

AVALIAÇÃO DE LIGAÇÕES KK ENTRE PERFIS TUBULARES EM AÇO SUJEITAS A ESFORÇOS AXIAIS NO BANZO

David Silva Nobre¹

Luciano Rodrigues Ornelas de Lima²

Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco³

André Tenchini da Silva⁴

RESUMO

O amplo uso de seções tubulares em regiões como, por exemplo, Europa Ocidental e América do Norte, em estruturas, por razões estéticas, pode ser atribuído ao alto grau de desenvolvimento de sua tecnologia de produção. Apesar disso, seu uso no Brasil no passado era limitado a coberturas espaciais. Atualmente, a situação do mercado brasileiro mudou em virtude do aumento significativo da disponibilidade de seções estruturais circulares. Este trabalho apresenta uma análise de ligações KK com seções circulares ocas. Uma comparação entre as formulações do EN 1993-1-8, da NBR16239 e da ISSO 14346 foi realizada. Um modelo de elementos finitos foi feito no programa ANSYS com o intuito de analisar cada ligação.

Palavras-chave: Seções tubulares. Modelo de elementos finitos. Análise numérica.

EVALUATION OF KK TUBULAR JOINTS SUBJECTED TO CHORD AXIAL FORCE

ABSTRACT

The widespread use of tubular sections in regions like Western Europe and North America in addition structural and aesthetical reasons can be attributed to the high degree of development of their production technology. Despite this fact, their use in Brazil in the past was limited to a few spatial roofs. Currently, the situation in the Brazilian market begins to change caused by the significant increase in the availability of structural hollow sections. This work presents an analysis of “KK” joints with circular hollow sections. A comparison between the analytical design formulations proposed by the EN 1993-1-8, NBR16239 and ISO 14346 tubular joint design guide was performed. A finite element model was developed in the ANSYS program for each analyzed joint typology.

Keywords: Tubular sections. Finite element model. Numerical analysis.

¹ Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Estadual do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, RJ, Brasil
david_nobre17@yahoo.com.br

² Pós-doutor em Engenharia Civil pela Universidade de Coimbra (U.COIMBRA), Coimbra, Portugal
lucianolima@uerj.br

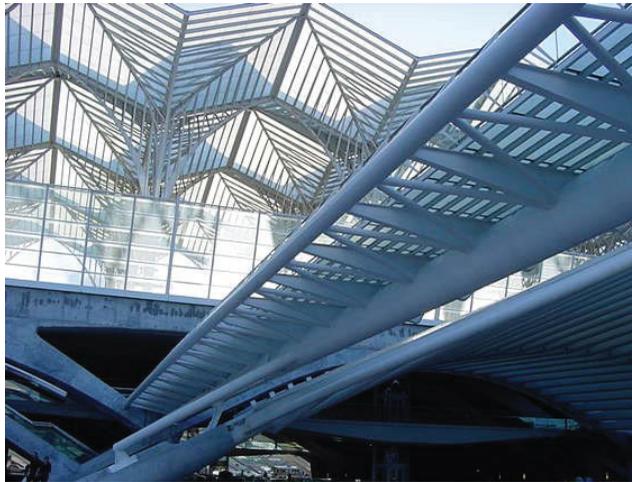
³ Pós-doutor em Engenharia Civil pelo Imperial College of Science Technology and Medicine University of London, Londres, Inglaterra
vellasco@eng.uerj.br

⁴ Doutor em Construção Metálica e Mista pela Universidade de Coimbra (U.COIMBRA), Coimbra, Portugal
tenchini@eng.uerj.br

1 INTRODUÇÃO

As excelentes propriedades mecânicas e estruturais de seções tubulares são bastante reconhecidas. A produção industrial de perfis tubulares quadrados, retangulares e circulares em aço, também conhecidos como SHS, RHS e CHS, respectivamente, só foi iniciada no início dos anos 60 na Inglaterra, o que explica o fato de os mesmos serem bem recentes. Exemplos na natureza evidenciam as excelentes propriedades geométricas destes perfis como elemento resistente à compressão, tração, flexão e, principalmente, torção (WARDENIER et al., 2010a, 2010b). Conforme se observa na figura 1, além do seu excelente comportamento estrutural, suas formas tornam este tipo de concepção bastante atrativa do ponto de vista arquitetônico e visual.

Figura 1: Exemplo de passarela em estrutura tubular (Lisboa, Portugal)



Fonte: Os autores.

Muitas outras vantagens podem ser evidenciadas, principalmente para elementos submetidos a esforços de compressão e torção. Todavia, o maior custo unitário do material em relação aos perfis de seções abertas, pode ser compensado tirando-se partido das inúmeras vantagens apresentadas pelas seções tubulares. Inúmeras construções executadas com estes perfis comprovam que este modelo construtivo pode ser economicamente competitivo em relação às estruturas convencionais.

Em virtude do elevado grau de desenvolvimento da tecnologia em sua produção, a utilização de perfis tubulares é grandemente difundida em países como, Canadá, Inglaterra, Alemanha e Holanda. A utilização de tais perfis no Brasil era bastante restrita, limitando-se a coberturas espaciais. Atualmente, a situação do mercado brasileiro começa a se alterar em decorrência do significativo aumento da oferta de perfis tubulares estruturais, pela TUPER S.A (TUPER, 2014), fabricante de tubos com costura e pela Vallourec & Mannesmann do Brasil (VALLOUREC & MANNESMANN TUBES, 2010), que, a partir de 2013, passou a se chamar somente Vallourec (V), fabricante de tubos sem costura.

Em função da resistência das ligações entre os elementos representarem o ponto crítico em um projeto de estruturas tubulares, um projeto otimizado pode ser obtido apenas se o projetista entender o real comportamento da ligação e considerá-lo conceitualmente no projeto.

A precisão de métodos de dimensionamento é um instrumento chave para atingir um dimensionamento econômico e seguro. Estudos recentes de ligações tubulares revelaram que pesquisas adicionais são necessários, especialmente para algumas geometrias particulares caracterizadas por modos de falha com predições de carregamento inseguras e não-econômicas.

Uma das primeiras investigações compreensivas nessa área foi publicada por Korol e Mirza (1982), que desenvolveram um modelo numérico com elementos de casca. Os autores concluíram que o aumento da resistência da ligação está associado ao aumento dos parâmetros β (relação entre o diâmetro da diagonal e o diâmetro do banzo) e γ (relação entre a largura do banzo e duas vezes a sua espessura) e indicaram a necessidade de um critério de deformação limite para as ligações avaliadas por eles.

O limite de deformação proposto por Lu e outros (1994), cujos resultados são validados e aceitos por Zhao e outros (2010) pode ser utilizado na avaliação de ligações sujeitas a esforços de flexão e esforços axiais. A resistência da ligação é baseada na comparação da deformação na interseção banzo–montante para dois níveis de carregamento: a resistência última, N_u , que corresponde a um deslocamento fora do plano do banzo $N_u = 3\% b_o$, e o limite de serviço, N_s , que corresponde a um deslocamento para fora do plano $N_s = 1\% b_o$. Para uma ligação com um carga pico, N_{pico} , com uma deformação associada menor que $3\% b_o$, tal pico é considerado a resistência da ligação. Se a carga pico é associada a uma deformação maior que $3\% b_o$, a razão N_u/N_s deve ser considerada. Se a razão N_u/N_s é menor que 1,5, o dimensionamento da ligação é baseado no estado limite último, N_u . Por outro lado, se N_u/N_s é maior que 1,5, o dimensionamento da ligação é controlado pelo limite de serviço multiplicado por 1,5, ou seja, $1,5N_s$.

Nesse ponto, é razoável dizer que Zhao e outros (2010) realizaram uma avaliação desse critério e concluíram que um entendimento mais adequado com resultados experimentais foi obtido usando apenas o critério de deformação limite de 3%.

Este trabalho apresenta um modelo numérico, isto é, simulações não-lineares de modelos de elementos finitos, usado para executar um estudo paramétrico lidando com o comportamento de ligações tubulares do tipo KK de seções circulares vazadas. O modelo proposto foi validado comparando resultados experimentais (LEE; WILMSHURST, 1997) com as equações propostas pelo EN 1993-1-8 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2010), pela ISO 14346 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2013) e pelo critério de deformação limite presente na literatura. As variáveis principais do presente trabalho são a razão entre o diâmetro da diagonal e o diâmetro do banzo e a razão entre o diâmetro do banzo e a espessura do banzo.

Usando um banco de dados contendo resultados testados de 58 ligações, expressões que expliquem a resistência de ligações multiplanares com perfis tubulares circulares com carregamentos axiais nas diagonais, foram procuradas por Paul e outros (1994). As ligações envolvidas foram TT ou KK multiplanares que consistiam em duas T ou K uniplanares que se encontravam em diferentes planos. Tais ligações tinham configurações idênticas e carregamentos nas diagonais. Uma análise de regressão múltipla foi realizada para obter equações de dimensionamento. As equações de resistência última propostas mostraram-se em boa concordância com os resultados de testes. Os modelos de previsão foram baseados em um modelo mecânico simples que possibilitaram uma extrapolação dos limites de validade das variáveis geométricas. As equações de resistência propostas foram comparadas com fórmulas já existentes na literatura. Para os intervalos de validade propostos nas equações de resistência última, o coeficiente multiplanar μ , o fator pelo qual a resistência da

ligação uniplanar precisa ser multiplicado para obter a carga da ligação multiplanar, variou de 0,5 a 1,3, indicando que os efeitos de uma ligação desse tipo são realmente significativos.

Lee e Wilmshurst (1997) apresentaram um estudo paramétrico levando em consideração ligações multiplanares KK em perfis tubulares circulares, apresentando a resistência das mesmas. Tal estudo foi realizado utilizando um modelo de elementos finitos validado e bem calibrado, cujas ligações foram sujeitas a um carregamento antissimétrico. No total, 40 ligações foram analisadas. As ligações que falharam por flexão do banzo foram divididas em 2 grupos: um no qual a falha ocorreu na região do afastamento transversal das diagonais e outro no qual a falha ocorreu na região do afastamento longitudinal, o que está de acordo com evidências experimentais de trabalhos anteriores. Os modelos de elementos finitos e os dados numéricos já existentes formaram uma quantidade razoável de ligações para que uma análise de regressão múltipla pudesse ser feita. Dois conjuntos de ligações foram desenvolvidos através delas: um forneceu funções de correção que podem ser aplicadas a uma ligação K e outro relaciona a carga não-dimensional a parâmetros geométricos. Ambas as equações produziram resultados com elevado grau de precisão.

Mendes (2008), em sua dissertação de mestrado, desenvolveu uma análise teórica, numérica e experimental de ligações soldadas do tipo K, KT e T entre perfis HSS, sendo RHS para o banzo e CHS para os demais elementos. As análises teóricas realizadas a partir das recomendações de norma e as análises numéricas envolveram a geração, análise e calibração, baseadas nos resultados obtidos nos ensaios experimentais. O autor apontou para uma boa convergência entre os resultados experimentais, a formulação teórica preconizada pelo EN 1993-1-8 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2010) e os resultados numéricos, para a ligação tipo T. Entretanto, observou-se que o mesmo não ocorre para as ligações tipo K e KT.

Gazzola e outros (2000) relataram em seu artigo um estudo do efeito dos esforços axiais em ligações tubulares soldadas do tipo K através do método dos elementos finitos comparando os resultados obtidos com uma equação anteriormente desenvolvida. Os resultados mostram-se satisfatórios. Observando-se a necessidade de maiores pesquisas em ligações do tipo K, Lee e Gazzola (2006) fizeram uma modelagem em elementos finitos para este tipo de ligação com o objetivo de determinar resultados para ligações com a chamada sobreposição (quando a coincidência dos centros dos montantes ocorre abaixo do banzo com sobreposição das diagonais) e afastamento (quando não ocorre sobreposição das diagonais) sob a ação de momento fletor no plano. Para tais análises foram feitas variações nos parâmetros geométricos dos tubos de forma a obterem a influência de cada um destes na ligação e com isso, a equação proposta pode ser analisada para ambas as ligações.

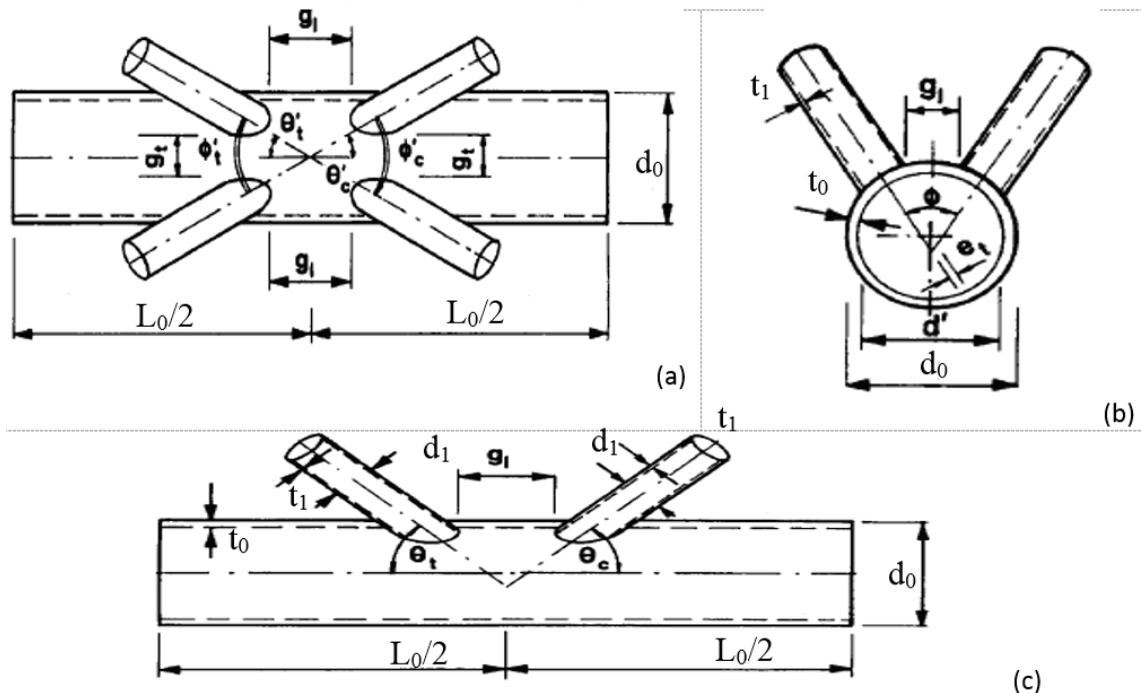
Forti (2010) apresentou, em sua Tese de Doutorado, um estudo paramétrico comparativo de ligações do tipo K e KK utilizando perfis tubulares circulares com afastamento entre diagonais e carregadas simetricamente. Para que as ligações fossem comparadas, foi desenvolvido um modelo numérico através do programa ANSYS (2010). Foram desenvolvidos dois programas auxiliares para facilitar o estudo paramétrico de 55 ligações do tipo KK e suas correspondentes K que foram analisadas e comparadas. Um dos objetivos da tese era propor um critério objetivo para definir os modos de falha (1 e 2) da ligação tipo KK baseado na deformação diametral do banzo. Outro objetivo era estabelecer uma demarcação do limite entre os dois modos de falha como uma função do afastamento transversal entre as diagonais. Os resultados permitiram o desenvolvimento de ligações que previam as resistências das ligações tipo KK para os modos de falha 1 e 2 a partir da resistência de ligação tipo K correspondente.

Silva (2012) apresentou, em sua Dissertação de Mestrado, uma análise de ligações tipo K e T entre perfis tubulares circulares. Ele estabeleceu um quadro comparativo entre as formulações analíticas de dimensionamento proposta pelo EN 1993-1-8 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2010), ISO 14346 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2013), e critérios de deformação limite (Zhao et al., 2010). Para cada um dos tipos de ligações analisadas, um modelo em elementos finitos foi desenvolvido no ANSYS (2010), calibrado e validado com resultados experimentais e numéricos existentes na literatura. As não-linearidades física e geométrica foram incorporadas aos modelos a fim de se mobilizar totalmente a capacidade resistente da ligação. Ele analisou modelos com e sem carregamentos no banzo. Ele concluiu que, tanto os modelos com carregamento, como os sem carregamento, a razão entre as cargas associadas ao estado limite último e ao de serviço permanecem menores que 1,50, ou seja, $N_u/N_s < 1,50$. Desta forma, o estado limite último permanece controlando a ligação.

2 RECOMENDAÇÕES DO EN 1993-1-8, DA NBR16239 E DA ISO 14346

De acordo com a EN 1993-1-8 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2010) a NBR 16239 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013) e a ISO 14346 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2013), alguns limites precisam ser verificados antes de calcular a resistência da ligação. Tais limites são mostrados na figura 2 onde $d_o, d_i, t_o, t_i, \theta, \phi, g_i, g_p$ e L representam, respectivamente, o diâmetro do banzo, o diâmetro da diagonal, a espessura da parede do banzo, a espessura da parede da diagonal, o ângulo entre o banzo e o eixo da diagonal comprimida, o ângulo fora do plano entre as diagonais, o afastamento longitudinal entre as diagonais, o afastamento transversal entre as diagonais e o comprimento do banzo.

Figura 2: Propriedades geométricas da ligação



Fonte: (LEE; WILMSHURST, 1997).

Quando ligações do tipo KK utilizando perfis circulares vazados são consideradas, alguns estados limites últimos precisam ser verificados. Apesar disso, a plastificação da face superior do banzo controla o dimensionamento em todos os casos analisados. O EN 1993-1-8 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2010) e a NBR 16239 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013) expressam o estado limite último na equação (7), baseado em uma ligação do tipo KK com perfis circulares vazados com um fator de redução igual a 0,9.

$$30^\circ \leq \theta_i \leq 90^\circ \quad (1)$$

$$0.2 \leq \beta = \frac{d_1}{d_0} \leq 1 \quad (2)$$

$$10 \leq \mu_0 = \frac{d_0}{t_0} \leq 50 \quad (3)$$

$$10 \leq \mu_i = \frac{d_i}{t_i} \leq 50 \quad (4)$$

$$\gamma = \frac{d_0}{2t_0} \quad (5)$$

$$g \geq t_1 + t_2 \quad (6)$$

$$N_{1,Rd} = 0.9k_g k_p f_{y0} t_0^2 (1.8 + 10.2 \times d_1 / d_0) / \gamma_{M5} / \sin \theta \quad (7)$$

$$k_g = \gamma^{0.2} [1 + 0.024\gamma^{1.2} / \exp(0.5g/t_0 - 1.33)] \quad (8)$$

Onde:

- $N_{1,Rd}$ é a resistência plástica da face do banzo;
- é um parâmetro geométrico de acordo com a equação (5);
- k_p é igual a 1,0 para cargas de tração no banzo e igual a $1 + 0,3n_p - 0,3n_p^2$ para cargas de compressão no banzo, sendo n dado pela equação (10);
- k_g é um parâmetro calculado pela equação (8);
- f_{y0} é a tensão de escoamento, igual a 355 MPa;
- é um parâmetro geométrico, calculado pela equação (2); e
- é um fator de segurança, nesse caso, igual a 1.

De acordo com a ISO 14346 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2013), a resistência da ligação é calculada em termos Q_u (influência dos parâmetros e) e Q_f (influência do parâmetro n). Nessas equações, o parâmetro C_1 é tomado igual a 0,25 para banzos com tensões de compressão e como 0,20 para tensões de tração. Para diferenciar da formulação presente na 1ª edição do CIDECT (PACKER et al., 1993) e adotada em diversos regulamentos ao redor do mundo, as equações apresentadas a seguir consideram pequenas diferenças nas notações utilizadas.

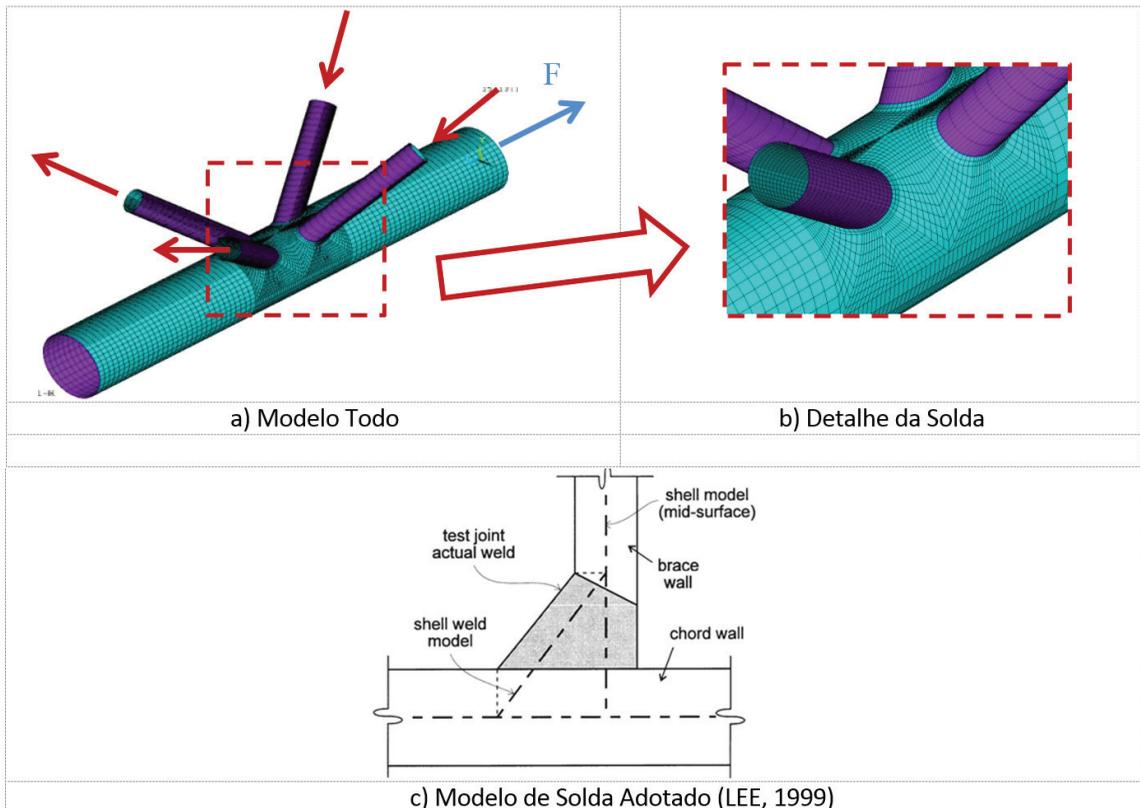
$$N_i^* = Q_u Q_f \frac{f_{y0} t_0^2}{\sin \theta_1} \quad \text{with} \quad Q_u = 1.65 \gamma^{0.3} (1 + 8 \beta^{1.6}) [1 + 1/1.2 + (g/t_0)^{0.8}] \quad (9)$$

$$n = \frac{N_0}{N_{pl,0}} + \frac{M_0}{M_{pl,0}} \quad Q_f = (1 - |n|)^{c_1} \quad (10)$$

3 MODELO NUMÉRICO

O modelo numérico proposto adotou elemento tipo casca (SHELL181), existente na biblioteca de elementos do ANSYS (2010), com 4 nós, considerando esforços de flexão, corte e efeito de membrana. A malha de elementos finitos 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 elemento de casca de acordo com Lee (1999), vide figura 3, mostrando uma visão geral do modelo de elementos finitos desenvolvido. Foi considerado um apoio de 2º gênero na extremidade esquerda e um apoio do 1º gênero na extremidade direita.

Figura 3: Modelo da ligação



Fonte: (NOBRE, 2014; LEE, 1999).

De forma a avaliar o efeito do esforço normal atuante no banzo no comportamento global da ligação, apresentam-se a seguir, neste artigo, modelos onde foram considerados níveis de esforços normal aplicados no banzo, variando de 15% até 75% da resistência plástica do banzo. Deve-se ressaltar que, neste caso, primeiro aplicou-se o esforço normal no banzo para gerar um estado de carregamento inicial e depois, aplicaram-se deslocamentos de forma simétrica nas diagonais.

Neste artigo, foram utilizadas três ligações, PKK-31, PKK-34 e SKK-15, cujas propriedades geométricas são mostradas na tabela 1.

De forma a avaliar o efeito do esforço normal atuante no banzo no comportamento global da ligação, apresentam-se, a seguir, modelos onde foram considerados níveis de esforços normal aplicados no banzo, variando de 15% até 75% da resistência plástica do banzo, de compressão e de tração. Deve-se ressaltar que, neste caso, primeiro aplicou-se o esforço normal no banzo para gerar um estado de carregamento inicial e depois, aplicaram-se deslocamentos de forma simétrica nas diagonais.

Foram analisadas duas séries de modelos, uma considerando esforço normal de tração no banzo, considerando 15%, 30%, 45% e 60% da resistência plástica, outra considerando esforço de compressão no banzo, considerando 30%, 45%, 60% e 75% da resistência plástica.

Tabela 1: Resumo das propriedades geométricas das ligações utilizadas ($f_y=355$ MPa)

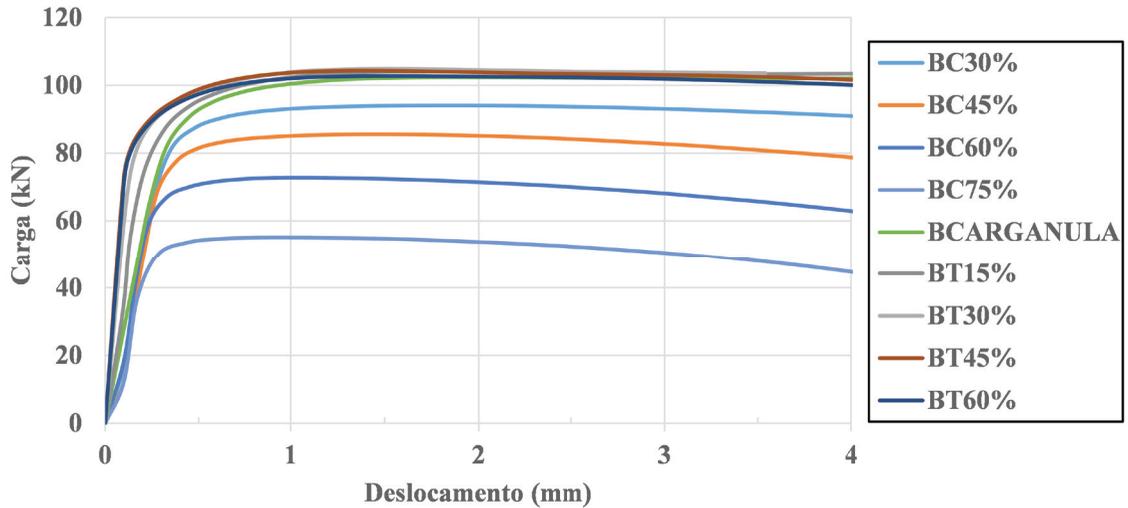
REF	Banzo d_0	Diagonal d_1	t_0	t_1	θ	ϕ	g_l	g_t	$\beta=d_1/d_0$
PKK-31	141,3	44.50	4,4	3	60	60	35	28,8	0,31
PKK-34	141,3	44.50	4,4	3	60	75	55	46,3	0,31
SKK-15	120	48	5	4	56,3	60	13,4	48	0,4

Fonte: (NOBRE, 2014).

4 RESULTADOS NUMÉRICOS

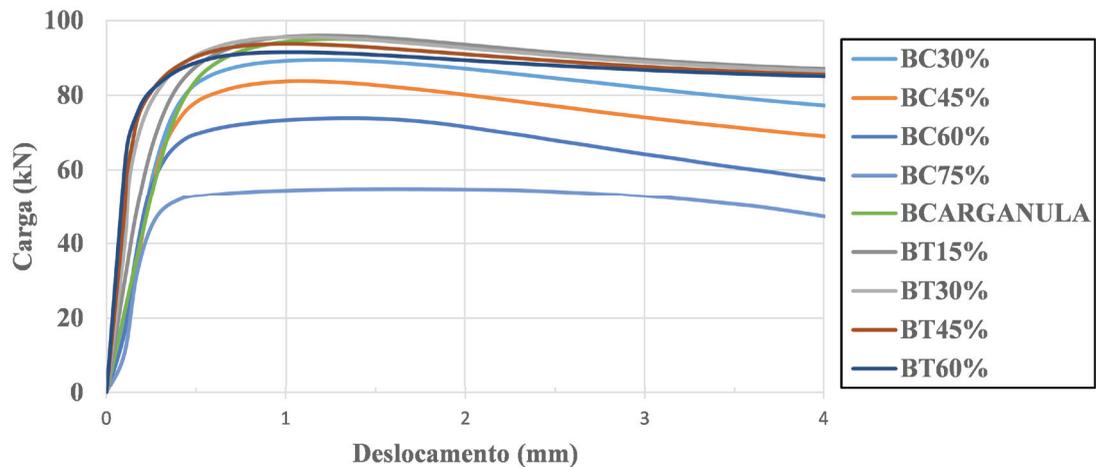
Como já foi explicado anteriormente para esse tipo de ligação, o estado limite último que governa o dimensionamento é a plastificação da face superior do banzo. Da figura 4 a figura 6 são apresentadas as curvas cargas versus deslocamento de todos os modelos analisados para as ligações PKK-31, PKK-34 e SKK-15, respectivamente.

Figura 4: Modelos analisados para a ligação PKK-31



Fonte: Os autores.

Figura 5: Modelos analisados para a ligação PKK-34

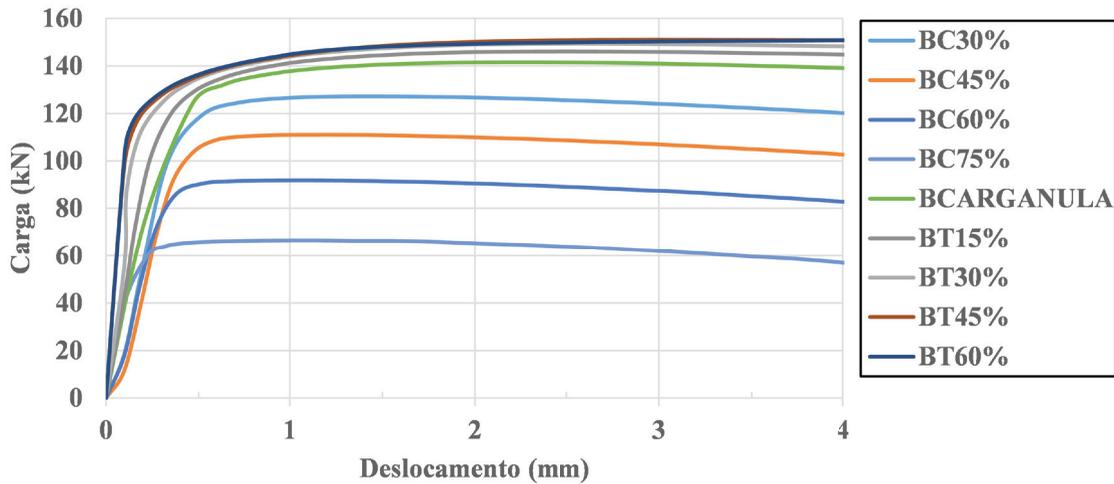


Fonte: Os autores.

As tabelas 2 e 3 mostram os resultados obtidos pelas equações do EN 1993-1-8 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2010) e da ISO 14346 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2013) e pela aplicação do critério de deformação limite, 3% de d_0 (igual a 4,24 mm) ou o pico de carga, o que ocorrer primeiro, para as ligações PKK-31 e PKK-34.

A tabela 4 mostra os resultados obtidos pelas equações do EN 1993-1-8 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2010) e da ISO 14346 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2013) e pela aplicação do critério de deformação limite, 3% de d_0 (igual a 3,6 mm) ou o pico de carga, o que ocorrer primeiro, para a ligação SKK-15.

Figura 6: Modelos analisados para a ligação SKK-15



Fonte: Os autores.

Tabela 2: Resultados para a ligação PKK-31

REF		$3\%d_0$	N_{pico}	N_{ANSYS}	$N_{1,Rd}$	$N1^*$
PKK-31	BC75%		55,12	55,12	39,50	55,57
	BC60%		72,8	72,8	46,38	62,50
	BC45%		85,57	85,57	52,39	67,68
	BC30%		94,6	94,6	57,52	71,89
	CNULA	102,13		102,13	65,15	78,59
	BT15%		104,08	104,08	65,15	76,08
	BT30%		104,83	104,83	65,15	73,18
	BT45%		104,31	104,31	65,15	69,74
	BT60%		102,72	102,72	65,15	65,43

Fonte: Os autores.

Da figura 7 a figura 9 são apresentados os resultados obtidos pelas equações do EN 1993-1-8 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2010) e da ISO 14346 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2013) e pelo critério de deformação limite e forma de gráfico para a ligação PKK-31, PKK-34 e SKK-15, respectivamente.

Tabela 3: Resultados para a ligação PKK-34

REF		3% d_0	N_{pico}	N_{ANSYS}	$N_{1,Rd}$	$N1^*$
PKK-34	BC75%		54,93	54,93	38,00	53,62
	BC60%		73,91	73,91	44,63	60,31
	BC45%		83,8	83,8	50,41	65,30
	BC30%		89,49	89,49	55,35	69,36
	CNULA		95,06	95,06	62,68	75,83
	BT15%		95,99	95,99	62,68	73,41
	BT30%		95,57	95,57	62,68	70,61
	BT45%		93,79	93,79	62,68	67,29
	BT60%		91,55	91,55	62,68	63,13

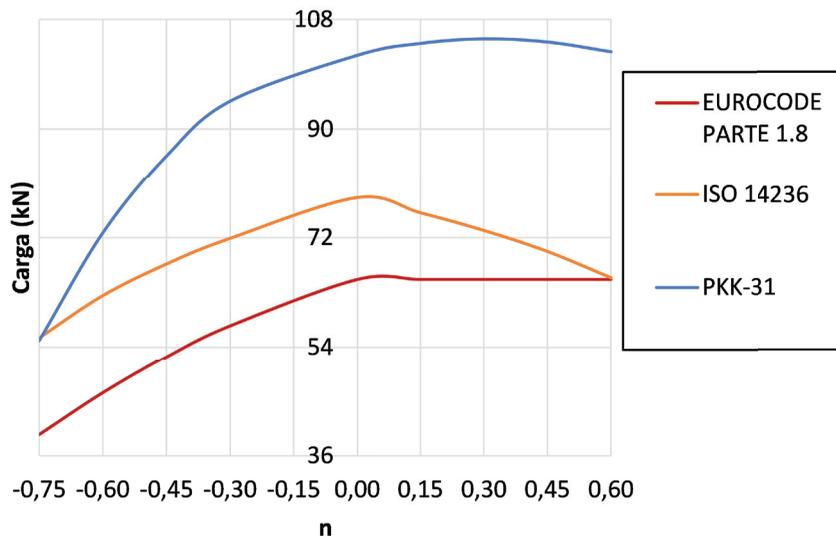
Fonte: Os autores.

Tabela 4: Resultados para a ligação SKK-15

REF		3% d_0	N_{pico}	N_{ANSYS}	$N_{1,Rd}$	$N1^*$
SKK-15	BC75%		66,53	66,53	57,06	84,89
	BC60%		91,81	91,81	67,01	95,47
	BC45%		111,03	111,03	75,70	103,38
	BC30%		127,2	127,2	83,11	109,81
	CNULA		141,59	141,59	94,12	120,05
	BT15%		146,14	146,14	94,12	116,21
	BT30%		149,38	149,38	94,12	111,78
	BT45%		151,03	151,03	94,12	106,52
	BT60%	150,52		150,52	94,12	99,94

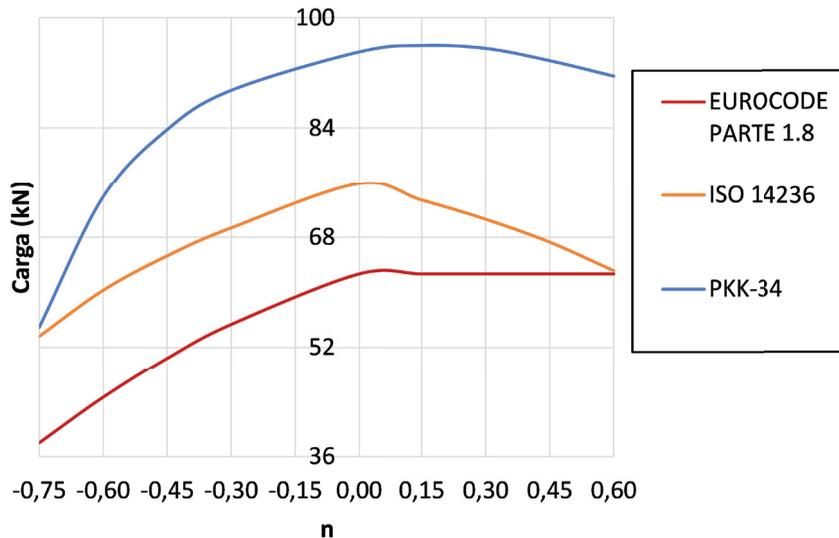
Fonte: Os autores.

Figura 7: Gráfico com resultados da ligação PKK-31



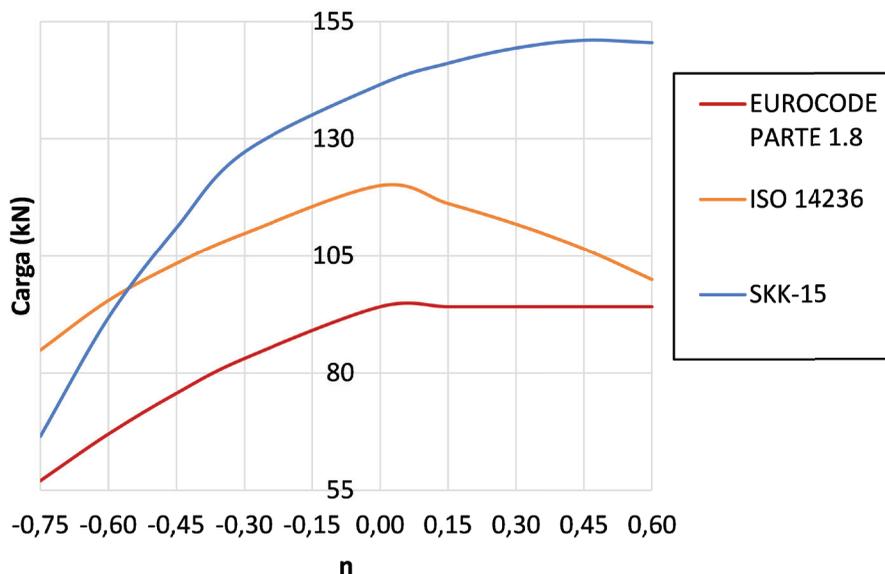
Fonte: Os autores.

Figura 8: Gráfico com resultados da ligação PKK-34



Fonte: Os autores.

Figura 9: Gráfico com resultados da ligação SKK-15



Fonte: Os autores.

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos pela aplicação do critério de deformação limite foram superiores aos obtidos pela aplicação das formulações do EN 1993-1-8 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2010) e da ISO 14346 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2013), a não ser para “n” maiores ou iguais a -0,6 (força de compressão no banzo correspondente a 60% da carga de plastificação do mesmo), cujos resultados foram menores apenas para a ligação SKK-15.

É importante ressaltar também que os resultados do EN 1993-1-8 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2010) são mais conservadores quando comparados aos da ISO 14346 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2013).

REFERÊNCIAS

ANSYS. **ANSYS mechanical APDL theory reference**. Canonsburg, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16239**: projetos de estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edificações com Perfis Tubulares. Rio de Janeiro, 2013.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode 3**: design of steel structures: part 1-8: design of joints. Brussels, 2010.

FORTI, N. C. S. **Estudo paramétrico de estruturas tubulares com ligações multiplanares**. 2010. 118 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

GAZZOLA, F. et al. Design equation for overlap tubular K-joints under axial loading. **Journal of Structural Engineering**, Michigan, v. 126, n. 7, p. 798-808, 2000.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14346**: static design procedure for welded hollow-section joints: recommendations. Switzerland, 2013.

KOROL, R.; MIRZA, F. Finite element analysis of RHS T-joints. **Journal of the Structural Division**, New York, v. 108, n. 9, p. 2081-2098, 1982.

LEE, M. M. K., Strength, stress and fracture analyses of offshore tubular joints using finite elements. **Journal of Constructional Steel Research**, Tucson, v. 51, p. 265-286, 1999.

LEE, M. M. K.; GAZZOLA, F. Design equation for offshore overlap tubular K-joints under in-plane bending. **Journal of Structural Engineering**, Michigan, v. 132, n. 7, p. 1087-1095, 2006.

LEE, M. M. K.; WILMSHURST, S. R. Strength of multiplanar tubular KK-joints under antisymmetrical axial loading. **Journal of Structural Engineering**, Michigan, v. 123, n. 6, p. 755-764, 1997.

LU, L. H. et al. Deformation limit for the ultimate strength of hollow section joints. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TUBULAR STRUCTURES, 6., 1994, Melbourne. **Proceedings...** Melbourne: [s.n.], 1994. p 341-347.

MENDES, F. C. **Análise teórica-experimental de ligações tipo “T”, “K” e “KT” com perfis metálicos tubulares**. 2008. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

NOBRE, D. S. **Avaliação de ligações KK entre perfis tubulares em aço**. 2014. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014

PACKER, J. A. et al. **Assemblages de sections creuses rectangulaires sous chargement statique predominant**. TUV Rheinland: Koln, 1993.

PAUL, J. et al. Ultimate resistance of unstiffened multiplanar tubular TT and KK-joints. **Journal of Structural Engineering**, Michigan, v. 120, n. 10, p. 2853-2870, 1994.

SILVA, R. S. **Avaliação de ligações K e T entre perfis estruturais tubulares circulares**. 2012. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012

TUPER SA. **Tubos estruturais e mecânicos**. São Bento do Sul, 2014. Disponível em: <http://www.tuper.com.br/wp-content/uploads/2014/05/tuper_tubos_estruturais.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2016.

VALLOUREC & MANNESMANN TUBES. **Technical information n. 1: structural hollow sections (msh) circular, square, rectangular**. Dusseldorf, 2010. Disponível em: <http://www.vmtubes.de/content/vmtubes/vmtubes000522/S_MSH1_p.pdf>. Acesso em: 29 jan. 2016.

WARDENIER, J. et al. Background of the New RHS Joint Strength Equations in the New IIW (2009) Recommendations. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TUBULAR STRUCTURES, 13., 2010, Hong Kong. **Proceedings...** Hong Kong: ISTS, 2010.

WARDENIER, J. et al. **Hollow sections in structural applications**. [S.l.]: CIDECT, 2010

ZHAO, X. Deformation limit and ultimate strength of welded T-joints in cold-formed RHS sections. **Journal of Constructional Steel Research**, Azirona, v. 53, n. 2, p. 149-165, 2000.

ZHAO, X. et al. Current static design guidance for hollow-section joints. **Structures and Buildings**, New York, v. 163, n. 6, p. 361-373, 2010.

Recebido em: 22 jan. 2016.
Aprovado em: 26 jan. 2016.