elementos tivessem um tamanho proporcional, evitando assim problemas numéricos. A Figura 6 apresenta esta malha composta de 1288 elementos com 1320 nós, bem como as condições de contorno e as cargas consideradas. A carga aplicada, nomeadamente tração na corda (83,4 kN) e no braço (566,7 kN), corresponde aos esforços obtidos na análise da treliça apresentada na Figura 2.

Deve-se ressaltar que este trabalho apresenta uma primeira avaliação de ligações de perfis tubulares quadrados desprezando-se assim, os respectivos raios de concordância dos perfis.

As propriedades do material utilizado foram: módulo de elasticidade  $E = 210$  GPa, coeficiente de Poisson  $\nu = 0,3$  para um aço S275 com tensão de escoamento de 275 MPa. Para as diversas geometrias utilizadas, 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-se uma comparação coerente entre os resultados obtidos através do Eurocode 3 e os numéricos no que diz ao estado limite último da ligação.

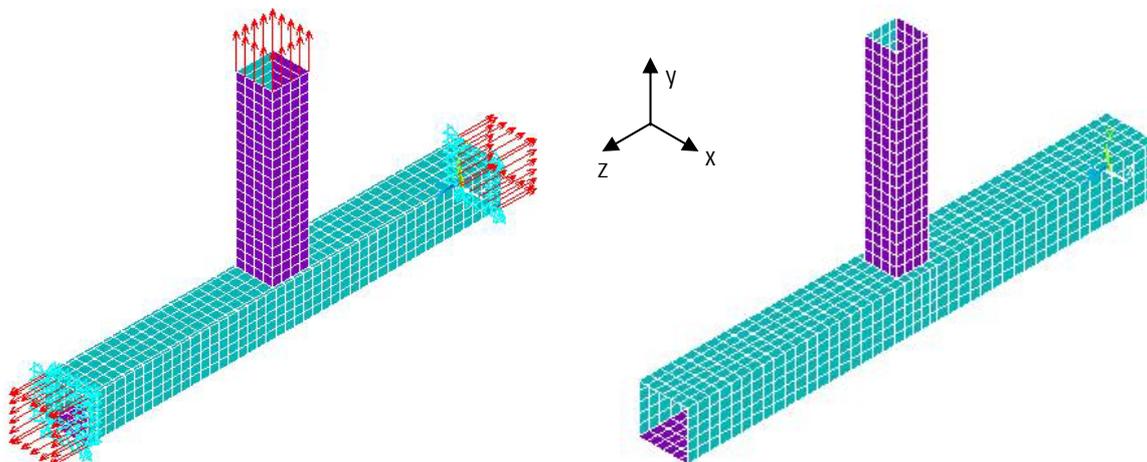


Figura 6 – Malha de Elementos Finitos – Ligação “T”.

#### 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para a ligação em “T” avaliada neste trabalho, apresenta-se na Figura 7 a configuração deformada da ligação entre um perfil 300x300x8 para a corda e 200x200x8 para o braço, com o detalhe da face da corda. Observando-se da Figura 8 a Figura 10, verifica-se que as maiores tensões ocorrem na direção do eixo paralelo ao da corda. E através da observação da Figura 11, que apresenta a distribuição de tensões de Von Mises na ligação, nota-se que a corda encontra-se completamente plastificada para o nível de carga correspondente ao limite deste elemento, comprovando-se que o estado limite que controla esta ligação é a falha na face da corda definida pela eq. (5).

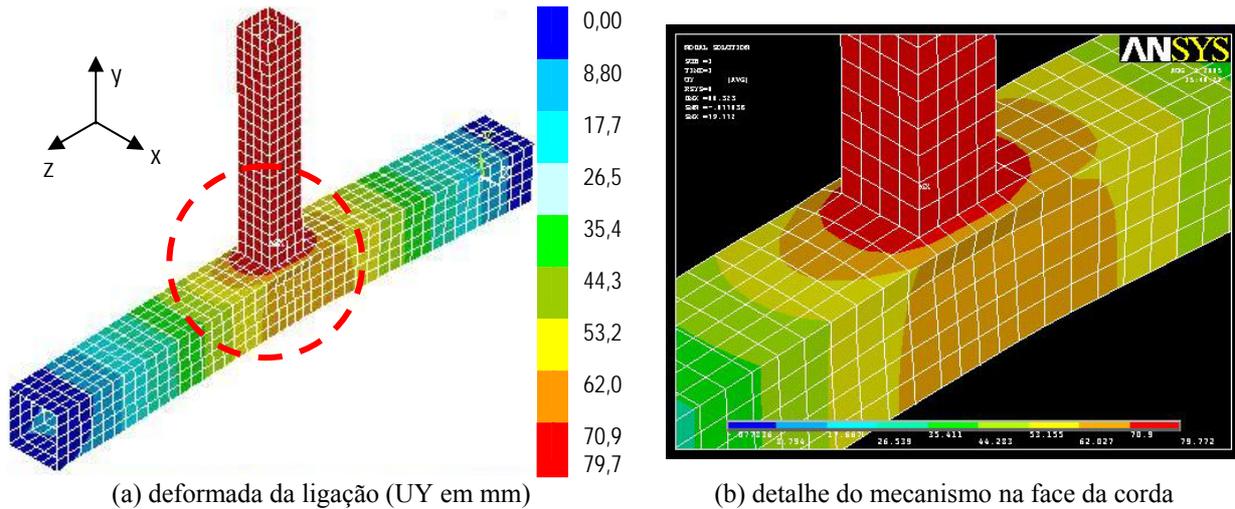
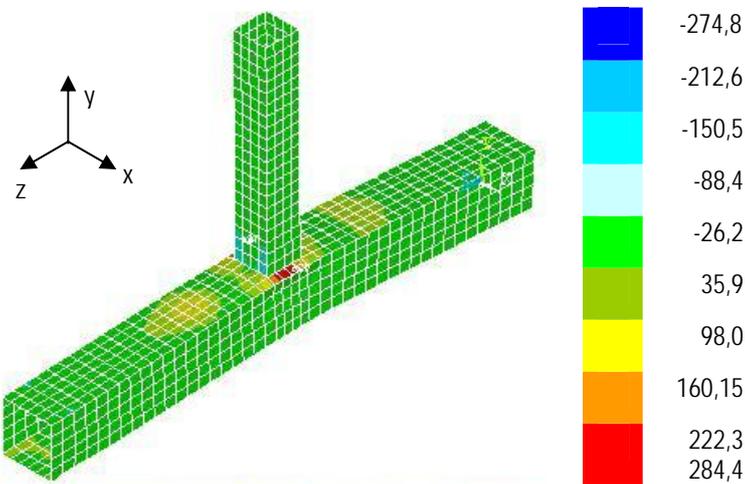


Figura 7 – Deslocamentos verticais (em mm).



Com o objetivo de se avaliar a influência do parâmetro  $\beta$  no comportamento destas ligações soldadas de perfis tubulares em “T”, efetuou-se uma análise paramétrica mantendo-se constante o perfil da corda, ou seja 300x300x8, e variou-se o perfil utilizado no braço de uma largura de 260 até 110 mm, mantendo-se a espessura de 8 mm. As curvas carga no braço *versus* deslocamento do mesmo são apresentadas na Figura 12 onde pode-se verificar a influência deste parâmetro no comportamento global da ligação. Nesta mesma figura, apresenta-se o critério de deformação limite citado no presente trabalho correspondente a um deslocamento para fora do plano da face da corda de 9 mm (critério dos 3% da largura da face da corda). Este critério é representado pela linha vertical tracejada. Um outro critério citado

limita este deslocamento em 9,6 mm, ou seja, 1,2 vezes a espessura da parede do tubo.

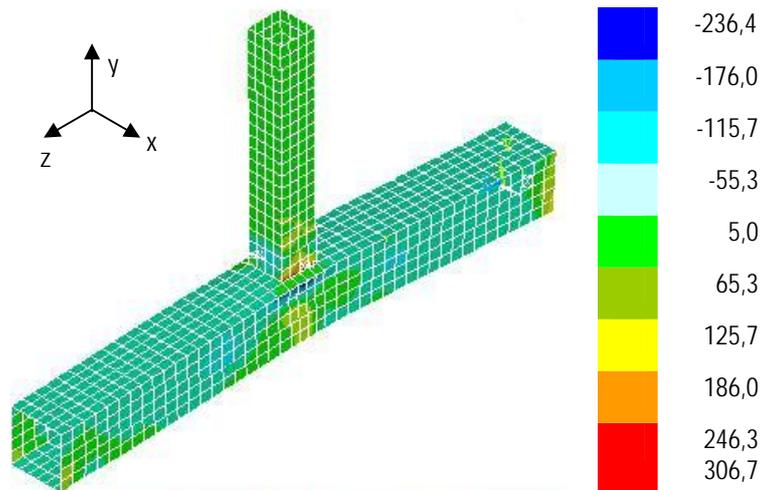


Figura 9 – tensões na direção Y (em MPa) - eixo do braço.

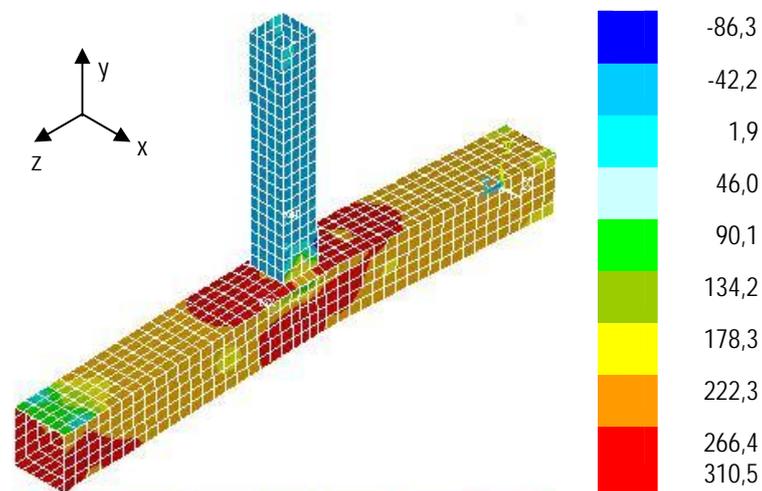


Figura 10 – tensões na direção Z (em MPa) - eixo da corda.

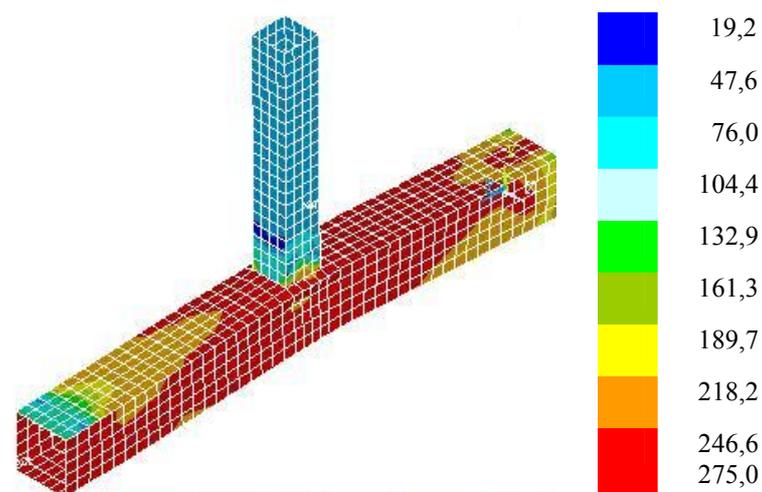


Figura 11 – Tensões de *Von Mises* (em MPa).

Para todos os modelos utilizados na análise paramétrica excluindo-se o último (100x100x8), obteve-se a curva individual carga *versus* deslocamento onde foi possível comparar com o valor fornecido pelo Eurocode 3 (2003) representado pela linha tracejada.

Através da observação destas curvas apresentadas na Figura 13, verifica-se que para valores de  $\beta > 0,73$ , os valores fornecidos pelo Eurocode 3 são superiores ao obtidos através do modelo de elementos finitos. Para valores de  $\beta < 0,60$ , os valores obtidos através da formulação do Eurocode 3 são bastante conservadores quando comparados com os obtidos numericamente, algo superior a 40% nos primeiros casos.

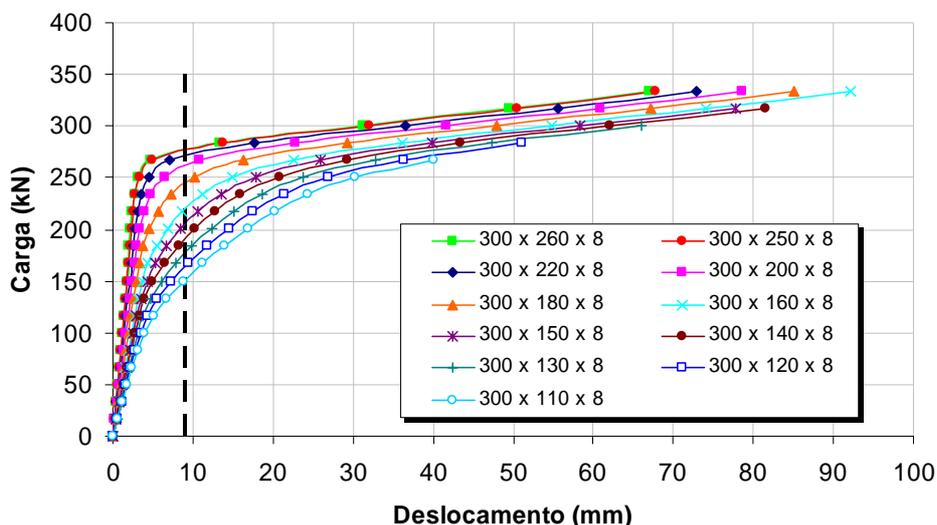


Figura 12 – Curvas carga *versus* deslocamento para as diversas geometrias.

Finalmente, apresenta-se na Figura 14 a curva teórica para cada valor de  $\beta$  considerado neste trabalho, obtida com auxílio da equação (5). A linha tracejada a vermelho representa o limite de validade ( $\beta = 0,85$ ) da equação proposta pelo Eurocode 3 (2003), que como se verificou pode conduzir a resultados inseguros. Com base nesta análise preliminar propõe-se que os mecanismos de flexão do Eurocode 3 sejam usados apenas até  $\beta = 0,73$  (linha tracejada a verde). Vale ressaltar que este trabalho apresenta um primeiro estudo de ligações soldadas de perfis tubulares e novas análises devem ser consideradas com o objetivo de se avaliar melhor a formulação proposta pelo Eurocode 3 (2003) para flexão e para cisalhamento.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os perfis tubulares são largamente utilizados na Europa, Sudeste Asiático, América do Norte e na Austrália. Países como Canadá, Inglaterra, Alemanha e Holanda fazem uso intensivo de estruturas tubulares e contam com uma produção corrente, industrializada e contínua com alto grau de desenvolvimento tecnológico. Porém, no Brasil, até cerca de quatro anos atrás, o uso desses perfis na construção civil era bastante limitado, restringindo-se praticamente a coberturas espaciais (Gerken, 2004).

A situação do mercado brasileiro, no entanto, começa a se alterar em razão da oferta de perfis tubulares estruturais pela V&M do Brasil (2004). Diante da novidade da tecnologia, impõe-se a necessidade de divulgação e implementação do uso desse tipo de perfil em projetos de arquitetura e engenharia, além de se aumentar o número de trabalhos de pesquisa realizados nesta área.

A consideração de ligações soldadas de perfis tubulares é atualmente considerada no Eurocode 3 (2003) onde são previstas ligações entre os mais diversos tipos de perfis tubulares, nomeadamente, com seções retangulares, quadradas, circulares e até, entre perfis tubulares e laminados. Entretanto, a formulação proposta neste regulamento somente pode ser aplicada dentro de determinados limites consoantes a configuração geométrica das ligações.

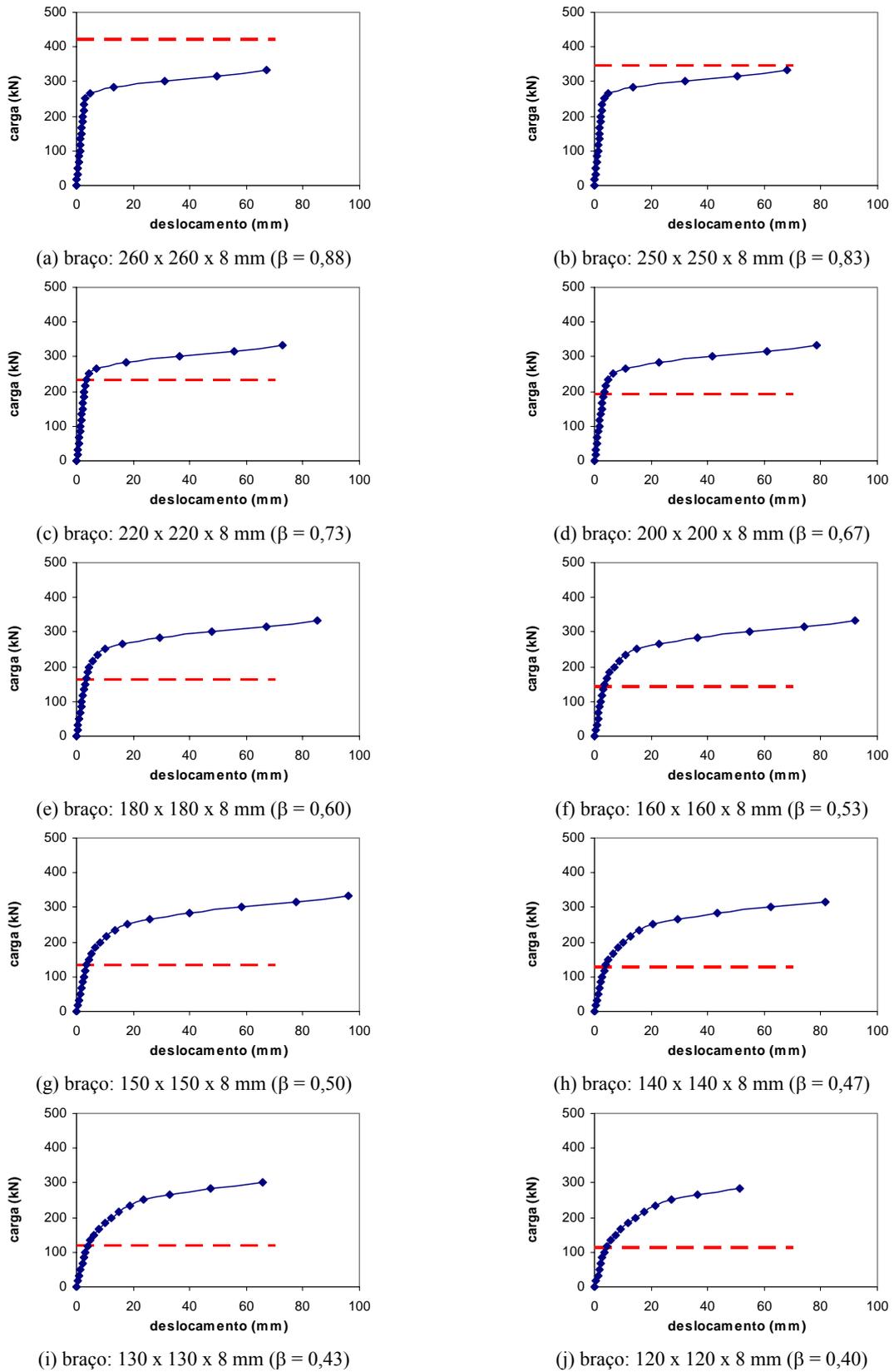


Figura 13 – Curvas carga *versus* deslocamento individuais.

Este trabalho apresentou um estudo numérico através do Método dos Elementos Finitos da influência do parâmetro  $\beta$  no comportamento global de ligações soldadas de perfis

tubulares quadrados. Com esta análise, verificou-se que o método preconizado pelo Eurocode 3 fornece valores contra a segurança quando  $\beta > 0,73$ , lembrando que o limite proposto por aquele regulamento é de  $\beta \leq 0,85$ .

Entretanto, como esta análise representou uma primeira investigação deste tema, algumas melhorias devem ser efetuadas no modelo numérico, nomeadamente, consideração do raio de concordância do perfil tubular além da modelagem da solda entre a corda e o braço. Considerando-se este modelo mais próximo do real, novas análises devem ser efetuadas variando-se outros parâmetros desta ligação, como por exemplo, espessura dos tubos, esforço axial de compressão nos membros, entre outros.

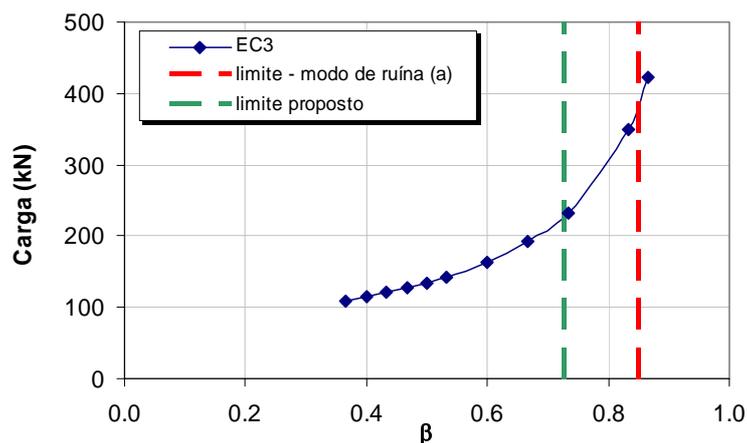


Figura 14 – Curvas carga versus  $\beta$  - teórica.

### Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem à parceria CAPES/GRICES que possibilitou a implementação de um projeto de Cooperação Internacional entre o PGECIV (UERJ) e a Universidade de Coimbra, Portugal, além do CNPq, pelo apoio financeiro.

### REFERENCES

- Anslys, Inc. Theory Reference (version 8.1), 2003.
- Cao, J.J., Packer, J.A., Young, G.J., 1998. Yield line analysis of RHS connections with axial loads, *J. Constructional Steel Research*, vol. 48, n° 1, pp 1-25.
- Davies, G., Packer, J.A., 1982. Predicting the strenght of branch plate – RHS connections for punching shear, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 9, n° 3, pp 458-467.
- Eurocode 3, prEN 1993-1.8, 2003. *Design of steel structures – Part 1.8: Design of joints* (“final draft”), CEN, European Committee for Standardisation, Brussels.
- Gerken, F. de S., 2005. Projeto para estruturas em perfis tubulares, *Revista Tubo & Companhia* - Ano I - Número 4.
- Gomes, F.C.T., 1990. *Etat Limite Ultime de la Résistance de L'âme d'une Colonne dans un Assemblage Semi-Rigide d'axe Faible*, Rapport Interne n° 203, MSM - Université de Liège.

- Korol, R., Mirza, F., 1982. Finite Element Analysis of RHS T-Joints, *Journal of the Structural Division, ASCE*, vol.108, No. ST9, pp 2081-2098.
- Kosteski, N., Packer, J.A., Puthli, R.S., 2003. 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.
- Lu, L.H., de Winkel, G.D., Yu, Y., Wardenier, J., 1994. Deformation limit for the ultimate strength of hollow section joints, *6th International Symposium on Tubular Structures*, Melbourne, Australia, pp 341-347.
- NBR8800, 1986. Projeto e Execução de Estruturas de Aço em Edifícios (Método dos Estados Limites). ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 200 pp.
- Neves, L.F.C., 2004. *Monotonic and Cyclic Behaviour of Minor-axis and Hollow Section Joints in Steel and Composite Structures*, Doctoral Thesis, University of Coimbra, 2004.
- Neves, L.F. C., Lima, L. R. O. de, Jordão, S. and Silva, J. G. S. da, 2005. Structural Analysis of “T” and “KT” Joints of a Steel Truss Structure Using the Finite Element Method. *Proceedings of the Tenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing*, Civil-Comp Press, Stirling, Scotland, pp. 1-15.
- Packer, J.A., 1993. Moment Connections between Rectangular Hollow Sections, *J. Constructional Steel Research* 25, pp 63-81.
- Packer, J.A., Wardenier, J., Kurobane, Y., Dutta, D., Yeomans, N., 1993. *Assemblages de sections creuses rectangulaires sous chargement statique predominant*. Série CIDECT “Construire avec des profiles creux”, Verlag TUV Rheinland, Koln.
- Vallourec & Mannesmann do Brasil, 2004. Catálogo de Produtos: Tubos Estruturais de Seções Circulares, Quadradas e Retangulares, 8 pp.
- Zhao, X, Hancock, G., 1991. T-Joints in Rectangular Hollow Sections Subject to Combined Actions, *Journal of the Structural Division, ASCE*, vol.117, No. 8, pp2258-2277.