

ANÁLISE PARAMÉTRICA DE LIGAÇÕES TIPO “K” ENTRE PERFIS TUBULARES CIRCULARES EM AÇO

Raphael S. da Silva^a, Luciano R. O. de Lima^a,
Pedro C. G. da S. Vellasco^a e José G. S. da Silva^b

^aPGECIV – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UERJ - Rio de Janeiro - Brasil
Rua São Francisco Xavier, 524, sala 5025E, Maracanã, RJ

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

Palavras-chave: Estruturas de aço, Ligações tubulares, Mecanismos plásticos, Elementos finitos e Análise paramétrica.

Resumo. O difundido uso de perfis estruturais tubulares, principalmente devido às vantagens associadas ao comportamento estrutural e estético, levou a uma intensa utilização nos países da Europa, Sudeste Asiático, América do Norte e na Austrália. Países como Canadá, Inglaterra, Alemanha e Holanda fazem uso intensivo dessas estruturas e contam com uma produção corrente, industrializada e contínua com alto grau de desenvolvimento tecnológico. O aumento da oferta deste tipo de perfis, aliado a recentes pesquisas nesta área, leva o Brasil a se inserir neste cenário mundial. Entretanto, as normas brasileiras que regem o dimensionamento destes perfis ainda não se encontram atualizadas, principalmente no que tange ao dimensionamento de ligações de perfis tubulares. Considerando esta perspectiva, este trabalho apresenta uma análise de ligações tipo “K” com perfis tubulares circulares efetuada com base na norma europeia, Eurocode 3, 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 da 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 de 5%. A não-linearidade geométrica foi introduzida no modelo através da Formulação de Lagrange Atualizado considerando-se a previsão de grandes deformações de forma a permitir a redistribuição de carregamento na ligação após o escoamento inicial. O modelo proposto foi validado comparando-se os resultados numéricos com resultados experimentais e analíticos sugeridos pelo Eurocode 3 e a nova edição do CIDECT. As principais variáveis do presente estudo foram os parâmetros geométricos β e γ .

1 INTRODUÇÃO

As excelentes propriedades mecânicas e estruturais de seções tubulares são reconhecidas há muito tempo. Perfis tubulares quadrados, retangulares e circulares em aço estrutural (SHS, RHS e CHS) são relativamente recentes, tendo em vista que sua produção industrial somente foi iniciada no início dos anos 60 na Inglaterra. Alguns exemplos na natureza evidenciam as excelentes propriedades geométricas destas seções como elemento resistente à compressão, tração, flexão e, principalmente, torção. Conforme se observa na Fig. 1, além do seu excelente comportamento estrutural, suas formas tornam este tipo de concepção bastante atrativa do ponto de vista arquitetônico e visual. Diversas outras vantagens estruturais são aparentes para a maioria dos projetistas, particularmente para membros carregados a compressão e torção, e, embora o custo unitário do material seja mais alto em relação aos perfis de seções abertas, muitas construções executadas com estruturas tubulares comprovam que este modelo construtivo pode ser economicamente competitivo em relação às estruturas convencionais.

A utilização de perfis tubulares é ainda mais difundida em países como Canadá, Inglaterra, Alemanha e Holanda, devido ao alto grau de desenvolvimento tecnológico de sua produção. No Brasil, até cerca de alguns anos atrás, a utilização destes perfis na construção civil era bastante limitada, restringindo-se apenas a coberturas espaciais. Atualmente, a situação do mercado brasileiro começa a se alterar em decorrência do significativo aumento da oferta de perfis tubulares estruturais, principalmente pela Vallourec & Mannesmann do Brasil (2002). Desta forma, encontra-se em desenvolvimento no Brasil, uma norma brasileira que contemple o projeto de ligações entre perfis tubulares, o que fará com que os engenheiros brasileiros não necessitem mais adotar normas de outros países. Com isso, faz-se cada vez mais necessária, a ampliação do número de trabalhos de pesquisa de forma a dar respaldo técnico aos projetistas de estruturas tubulares, principalmente no que tange ao dimensionamento das ligações.



a) Estação de metrô Cidade Nova – Rio de Janeiro



b) Edifício V&M – Belo Horizonte



c) Viaduto do metrô – Rio de Janeiro



d) Salão para os jogos olímpicos - Atenas

Figura 1: Exemplos de estruturas utilizando seções tubulares.

Enumeram-se a seguir, outros importantes aspectos que contribuem para tornar estas

seções ainda mais vantajosas em relação aos perfis de seções abertas, tais como:

- a) soluções leves e econômicas podem ser facilmente alcançadas, considerando-se sua elevada resistência e baixo peso próprio, contribuindo para uma redução significativa nos custos de fundação;
- b) resistem de maneira mais econômica às altas solicitações de torção, carga axial e efeitos combinados;
- c) a elevada resistência à flambagem das barras possibilita o uso de maiores vãos livres com significativa redução do número de pilares e diagonais com espaçamentos maiores;
- d) o sistema de montagem industrial de alta precisão elimina significativamente desperdícios oriundos de improvisações, correções e adequações, comuns nos métodos convencionais de construção, possibilitando orçamentos mais precisos e reduzindo significativamente os prazos de construção, os custos de gerenciamento do canteiro de obras, e conseqüentemente, antecipando o retorno de capital;
- e) a facilidade para utilização destes perfis como estruturas mistas confere a estrutura uma resistência adicional à esforços de compressão;
- f) a menor área superficial, se comparadas às seções abertas, conduz a menores custos de pintura e proteção contra o fogo e facilita os serviços de manutenção;
- g) menor coeficiente de arrasto quando exposto à ação do vento e da água;
- h) Possui um variado campo de aplicações, como por exemplo, arquitetura, civil, estruturas *off-shore*, mecânica, química, aeronáutica, transporte, etc.

Um dos principais entraves iniciais à utilização dos perfis tubulares deu-se em função do pouco conhecimento que se tinha do comportamento estrutural e do projeto das ligações dessas estruturas. Em função deste quadro, surge em 1962 uma organização internacional de fabricantes de seções tubulares, chamada International Committee for the Study and Development of Tubular Structures (CIDECT). A ideia principal foi reunir todos os recursos disponíveis nas indústrias, universidades, e outros órgãos nacionais e internacionais para pesquisa e disseminação de informações técnicas, desenvolvimento de projetos, métodos matemáticos e divulgação dos resultados em pesquisas e publicações. Desde o início de suas atividades, o foco principal têm sido os aspectos que envolvem os projetos de seções tubulares, incluindo comportamento estrutural, resistência estática e a fadiga das ligações, propriedades aerodinâmicas, resistência à corrosão, fabricação e manutenção dessas estruturas.

Nos últimos anos, o CIDECT tem conduzido inúmeros programas de pesquisa no campo de estruturas tubulares. Os resultados dessas investigações estão disponíveis em relatórios e guias de projeto e tem sido incorporados pelas normas técnicas de diversos países. Inicialmente, a maioria destes estudos foi uma combinação de pesquisas analíticas e experimentais. Com o desenvolvimento de métodos computacionais, alcançaram-se importantes avanços no entendimento do comportamento destas estruturas, principalmente no que tange ao comportamento das ligações.

Desta forma, o presente trabalho tem por objetivo desenvolver uma análise numérica do comportamento de uma ligação soldada do tipo K entre perfis tubulares circulares. O modelo proposto foi calibrado comparando-se os resultados numéricos com os resultados experimentais de Kurobane (1982) e os analíticos sugeridos no Eurocode 3 (2003) e na 2ª edição do guia de projeto para ligações circulares do CIDECT (Packer *et al.*, 2008) e os limites de deformação propostos na literatura (Lee *et al.*, 1993). As principais variáveis do estudo foram os parâmetros β e γ . Estes parâmetros foram escolhidos com base em resultados de estudos recentes que mostravam algumas discrepâncias nas regras do Eurocode 3 (2003).

2 RECOMENDAÇÕES DE PROJETO

2.1 Eurocode 3, Parte 1.8 (2003)

Depois do advento das seções estruturais tubulares na Inglaterra, estudos experimentais e teóricos sobre ligações soldadas com membros quadrados e circulares foram desenvolvidos na Universidade de Sheffield. Estes estudos foram facilmente introduzidos no Canadá e publicados pela Stelco como o primeiro manual de ligações entre perfis estruturais tubulares. Depois disso, estes manuais foram disponibilizados para os engenheiros americanos no guia da American Iron and Steel Institute (AISI) e em manuais desenvolvidos pela American Welding Society (AWS).

Durante os anos 70 e 80, muitas pesquisas sobre ligações entre perfis tubulares estruturais foram desenvolvidas em muitos países, mas a grande maioria foi coordenada pelos comitês técnicos do CIDECT e do International Institute of Welding (IIW). Estas recomendações já têm sido parcialmente ou completamente implementadas em vários países, além de já terem sido adotadas pelo Eurocode 3 (2003) garantindo uma difundida aceitação.

Nas treliças planas ou espaciais, o principal objetivo da ligação é desenvolver a resistência à tração ou à compressão necessária sem comprometer a integridade estrutural da barra a qual é ligada. Por muitos anos esta premissa foi atingida por barras tubulares soldadas, utilizadas na montagem de aeronaves e torres leves. Entretanto, em muitas destas ligações, os diâmetros dos tubos eram pequenos e as paredes relativamente finas, e não havia muitas diferenças entre os diâmetros das barras que formavam a ligação.

O Eurocode 3 (2003) propõe para previsão do comportamento rotacional de ligações viga-coluna, viga-viga ou placa de base, um método geral conhecido como Método das Componentes. Entretanto, para ligações entre perfis tubulares considera-se que as ligações são rotuladas e por esta razão, as características relevantes (juntamente com a capacidade de deformação) são a resistência dos elementos individuais submetidos a esforços axiais. Deve-se ressaltar que 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 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. Além disso, para uma correta previsão da carga de ruína da face do perfil, devem ser considerados os efeitos de flexão, de cisalhamento, da punção e do comportamento de membrana. O estudo destas ligações representa um importante papel e requer uma profunda avaliação do seu comportamento para o alcance de projetos otimizados.

De acordo com o CIDECT, a designação dos tipos de ligações é baseada no método de transferência de forças na ligação, e não apenas em sua aparência física. A Fig. 2 apresenta a convenção utilizada para a classificação das ligações.

- a) quando no mínimo 80 % da componente normal da força na diagonal é equilibrada pela componente normal da força na outra diagonal, estando as diagonais soldadas no mesmo lado do banzo, a ligação é classificada como K - Fig. 2(a) e 2(b). Caso contrário, a ligação é classificada como X - Fig. 2(e). Observa-se que uma ligação do tipo N pode ser considerada como um tipo especial da ligação tipo K;
- b) quando a componente normal da força no elemento (diagonal ou montante) é equilibrada pelos esforços (cortante ou momento) atuantes no banzo, a ligação será classificada como T, caso este elemento seja um montante (perpendicular ao banzo) –

ver Fig. 2(c). Se este elemento for uma diagonal, a ligação passa a ser classificada como Y - Fig. 2(d);

- c) quando a componente normal da força na diagonal é transmitida através do banzo e é equilibrada pela componente normal da força na outra diagonal soldada no lado oposto, a ligação é classificada como X - Fig. 2(f).

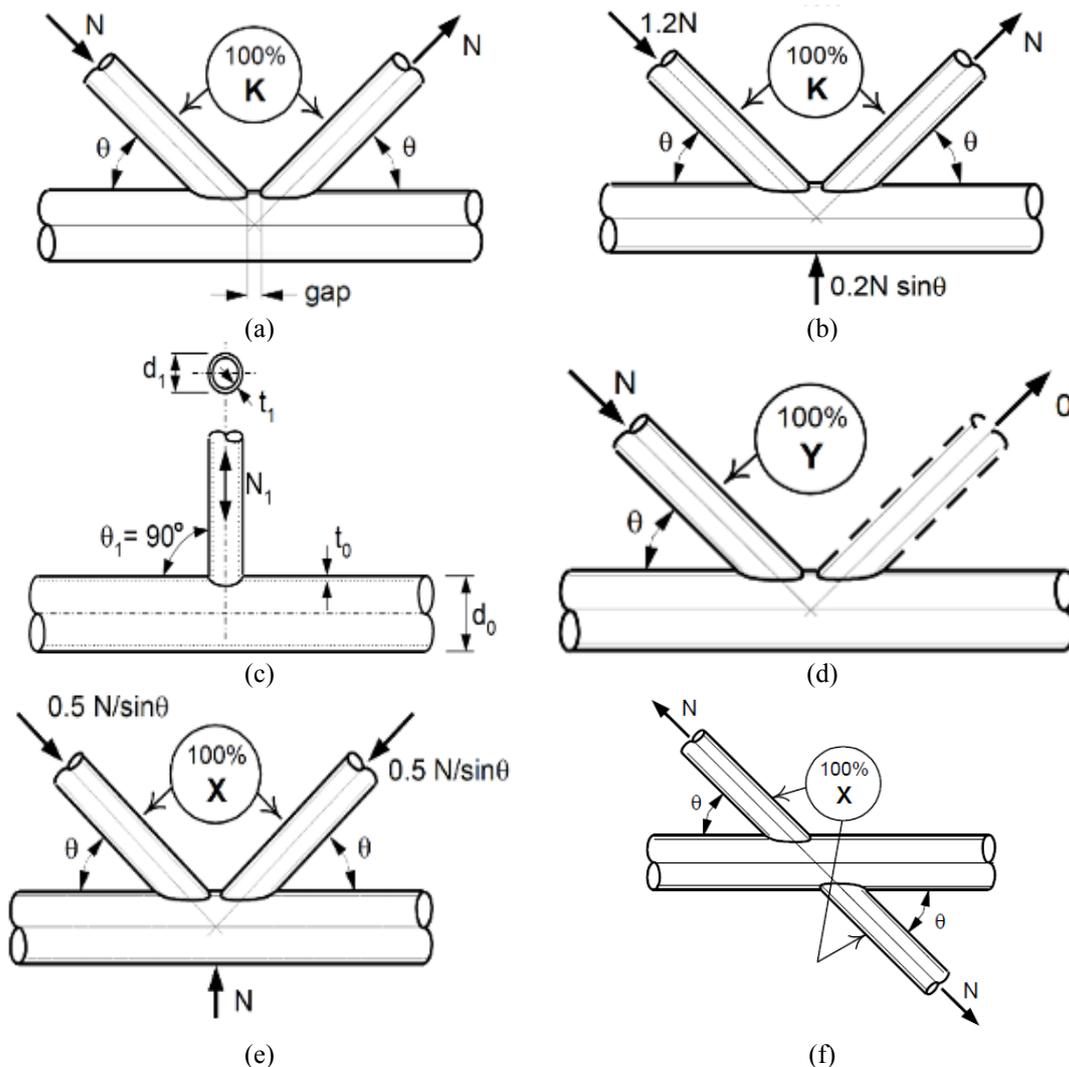


Figura 2: Classificação de ligações tubulares em função do carregamento aplicado.

No que tange ao dimensionamento destas ligações, Packer et al. (1992) e o Eurocode 3 (2003) apresentam diferentes tipos de ruína que dependem da configuração da ligação, das condições de carregamento e dos parâmetros geométricos, conforme citado a seguir e ilustrado na Fig. 3:

- plastificação da face superior do banzo (uma das diagonais comprime a face do tubo do banzo enquanto a outra traciona);
- flambagem local da parede do banzo sob o montante comprimido;
- falha por cisalhamento do banzo na região de espaçamento;
- punçoamento da face do banzo ao redor do perímetro da diagonal (tração ou compressão);
- ruptura por tração da diagonal ou ruptura da solda com largura efetiva reduzida;

f) flambagem local da diagonal comprimida ou amassamento da parede do banzo próximo à diagonal tracionada.

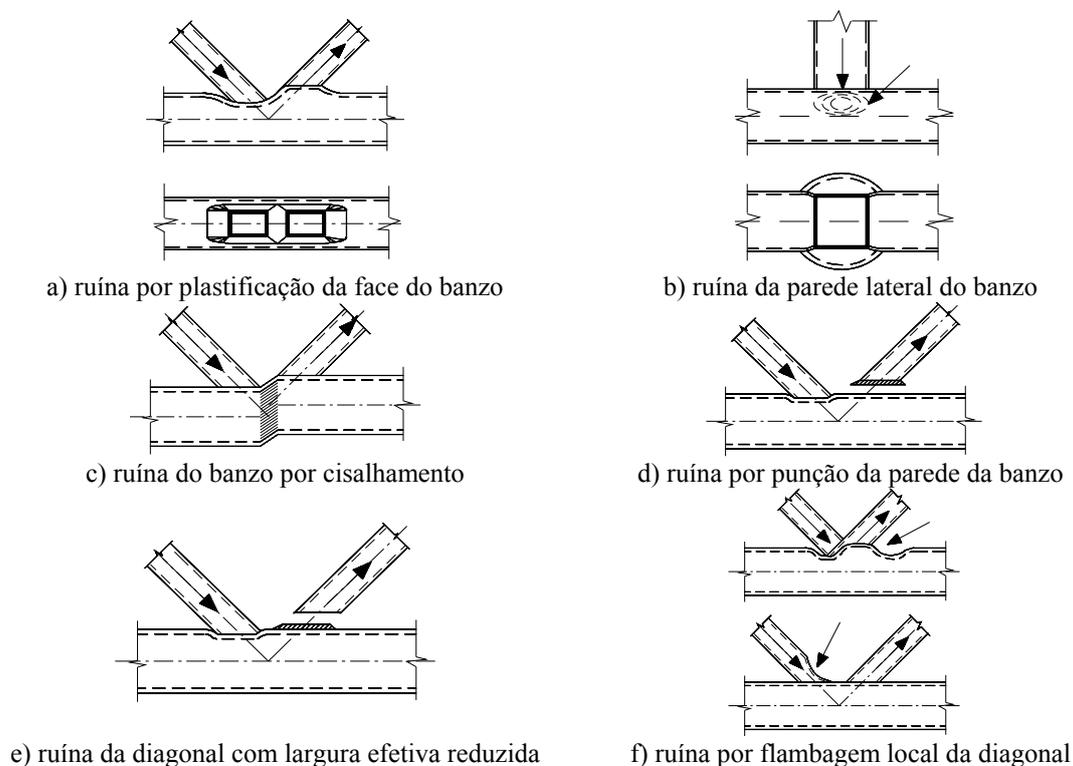


Figura 3: Modos de ruína – Eurocode 3 (2003).

Segundo o Eurocode 3 parte 1.8 (2003), a resistência estática de projeto destas ligações é expressa em termos da máxima resistência axial e/ou momento fletor admissíveis pelos elementos que se ligam ao banzo. As regras de projeto propostas pelo Eurocode 3 (2003) aplicam-se tanto à perfis laminados quanto à perfis formados a frio, desde que todos os requisitos de projeto sejam completamente satisfeitos. A espessura da parede dos perfis que constituem a ligação não deverá ser menor que 2,5mm. Entretanto, a espessura da parede do banzo não deverá ser maior que 25 mm, a menos que estudos específicos garantam a adequabilidade da ligação.

Enumeram-se a seguir, outros requisitos de projeto que deverão ser atendidos no projeto de uma ligação tipo K:

- A tensão de escoamento nominal do aço não deverá ultrapassar o limite de 460 MPa, sendo que para materiais com tensões de escoamento acima de 355 MPa, a resistência de projeto deverá ser multiplicada por um fator de redução igual a 0,9.
- os elementos em compressão deverão ser de classe 1 ou 2 para condição de flexão pura;
- o ângulo θ entre o banzo e as diagonais deverá estar sempre compreendido entre 30° e 90° ;
- as extremidades dos elementos devem ser preparadas de forma que não haja modificação da sua seção transversal;
- em ligações tipo K com afastamento, deve-se garantir que haja soldabilidade adequada, para isso o afastamento entre os elementos não deverá ser menor que a soma da espessura da parede das diagonais;
- em ligações do tipo K sobreposta, a sobreposição deve ter espaço o bastante para garantir que a interligação entre os elementos seja suficiente para garantir uma

adequada transferência de esforço cortante de uma diagonal para a outra. Para isso a sobreposição deverá ser no mínimo de 25%;

- g) quando houver diferença na espessura das paredes das diagonais e/ou diferença no grau de resistência do aço, a diagonal com menor valor de $t_i f_{yi}$ deverá sobrepor a outra;
- h) quando as diagonais tiverem diferentes larguras ou diâmetros, a diagonal menor deverá sobrepor a outra.

A Fig. 4 apresenta os parâmetros geométricos a serem verificados no dimensionamento de ligações tubulares. Destaca-se que, respeitados estes parâmetros, somente a ruína por plastificação do banzo - Fig. 3(a) - e punçoamento da parede do banzo - Fig. 3(d) – devem ser verificados, pois um destes critérios controlará o dimensionamento. Caso a geometria da ligação esteja fora destes limites de validade, todos os critérios de ruína apresentados anteriormente deverão ser verificados.

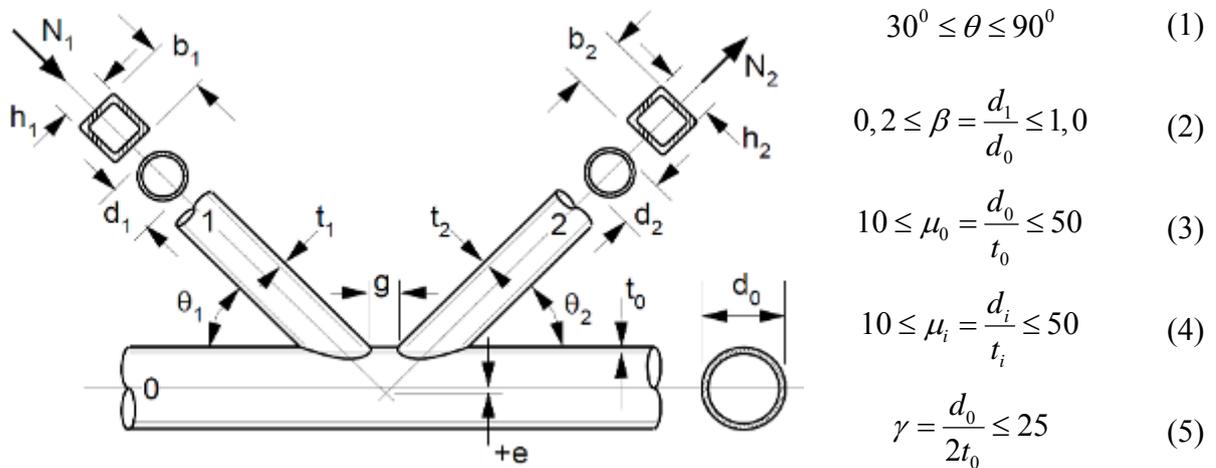


Figura 4: Parâmetros geométricos de verificação para ligação tipo K (Eurocode 3).

A formulação para resistência de projeto de ligações uniplanares do tipo T, X e K é originalmente baseada nas equações de dimensionamento de Kurobane (1981) e, após algumas simplificações e avaliações de regras de projeto, por Wardenier (1982), foram incorporadas nas recomendações do IIW (1989).

Para a ligação do tipo K entre perfis CHS abordada neste trabalho, o Eurocode 3 (2003) recomenda que sejam considerados os critérios de ruína do perfil tubular através dos mecanismos “a” e “d” conforme apresentado na Fig. 3, respeitando-se os limites de validade dos parâmetros geométricos. A carga total que leva à plastificação da face do banzo é obtida através da Eq. (6), sendo a carga que leva à ruína por punçoamento da parede do banzo obtida através da Eq. (7).

$$N_{1,Rd} = \frac{k_p k_g f_{y0} t_0^2}{\text{sen} \theta_1} \left(1,8 + 10,2 \frac{d_i}{d_0} \right) / \gamma_{M5} \quad (6)$$

$$N_{1,Rd} = 0,58 f_{y0} t_0 \pi d_i \frac{1 + \text{sen} \theta_i}{2 \text{sen}^2 \theta_1} / \gamma_{M5} \quad (7)$$

$$k_p = 1 + 0,3n_p - 0,3n_p^2 \leq 1,0 \quad (8)$$

$$k_g = \gamma^{0,2} \left[1 + \frac{0,024\gamma^{1,2}}{1 + \exp(0,5g/t_0 - 1,33)} \right] \quad (9)$$

onde: $N_{i,rd}$ é carga que provoca a plastificação da face do banzo;

γ é o parâmetro geométrico apresentado na Eq. (5);

k_p é calculado conforme a Eq. (8) se $n_p < 0$, ou igual a 1 se $n_p \geq 0$;

k_g é calculado conforme a Eq. (9);

n_p é igual a σ_{op} / f_{y0} ;

σ_{op} é a tensão no banzo sob a diagonal comprimida;

f_{y0} é a tensão de escoamento do aço;

t_0 é a espessura do banzo;

θ_i é o ângulo em graus da diagonal com o banzo;

β é o parâmetro geométrico apresentado na Eq. (2);

γ_{M5} é o coeficiente de segurança, neste caso considerado igual a 1.

2.2 Guia de Projeto de Ligações Tubulares do CIDECT – 2ª versão (Packer, *et al.*, 2008)

Baseado em rigorosas investigações em combinação com diversos estudos numéricos, o IIW re-analisou todas as equações de resistência de ligações e propôs, na segunda edição do guia de projeto do CIDECT (Packer *et al.*, 2008), novas equações para avaliar a resistência de projeto das ligações. A influência dos parâmetros geométricos foi determinada através de retro-análises dos resultados dos modelos numéricos. Após algumas simplificações, as equações foram comparadas com informações experimentais compiladas por Makino *et al.* (1996) e modelos numéricos de Qian *et al.* (2008).

Os pré-requisitos da formulação dados pelo Eurocode continuam sendo válidos. Embora, em alguns casos particulares, o intervalo de validade do parâmetro γ poderia ser maior. Porém, o IIW limitou a razão $2\gamma \leq 50$ porque para razões que excedam este limite, a deformação deverá controlar o dimensionamento da ligação, enquanto que em outros casos, a capacidade de deformação não deverá ser suficiente para redistribuir os momentos de segunda ordem. Nas novas equações, os efeitos da flexão no banzo devido à carga na diagonal são completamente incluídos na função Q_f de tensão no banzo, possibilitando uma melhor apresentação da capacidade da ligação. As equações anteriores de plastificação do banzo foram baseadas em resultados experimentais. Tais resultados foram influenciados pela flexão no banzo devido às configurações dos ensaios.

De acordo com a nova formulação proposta pelo CIDECT (Packer, *et al.*, 2008), a carga total de plastificação da face do banzo é obtida através da Eq. (10) e a carga de ruína por punçamento é obtida através da Eq. (11).

$$N_i^* = Q_u Q_f \frac{f_{y0} t_0^2}{\text{sen} \theta_i} \quad (10)$$

$$N_i^* = 0,58 f_{y0} t_0 \pi d_i \frac{k_a}{\text{sen} \theta_i} \quad (11)$$

$$\text{sendo } d_i \leq d_0 - 2t_0 \quad (12)$$

Os fatores Q_u , Q_f e k_a das equações anteriores são encontrados através das Eqs. (13), (14), (15) e (16), respectivamente:

$$Q_u = 1,65(1 + 8\beta^{1,6})\gamma^{0,3} \left[1 + \frac{1}{1,2 + (g/t_0)^{0,8}} \right] \quad (13)$$

$$Q_f = (1 - |n|)^{C_i} \quad (14)$$

$$k_a = \frac{1 + \text{sen}\theta_i}{2\text{sen}\theta_i} \quad (15)$$

$$n = \frac{N_0}{N_{pl,0}} + \frac{M_0}{M_{pl,0}} \quad (16)$$

onde: N_i é carga que provoca a plastificação da face do banzo;

γ é o parâmetro geométrico apresentado na eq. (5);

n é dado pela Eq. (15);

C_i é igual a 0,25 se $n < 0$ (compressão) ou igual a 0,20 se $n \geq 0$ (tração);

t_0 é a espessura do banzo;

θ_i é o ângulo em graus das diagonais com o banzo;

β é o parâmetro geométrico apresentado na Eq. (2);

γ_{M5} é o coeficiente de segurança, neste caso considerado igual a 1.

3 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 de $\Delta_u = 0,03d_0$, e o limite de serviço, N_s , 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. No caso das ligações onde a razão do banzo é $N_u/N_s < 1,5$, a deformação limite apropriada para determinar a resistência última da ligação deve ser igual a $0,03d_0$. A utilização deste critério será melhor detalhada em seções posteriores do presente trabalho.

4 MODELO NUMÉRICO

Inicialmente, apresenta-se o modelo numérico utilizado neste trabalho para calibração (Kurobane *et al.*, 1986). Este modelo é composto por perfis tubulares circulares, sendo um banzo e duas diagonais com 216,30 e 165,20 mm de diâmetro e espessura de 8,0 e 4,5 mm, respectivamente (Fig. 5). O aço adotado apresenta tensão de escoamento igual a 460 MPa para o banzo e 409 MPa para as diagonais. Este modelo foi desenvolvido no programa de elementos finitos Ansys 12.0 (2009), sendo constituído de elementos de casca (SHELL181 - Ansys Manual Reference, 2009) com quatro nós com seis graus de liberdade cada, ou seja, translação e rotação nos eixos X, Y e Z.

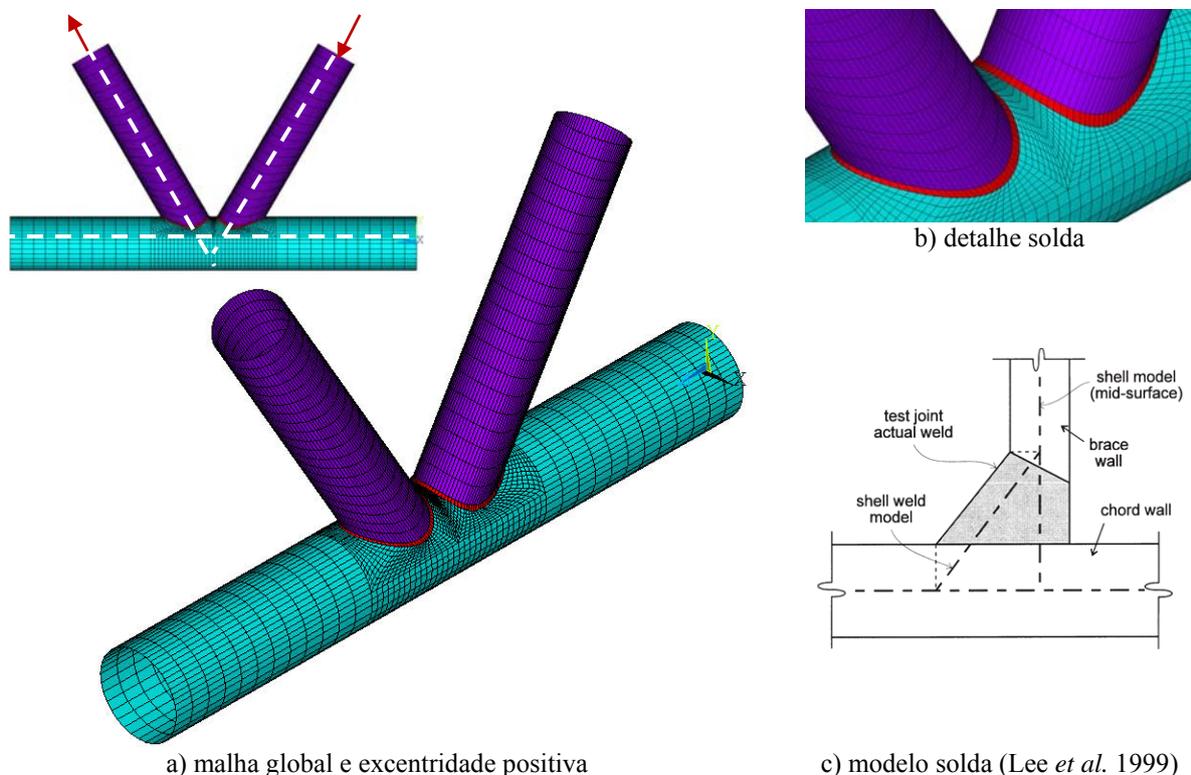


Figura 5: Ligação CHS_K_216,3 x 165,2 mm

Conforme observa-se na Fig. 5, a malha de elementos finitos foi mais refinada próxima da solda, onde a concentração de tensão é maior, e o mais regular possível no restante do

modelo, a fim de evitar problemas numéricos.

Para total mobilização da capacidade resistente da ligação, foram incorporadas ao modelo, as não-linearidades geométricas e do material. 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. A não-linearidade geométrica foi introduzida no modelo através da formulação de Lagrange Atualizado, considerando a previsão de grandes deformações de forma a permitir a redistribuição de carregamento na ligação após escoamento inicial e atualização da matriz de rigidez a cada incremento de carga. Este tipo de análise possibilita obter uma resposta global da ligação efetuando-se uma comparação coerente entre os resultados obtidos através do Eurocode 3 (2003) e os numéricos no que diz ao estado limite último da ligação. Considerou-se também, os efeitos de flexão, cisalhamento e de membrana. Maiores detalhes sobre a geometria da ligação podem ser visualizados na Tab. 1.

Tabela 1: Características da ligação K (Kurobane et al., 1986).

Propriedade	Valor	Definição
d_0 [mm]	216.3	Diâmetro do banzo
d_1 [mm]	165.0	Diâmetro das diagonais
t_0 [mm]	7.82	Espessura do banzo
t_i [mm]	4.32	Espessura das diagonais
L_0 [mm]	1560	Comprimento do banzo
L_i [mm]	800	Comprimento das diagonais
Δ [mm]	20.0	Deslocamento prescrito na extremidade das diagonais
f_y [MPa]	460	Tensão de escoamento do aço do banzo
f_y [MPa]	409	Tensão de escoamento do aço das diagonais
E [GPa]	210	Módulo de Elasticidade do aço
ν	0.3	Coefficiente de Poisson

Apresenta-se na Fig. 6, as curvas carga *versus* deslocamento obtidas numericamente para a ligação K cujas propriedades mecânicas e geométricas são apresentadas na Tab. 1., sendo esta ligação, utilizada na calibração e verificação da aplicação do critério de deformação limite.

Neste gráfico, podem ser observados os limites de $1\%d_0$ e $3\%d_0$, de acordo com o critério de deformação limite proposto por Lu *et al.* (1994) para atendimento aos estados limites de utilização e último respectivamente. Também podem ser observados os valores de resistência obtidos experimentalmente (Kurobane *et al.*, 1986) e analiticamente pelo Eurocode 3 (2003) e pelo CIDECT (Packer *et al.*, 2008). De acordo com a Eq. (6), a carga máxima a ser aplicada nas diagonais de forma a não provocar falha no banzo é $N_{1,Rd} = 427,67$ kN correspondente ao dimensionamento pelo Eurocode 3 (2003). Já pelo CIDECT, obtém-se um valor de $N_1^* = 832,50$ kN. O valor de carga última experimental obtido por Kurobane *et al.* (1986) foi de 794 kN. Aplicando-se os critérios de deformação limite, obtém-se, respectivamente, $N_u = 852,70$ kN e $N_s = 724,54$ kN. Como a razão $N_u/N_s < 1,5$, N_u controla o dimensionamento. Sendo assim, pelo critério de deformação limite, esta ligação resiste a um esforço máximo de compressão de 852,70 kN. Desta forma, pode-se concluir que os resultados obtidos através da equação do Eurocode 3 (2003) apresentam valores significativamente a favor da segurança quando comparados aos resultados dos critérios de deformação limite, equações do CIDECT e experimentais de Kurobane et al (1986). Verifica-se que os resultados obtidos através da formulação proposta pelo CIDECT em 2008 fornecem valores a favor da segurança quando

comparados com os critérios de deformação limite e desfavoráveis quando comparado ao resultado experimental de Kurobane *et al.* (1986). Destaca-se que os valores obtidos com a nova formulação proposta pelo CIDECT apresentam uma melhor concordância com os critérios de deformação limite e experimentais.

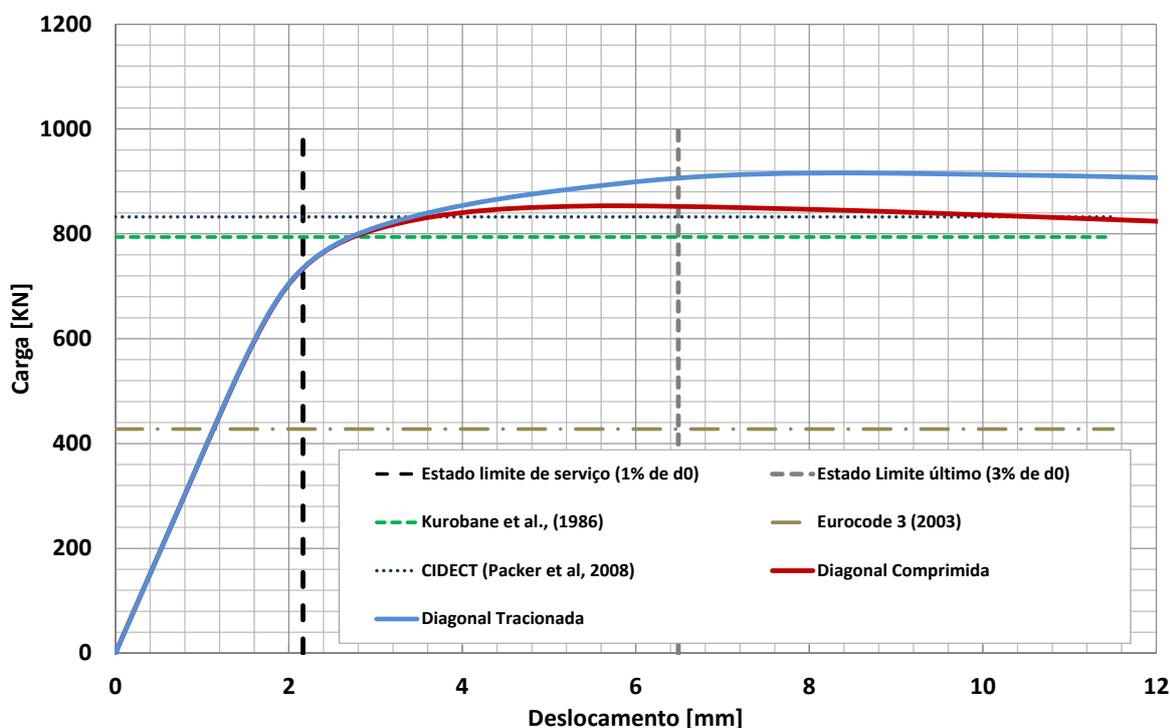


Figura 6: Carga *versus* deslocamento – ligação K CHS com banzo de 216,3x7,82 e diagonais 165,0x4,32 mm

Observa-se ainda, que a resistência ao punçoamento também foi verificada, se confirmando que esta ligação é controlada pela plastificação da face superior do banzo.

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. 7, a distribuição de tensões de *Von Mises*, para quatro níveis de carregamento, obtidas através da análise numérica.

5 ANÁLISE PARAMÉTRICA

Após a calibração do modelo efetuada no capítulo anterior, apresenta-se a seguir, o estudo paramétrico realizado variando alguns parâmetros geométricos, objetivando avaliar sua influência na resistência da ligação K entre perfis CHS. A Tab. 2 apresenta as variáveis utilizadas neste estudo, o qual totaliza doze simulações.

É importante ressaltar que as combinações foram escolhidas respeitando todos os limites geométricos preconizados no Eurocode 3 (2003). Três perfis diferentes para o banzo foram usados, 168,3 x 5,0 mm, 219,1 x 8,0 mm e 298,5 x 8,0 mm. Para cada banzo, quatro diâmetros de diagonais foram escolhidos, de forma a manter aproximadamente a mesma relação entre os parâmetros geométricos das combinações. A espessura da solda foi adotada como a menor espessura entre os elementos a serem soldados na ligação.

Apresenta-se na Tab. 3, o resultado das análises efetuadas, considerando a falha por plastificação da face superior do banzo de acordo com o Eurocode 3 (2003) e o CIDECT

(Packer *et al.*, 2003) e os valores referentes a falha por punçoamento do banzo.

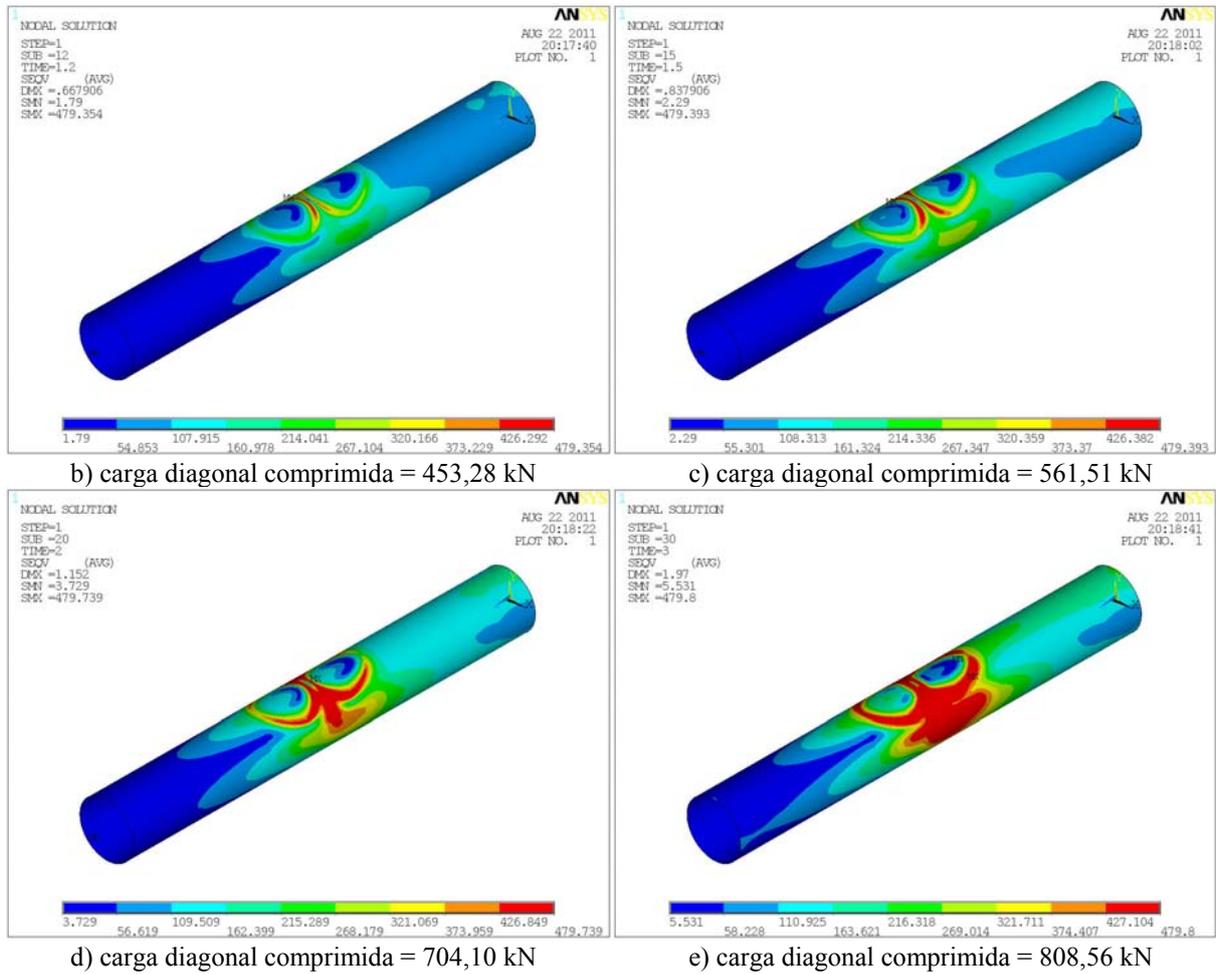


Figura 7: Evolução de tensões de Von Mises – ligação de calibração

Tabela 2: Dados geométricos

Banzo			Diagonal			$\beta = d_i/d_0$
d_0	t_0	$\gamma = d_0/2t_0$	d_i	t_i	d_i/t_i	
168.3	5.0	16.83	88.9	5.0	17.78	0.53
			101.6	5.0	20.32	0.60
			114.3	5.0	22.86	0.68
			127.0	5.0	25.40	0.75
219.1	8.0	13.69	114.3	8.0	14.29	0.52
			127.0	8.0	15.88	0.58
			139.7	8.0	17.46	0.64
			159.0	8.0	19.88	0.73
298.5	8.0	18.66	152.4	8.0	19.05	0.51
			168.3	8.0	21.04	0.56
			193.7	8.0	24.21	0.65
			219.1	8.0	27.39	0.73

Tabela 3: Resultados das análises

Banzo	Diagonal	$N_{1,Rd}$ (EC3)	N_i^* (Cidect)	N_u	N_s	N_u/N_s	$N_{1,Rd}/N^{[1]}$	$N_i^*/N^{[1]}$	N (punção)
d_o	d_i	Ansys							
168,3	88,9	130,24	171,06	240,11	250,28	0,96	0,54	0,71	483,63
	101,6	141,38	187,28	282,29	272,01	1,04	0,50	0,66	552,73
	114,3	154,61	284,70	316,04	306,07	1,03	0,49	0,90	621,82
	127,0	171,87	327,13	354,12	344,65	1,03	0,49	0,92	690,91
219,1	114,3	324,19	409,96	591,91	600,71	0,99	0,55	0,69	994,91
	127,0	348,08	582,35	647,72	658,17	0,98	0,54	0,90	1105,45
	139,7	377,35	656,20	702,59	718,76	0,98	0,54	0,93	1216,00
	159,0	438,90	776,31	799,26	818,32	0,98	0,55	0,97	1383,99
298,5	152,4	363,54	475,46	681,73	673,20	1,01	0,53	0,70	1326,54
	168,3	383,62	516,35	747,13	736,07	1,02	0,51	0,69	1464,94
	193,7	416,38	571,07	861,94	844,97	1,02	0,48	0,66	1686,03
	219,1	454,54	864,73	988,08	965,76	1,02	0,46	0,88	1907,12

^[1] Se $N_u/N_s > 1.5$, então $N = N_u$. Caso contrário, $N = N_s$.

Dimensões em [mm] e cargas em [kN]

Observando-se os resultados, verifica-se que tanto o Eurocode quanto o CIDECT apresentam valores a favor da segurança. Entretanto, verifica-se que os valores da nova formulação do CIDECT apresentam uma melhor concordância com o critério de deformação limite. Analisando a última coluna da Tab. 3, observa-se que as cargas máximas a serem aplicadas pelas diagonais e que provocam o punçoamento no banzo são significativamente superiores as cargas que provocam a plastificação da face superior do banzo, ratificando que a plastificação da seção controla o dimensionamento da ligação.

As Figs. 8 a 10 apresentam as curvas carga *versus* deslocamento para os diversos casos avaliados na análise paramétrica com o objetivo de ilustrar como os valores de resistência referentes à aplicação do critério de deformação limite foram obtidos.

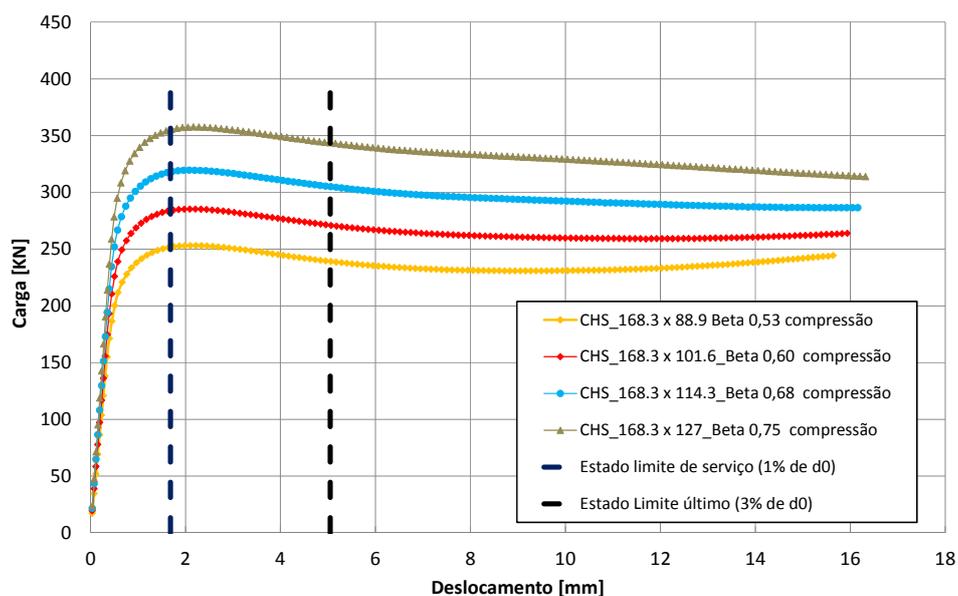


Figura 8: CHS_K Banzo 168.3 x 5.0mm - Curvas Carga x Deslocamento

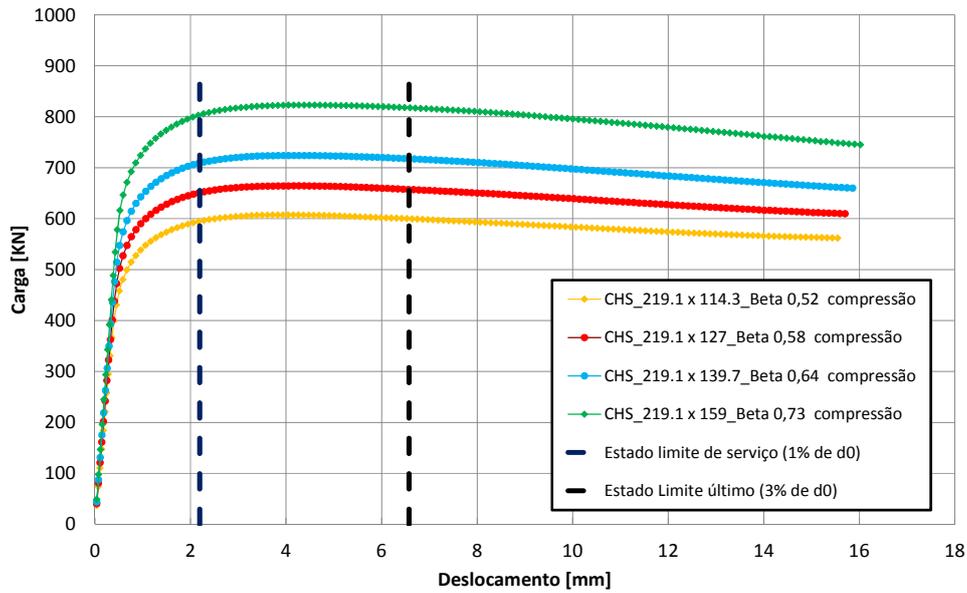


Figura 9: CHS_K Banzo 219.1 x 8.0mm - Curvas Carga x Deslocamento

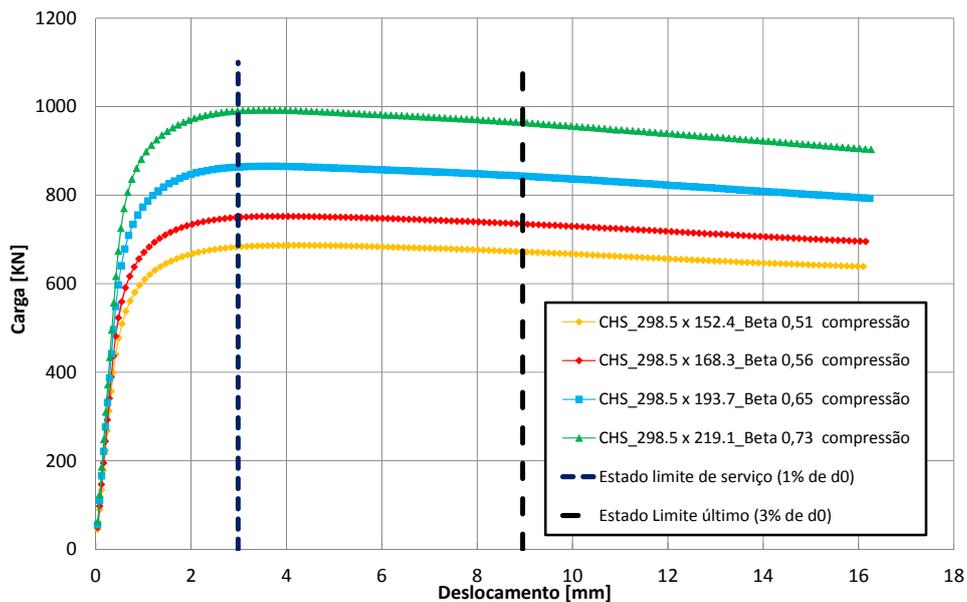


Figura 10: CHS_K Banzo 298.5 x 8.0mm - Curvas Carga x Deslocamento

Cabe ressaltar que estes valores foram obtidos para as cargas aplicadas nas diagonais comprimidas considerando-se que estes valores são menores do que as cargas nas diagonais tracionadas conforme pode ser verificado na Fig. 6 que apresentou a calibração do modelo numérico desenvolvido neste trabalho.

6 CONCLUSÕES

As ligações soldadas de perfis tubulares em aço estrutural são atualmente consideradas no Eurocode 3 parte 1.8 (2003) onde são previstas ligações entre os mais diversos tipos de perfis tubulares. O código relaciona ainda, os parâmetros que influenciam o comportamento das

ligações e os diferentes tipos de ruína. Entretanto, a formulação proposta neste regulamento somente pode ser aplicada dentro de determinados limites consoantes a configuração geométrica das ligações. Em 2008, o CIDECT propôs, na 2ª edição de seu Guia de Projeto de Estruturas Tubulares, uma nova formulação para avaliar a resistência da ligação destas estruturas. Desta forma, este trabalho apresentou um estudo comparativo entre as equações propostas no Eurocode e a nova formulação proposta pelo CIDECT. Cabe ressaltar, que as equações proposta na norma européia se basearam na 1ª edição do mesmo Guia de Projeto de Estruturas Tubulares do CIDECT.

Este trabalho apresentou um estudo numérico através do Método dos Elementos Finitos de uma ligação do tipo K entre perfis tubulares circulares, calibrado com o modelo numérico desenvolvido por Kurobane et al. (1982). Os resultados foram comparados com as equações de projeto do Eurocode 3, as equações propostas pela 2ª edição do Guia de Projeto de Estruturas Tubulares do Cidect e os critérios de deformação limite de Zhao (1991) e Lu et al (1994).

Analisando as Figs. 8 a 10, observa-se que o aumento do parâmetro β , conduz a um aumento da resistência da ligação, convergindo com as Eqs. (6) e (10). Ressalta-se que o parâmetro γ também contribuiu para o aumento da resistência global da ligação. A evolução das tensões de Von Mises (Fig. 7) apresenta uma comprovação do que o Eurocode 3 preconiza no que tange ao estado limite último da ligação. Observa-se que a ruína da ligação ocorre com a plastificação da face carregada do banzo. Esta condição foi também comprovada comparando os valores analíticos da carga de plastificação da face do banzo e da carga que provoca o punçoamento no banzo.

Desenvolveu-se ainda uma análise paramétrica para avaliar a influência do parâmetro β no comportamento global dessas ligações. Foram escolhidas doze combinações diferentes para análise, sendo um conjunto de quatro diagonais para cada três banzos, considerando-se, aproximadamente, a mesma variação para o parâmetro β . Esse conjunto considera elementos com diâmetros de médio porte, que são os mais usuais no Brasil. Observando-se os resultados dessa análise, conclui-se que quanto maior for o valor do parâmetro β maior será a resistência da ligação. Ainda analisando os resultados da análise paramétrica, percebe-se que dentro dos limites de validade preconizados pelo Eurocode 3, os resultados da análise numérica, da equação proposta pelo Eurocode 3 e da aplicação do critério de deformação limite são bem compatíveis e satisfatórios, apesar de uma pequena divergência encontrada entre os valores.

Analisando a Tab. 3, observa-se que os resultados do Eurocode 3 apresentam-se consideravelmente conservadores quando comparados aos resultados dos critérios de deformação limite.

Verifica-se que a nova formulação proposta pelo CIDECT apresenta resultados com maior convergência aos critérios de deformação limite, e ainda, a favor da segurança quando comparados a estes critérios.

Os valores da carga de punçoamento são apresentados também como forma de evidenciar que a ligação é controlada pela plastificação da face superior do banzo.

Conclui-se que para uma ligação do tipo K, e respeitadas todas as condições geométricas de contorno, a plastificação da seção do banzo irá controlar o dimensionamento. Os resultados da norma europeia apresentam-se significativamente a favor da segurança e a nova formulação proposta pelo CIDECT, ainda que mais arrojada se comparada com o Eurocode 3, apresenta uma boa concordância com os critérios de deformação limite.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem a UERJ, a FAPERJ, ao CNPq e a CAPES, pelo apoio financeiro para desenvolvimento do presente projeto de pesquisa.

REFERENCES

- Cao, J.J., Packer, J.A., Young, G.J. (1998), Yield line analysis of RHS connections with axial loads, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 48, (pp 1-25).
- 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.
- Bittencourt, M.C., Avaliação de Ligações Soldadas de Perfis Tubulares em Estruturas de Aço Através do Método dos Elementos Finitos, Dissertação de Mestrado, PGECIV - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UERJ, 2008.
- 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.
- Gerken, F. de S., 2005. Projeto para estruturas em perfis tubulares, *Revista Tubo & Companhia* - Ano I - Número 4.
- Korol, R., Mirza, F. (1982). Finite Element Analysis of RHS T-Joints. *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol.108, (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. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 59, (pp. 427-559).
- Kurobane, Y., Ogawa, K., Ochi, K., Makino, Y., (1986). Local Buckling of Braces in Tubular K-Joints. *Thin-Walled Structures*, (pp. 23-40).
- 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.
- Lu LH, Puthli RS, Wardenier J. In: Ultimate deformation criteria for uniplanar connections between I-beams and RHS columns under in-plane bending. Proceedings of the 4th International Offshore and Polar Engineering Conference, ISOPE-94, Osaka (Japan), 1994.
- Makino, Y., Kurobane, Y., Ochi, K., Vegte, G.J. van der, and Wilmshurst, S.R., 1996: Database of test and numerical analysis results for unstiffened tubular joints. IIW Doc. XV-E-96-220.
- 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.
- 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, *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., Kurobane, Y., Dutta, D., and Yeomans, N, (2008). Design guide for rectangular hollow section (RHS) joints under predominantly static loading, CIDECT 3, Second Edition.
- Qian, X.D., Choo, Y.S., Vegte, G.J. van der, and Wardenier, J., 2008: Evaluation of the new IIW CHS strength formulae for thick-walled joints. Proceedings 12th International Symposium on Tubular Structures, Shanghai, China, Tubular Structures XII, Taylor & Francis Group, London, UK, pp. 271-279.
- Rondal, J., Wurker, K.G., Wardenier, J., Dutta, D., and Yeomans, N, (1992). Structural Stability of Hollow Sections, CIDECT.
- Vallourec & Mannesmann do Brasil, 2004. Catálogo de Produtos: Tubos Estruturais de Seções Circulares, Quadradas e Retangulares, 8 pp.
- Wardenier, J., (2000). Hollow Sections in Structural Applications, CIDECT.
- 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.
- <http://www.cbca-ibs.org.br/>. Consulta em 10/11/2010.
- <http://www.metrorio.com.br>. Consulta em 29/10/2010.