

LIGAÇÕES TIPO T e Y EM TRELIÇAS PLANAS COM PERFIS TUBULARES DE AÇO**Euler de Oliveira Guerra²; Guilherme Ribeiro Caetano³; Renata Ferreira Gomes¹**

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

Resumo

Ligações soldadas tipo T e Y 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: PET/MEC/SESu.

Introdução

As ligações desempenham um papel importante no comportamento das estruturas, assim como seu custo, que inclui material, mão de obra, 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 uma ligação soldada entre perfis tubulares em treliças planas, denominada tipo T e Y.



Figura 1 – Exemplo de ligação tubular tipo T e Y

A capacidade resistente é função da força axial ou do momento fletor resistente de cálculo das diagonais ou montantes ligadas aos banzo. Essa capacidade é baseada em modos de falha definidos por ensaios experimentais: 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 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.

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, 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 T e Y, 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 T e Y estão entre as 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; força axial e momentos resistentes no plano e fora do plano da ligação 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 e X, 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 + Weyand 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, 2007), 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 T e Y, 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 desenvolvidos manualmente por GOMES (2017), por GUERRA (2017) e por ALVES (2013). A finalidade deste procedimento é validar a planilha.

Resultados e Discussão

Nas ligações T e Y, o banzo e diagonal podem ser perfis tubulares do tipo circular, retangular ou quadrado. A ABNT NBR 16239: 2013 estipula os modos de falhas resumidos na tabela seguinte, simplificando a memória de cálculo e planilha que contenham todas as verificações necessárias.

BANZO	DIAGONAL/MONTANTE	MODO DE FALHA
CIRCULAR	CIRCULAR	A, D
QUADRADO	QUADRADO / CIRCULAR	A
RETANGULAR	CIRCULAR	A
RETANGULAR	RETANGULAR	A,B,D,E

Observa-se que: para banzo circular existem apenas os modos de falha A e D; para banzo retangular os modos de falha são A,B,D e E; para banzo quadrado apenas o modo de falha A.

Ligações T e Y envolvendo diagonal e montante 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. Estes detalhes de reforços são apresentados por ARAÚJO (2016).

No caso de ligações T e Y com diagonal, montante e banzo circulares podem ocorrer os modos de falha A e D. Existe verificação da resistência da ligação para a força axial isolada, para momento fletor no plano e fora do plano da treliça e também para a combinação de força axial e momento fletor. São necessárias vinte verificações para validar a resistência da ligação.

No caso de ligações T e Y com diagonal, montante e banzo com perfis retangulares podem ocorrer os modos de falha A,B,D e E. Existe verificação da resistência da ligação para a força axial isolada, para momento fletor no plano e fora do plano da treliça e também para a combinação de força axial e momento fletor apenas para ligação do tipo T, conforme tabela 12 da norma ABNT NBR16239: 2013. São necessárias vinte e nove verificações para validar a resistência da ligação T.

O exemplo de ligação T ilustrado a seguir demonstra a necessidade da elaboração 34 itens na planilha para que realize todas as verificações com a conseqüente geração automática da memória de cálculo correspondente.

Conclusões

A análise das ligações T e Y soldadas uniplanares em conformidade com a norma ABNT NBR16239: 2013 é extremamente trabalhosa, com grande quantidade de parâmetros geométricos e físicos, limites de esbeltez e modos de falha. Este fato inviabiliza o dimensionamento manual destas ligações, pois consome um tempo excessivo, considerando que sistemas estruturais treliçados têm 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 e 3) de exemplo de ligação T.

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS PET - ENGENHARIA CIVIL LIGAÇÃO TIPO T e Y - ABNT NBR 16239:2013		PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS PET - ENGENHARIA CIVIL LIGAÇÃO TIPO T e Y - ABNT NBR 16239:2013	
NOME DO PROJETO: RESPONSÁVEL: OBSERVAÇÕES:		NOME DO PROJETO: RESPONSÁVEL: OBSERVAÇÕES:	
PÁGINA: 1/3		PÁGINA: 2/3	
DADOS DO NÓ			
DADOS DO BANZO		DADOS DO MONTANTE	
Seção Retangular Altura (h0): 150 mm Base (b0): 200 mm Espessura (t0): 6,4 mm Perfil soldado Área (A0): 4316,16 mm ² Módulo Resistente (W0): 212812,78 mm ³ Resist. Caract. ao Escoamento (fy0): 350 MPa		Seção Retangular Altura (h1): 120 mm Base (b1): 180 mm Espessura (t1): 5,3 mm Perfil soldado Área (A1): 3.067,64 mm ² Módulo Resistente Elástico (W1): 123.941,73 mm ³ Módulo Resistente Plástico (Zx1): 141.139,95 mm ³ Módulo Resistente Plástico (Zy1): 187.154,55 mm ³ Resist. Caract. ao Escoamento (fy1): 300MPa $\theta_1: 90^\circ (1,57 \text{ radianos})$	
SOLICITAÇÕES DE CÁLCULO NO BANZO		SOLICITAÇÕES DE CÁLCULO NO MONTANTE	
<ul style="list-style-type: none"> N0p,sd = -130 KN N0,sd = -130 KN M0,sd = -300 KN.cm M0,sd = -300 KN.cm 		<ul style="list-style-type: none"> N1,sd = -130 KN M1p,sd = 1000 KN.cm Mop,sd = 1500 KN.cm Mop,sd = 100 KN.cm 	
Módulo de Elasticidade Longitudinal (E):			
E = 200000 MPa			
DESENHO ESQUEMÁTICO			
LIGAÇÃO TIPO T			
REQUISITOS NECESSÁRIOS			
Item 6.1.2.a - ABNT NBR 16239:2013 - Generalidades - Requisitos necessários - Os ângulos θ entre o banzo e as diagonais e entre montantes e diagonais adjacentes não podem ser inferiores a 30° .			
$\beta: > 30^\circ \rightarrow \theta_1 = 90^\circ \geq 30^\circ$ Conforme			
Item 6.1.2.b - ABNT NBR 16239:2013 - Generalidades - Requisitos necessários - A espessura nominal da parede dos perfis tubulares não pode ser inferior a 2,5 mm.			
$t0 \geq 2,5 \text{ mm} \rightarrow t0 = 6,4 \text{ mm} \geq 2,5 \text{ mm}$ Conforme			
$t1 \geq 2,5 \text{ mm} \rightarrow t1 = 5,3 \text{ mm} \geq 2,5 \text{ mm}$ Conforme			
Item 6.3.1 - ABNT NBR 16239:2013 - Generalidades - Requisitos necessários - A força resistente de cálculo deve ser tomada como o menor valor encontrado entre os modos de falha A até F, conforme 6.3.2 e 6.3.3, desde que sejam atendidas as seguintes condições de tabela 7:			
$0,5 \leq h0/b0 \leq 2,0 \rightarrow 0,5 \leq 0,75 \leq 2,0$ Conforme $0,5 \leq h1/b1 \leq 2,0 \rightarrow 0,5 \leq 0,67 \leq 2,0$ Conforme $b0/t0 \leq 36 \rightarrow 31,25 \leq 36$ Conforme $h0/t0 \leq 36 \rightarrow 23,44 \leq 36$ Conforme $b0/t0 \leq 1,45(E/fy)^{0,5} \rightarrow 31,25 \leq 34,66$ Conforme $h0/t0 \leq 1,45(E/fy)^{0,5} \rightarrow 23,44 \leq 34,66$ Conforme $b1/b0 \geq 0,25 \rightarrow 0,90 \geq 0,25$ Conforme $b1/t1 \leq 36 \rightarrow 33,96 \geq 36$ Conforme $h1/t1 \leq 36 \rightarrow 22,64 \leq 36$ Conforme $b1/t1 \leq 1,45(E/fy)^{0,5} \rightarrow 33,96 \leq 37,44$ Conforme $h1/t1 \leq 1,45(E/fy)^{0,5} \rightarrow 22,64 \leq 37,44$ Conforme			
Item 6.1.3 - ABNT NBR 16239:2013 - PARÂMETROS E CONVENÇÕES			
$\beta = \frac{b1}{b0} = 0,9$ $\eta = \frac{h1}{b0} = 0,6$ $\gamma = \frac{b0}{2t0} = 15,63$ $\sigma_{0,sd} = \frac{N_{0,sd}}{A_0} + \frac{M_{0,sd}}{W_0} = -4,42 \text{ KN/cm}^2$ $\eta = \frac{c_{0,sd}}{f_{yc}} = -0,126$ $n < 0: \lambda_n = 1,3 + \frac{0,4n}{\beta} \leq 1,0$ $kn = 1$ $n \geq 0: \lambda_n = 1,0$			

Figura 2 - Exemplo de aplicação da planilha para ligações tipo T - Páginas 1 e 2

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS		PET	
PET - ENGENHARIA CIVIL		civil	
LIGAÇÃO TIPO T e Y - ABNT NBR 16239:2013			
NOME DO PROJETO:	DATA:		
RESPONSÁVEL:			
OBSERVAÇÕES:		PÁGINA: 3/3	
MODOS DE FALHA			
Modo de falha E (Tabela 10 - ABNT NBR 16239:2013)			
$b_{ef} = \frac{10}{b_0/t_0} \cdot \frac{f_y t_0}{f_y t_1} \cdot b \leq b1$	bef = 81,1 mm		
$\beta = 0,85$			
$N_{1,Rd} = f_{yk} t_1 (2,2 b_1 - 4,4 t_1 + 2,2 b_{ef}) / \gamma_{M1}$	N1,Rd = 605,94 KN		
Modo de falha D (Tabela 10 - ABNT NBR 16239:2013)			
$b_{e,p} = \frac{10}{b_0/t_0} \cdot \frac{f_y t_0}{f_y t_1} \cdot b$	be,p = 57,6 mm		
$0,85 < \beta = 1 - 1/f_y$			
$N_{1,Rd} = \frac{0,60 f_{yk} t_0}{\gamma_{M1}} \left(2,2 b_1 + 2,2 b_{e,p} \right) / \gamma_{M1}$	N1,Rd = 477,39 KN		
Modo de falha B (Tabela 12 - ABNT NBR 16239:2013)			
$0,85 < \beta = 1$	$f_{yk} = f_{yk} \text{ para } 0 \leq t_0/t_1 \leq 2$		
$M_{ip,1,Rd} = 0,5 f_{yk} t_0 (1,1 b_1 + 0,5 t_0) / \gamma_{M1}$	Mip,1,Rd = 2.846,41 KN.cm		
$M_{op,1,Rd} = 1,1 f_{yk} t_0 (b_0 - t_0) (h_1 + 0,5 t_0) / \gamma_{M1}$	Mop,1,Rd = 6.591,69 KN.cm		
Modo de falha E (Tabela 12 - ABNT NBR 16239:2013)			
$b_{ef} = \frac{10}{b_0/t_0} \cdot \frac{f_y t_0}{f_y t_1} \cdot b \leq b1$	bef = 81,1 mm		
$M_{ip,1,Rd} = 1,1 f_{yk} \left[z_{x1} - \left(1 - \frac{b_{ef}}{b_1} \right) b_1 (h_1 - t_1) t_1 \right] / \gamma_{M1}$	Mip,1,Rd = 2.431,39 KN.cm		
$M_{op,1,Rd} = 1,1 f_{yk} (z_{y1} - 0,5 \left(1 - \frac{b_{ef}}{b_1} \right) b_1^2 t_1) / \gamma_{M1}$	Mop,1,Rd = 3.457,33 KN.cm		
Modo de falha por distorção do banzo (Tabela 12 - ABNT NBR 16239:2013)			
$M_{op,1,Rd} = 2,2 f_{yk} t_0 (h_1 t_0 + \sqrt{b_0 h_0} t_0 (b_0 + h_0)) / \gamma_{M1}$	Mop,1,Rd = 4.016,57 KN.cm		
Verificação de Segurança			
$N1,Rd,min = 477,39 \text{ KN}$	$N_{1,Rd}$	$M_{ip,1,Rd}$	$M_{op,1,Rd}$
$Mip,1,Rd,min = 2.431,39 \text{ KN.cm}$			
$Mop,1,Rd,min = 3.457,33 \text{ KN.cm}$	1,12	<	1
			112%

Figura 3 - Exemplo de aplicação da planilha para ligações tipo T - Página 3

O exemplo aborda a ligação T com banzo e montante retangulares. Na primeira página estão os dados de entrada e a geometria da ligação definidas pelo usuário. Nas páginas seguintes apresentam-se 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 correções rápidas em conformidade com os critérios das normas ABNT 16239: 2013 e ABNT 8800: 2008. Em cada uma das verificações são citados os itens da norma correspondentes facilitando a análise dos resultados apresentados.

Referências bibliográficas

ALVES, Celso Pereira. **Ligações de perfis tubulares metálicos: projeto e análise**. 2013. 5f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Aveiro – Portugal. 2013.

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.

Eurocode 3:2007, **Design of steel structures – part 1-8: General – Design of joints**, CEN, European Committee for Standardisation, Brussels, prEN 1993-1.8.

GOMES, Nathann Vasconcelos. **Avaliação de ligações tipo T com reforço de chapa lateral**. 2017. 102f. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

GUERRA, Messias Júnio Lopes, et al. **Análise numérica de ligações tipo T com perfis tubulares de paredes esbeltas**. Revista da Estrutura de Aço – REA- Vol. 6 – Número 2. 2017.