

Análise numérica de ligações tipo T com perfis tubulares

Messias Júnio Lopes Guerra¹, Gabriel Vieira Nunes¹, Arlene Maria Cunha Sarmanho^{2*}, Daniel José Rocha Pereira², Luiz Henrique de Almeida Neiva²

¹Departamento de Edificações – IFMG,

messias.guerra@ifmg.edu.br, gabriel.nunes@ifmg.edu.br

²Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PROPEC – DECIV/EM/UFOP,

arlene.sarmanho@gmail.com, drocha044@gmail.com,

lhalmeidaneiva@gmail.com

Numerical analysis of T joints with hollow sections

Resumo

Neste trabalho é apresentada uma análise paramétrica de ligações soldadas do tipo T formadas por perfis estruturais de aço sem costura, com seção transversal retangular no banzo e circular no montante. Um modelo numérico foi calibrado com resultados experimentais e após a calibração foi feito um estudo paramétrico variando os parâmetros β (relação entre o diâmetro do montante e largura da face banzo conectado) e 2γ (relação entre a largura e a espessura da face do banzo). Os resultados dos modelos numéricos, obtidos pelo critério de deformação limite, foram comparados com as prescrições mais recentes da ABNT NBR 16239 (2013) e da ISO 14346 (2013).

Palavras-chave: análise numérica, perfis tubulares, ligações tipo T.

Abstract

This work presents a parametric analysis of T welded joints formed by hot-rolled steel, with rectangular hollow sections for the chord and circular hollow sections for the braces. A numerical model was calibrated with experimental results and after the calibration a parametric study was performed, varying the parameters β (ratio between the diameter of the brace and width of the chord) and 2γ (ratio between the width and thickness of the chord). The numerical results, obtained using the deformation limit criterion, were compared with the normative prescriptions of ABNT NBR 16239:2013 and ISO 14346:2013.

Keywords: numerical analysis, hollow sections, T joints.

* autor correspondente

1. Introdução

A utilização de perfis tubulares na construção metálica apresenta vantagens, como por exemplo, alta resistência a esforços de torção, axiais e à combinação de solicitações. Associado às vantagens, encontram-se os aspectos de arrojo e modernidade que propiciam diversidade de projetos (Figura 1). Os perfis tubulares podem ser usados como estruturas mistas (tubos preenchidos com concreto), ganhando resistência adicional aos esforços de compressão e melhor proteção contra o fogo; possuem menor área se comparados às seções abertas, o que conduz a menores custos de pintura e outros benefícios, facilitando assim, os serviços de manutenção e minimizando seus custos.



Figura 1 – Estrutura tubular da cobertura do Estádio Mineirão, Belo Horizonte. (Nunes, 2017).

Devido ao bom comportamento quando solicitado por forças axiais, os perfis tubulares são amplamente utilizados em treliças para vencer grandes vãos (Araujo *et al.*, 2016). Uma importante verificação em sistemas treliçados são as ligações entre suas barras componentes (Figura 2), que podem ser dominantes na avaliação da sua capacidade resistente.

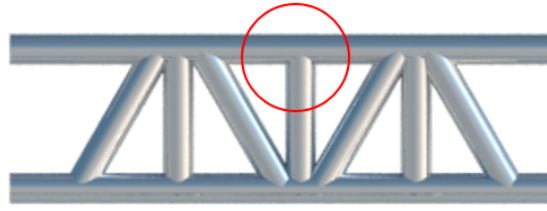


Figura 2 – Treliça com destaque para a ligação entre montante e banzo.

Dessa forma, com um modelo numérico calibrado com resultados experimentais, foi realizado um estudo teórico e numérico de ligações do tipo T formadas por perfis tubulares com seção retangular no banzo e circular no montante, sendo o montante submetido a carregamento axial de compressão. Adicionalmente, um estudo da validade das equações das normas ABNT NBR 16239:2013 e ISO 14346:2013 foi realizado.

2. Dimensionamento de ligações tubulares

O dimensionamento das ligações tubulares soldadas nas prescrições existentes são função da tipologia da ligação e dos parâmetros geométricos. A seguir, têm-se, para as ligações soldadas entre tubos, os modos de falha possíveis e as equações para a verificação da capacidade resistente da ligação T segundo as normas ABNT NBR 16239:2013 – Projetos de Estrutura de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edificações com Perfis Tubulares e a ISO 14346:2013 – Static design procedure for welded hollow – section joints – Recommendations.

2.1. Modos de falha

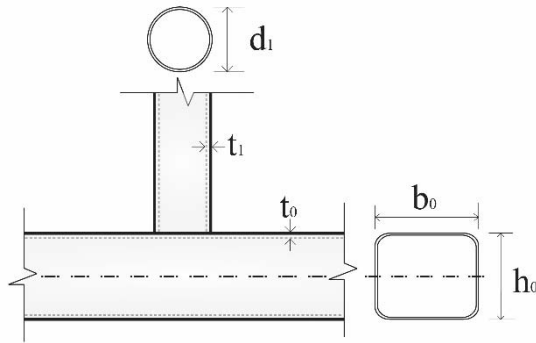
Para as ligações soldadas entre tubos, podem ocorrer os seguintes modos de falha que estão representados na Tabela 1, considerando a força axial aplicada e banzos em perfis retangulares e montante/diagonais circulares:

Tabela 1 - Modos de falha em ligações soldadas compostas por perfis tubulares e nomenclatura segundo a NBR 16239:2013.

Plastificação da face ou de toda a seção transversal do banzo na região da ligação.		Modo A
Plastificação da face lateral da seção transversal do banzo junto na região da ligação.		Modo B
Plastificação ou instabilidade por cisalhamento do banzo, junto a diagonais ou montantes.		Modo C
Ruptura por punção da parede do banzo na área de contato com diagonais ou montantes.		Modo D
Ruptura ou plastificação na região da solda ou flambagem localizada de diagonais ou montantes, devido distribuição não uniforme de tensão.		Modo E
Instabilidade localizada de diagonais ou montantes comprimidos, na região da ligação.		Modo F
Instabilidade localizada da face do banzo atrás do montante tracionado, na região da ligação.		Modo F

2.2. Nomenclatura e parâmetros geométricos

Para a ligação tipo T tem-se na Figura 3, a representação dos parâmetros geométricos importantes. O índice 0 (zero) relaciona-se ao banzo e o índice 1 (um) ao montante.



Onde:

d_1 - diâmetro externo da seção transversal do tubo do montante.

b_0 - largura do tubo retangular do banzo.

h_0 - altura do tubo retangular do banzo.

t_0 - espessura da parede do tubo do banzo.

t_1 - espessura da parede do tubo do montante.

Figura 3 – Nomenclatura das ligações compostas por perfis tubulares circulares ou retangulares.

Para as ligações do tipo T, os seguintes parâmetros geométricos são utilizados:

a) Relação entre o diâmetro do montante e a largura do banzo (β):

$$\beta = \frac{d_1}{b_0} \quad 2.1$$

b) Relação entre a largura do banzo e a sua espessura (2γ) dada por:

$$2\gamma = \frac{b_0}{t_0} \quad 2.2$$

2.3. Condições de validade

Na Tabela 2 estão indicadas as relações geométricas e de material que devem ser atendidas para as ligações tipo T, segundo as normas ABNT NBR 16239:2013 e ISO 14346:2013.

Tabela 2 - Condições de validade geométrica e de material para ligações tipo “T”.

		ABNT NBR 16239:2013	ISO 14346:2013
Relação entre banzo e diagonais /montante		$0,4 \leq \frac{d_i}{b_0} \leq 0,8$	$0,25 \leq \frac{d_i}{b_0} \leq 0,8$ $\frac{d_i}{b_0} \geq 0,1 + 0,01 \frac{b_0}{t_0}$
Banzo	Compressão	$\frac{b_0}{t_0} \leq 36 e$ $\frac{b_0}{t_0} \leq 1,45 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$ $\frac{h_0}{t_0} \leq 36 e$ $\frac{h_0}{t_0} \leq 1,45 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Classe 1 ou 2 e $\frac{b_0}{t_0} \leq 40$ $\frac{h_0}{t_0} \leq 40$
	Tração	$\frac{b_0}{t_0} \leq 35$ $\frac{h_0}{t_0} \leq 35$	$\frac{b_0}{t_0} \leq 40$ $\frac{h_0}{t_0} \leq 40$
Diagonais/ montantes	Compressão	$\frac{d_i}{t_i} \leq 0,05 \frac{E}{f_y}$	Classe 1 ou 2 e $\frac{d_i}{t_i} \leq 40$
	Tração	$\frac{d_i}{t_i} \leq 50$	$\frac{d_i}{t_i} \leq 40$
Ângulo entre diagonais/montantes e banzo		$\theta \geq 30^\circ$	$\theta \geq 30^\circ$
Resistência ao escoamento		-	$f_{yi} \leq f_{y0}$ $f_y \leq 0,8f_u$ $f_y \leq 460\text{MPa}$
Observações		Para $f_{y0} > 350\text{MPa}$, a resistência do cálculo deve ser dividida por um coeficiente de ajustamento γ_n , igual a 1,1.	Para $f_{y0} \geq 355\text{MPa}$, f_{y0} deve ser multiplicado por 0,9

2.4. Verificação da ligação tipo T

Na Tabela 3 são descritas as equações para verificação da ligação do tipo “T” para o modo de falha A (plastificação da face do banzo), segundo as normas ABNT NBR 16239:2013 e ISO 14346:2013.

Tabela 3 - Força axial resistente de cálculo para o modo de falha A para ligações tipo T segundo as prescrições normativas.

Modo de falha	ABNT NBR 16239:2013	ISO 14346:2013
Plastificação da face do banzo na região da ligação	Modo A $N_{1,Rd} = \frac{k_n f_{y0} t_0^2}{1 - \beta} (2,2\eta + 4,4\sqrt{1 - \beta})$	Chord plastification $N_1^* = Q_u Q_f f_{y0} t_0^2$
Parâmetros	<p>Para $n < 0$: $k_n = 1,3 + \frac{0,4n}{\beta}$</p> <p>Para $n \geq 0$: $k_n = 1,0$</p> <p>Onde: $n = \frac{\sigma_{0,Sd}}{f_{y0}}$ $\sigma_{0,Sd} = \frac{N_{0,Sd}}{A_0} + \frac{M_{0,Sd}}{W_0}$ </p> <p>sendo $\sigma_{0,Sd}$ determinado considerando sinal negativo para compressão.</p>	$Q_u = \frac{2\eta}{1 - \beta} + \frac{4}{\sqrt{1 - \beta}}$ $Q_f = (1 - n)^{C_1}$ <p>Onde: $n = \frac{N_0}{N_{pl,0}} + \frac{M_0}{M_{pl,0}}$ </p> <p>Para Tração: $C_1 = 0,1$</p> <p>Para compressão: $C_1 = 0,6 - 0,5\beta$</p>

Onde:

k_n – Fator de redução da resistência devido a carga no banzo;

β – Razão entre a largura do montante (d_1) e largura do banzo (b_0);

η – Relação entre a altura do montante no plano da estrutura e a largura do banzo;

n – Razão de tensão no banzo;

$\sigma_{0,Sd}$ – Máxima tensão de compressão de cálculo do banzo na superfície de contato com montantes;

f_{y0} – Resistência ao escoamento do aço do perfil do banzo;

$N_{0,Sd}$ – Força axial solicitante de cálculo no banzo;

$M_{0,Sd}$ – Momento fletor solicitante de cálculo no banzo;

A_0 – Área da seção transversal do banzo;

W_0 – Módulo de resistência elástico da seção transversal do banzo;

$N_{pl,0}$ – Força axial de plastificação da seção do banzo;

$M_{pl,0}$ – Momento fletor de plastificação da seção do banzo;

Para montante de perfil circular, multiplicam-se as forças axiais resistentes acima por $(\pi/4)$.

3. Deformação limite

O critério adotado para determinação da capacidade resistente de ligações tubulares é caracterizado por deformação limite a ser avaliada na face conectada do banzo (Lu *et al.*, 1994). Essa força resistente, seja numérica ou experimental, é considerada para uma deformação, Δ , na face do banzo oriunda do modo de falha A de 3% da largura da face do banzo sob efeito do amassamento, como indicado na Figura 4 (a). A resistência da ligação é determinada pela carga equivalente ao deslocamento limite, Δ , em casos onde não há pico de carga na curva, ou pelo menor valor entre essa carga e a dada pelo pico da curva, em casos onde pode ser identificado um pico - Figura 4 (b) - (Wardenier *et al.*, 2010).

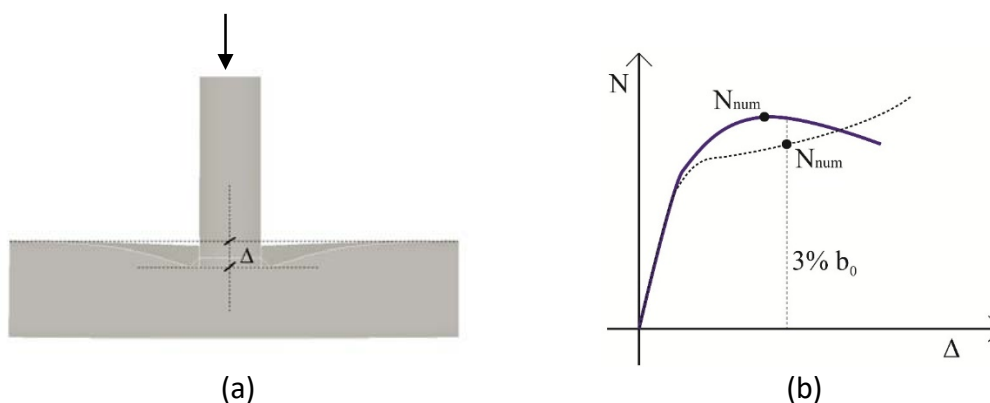


Figura 4 – (a) Deslocamento, Δ , na face do banzo sob o montante comprimido; (b) Método da deformação limite para obtenção da força resistente.

4. Modelo numérico

O modelo numérico foi desenvolvido em elementos finitos utilizando o software ANSYS (2012), como apresentado na Figura 5. O elemento utilizado é o elemento de casca SHELL181 que considera esforços de flexão, corte, efeito de membrana e possui 4 nós e 6 graus de liberdade por nó, sendo três translações em x, y e z e três rotações em torno de x, y e z.

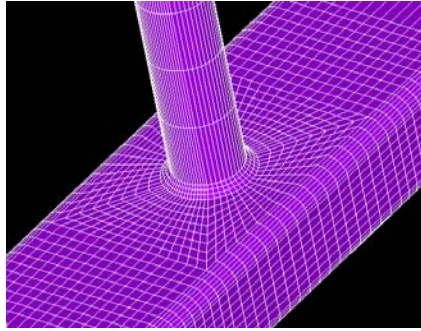


Figura 5 – Detalhe da malha da ligação tipo T utilizando o elemento de casca SHELL 181 (ANSYS, 2012).

As propriedades mecânicas utilizadas nos modelos numéricos estão listadas a seguir e a relação tensão x deformação foi representada por diagrama bilinear (Figura 6).

- Módulo de elasticidade: $E = 200 \text{ GPa}$;
- Coeficiente de Poisson: $\nu = 0,3$;
- Resistência ao escoamento do perfil do banzo: $f_{y0} = 456 \text{ MPa}$;
- Resistência à ruptura do perfil do banzo: $f_{u0} = 555 \text{ MPa}$;
- Módulo de elasticidade tangente do perfil do banzo: $E_t = 3987 \text{ MPa}$;
- Resistência ao escoamento do perfil do montante: $f_{y1} = 250 \text{ MPa}$;
- Resistência à ruptura do perfil do montante: $f_{u1} = 325 \text{ MPa}$;
- Módulo de elasticidade tangente do perfil do montante: $E_t = 2500 \text{ MPa}$.

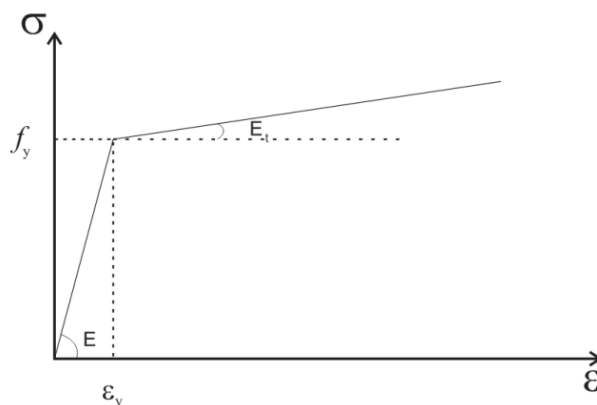


Figura 6 – Representação esquemática do diagrama tensão x deformação bilinear utilizado nas análises.

Nos modelos numéricos foram consideradas tanto a não linearidade física quanto a geométrica, utilizando o algoritmo de Lagrange atualizado. A aplicação do carregamento

do montante foi realizada por meio de controle de deslocamentos aplicados de forma incremental sendo utilizado o método iterativo de Newton-Raphson. Quanto às condições de contorno do banzo, suas extremidades foram consideradas engastadas, conforme Figura 7. Essa condição de contorno faz com que a consideração de tensões normais no banzo sejam consideradas, o que é contabilizado pelas equações normativas e levado em consideração no dimensionamento.

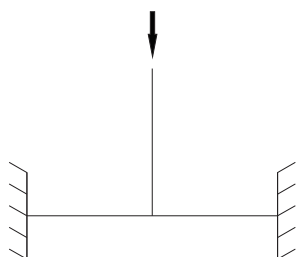


Figura 7 – Condição de contorno biengastado do banzo da ligação

5. Modelo experimental

Para calibração do modelo numérico, fez-se uma análise comparativa com resultados experimentais realizados por Mendes (Mendes, 2008). Os ensaios utilizados foram realizados em dois protótipos, identificados como T02 e T03, de uma ligação T (Figura 8), sendo os testes realizados no Laboratório de Estruturas Professor Altamiro Tibiriçá Dias do DECIV/PROPEC/EM/UFOP. As ligações são compostas por perfil retangular no banzo e circular no montante e diagonais. Na Tabela 4 têm-se as dimensões e as propriedades mecânicas dos perfis utilizados na ligação ensaiada.

Tabela 4 – Dimensões nominais e propriedades mecânicas dos perfis componentes da ligação dos protótipos ensaiados.

Elementos de Ligação	h_0 (mm)	b_0 (mm)	t_0 (mm)	d_1 (mm)	t_1 (mm)	f_{y0} (MPa)	f_{u0} (MPa)	$f_{y1,2}$ (MPa)	$f_{u1,2}$ (MPa)	δ (%)
Banzo	110	60	4,8	-	-	456	555	-	-	32
Montante	-	-	-	38,1	3,2	-	-	250	325	35

f_{y0} - Resistência ao escoamento do aço do banzo;
 f_{u0} - Resistência à Ruptura à tração do aço do banzo;
 $f_{y1,2}$ - Resistência ao escoamento do aço do montante;
 $f_{u1,2}$ - Resistência à Ruptura à tração do aço montante;
 δ - Alongamento residual após à ruptura oriundo do ensaio de caracterização.

As propriedades mecânicas do aço dos perfis retangulares que compõem o banzo, com especificação técnica de aço A36, foram obtidas por meio de ensaios de caracterização. As propriedades mecânicas reais dos perfis circulares dos montantes não foram obtidas, devido a não interferência do aço deste elemento na resistência da ligação. Portanto, foram utilizados os valores nominais.

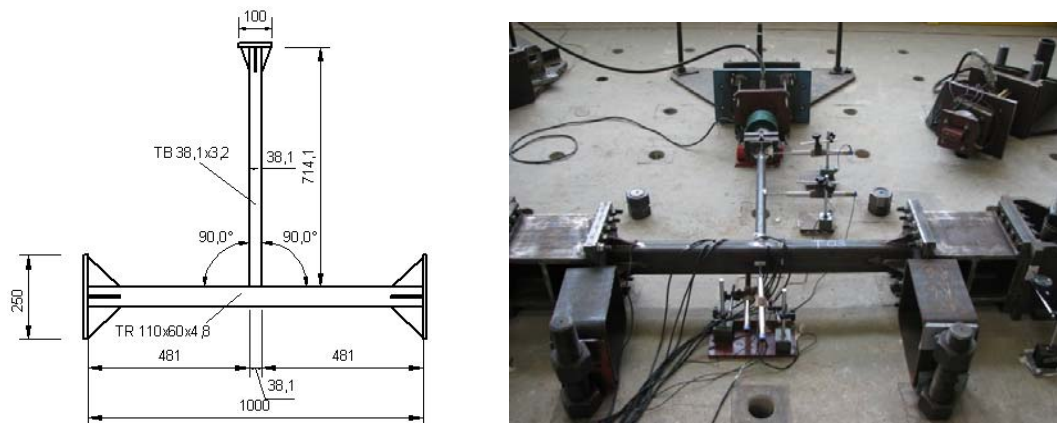
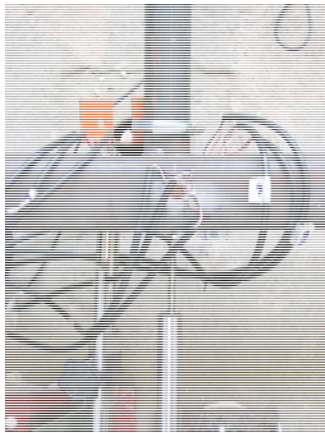


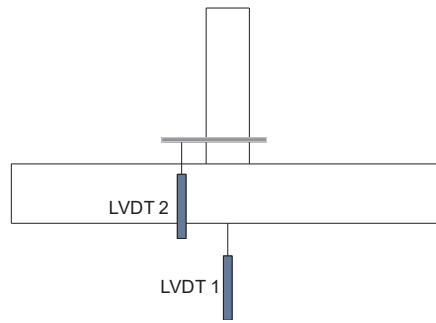
Figura 8 – Dimensões dos protótipos e esquemas gerais dos protótipos para a Ligação T (Mendes, 2008).

Os ensaios tiveram como um dos objetivos, a avaliação do comportamento das ligações, considerando-se os deslocamentos. A aplicação dos carregamentos foi realizada por atuadores hidráulicos. O monitoramento das forças aplicadas foi feito por células de carga previamente calibradas, que tiveram os dados captados por sistema automático de aquisição. A Figura 9 apresenta a instrumentação utilizada nos ensaios.

Os resultados experimentais obtidos estão representados graficamente em função dos deslocamentos máximos na face superior do banzo.



(a)



(b)

Figura 9 - Posição dos LVDTs para medição dos deslocamentos relativos da face superior do banzo: (a) Foto da posição dos LVDTs dos ensaios; (b) Esquema geral da posição dos LVDTs para medir o deslocamento máximo relativo, Δ .

6. Calibração dos modelos numéricos

Na Figura 10 são apresentadas as análises comparativas entre os resultados obtidos nos ensaios experimentais e os obtidos nos modelos numéricos. A comparação dos resultados foi realizada por gráficos com os valores da força aplicada no montante *versus* deslocamento relativo na face superior do banzo para as ligações ensaiadas.

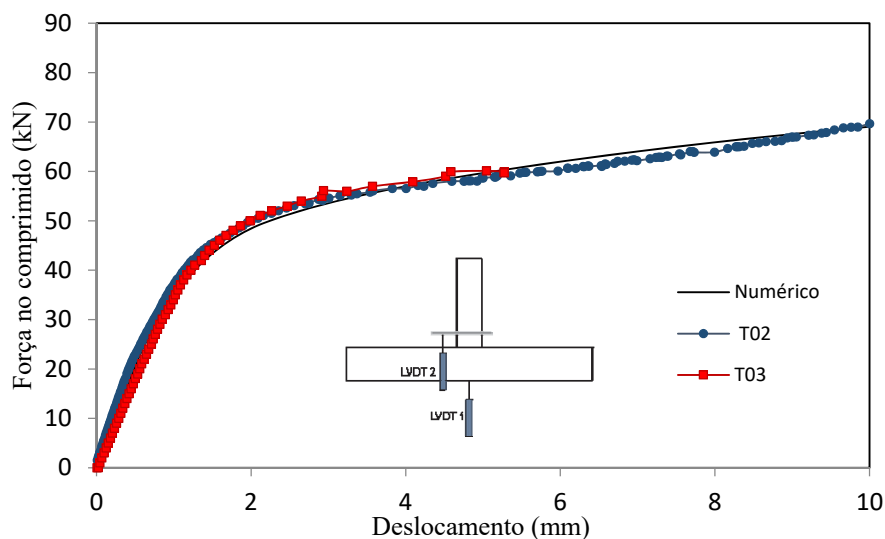


Figura 10 – Comparação entre os resultados numéricos e experimentais. (Nunes, 2012)

Observa-se que os resultados dos modelos numéricos apresentaram uma ótima correlação com os modelos experimentais, validando assim, os estudos para uma análise paramétrica.

7. Análise paramétrica

A ligação tipo T analisada considera a aplicação de força de compressão no montante e não possui carregamento no banzo. Foram variados os parâmetros β e 2γ . As geometrias dos modelos das ligações tipo T analisadas são descritas na Tabela 5. Todos os modelos foram desenvolvidos para que o modo de falha A (plastificação da face do banzo) fosse o dominante.

Tabela 5 – Geometria dos modelos numéricos do estudo paramétrico.

Modelo	b_0 (mm)	h_0 (mm)	t_0 (mm)	d_1 (mm)	t_1 (mm)	β	2γ
1	200	150	13	50	5	0,25	15,38
2				60		0,30	
3				70		0,35	
4				80		0,40	
5				90		0,45	
6				100		0,50	
7				110		0,55	
8	110	60	4,8	33,4	3,4	0,30	22,92
9				38,1	3,0	0,35	
10				48,3	3,7	0,44	
11				60,3	3,6	0,55	
12				70	4,0	0,64	
13				77	4,0	0,70	
14	200	150	7,5	50	5	0,25	26,67
15				60		0,30	
16				70		0,35	
17				80		0,40	
18				90		0,45	
19				100		0,50	
20				110		0,55	

A Tabela 6 apresenta o cálculo da força resistente teórica segundo a ABNT NBR 16239:2013, N_{NBR} , segundo a ISO 14346:2013, N_{ISO} , e a força última resistente obtida no modelo numérico, N_{num} , utilizando o critério de deformação limite. Com os resultados

tem-se a relação entre a resistência teórica prevista em prescrições de norma, e a relativa à análise numérica.

Tabela 6 – Forças resistentes teórica e numérica.

Modelo	β	2γ	N_{NBR} (kN)	N_{ISO} (kN)	N_{num} (kN)	$\frac{N_{NBR}}{N_{num}}$	$\frac{N_{ISO}}{N_{num}}$
1	0,25	15,38	283,42	267,64	330	0,86	0,81
2	0,30		310,23	285,08	365	0,85	0,78
3	0,35		332,25	304,95	405	0,82	0,75
4	0,40		357,51	327,55	432	0,83	0,76
5	0,45		386,81	353,73	495	0,78	0,71
6	0,50		421,31	384,34	545	0,77	0,71
7	0,55		462,60	420,87	605	0,76	0,70
8	0,30	22,92	36,63	36,59	48	0,76	0,76
9	0,35		39,98	38,80	48	0,83	0,81
10	0,44		47,28	44,18	64	0,74	0,69
11	0,55		57,84	52,85	88	0,66	0,60
12	0,64		68,99	62,87	110	0,63	0,57
13	0,70		79,82	72,80	129	0,62	0,56
14	0,25	26,67	96,80	92,59	98	0,99	0,94
15	0,30		103,26	98,71	108	0,96	0,91
16	0,35		110,59	105,64	118	0,94	0,90
17	0,40		118,99	113,58	132	0,90	0,86
18	0,45		128,75	122,80	144	0,89	0,85
19	0,50		140,23	133,60	162	0,87	0,85
20	0,55		170,77	146,50	190	0,81	0,77

N_{NBR} – Força axial resistente de cálculo da ligação para o modo de falha A segundo ABNT NBR 16239:2013;
 N_{ISO} – Força axial resistente de cálculo do montante da ligação para segundo ISO 14346:2013;
 N_{num} – Força axial resistente de cálculo do montante da ligação para o modo de falha A segundo modelo numérico.

Observa-se que à medida que se diminui o parâmetro β , tanto a força resistente teórica quanto a obtida nos modelos numéricos decrescem. Isto é justificado por um efeito de punção, ou seja, quanto menor o diâmetro do montante em relação a largura do banzo, maior a tendência de o montante deformar a face superior do banzo.

Pode-se observar que a relação entre a força axial resistente teórica e numérica diminui com o crescimento do parâmetro β , ou seja, as prescrições normativas tornam-se mais conservadoras.

Para a esbeltez (2γ) maior, 26,67, observou-se que para os modelos com β menores, a capacidade resistente do modelo numérico foi muito próxima da teórica. Para essas ligações, há um aumento do efeito da punção, devido a menor relação entre o diâmetro do montante e a largura do banzo.

Para melhor avaliar os resultados obtidos e listados na Tabela 6, são apresentados graficamente na Figura 11, as curvas *versus* deslocamento (Δ), obtidas através dos modelos numéricos, sendo também apresentadas as deformações referentes à força última, 3%.

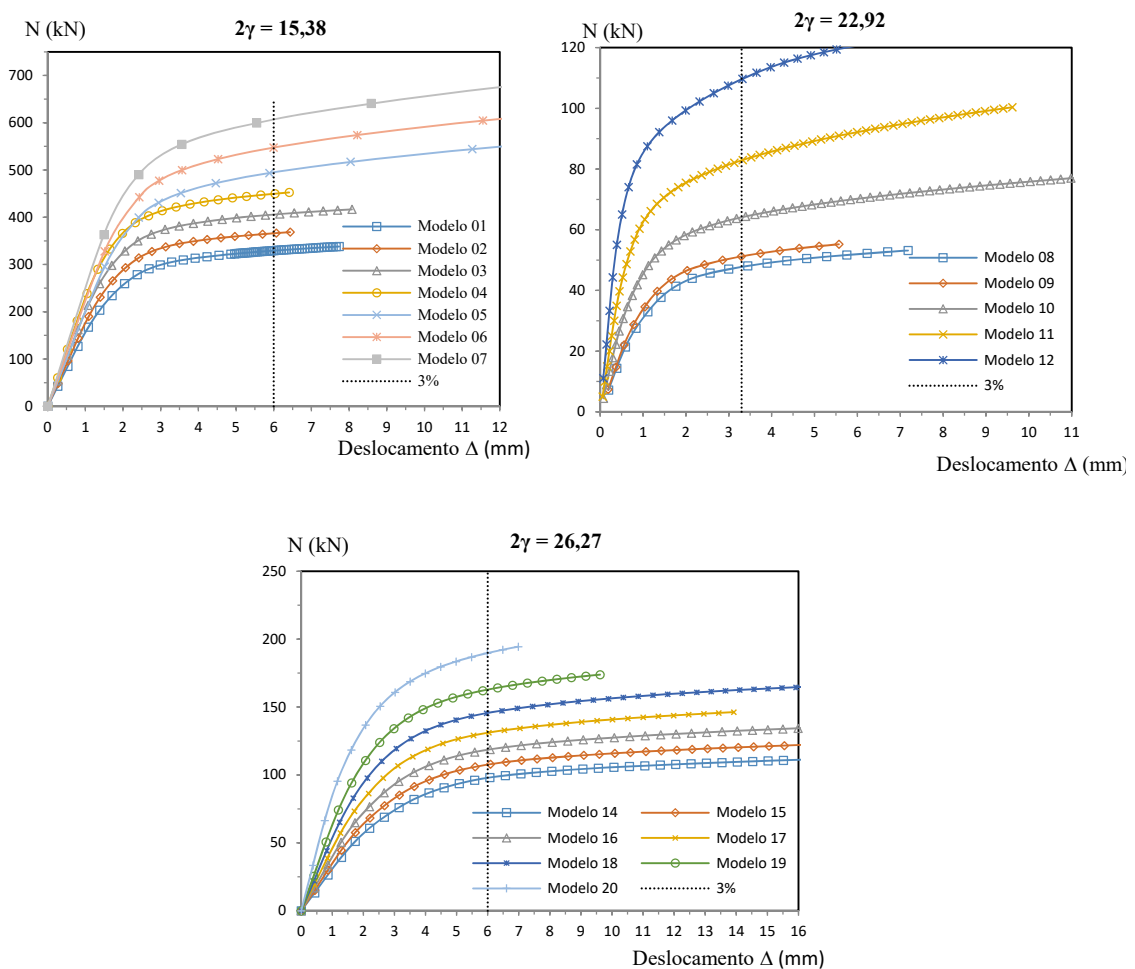


Figura 11 – Curvas carga versus deslocamento Δ dos modelos numéricos da ligação tipo T para $2\gamma = 15,38, 22,92$ e $26,27$.

Na Figura 12 tem-se apresentados os valores das forças axiais resistentes teóricas e numéricas, em função da geometria da ligação (parâmetro β). Essas figuras foram

definidas segundo a esbeltez do banzo da ligação, $2\gamma = 15,38$, $2\gamma = 22,92$ e $2\gamma = 26,27$, respectivamente. Para avaliar os resultados tem-se representados os limites inferiores de β previstos pela norma ABNT NBR 16239:2013, dado pela linha tracejada vertical, e ISO 14346:2013, dada pela linha vertical pontilhada, sendo o limite superior para as duas normas igual a 0,8. A representação destes gráficos possibilita um estudo paramétrico da ligação tipo T para o modo de falha A.

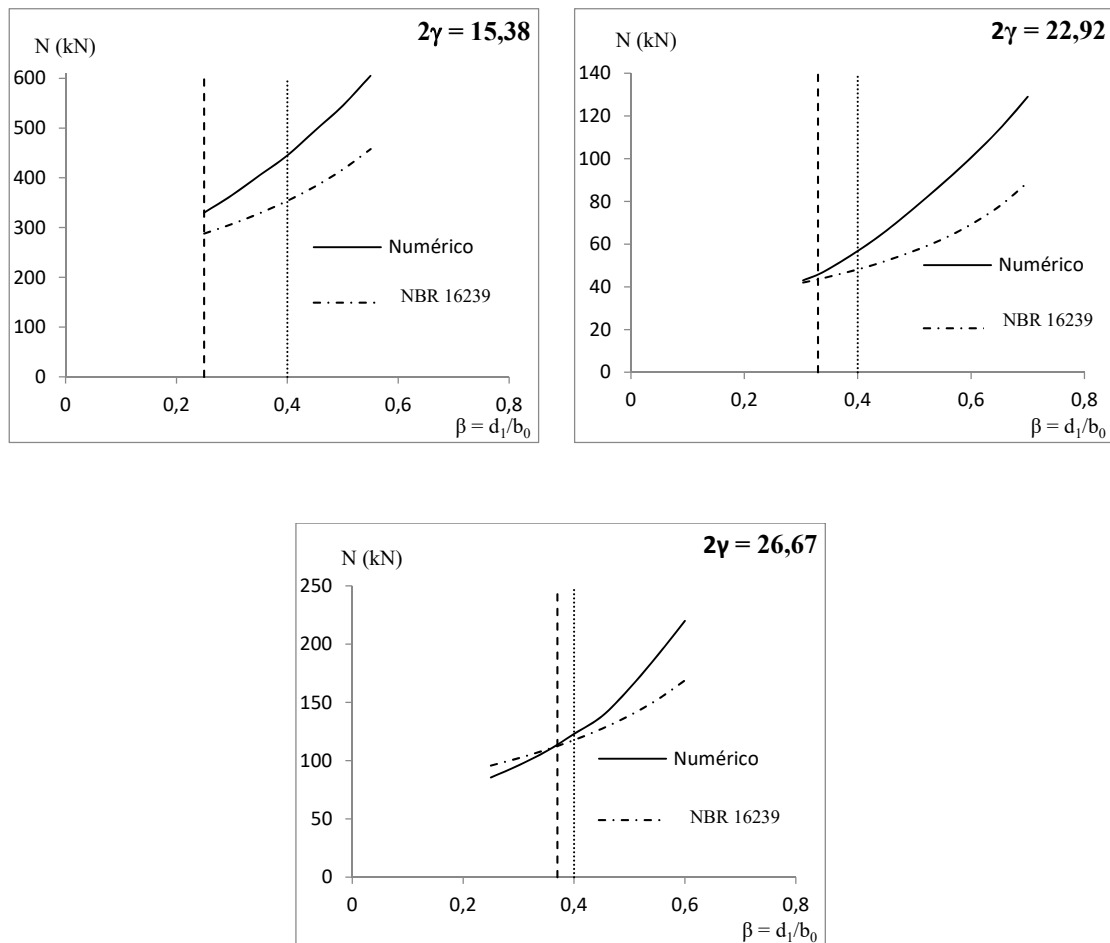
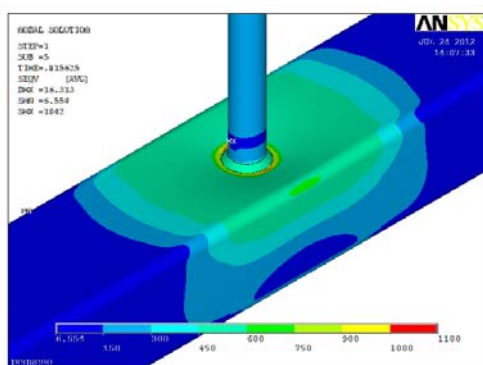
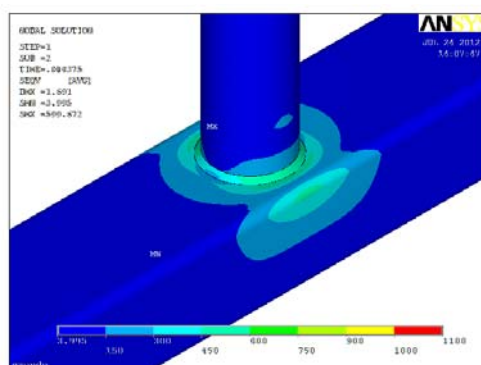


Figura 12 – Curva Força Resistente Numérica versus β dos modelos da ligação tipo T para $2\gamma = 15,38$, $22,92$ e $26,67$.

O crescimento na diferença da força axial resistente teórica e do modelo numérico para valores maiores de β , pode ser explicada devido a melhor distribuição das tensões na face superior do banzo e uma maior contribuição de sua face lateral na resistência do perfil, conforme apresentado na Figura 13.



(a)



(b)

Figura 13 – Distribuição das tensões de von Mises na região da ligação para $2\gamma = 26,67$ e carregamento de 130 kN. (a) Para $\beta = 0,25$; (b) Para $\beta = 0,6$.

8. Considerações finais

A calibração realizada entre os modelos numéricos e os experimentais apresentou ótima correlação. A precisão da calibração possibilitou a validação do estudo paramétrico das ligações.

Após a calibração, o estudo paramétrico considerou a variação dos parâmetros β e 2γ , relação entre o diâmetro do(s) montante e a largura da face do banzo e da largura da face do banzo em relação a sua espessura, respectivamente. As variações realizadas foram escolhidas considerando os limites inferior e superior dos parâmetros. Para todos os modelos numéricos desenvolvidos, o modo de falha dominante foi a plastificação da face do banzo.

Observou-se que com o aumento do parâmetro β , tanto a capacidade resistente teórica quanto a capacidade resistente dos modelos numéricos aumentam e os modelos mais esbeltos possuem uma rigidez inicial maior em relação aos de menor esbelteza.

Houve boa correlação entre os resultados dos modelos numéricos e as capacidades resistentes prescritas nas normas estudadas. Houve uma dispersão entre os valores das resistências teóricas e dos modelos numéricos com o aumento do parâmetro β que pode ser explicada pela melhor distribuição das tensões na seção e contribuição das faces laterais, para os modelos com β maiores.

9. Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais), CNPq (Conselho Nacional de Pesquisa) e à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior).

10. Referências bibliográficas

ANSYS, **Ansys program version 12.0. Finite Element Software**. Ansys Incorporation, Houston, PA, 2012.

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

ARAÚJO, A. H. M.; SARMANHO, A. M. C.; BATISTA, E. M.; REQUENA, J. A. V.; FAKURY, R. H.; PIMENTA, R. J. **Projeto de Estruturas de Edificações com Perfis Tubulares de Aço**. 1. ed. Belo Horizonte: Ed. do Autor, 2016.

ISO 14346: Static design procedure for welded hollow – section joints – Recommendations. 1st ed., Geneva, Switzerland, 2013.

LU, L. H.; de WINKEL, G. D.; YU, Y.; WARDENIER, J. **Deformation limit for the ultimate strength of hollow section joints**. Proc. of 6th Intl. Symp. on Tubular Structures, Melbourne, p. 341–347, 1994.

MENDES, F. C. **Análise teórica-experimental de ligações tipo “T”, “K” e “KT” com perfis metálicos tubulares**. Dissertação de Mestrado. PROPEC/EM - Universidade Federal de Ouro Preto, 2008.

NUNES, G. V. **Estudo paramétrico de ligações tipo "T", "K" E "KT" compostas por perfis tubulares de seção retangular e circular**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.

NUNES, G. V. **Análise teórica-experimental de ligações com perfis metálicos tubulares (retangulares e circulares) considerando o efeito do carregamento do banzo**. Tese de doutorado. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

WARDENIER, J.; PACKER, J. A.; ZHAO, X. L.; VAN DER VEGTE, G. J. **Hollow sections in structural applications**. Genebra: CIDECT, 2010.