

### 3.01.02- Engenharia Civil /Estruturas

## LIGAÇÕES TIPO K EM TRELIÇAS PLANAS COM PERFIS TUBULARES DE AÇO

Euler de Oliveira Guerra<sup>2</sup>, Livia Andressa Barbosa Lima<sup>1</sup>, Lorena Marques Fernandes<sup>1</sup>

1. Estudante do curso de graduação em Engenharia Civil da PUC Minas
2. Professor Orientador curso de Engenharia Civil PUC Minas, Belo Horizonte, MG

### Resumo:

Ligações soldadas entre perfis tubulares circulares, quadrados e retangulares são muito comuns na prática e com a publicação da norma ABNT NBR16239: 2013 são inúmeras as verificações para garantir a resistência. Este fato demanda um tempo excessivo no dimensionamento da ligação. Os programas disponíveis no meio acadêmico e profissional não contemplam as exigências da norma em vigor e apresentam algumas limitações aos usuários quanto a perfis e a materiais. O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de uma planilha sem as limitações e que gere uma memória de cálculo como resultado final.

Na metodologia geraram-se todas as verificações, informando gradativamente ao usuário quais os parâmetros estão em acordo ou não com as prescrições de norma. A validação da planilha foi confirmada comparando-se resultados com exemplos numéricos disponíveis na bibliografia.

A quantidade enorme de verificações justifica a elaboração da planilha e a memória de cálculo correspondente.

**Palavras-chave:** Planilha para uniões entre perfis fechados; dimensionamento segundo a NBR16239: 2013; estruturas de aço.

**Apoio financeiro:** Programa de Educação Tutorial – PET/MEC/SESu.

### Introdução:

As ligações desempenham um papel importante no comportamento das estruturas, assim como seu custo, que inclui material, mão de obra e os recursos tecnológicos disponíveis e, complexidade de execução, impactando na viabilidade econômica do empreendimento.

Existem diversos tipos de ligações utilizadas em estruturas com perfis tubulares que promovem uma estrutura segura, econômica e de fácil execução. A figura 1 apresenta um exemplo de ligação soldada entre perfis tubulares circulares em treliças planas, denominada como tipo K.



Figura 1 – Exemplo ilustrativo de ligação tubular tipo K

As ligações podem apresentar excentricidade. A configuração pode ser com sobreposição das barras ou com afastamento. A capacidade resistente é função da força axial resistente de cálculo ou do momento fletor resistente de cálculo das diagonais ou montantes ligadas aos banzos, ou do esforço resistente de cálculo das chapas de ligação. Essa capacidade é determinada com base em modos de falha definidos por ensaios experimentais, listados a seguir: Modo A – Plastificação da face ou de toda a seção transversal do banzo, junto a diagonais ou montantes; Modo B – Plastificação, amassamento ou instabilidade da face lateral da seção transversal do banzo junto a diagonais ou montantes sob compressão; Modo C – Plastificação ou instabilidade por cisalhamento do banzo, junto a diagonais ou montantes; Modo D – Ruptura por punção da parede do banzo na área de contato com diagonais ou montantes; Modo E – Ruptura ou plastificação de diagonais ou montantes na região da solda oriunda da distribuição não uniforme de tensão; Modo F – Flambagem localizada de diagonais ou montantes comprimidos ou do banzo, na região da ligação.

A ocorrência deste tipo de ligação é muito comum na prática. A quantidade de verificações necessárias para

garantir a integridade da ligação é muito grande. Este fato inviabiliza o dimensionamento manual destas ligações, que consome um tempo excessivo, considerando que treliças têm vários nós e para cada nó existem várias combinações de ações que geram esforços solicitantes diferenciados.

O objetivo é gerar uma planilha de verificação da resistência dos componentes da ligação soldada, tipo K, em treliças planas envolvendo perfil tubular circular, retangular ou quadrado. A expectativa é criar uma ferramenta útil para os profissionais envolvidos com o dimensionamento de estruturas de aço tubulares, com redução significativa do tempo de trabalho para as verificações.

### Metodologia:

Primeiramente pesquisaram-se os tipos mais comuns de ligações entre perfis tubulares que ocorrem em projetos de estruturas de passarelas treliçadas, coberturas de prédios comerciais, industriais, estádios de futebol, aeroportos, pipe-rack e vigas treliçadas de sustentação de pisos. Constatou-se que as ligações soldadas do tipo K são mais comuns.

A NBR 16239:2013 no capítulo 6 estabelece os requisitos básicos em temperatura ambiente necessários para verificação da resistência da ligação, fornecendo parâmetros: geométricos; nível de tensão na junção de cordas, diagonais e montantes; modos de falha; limites de esbeltez das chapas componentes dos perfis tubulares; forças e momentos resistentes das barras estruturais e chapas de ligação.

Pesquisaram-se quais são os programas existentes e disponíveis no âmbito acadêmico e profissional que realizam todas as inúmeras verificações necessárias para garantir segurança e integridade das ligações, apresentando o resultado final na forma de memória de cálculo.

Um dos programas disponíveis foi desenvolvido na UNICAMP, com nome Ligações Tubulares Versão 2.8, com apoio da Vallourec Brazil. O programa analisa ligações do tipo K, T, Y, X, flangeada, pinada e base de colunas, considerando perfis tubulares circulares e retangulares. O programa foi desenvolvido antes a publicação da norma ABNT NBR 16239: 2013.

Outro exemplo de programa é o CoP2 – V&MEditon 1.8.1 desenvolvido por Feldmann + Weynand GmbH, 2010. O programa permite efetuar o dimensionamento de ligações entre perfis tubulares, realizando de forma automática, todas as verificações de segurança necessárias, de acordo com a EN 1993-1-8 (CEN, 2005), a partir da introdução, por parte do usuário, de um conjunto de parâmetros: configuração da junta, geometria, materiais e cargas aplicadas. Todos os parâmetros são selecionados a partir da base de dados existente no programa, não existindo a possibilidade de introduzir seções, materiais ou tipos de ligação não incluídos no programa. Na fase final de cálculo, obtém-se um arquivo de saída, onde se discriminam os valores de resistência para todos os modos de ruptura previstos na norma.

Com a publicação da norma ABNT NBR 16239 em 2013 surgiu a necessidade de desenvolver um programa com base nos critérios normativos. Os alunos bolsistas do PET Engenharia Civil da PUC Minas desenvolveram uma planilha em Excel para verificação de ligações tubulares soldadas do tipo K, sob a orientação do tutor prof. Euler Guerra. Os dois fatos motivadores para elaboração da planilha são a limitação ao uso de seções transversais e aços não catalogados nos programas e a recente publicação da norma ABNT NBR16239: 2013.

Após a elaboração da planilha os resultados serão comparados com os exemplos numéricos do livro do ARAÚJO (2016) com a finalidade de validar a planilha.

### Resultados e Discussão:

Na ligação K com banzo e diagonal circular, retangular ou quadrado, as duas diagonais podem apresentar sobreposição ou afastamento. A ABNT NBR 16239: 2013 estipula os modos de falhas resumidas na tabela seguinte, simplificando a memória de cálculo e planilha que contenham todas as verificações necessárias.

BANZO	DIAGONAL	SOBREPOSIÇÃO OU AFASTAMENTO	MODO DE FALHA
CIRCULAR	CIRCULAR	SOBREPOSIÇÃO	A
CIRCULAR	CIRCULAR	AFASTAMENTO	A, D
QUADRADO	QUADRADO	SOBREPOSIÇÃO	E
QUADRADO	QUADRADO	AFASTAMENTO	A
RETANGULAR	CIRCULAR	SOBREPOSIÇÃO	E
RETANGULAR	CIRCULAR	AFASTAMENTO	A,C,D,E
RETANGULAR	QUADRADO	SOBREPOSIÇÃO	E
RETANGULAR	QUADRADO	AFASTAMENTO	A,C,D,E

Observa-se que: para banzo circular existe apenas os modos de falha A e D; para banzo retangular os modos de falha são A,C,D e E; para banzo quadrado os modos de falha são apenas A e E.

Ligações K com diagonal circular ou retangular e com banzo retangular podem apresentar necessidade de reforço com objetivo de evitar a ocorrência de modos de falha conforme as três situações: nos modos de falha A, D e E, utilizar chapa horizontal de reforço na mesa do banzo que recebe diagonal e montante; no modo de falha C, utilizar chapas de reforço laterais nas duas almas do banzo; no caso de sobreposição insuficiente entre diagonais ou montantes, soldar entre esses elementos um enrijecedor vertical, perpendicular ao banzo.

No caso de diagonal e banzo circular com sobreposição e o modo de falha A realizam-se dezenove verificações e determinam-se quatro parâmetros auxiliares para validar a resistência da ligação. Este é caso mais simples de verificação de ligações do tipo K. No caso de ligação com diagonal quadrada e banzo retangular com afastamento e modos de falha A, C, D e E, realizam-se quarenta verificações e determinam-se dez parâmetros auxiliares para validar a resistência da ligação.

Os dois exemplos demonstram a necessidade da elaboração de uma planilha que realize todas as verificações com a geração da memória de cálculo correspondente.

### Conclusões:

A análise de resistência das ligações soldadas uniplanares envolvendo diagonais e banzos com perfis tubulares em conformidade com os requisitos da norma ABNT NBR16239: 2013 é extremamente trabalhosa. A quantidade de parâmetros geométricos e físicos, limites de esbeltez e modos de falha é grande. Este fato inviabiliza o dimensionamento manual destas ligações, pois consome um tempo excessivo, considerando que sistemas estruturais treliçados tem vários nós e para cada nó existem várias combinações de ações que geram esforços solicitantes diferenciados.

O presente trabalho gerou a planilha de cálculo (imagens nas figuras 2 a 5) para as possíveis geometrias das ligações tubulares uniplanares do tipo K. A planilha apresenta um relatório final contemplando todas as verificações necessárias para validar a resistência da ligação com uma redução expressiva do tempo de trabalho. Neste relatório o usuário identifica quais os requisitos não atendidos, possibilitando assim correções rápidas.

Ligação Tipo K									
Introdução de Dados									
E	200000	MPa							
$f_y$	350	MPa							
Banzo:			Diagonais:						
$d_0$ ou $h_0$	101,6	mm	$d_1$ ou $h_1$	88,9	mm	$d_2$ ou $h_2$	88,9	mm	
$b_0$	0	mm	$b_1$		mm	$b_2$	0	mm	
$t_0$	4,8	mm	$t_1$	4,8	mm	$t_2$	4,8	mm	
Circular			Circular			Circular			
$A_0$	1459,71	mm <sup>2</sup>	$A_1$	1268,2	mm <sup>2</sup>	$A_2$	1268,2	mm <sup>2</sup>	
$W_0$	33738,83	mm <sup>3</sup>							
e	0	mm	$\theta_1$	49,1	°	=	0,86	rad	
g	-29,61	mm	$\theta_2$	49,1	°	=	0,86	rad	
Solicitações de cálculo:									
$N_{0,SD}$	33,30	kN	Tração						
$N_{1,SD}$	-34,30	kN	Compressão						
$N_{2,SD}$	-51,70	kN	Compressão						
$N_{3,SD}$	51,60	kN	Tração						
$M_{0,SD}$	8,31	kNcm	Traciona fibras superiores do nó						
$M_{1,SD}$	8,31	kNcm	Traciona fibras superiores do nó						

Figura 2 - Exemplo de aplicação da planilha para ligações tipo K - Parte 1

Barras Circulares	Verificação válida
$0,2 \leq d_1/d_0 \leq 1,0$	$0,2 \leq 0,88 \leq 1,0$ OK!
$0,2 \leq d_2/d_0 \leq 1,0$	$0,2 \leq 0,88 \leq 1,0$ OK!
$10 \leq d_0/t_0 \leq 50$	$10 \leq 21,17 \leq 50$ OK!
$10 \leq d_1/t_1 \leq 50$	$0,2 \leq 18,52 \leq 1,0$ OK!
$10 \leq d_2/t_2 \leq 50$	$10 \leq 18,52 \leq 50$ OK!

Figura 3 - Exemplo de aplicação da planilha para ligações tipo K - Parte 2

Requisitos necessários (Item 6.1.2 - ABNT NBR 16239:2013)			
Para que a formulação seja válida, deve-se cumprir:			
<b>Ângulos Mínimos de diagonais</b>			
Ângulos $\theta_i$ entre o banzo e as diagonais e entre montantes e diagonais adjacentes não podem ser inferiores a 30° (Item 6.1.2.a - ABNT NBR 16239:2013);			
$\theta_1 \geq 30^\circ$	$\theta_1 = 49,10^\circ$	$\geq 30^\circ$	OK!
$\theta_2 \geq 30^\circ$	$\theta_2 = 49,10^\circ$	$\geq 30^\circ$	OK!
<b>Espessuras mínimas de perfis tubulares</b>			
A espessura nominal da parede dos perfis tubulares não pode ser inferior a 2,5mm (Item 6.1.2.h - ABNT NBR 16239:2013);			
$t_0 \geq 2,5mm$	$t_0 = 4,8$ mm	$\geq 2,5mm$	OK!
$t_1 \geq 2,5mm$	$t_1 = 4,8$ mm	$\geq 2,5mm$	OK!
$t_2 \geq 2,5mm$	$t_2 = 4,8$ mm	$\geq 2,5mm$	OK!
<b>Compatibilidade de diâmetros de diagonais sobrepostas</b>			
Quando as barras sobrepostas tiverem larguras diferentes no plano de ligação, a barra com menor largura deve sobrepor à mais larga (Item 6.1.2.f - ABNT NBR 16239:2013);			
$d_1$ ou $b_1$	88,9 mm	$d_2$ ou $b_2$	88,9 mm
Sobreposta		Sobposta	
$b_1 \leq b_2$ ou $d_1 \leq d_2$		$89 \leq 89$	
OK!			
<b>Suficiência de sobreposição mínima de 25%</b>			
Em ligações com sobreposição, a ligação deve ter dimensão suficiente para garantir a adequada transferência dos esforços de uma barra para a outra. Para isso, a razão entre a sobreposição $q$ e a dimensão $p$ deve ser maior ou igual a 0,25 (Item 6.1.2.d - ABNT NBR 16239:2013);			
$p = \left( \frac{h_1}{\sin \theta_1} \right)$	$h_1 = 88,9$ mm	$p = 117,62$ mm	
	$\theta_1 = 0,86$ rad	$0,25p = 29,40$ mm	
	$g = -29,61$ mm	$\lambda_{ov} = 25,17$ %	
$-g \geq 0,25p$	29,61	$\geq 29,40$	OK!
$\lambda_{ov} = 100 \frac{-g}{p} \geq 25\%$	25,17	$\geq 25\%$	OK!

  

PARÂMETROS	
Item 6.1.2.3 - ABNT NBR 16239:2013 - As tensões no banzo circular de uma ligação são dadas por:	$\sigma_{cp,5d} = \frac{N_{cp,5d}}{A_0} + \frac{M_{0,5d}}{W_0}$
	$\sigma_{cp,5d} = 2,53$ kN/cm <sup>2</sup>
$\sigma_{0,5d}$ é a máxima tensão de compressão solicitante de cálculo no banzo em um determinado nó, causada pela força $N_{0,5d}$ e pelo momento $M_{0,5d}$ .	
$\sigma_{0p,5d}$ é o valor de $\sigma_{0,5d}$ , excluindo-se as tensões provenientes das componentes das forças nas diagonais e montantes, paralelas ao eixo do banzo.	
Item 6.1.3.3.b - ABNT NBR 16239:2013 - Relação entre a largura ou o diâmetro do banzo e duas vezes a sua espessura, representada por $\gamma$ e para banzo circular, dada por:	$\gamma = \frac{d_0}{2t_0}$
	$\gamma = 10,58$
Item 6.1.3.3.d - ABNT NBR 16239:2013 - Fator geométrico para ligação com banzo circular, representado por $k_p$ , para ligações com sobreposição, e dado por:	$k_p = \gamma^{0,2} \left( 1 + \frac{0,024\gamma^{1,2}}{1 + \exp(-0,5q/t_0) - 1,33} \right)$
	$k_p = 2,25$
Item 6.1.3.3.e - ABNT NBR 16239:2013 - Fator relacionando as tensões no banzo circular, representado por $n_p$ , e dado por:	$n_p = \frac{\sigma_{0p,5d}}{f_{y0}}$
para $n_p < 0$	para $n_p \geq 0$
$k_p = 1 + 0,3n_p - 0,3n_p^2$	$k_p = 1,0$
	Obs: Compressão, sinal negativo.
	$n_p = 0,0722$
	$k_p = 1$

Figura 4 - Exemplo de aplicação da planilha para ligações tipo K - Parte 3 e 4

Modo de Falha da Ligação		TABELA 2 - BANZO CIRC + DIAGONAL CIRC	
Modos de Falha - NBR 16239:2013 - Item 6.1.4		Tabela 2 - ABNT NBR 16239:2013 - Força axial resistente de cálculo de ligações soldadas entre perfis circulares: Modo de falha A - Ligações K com sobreposição:	
Tipo	A	$N_{1,Rd} = \frac{k_p k_{\sigma} f_{0,5d} t_0^2}{\sin \theta_1} \left( 1,98 + 11,22 \frac{d_1}{d_0} \right) / \gamma_{d1}$	
		$N_{2,Rd} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} N_{1,Rd}$	
		$N_{1,Rd} =$	256,82 kN
		$N_{2,Rd} =$	256,82 kN

Figura 5 - Exemplo de aplicação da planilha para ligações tipo K - Parte 5 e 6

**Referências bibliográficas**

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. **AISC-LRFD: Load and resistance factor design**. Chicago, 1994.

ARAÚJO, Afonso Henrique Mascarenhas de, et al. **Projeto de estruturas de edificações com perfis tubulares de aço**. Belo Horizonte: Vallourec, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, **NBR 8800 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro, 2008.

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

CIDECT, 1996. **Design guide for rectangular hollow section (RHS) joints under predominantly static loading**. Koln: Verl. TUV Rheinland.

CIDECT, 1996. **Design guide for circular hollow section (CHS) joints under predominantly static loading**. Koln: Verl. TUV Rheinland.

Eurocode 3:2007, **Design of steel structures – part 1-8: General – Design of joints**, CEN, European Committee for Standardisation, Brussels, prEN 1993-1-8.

GERDAU, **Açominas**. Tabela de Bitolas.

MEDANHA, Fabiano Oliveira. **Análise de ligações de perfis tubulares em aço do tipo K e KT**. 2006. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, MG.

PEREIRA, Filipe José Botelho. **Juntas entre perfis tubulares de aço**. 2013. 5f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 2013

RAUTARUUKKI OYJ, H.V., 1998- **Design Handbook for Rautaruukki Structural Hollow Sections**. Hameenlinna.