



ESTUDO TEÓRICO E NUMÉRICO DE LIGAÇÕES TIPO “T” COM PERFIS TUBULARES DE PAREDES ESBELTAS

Messias Júnio Lopes Guerra

messias.guerra@ifmg.edu.com

Instituto Federal de Minas Gerais – Campus Governador Valadares

Avenida Minas Gerais, 5189 – Ouro Verde, Governador Valadares, CEP 35.057-760, Minas Gerais, Brasil.

Arlene Maria Cunha Sarmanho

Gabriel Vieira Nunes

Daniel José Rocha Pereira

João Batista da Silva Neto

gabriel.nunes@ifmg.edu.br

arlene.sarmanho@gmail.com

drocha044@gmail.com

joaobatista011@gmail.com

Universidade Federal de Ouro Preto

Departamento de Engenharia Civil – Campus Universitário Morro do Cruzeiro, Ouro Preto, CEP 35.400-000, Minas Gerais, Brasil.

Resumo. Neste trabalho é apresentado um estudo teórico e numérico de ligações soldadas do tipo “T” formadas por perfis tubulares de aço de seções esbeltas, com seção transversal retangular no banzo e circular no montante. As análises avaliam o comportamento, os modos de falha e a carga última da ligação. Foram analisadas as influências dos parâmetros 2γ (razão entre a largura e a espessura do banzo) e β (razão entre o diâmetro do montante e a largura do banzo), além da influência da adição de carga de tração no banzo. Os modelos numéricos em elementos finitos e os resultados foram comparados com as prescrições normativas recentes, utilizando o critério de deformação limite para determinação da carga última para o modo de falha de plastificação da parede superior do banzo.

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

1 INTRODUÇÃO

Em diversos países a construção metálica faz uso intensivo de estruturas com perfis de seção tubular. Esses perfis são muito utilizados em colunas, sistemas treliçados, pontes (Figura 1) e passarelas (Araújo et al., 2016).



Figura 1. Ponte Helix em Cingapura, composta por perfis tubulares (Portal Metálica, 2017)

A utilização atual no Brasil das estruturas tubulares em sistemas treliçados envolve grandes vãos com cargas elevadas, e as formulações existentes em prescrições de normas nacionais e internacionais são direcionadas para seções tubulares compactas.

A utilização de perfis tubulares de seção transversal esbelta em ligações de sistemas treliçados necessita de estudos específicos de modo a viabilizar sua aplicação e avaliação estrutural.

Desta forma, foi realizado um estudo teórico e numérico de ligações formadas por perfis tubulares em aço de seção esbelta, de acordo com a classificação do Eurocode 3. As ligações analisadas são do tipo "T" com seção retangular no banzo e circular no montante, sendo o montante submetido a carregamento axial de compressão. Além disso, é analisada a influência de um carregamento de tração no banzo na resistência da ligação. No estudo são observados os modos de falha, a carga última, bem como a aplicabilidade do critério de deformação limite para o estado limite último. Os resultados dos estudos numéricos são comparados com as prescrições normativas para perfis tubulares de seção compacta.

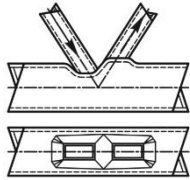
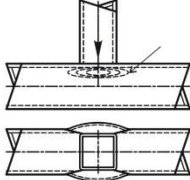
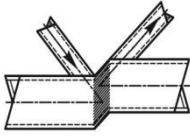
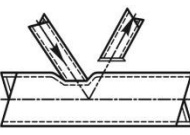
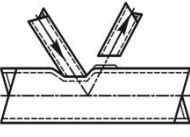
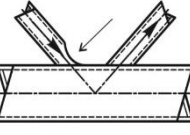
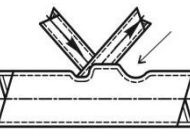
2 DIMENSIONAMENTO DE LIGAÇÕES TUBULARES

O dimensionamento das ligações tubulares soldadas nas prescrições existentes é em função dos modos de falha e de limites de relações geométricas que garantam um comportamento dúctil da ligação. A seguir têm-se os modos de falha possíveis em ligações tubulares, os parâmetros geométricos e as formulações para a verificação da capacidade resistente da ligação "T" segundo as normas NBR 16239 (2013), Eurocode 3 (2010) e ISO 14346 (2013).

2.1 Modos de falha

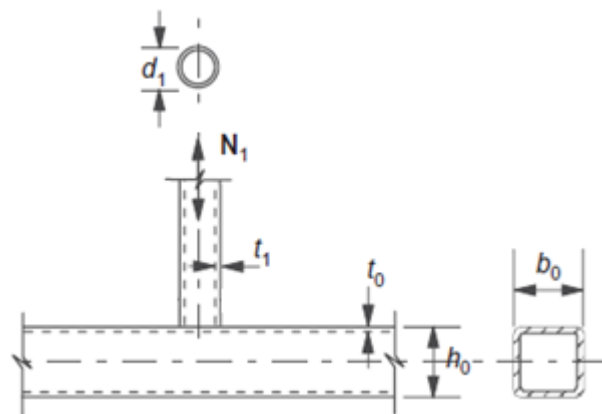
Para as ligações soldadas com perfis tubulares retangulares para os banzos e circulares para montante/diagonais e considerando a força aplicada axialmente nestes elementos, podem ocorrer os modos de falha representados na Tabela 1.

Tabela 1. Modos de falha em ligações soldadas compostas por banzo em perfis retangulares e montantes/diagonais por perfis circulares ou retangulares (NBR 16239, 2013)

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

2.2 Parâmetros e limites geométricos

Para a ligação tipo "T" tem-se na Figura 2 a representação dos parâmetros geométricos em que o índice 0 (zero) relaciona-se ao banzo e ao índice 1 (um) o montante.



Onde:

d_1 - diâmetro externo da seção transversal do tubo circular do montante comprimido ou tracionado;

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 comprimido ou tracionado;

N_1 – força axial solicitante de cálculo no montante.

Figura 2. Parâmetro geométrico da ligação tipo "T" composta por perfis tubulares circulares ou retangulares

Os seguintes parâmetros geométricos são utilizados nas análises e formulações existentes:

a) Relação entre o diâmetro do montante e a largura do banzo, representada por β , dada por:

$$\beta = \frac{d_1}{b_0} \quad (1)$$

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

$$2\gamma = \frac{b_0}{t_0} \quad (2)$$

Na Tabela 2 estão indicadas as relações geométricas e de material que devem ser atendidas para as ligações tipo "T" segundo as normas NBR 16239 (2013), Eurocode 3 (2010) e ISO 14346 (2013). Observa-se que as relações são para seções compactas (Classes 1 e 2) e são limites de validade das equações de determinação da capacidade resistente das prescrições normativas.

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

Ligação “T”		NBR 16239 (2013)	Eurocode 3 (2010)	ISO 14346 (2013)
Relação entre banzo e montante		$0,4 \leq \frac{d_i}{b_0} \leq 0,8$		$0,25 \leq \frac{d_i}{b_0} \leq 0,80$ $\frac{d_i}{b_0} \geq 0,1 + 0,01 \frac{b_0}{t_0}$
Montante	Compressão	$\frac{d_i}{t_i} \leq 0,05 \frac{E}{f_y}$	Classe 1	Classe 1 ou 2 e $\frac{d_i}{t_i} \leq 50$
Banzo	-	$\frac{b_0}{t_0} \leq \begin{cases} 36 \\ 1,45 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \end{cases}$ $\frac{h_0}{t_0} \leq \begin{cases} 36 \\ 1,45 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \end{cases}$	$\frac{b_0}{t_0} \leq \begin{cases} 35 \\ \text{Classe 1 ou 2} \end{cases}$ $\frac{h_0}{t_0} \leq \begin{cases} 35 \\ \text{Classe 1 ou 2} \end{cases}$	Classe 1 ou 2 e $\frac{b_0}{t_0} \leq 40$ $\frac{h_0}{t_0} \leq 40$
Tensão de escoamento		-	-	$f_{yi} \leq f_{y0}$ $f_y \leq 0,8f_u$ $f_y \leq 460 \text{ MPa}^a$

Onde:

i - índice do elemento, igual a 1 para montante da ligação "T";

f_{y0} - resistência ao escoamento do aço do perfil do banzo;

f_y - resistência ao escoamento do aço do perfil da ligação;

^a Quando $f_{y0} \geq 355 \text{ MPa}$, f_{y0} deve ser multiplicado por 0,9.

2.3 Força axial resistente de cálculo para o montante para ligações tipo “T”

Na Tabela 3, estão apresentadas as forças axiais resistentes de cálculo para o montante de uma ligação do tipo “T”, apenas para o modo de falha de plastificação da face ou de toda a seção transversal do banzo na região da ligação. Esse modo de falha pode ser descrito como Modo A, de acordo com a classificação da NBR 16239 (2013). Destaca-se que, nos casos em que não há carregamentos aplicados no banzo, as formulações aparentemente diferem no cálculo das cargas últimas, mas como resultado final, possuem o mesmo valor numérico. Nos casos de tração no banzo, a ISO 14346 (2013) indica o cálculo de um coeficiente de redução (Q_f), enquanto nas outras duas normas o fator de redução (k_n) é igual a 1.

Tabela 3. Força axial resistente de cálculo para o modo de falha A para ligações tipo “T” segundo às prescrições

Modo de falha	NBR 16239 (2013) e Eurocode 3 (2010)	ISO 14346 (2013)
Plastificação da face do banzo na região da ligação	Modo A	
	$N_{1,Rd} = \frac{k_n f_{y0} t_0^2}{(1 - \beta)} (2,2\eta + 4,4\sqrt{1 - \beta})$	$N^*_i = Q_u Q_f f_{y0} t_0^2$
Parâmetros	Para $n < 0$: $k_n = 1,3 + \frac{0,4n}{\beta}$ Para $n \geq 0$: $k_n = 1,0$ Onde: $n = \frac{\sigma_{0,Sd}}{f_{y0}}$ $\sigma_{0,Sd} = \frac{N_{0,Sd}}{A_0} + \frac{M_{0,Sd}}{W_0}$ sendo $\sigma_{0,Sd}$ determinado considerando sinal negativo para compressão.	$Q_u = \frac{2\eta}{(1 - \beta)} + \frac{4}{\sqrt{1 - \beta}}$ $Q_f = (1 - n)^{C_1}$ Onde: $n = \frac{N_0}{N_{pl,0}} + \frac{M_0}{M_{pl,0}}$ Para Tração: $C_1 = 0,1$ Para compressão: $C_1 = 0,5 - 0,5\beta$

Onde:

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

2γ - 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 método da deformação limite é um método consolidado por diversos pesquisadores (Lu et al., 1994, Zhao, 2010), que pode ser utilizado para determinar a resistência última de uma ligação; considera-se a deformação limite como o estado limite último, que governa o dimensionamento da ligação tubular. Esse método considera que quando não ocorre um pico de carga máxima bem definida, essa pode ser associada a plastificação da face superior do banzo (Modo A) conforme uma deformação relativa, Δ (Figura 3). Neste caso, essa deformação limite é de 3% da largura da face do banzo (b_0) (Figura 4). Caso esse pico de carga máxima ocorra antes do limite de 3% de b_0 , essa carga será a resistência da ligação.

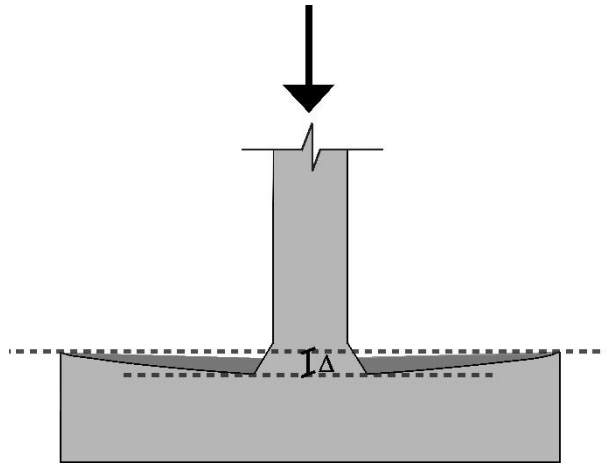


Figura 3. Deformação relativa na face do banzo, Δ , para o modo de falha A

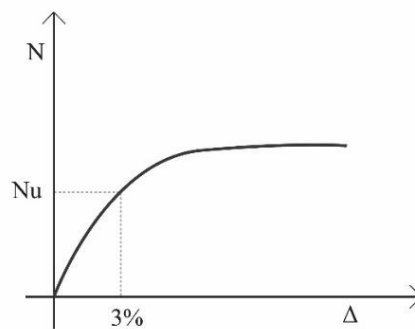


Figura 4. Método para obtenção da carga última da ligação – N_{um} (Zhao, 2010)

4 ANÁLISE NUMÉRICA

Para a análise numérica foram consideradas seções de paredes esbeltas. De acordo com a classificação do Eurocode 3 (2010), os perfis são divididos em classes de 1 a 4. As normas utilizadas nesse trabalho são válidas para perfis compactos (classes 1 e 2) e nas análises foram utilizados perfis das classes 3 e 4 (Eurocode 3, 2010), segundo a descrição a seguir:

- Classe 3: são aquelas em que a tensão na fibra de compressão mais externa da seção transversal, assumindo uma distribuição elástica de tensões, pode atingir a resistência ao escoamento, mas a flambagem local impede o desenvolvimento do momento plástico;
- Classe 4: são aquelas em que a flambagem local irá ocorrer antes de atingir a tensão de escoamento em uma ou mais partes da seção transversal.

As ligações "T" em estudo possuem geometria que não atendem aos limites de validade do Eurocode 3 (2010), da NBR 16239 (2013) e da ISO 14346 (2013) dados na Tabela 2. Assim, os modelos utilizados para as análises são os descritos na Tabela 4, na qual se tem a classificação da seção e a informação se os limites são ou não obedecidos.

Tabela 4. Nomenclatura e parâmetros geométricos dos modelos numéricos

Série	Modelos	2γ	β	t_0 (mm)	b_0 (mm)	d_1 (mm)	Classificação - Eurocode 3 (2010)
SN1	SN1 60-0,32 ^a	60 ^c	0,32	2,00	120	38,0	Classe 4
	SN1 60-0,42 ^b		0,42			50,0	
SN2	SN2 53-0,32 ^a	53,3 ^c	0,32	2,25		38,0	Classe 4
	SN2 53-0,42 ^b		0,42			50,0	
SN3	SN3 40-0,32 ^a	40 ^c	0,32	3,00		38,0	Classe 3
	SN3 40-0,42 ^b		0,42			50,0	
SN4	SN475-0,25 ^b	75 ^c	0,25	2,00		38,0	Classe 4
	SN475-0,33 ^b		0,33			50,0	
SN5	SN566-0,25 ^b	66,7 ^c	0,25	2,25	38,0	Classe 4	
	SN566-0,33 ^b		0,33		50,0		
SN6	SN650-0,25 ^b	50 ^c	0,25	3,00	38,0	Classe 4	
	SN650-0,33 ^b		0,33		50,0		

^a Os limites da NBR 16239 e Eurocode 3 são atendidos para β , limite da ISO 14346 não atendido (ver Tabela 2) quanto ao parâmetro β ;

^b Limites da NBR 16239, Eurocode 3 e ISO 14346 não atendidos (ver Tabela 2) quanto ao parâmetro β ;

^c Limites da NBR 16239, Eurocode 3 e ISO 14346 não atendidos (ver Tabela 2) quanto ao parâmetro 2γ .

Os modelos numéricos são em elementos finitos, sendo utilizado o software comercial ANSYS (2012). Os modelos analisados foram divididos em séries, de acordo com a espessura do banzo, relacionado com parâmetro 2γ e com o parâmetro β (Tabela 4).

O elemento utilizado nas análises para essa tipologia de ligação foi o elemento de casca, que possui quatro nós e seis graus de liberdade por nó (*SHELL 181*). Esse elemento considera esforços de flexão, cisalhamento e efeito de membrana sendo utilizado por diversos pesquisadores no estudo de ligações tubulares (Mayor, 2013, Mendanha 2007, Nunes, 2012, Nizer et al., 2015).

O material utilizado nas análises tem o diagrama tensão-deformação bi-linear e elasto-plástico perfeito, e para a modelagem foram utilizadas os seguintes dados:

- Módulo de elasticidade: $E = 200 \text{ GPa}$
- Coeficiente de Poisson: $\nu = 0,3$
- Tensão de escoamento do perfil do montante (Aço A36): $f_{y1} = 250 \text{ MPa}$
- Tensão de escoamento do perfil do banzo (Aço A36): $f_{y0} = 250 \text{ MPa}$
- Resistência à tração do metal da solda: $f_w = 485 \text{ MPa}$

4.1 Modelagem em elementos finitos

Na construção dos modelos numéricos com perfis de seção transversal retangular, foram considerados os raios de dobramento do banzo iguais a duas vezes a espessura da seção transversal dos perfis do banzo, conforme apresentado na Figura 5.

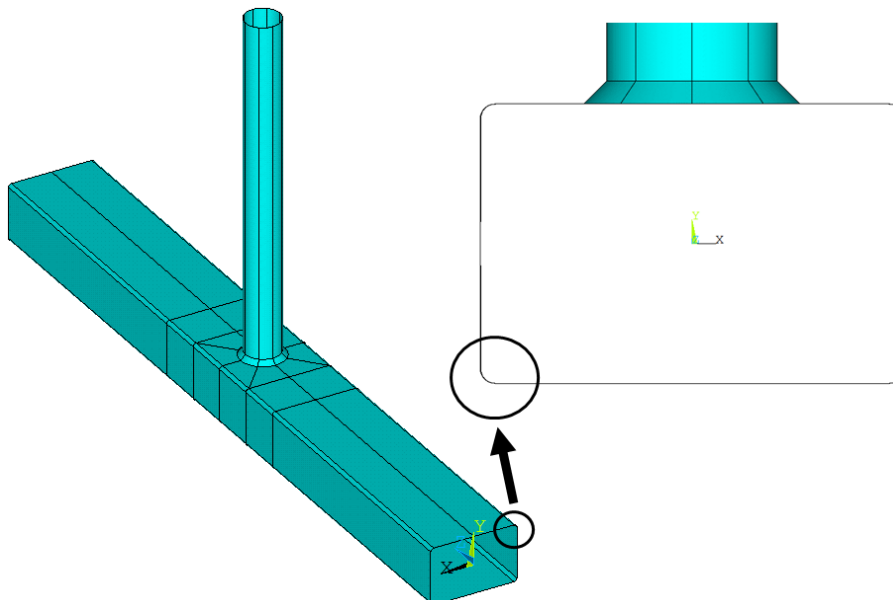


Figura 5. Representação dos modelos numéricos e os raios de dobramento do banzo

A malha de elementos finitos foi gerada com uma forma adequada de arranjo dos elementos que possibilitasse o refinamento nas regiões de concentração de tensões, região de união entre o montante e o banzo das ligações, Figura 6, sendo seu refinamento baseado em estudos anteriores (Nunes et al., 2011).

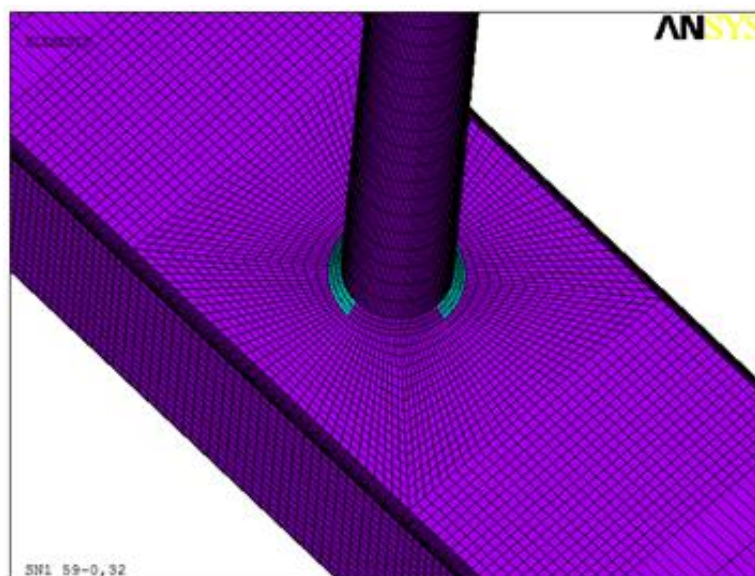


Figura 6. Detalhe da malha dos modelos numéricos geradas no software ANSYS (2012)

Para a modelagem do filete de solda o elemento foi o mesmo utilizado na modelagem dos elementos da ligação (*SHELL 181*). A espessura da garganta do filete de solda foi de uma vez e meia a espessura do montante. Na Figura 7 tem-se a representação da malha da solda utilizada.

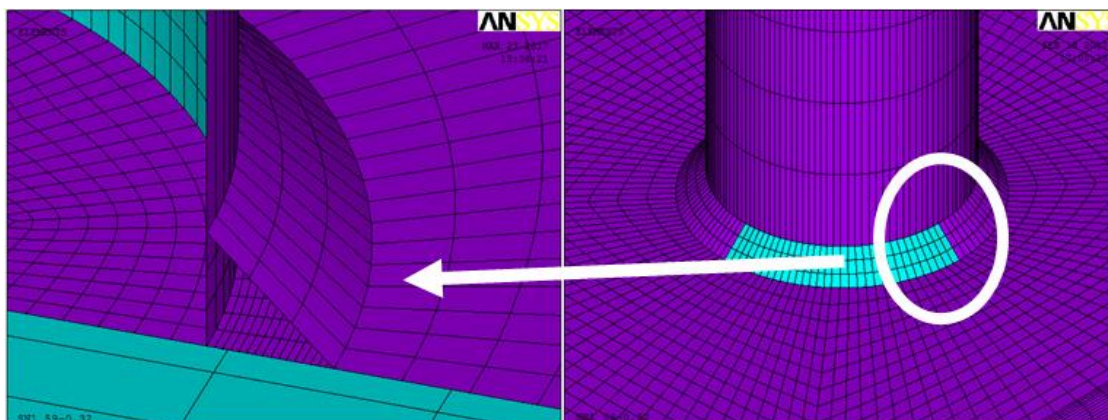
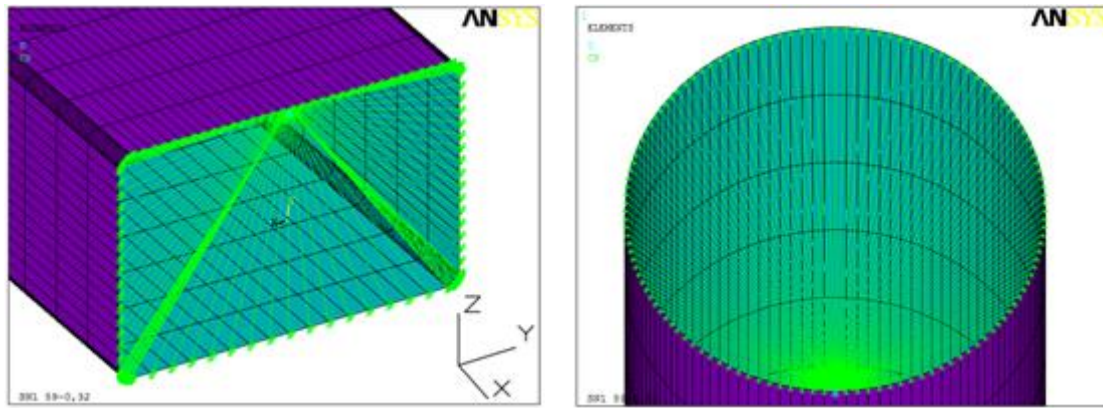


Figura 7. Representação do cordão de solda dos modelos com elemento de casca SHELL 181

Quanto às condições de contorno do banzo, foi considerada engastada e apoiada. Portanto, para a extremidade engastada, restringiu-se todos os graus de liberdade e a extremidade apoiada restringiu-se somente na direção Z (Figura 8 (a)). Para o montante foi restringido apenas o grau de liberdade em X, Figura 8 (b), simulando, assim, as condições de contorno de uma rótula.



(a) - Extremidade do banzo

(b) - Extremidade do montante

Figura 8. Condições de contorno das extremidades dos modelos

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.

4.2 Apresentação e análise dos resultados

As séries avaliadas, apresentadas na Tabela 4, foram analisadas segundo os resultados numéricos do deslocamento relativo, Δ , da face superior do banzo para cada etapa de carregamento. Conforme mencionado anteriormente, as análises consideram o critério de deformação limite em que o carregamento último corresponde ao deslocamento relativo a 3% da largura da face superior do banzo (b_0). A Figura 9 ilustra o deslocamento Δ obtido na análise numérica.

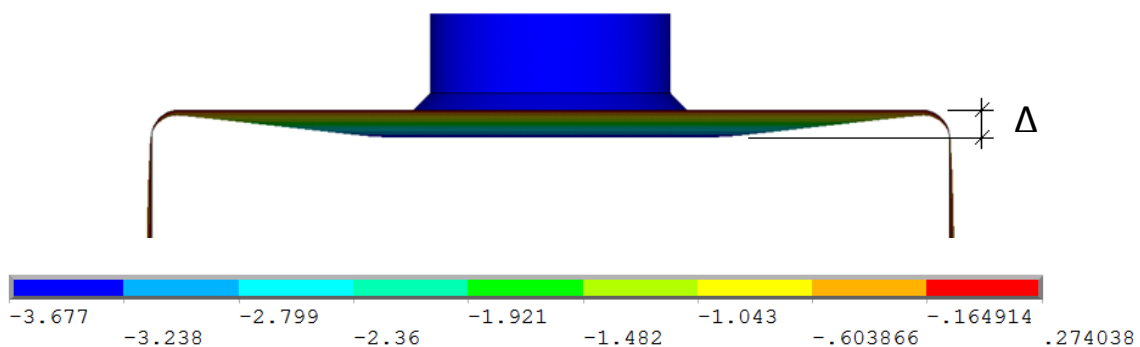


Figura 9. Deslocamento relativo (Δ) da face superior do banzo para 3% b_0

Na Figuras 10 e 11 tem-se representado os resultados dos deslocamentos relativos dos modelos versus o carregamento aplicado e a indicação de 3% de b_0 . A nomenclatura utilizada na identificação dos modelos segue a seguinte identificação: SNX Y-Z onde SN é a abreviatura de série numérica, X corresponde ao número da série, Y é o valor do parâmetro 2γ e Z é o valor do parâmetro β .

Pode-se observar nas curvas das Figuras 10 e 11 que o deslocamento relativo, Δ , para as seis séries avaliadas possuem coerência entre os resultados, apresentando a carga última menor para aqueles modelos com maiores valores do parâmetro 2γ ou seja, maior esbeltez. Ao comparar as séries com relação ao valor de β , observa-se que a cada dois modelos da mesma série, quanto maior o valor de β maior o valor da carga última. Isso se justifica pois com β maior, tem-se um maior diâmetro do montante propiciando uma melhor distribuição da compressão axial na parede do banzo e diminuindo o efeito da punção.

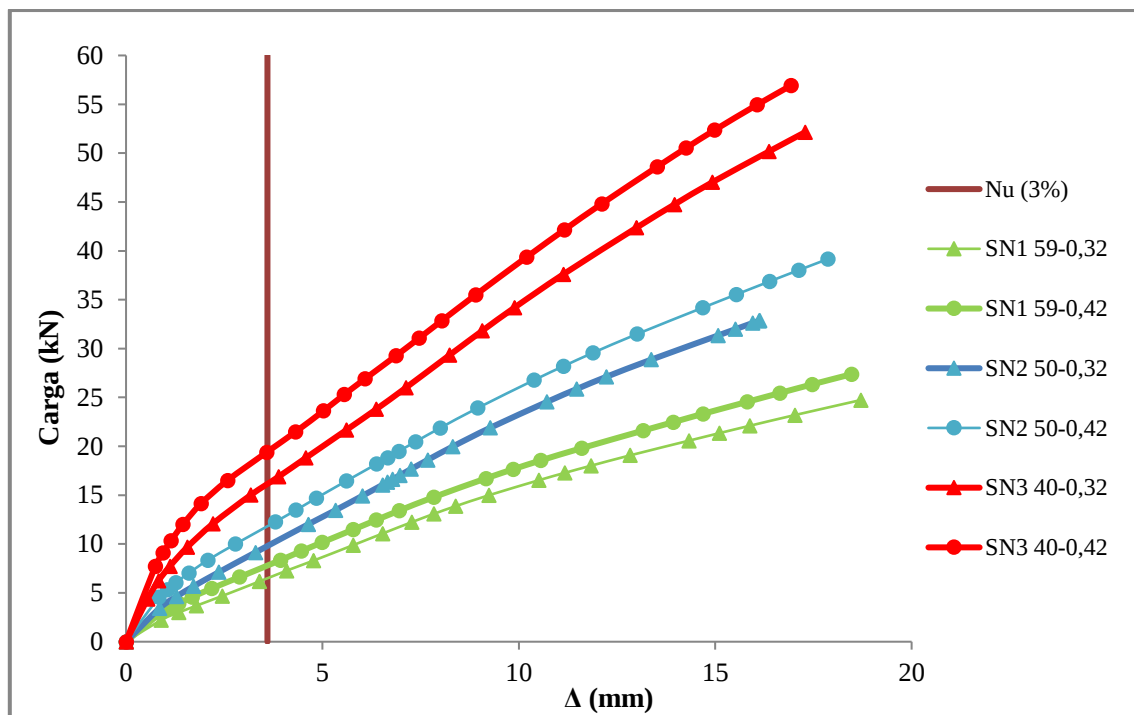


Figura 10. Curva Carga x Deslocamento Relativo, Δ , SN1, SN2 e SN3

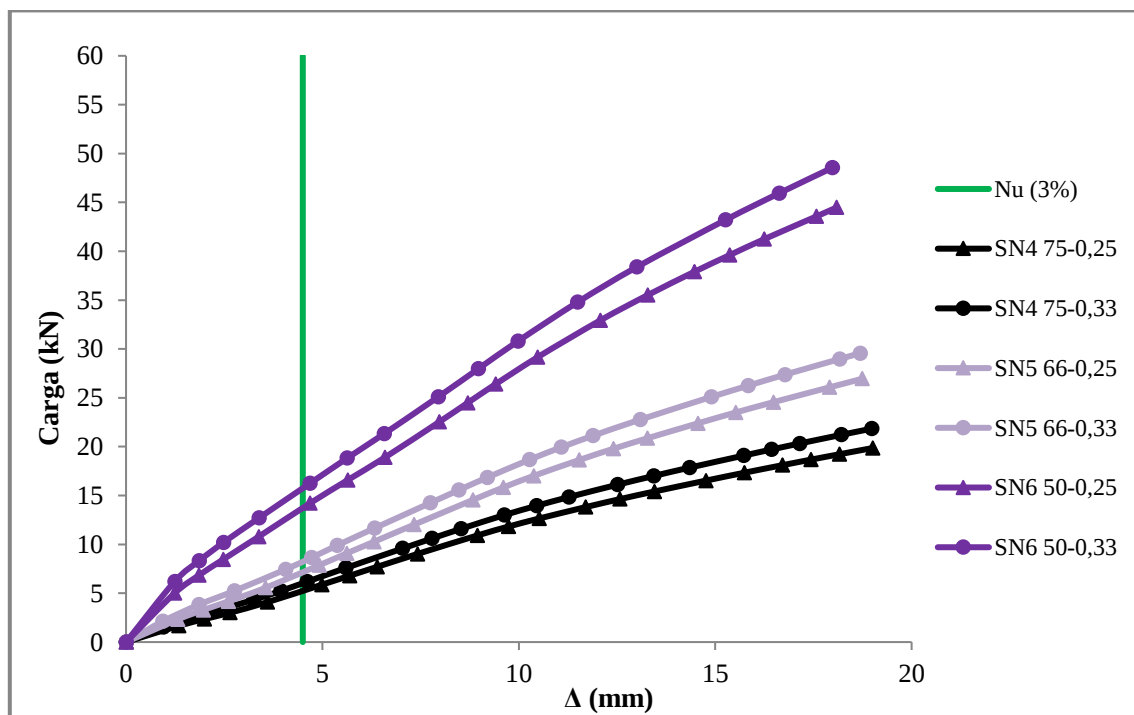


Figura 11. Curva Carga x Deslocamento Relativo, Δ , SN4, SN5 e SN6

Com relação ao modo de falha, pôde-se observar o modo de falha da plastificação da face superior do banzo, modo A, em todas as séries. As Figuras 12 e 13 ilustram, respectivamente, o deslocamento relativo, Δ , e o modo de falha de plastificação na face superior do banzo, avaliados por meio da distribuição de tensões de von Mises para os modelos com $b_0=150\text{mm}$.

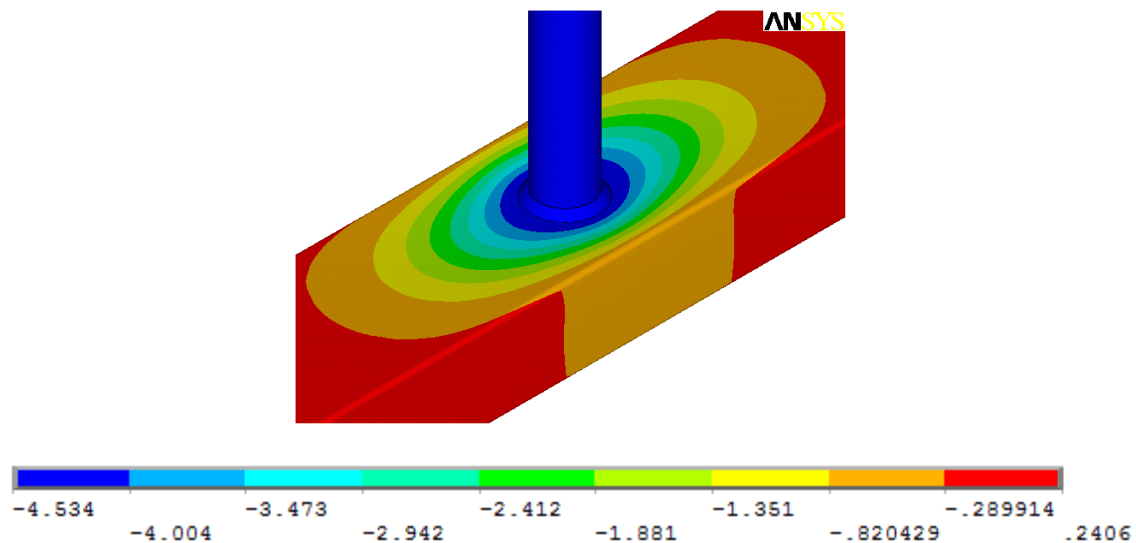


Figura 12. Deslocamento relativo, Δ , de 3% b_0 (4,5mm) para $\beta= 0,33$

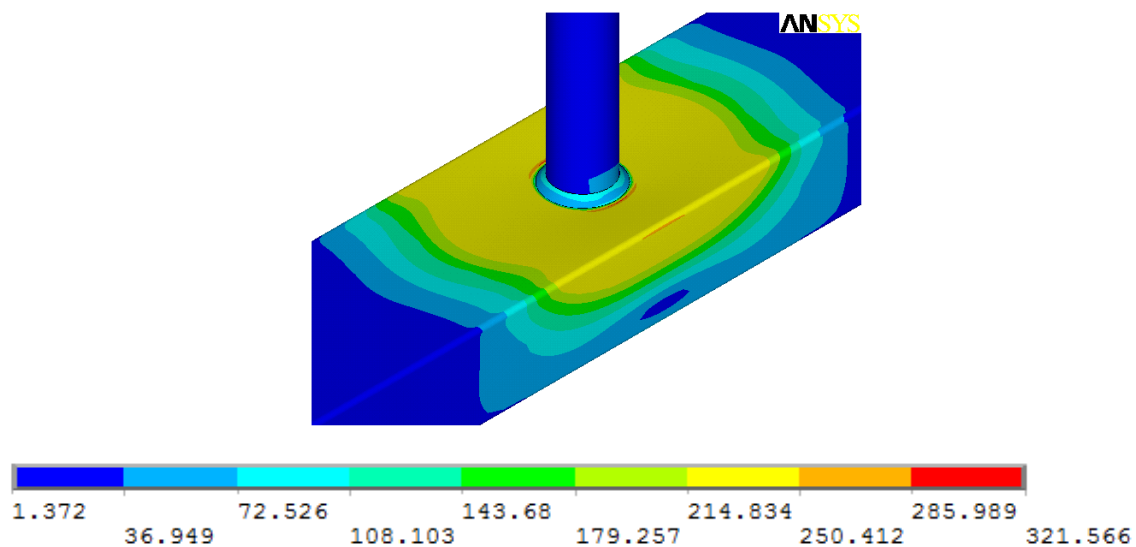


Figura 13. Plastificação da face superior do banzo para $\beta=0,33$

A influência de uma carga de tração axial no banzo foi analisada para um dos modelos, o SN3 40-0,32. As condições de análise do modelo foram idênticas às anteriores, porém com adição dessa carga de tração. A Figura 14 mostra a curva Carga (aplicada no montante) x Deslocamento relativo, para diferentes valores de carga de tração no banzo. Os valores dessas cargas foram definidos a partir da tensão de escoamento do aço, variando entre uma proporção de 0,1 e 0,9 dessa tensão.

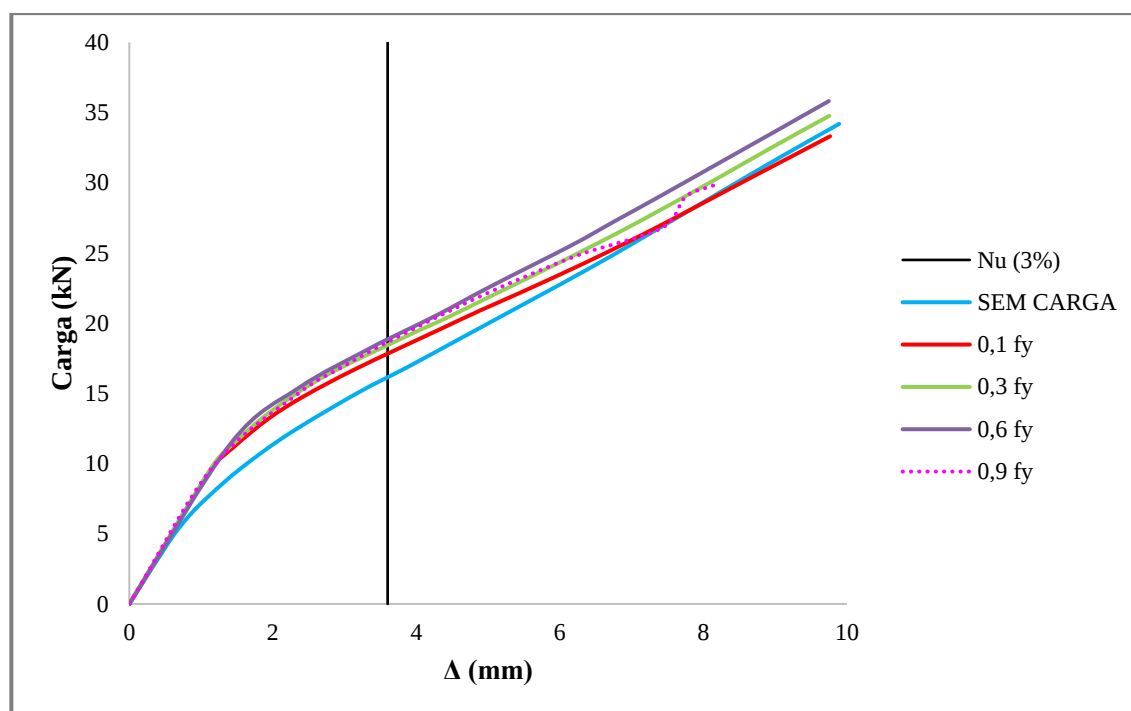


Figura 14. Curva Carga x Deslocamento Relativo, Δ , SN3 40-0,32, para diferentes carregamentos no banzo

5 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS NUMÉRICOS COM AS PRESCRIÇÕES

As comparações dos resultados obtidos para a resistência das ligações, segundo as prescrições normativas consideradas neste trabalho, são apresentadas na Tabela 5, que contém: os parâmetros geométricos, os valores das cargas últimas teóricas (N_1), os valores das cargas últimas numéricas (N_{num}) e a relação entre N_1 e N_{num} .

Tabela 5. Resultados teóricos e numéricos (Continua)

Série	Modelos	2γ	β	t_0 (mm)	b_0 (mm)	N_1 (kN)	N_{num} (kN)	$\frac{N_1}{N_{num}}$
SN1	SN1 59-0,32	60,0	0,32	2,00	120	5,00	6,49	0,85
	SN1 59-0,42		0,42			5,79	7,80	0,82
SN2	SN2 50-0,32	53,3	0,32	2,25		6,33	9,79	0,71
	SN2 50-0,42		0,42			7,33	11,82	0,68
SN3	SN3 40-0,32	40,0	0,32	3,00		11,26	16,14	0,77
	SN3 40-0,42		0,42			13,02	19,44	0,74

Tabela 5. Resultados teóricos e numéricos (Conclusão)

Série	Modelos	2γ	β	t_0 (mm)	b_0 (mm)	N_1 (kN)	N_{num} (kN)	$\frac{N_1}{N_{num}}$
SN4	SN4 75-0,25	75,0	0,25	2,00	150	4,57	5,25	0,96
	SN4 75-0,33		0,33			5,07	6,03	0,93
SN5	SN5 66-0,25	66,7	0,25	2,25		5,78	7,16	0,89
	SN5 66-0,33		0,33			6,42	8,24	0,86
SN6	SN6 50-0,25	50,0	0,25	3,00		10,27	13,73	0,82
	SN6 50-0,33		0,33			11,41	15,75	0,80

N_1 - Carga última obtida nas prescrições NBR 16239 (2013), Eurocode 3 (2010) e ISO 14346 (2013)

Pelos resultados obtidos pode-se destacar que os valores das cargas últimas, numéricas e teóricas, tiveram melhor correlação para os modelos com largura do banzo b_0 de 150 mm. Observa-se ainda que para todos os modelos, as cargas últimas obtidas pela análise numérica são superiores às resistências prescritas pelas normas consideradas na análise, como apresentado pela coluna N_1/N_{num} . Essa relação menor que 1 resulta em uma carga última prevista por norma está a favor da segurança.

Vale destacar que a resistência da ligação (N_{num}) dos modelos com maior largura do banzo (b_0) é menor que daqueles modelos com menor b_0 . Isto é justificado pela melhor distribuição do carregamento do montante, elevando, assim, a carga última da ligação.

Destaca-se, também, a influência do parâmetro 2γ , relacionado com a espessura da seção transversal do banzo, na carga última da ligação. Desta forma, observa-se que para banzos com espessuras maiores tem-se um aumento na carga última da ligação.

No caso onde há também aplicação de tração no banzo, a NBR 16239 (2013) e o Eurocode 3 (2010) definem o fator de redução da resistência como $k_n=1$, enquanto a ISO 14346 (2013) prevê o cálculo de um fator Q_f . Para o caso analisado, os valores de Q_f são mostrados na Tabela 6, de acordo com o fator “n” de cada carga aplicada. Além disso, é mostrado o quanto a resistência nos modelos numéricos se mostrou superior ao caso onde não há aplicação de carga no banzo, através do cálculo de um fator de amplificação.

Tabela 6. Fator de redução da resistência da ligação segundo a ISO 14346 (2013)

Fator "n"	Q_f	Fator de amplificação numérico
0,9	0,79	1,18
0,6	0,91	1,17
0,3	0,96	1,13
0,1	0,99	1,10

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise numérica realizada foi dividida em 6 séries distintas, possuindo duas larguras (b_0) para os banzos (120mm e 150mm), os quais possuíram espessuras iguais a 2,0 mm, 2,25 mm e 3,0 mm, respectivamente. Para cada espessura do banzo, foram adotados dois diâmetros diferentes para o montante, 38 mm e 50 mm. Com a combinação das dimensões dos elementos da ligação tem-se a variação dos parâmetros geométricos 2γ (d_0/t_0) e β (d_1/b_0).

Na modelagem numérica foram observados o comportamento da ligação, modo de falha e deslocamento limite da face superior do banzo. Os resultados indicaram boa correlação entre si, sendo o modo de falha observado, na totalidade dos modelos, o Modo A, caracterizado pela plastificação da face superior do banzo na região da ligação.

Para a análise da carga última numérica foi utilizado o critério de deformação limite que se mostrou adequado para os modelos. Para este critério foi utilizado o estado limite último (Zhao, 2010), dado por um deslocamento relativo da face superior do banzo, Δ , igual a 3% da largura deste elemento (b_0), para obtenção da carga máxima de todos os modelos.

Para os modelos das seis séries, as cargas últimas numéricas (N_{num}) foram maiores que as obtidas nas prescrições (N_1).

Para os modelos com $\beta=0,32$, a dispersão entre N_1 e N_{num} foi um pouco menor que dos modelos com $\beta=0,42$. Vale destacar que essa dispersão maior, para os modelos com $\beta=0,42$, é justificada pela melhor distribuição do carregamento do montante, elevando, assim, a carga última da ligação.

É importante destacar a influência do parâmetro 2γ , relacionado com a espessura da seção transversal do banzo, ou seja, sua esbeltez, na carga última da ligação. Isto é, quanto menor o valor de 2γ , menor esbeltez, observa-se um aumento na carga última.

Destaca-se que os modelos analisados pertencem às classes 3 e 4, o que contraria o Eurocode 3 (2010), que limita a utilização de perfis com esbeltez somente das classes 1 e 2, não esbeltos. Segundo os resultados obtidos na análise numérica, as equações para dimensionamento da ligação “T” das prescrições apresentam resultados conservadores. Destaca-se que modos locais de estabilidade não ocorrem para o carregamento estudado na ligação.

No modelo utilizado para avaliar a influência da adição da carga de tração no banzo, notou-se um aumento da resistência da ligação no estudo numérico, em todos os diferentes carregamentos aplicados. A NBR 16239 (2013) e o Eurocode 3 (2010) não preveem a alteração da resistência da ligação nesses casos, enquanto a ISO 14346 (2013) estipula um fator de redução da ligação.

O aumento nos valores de resistência numérica pode ser atribuída a um possível efeito de membrana na peça, que não é contemplado nas normas estudadas.

7 AGRADECIMENTOS

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

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ansys, Inc., 2012. *ANSYS documentation for release 12.0*.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013. *NBR 16239: Projetos de Estrutura de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edificações com Perfis Tubulares*. Rio de Janeiro.

Araújo, A. H. M., Sarmanho, A. M. C., Batista, E. M., Requena, J. A. V., Fakury, R. H., Pimenta, R. J., 2016. *Projeto de Estruturas de Edificações com Perfis Tubulares de Aço*. 1. ed. Belo Horizonte: Ed. do Autor.

EN 1993-1-8, 2010. *Eurocode 3: Design of steel structures – Structures – Part 1-8: Design of joints*. CEN, ECCS, Brussels.

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

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

Mayor, I. S., Nunes, G. V., Sarmanho, A. M. C., Requena, J. A. V., Araújo, A. H. M, 2013. Theoretical and experimental analysis of RHS/CHS K gap joints. *Revista Escola de Minas*, v. 66, p. 295-300.

Mendanha, F. O., Sarmanho, A. M. C, Freitas, M. S. R., Muniz, C. F. D. G., 2007. Análise de ligações em perfis tubulares de aço do tipo K e KT com afastamento entre as diagonais e o montante. *Revista Escola de Minas*, v.60, p. 419-423.

Nunes, G. V; Sarmanho, A. M. C., Araújo, A. H. M., Requena, J. A. V., Lima, L. O. R., 2011. Análise do comportamento de ligações tubulares “T”. *XXXII Cilamce - Congresso ibero latino americano de métodos computacionais em engenharia*, v.1, p. 1 – 10.

Nunes, G. V., 2012. *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.

Nizer, A., Lima, L. O. R., Vellasco, P. C. G. S., Andrade, S. A. L., Goulart, E. S.; Silva, A. T., Neves, L. F. C., 2016. Experimental and numerical assessment of RHS T-joints subjected to brace and chord axial forces. Ernst & Sohn. Verlag für Architektur und Technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin - *Steel Construction – Design and Research*, v. 9, p. 315-322.

Portal Metálica. *Ponte Helix*, 2017. Disponível em: <<http://wwwo.metalica.com.br/ponte-helix-dupla-estrutura-de-aco-inoxidavel-em-formato-helicoidal>>. Acesso em: Agosto 2017.

Zhao, X. L.; Wardenier, J.; Packer, J. A.; Van der velt, G. J., 2010. Current static design guidance for hollow-section joints. *Structures and Buildings*, 163, SB6 p. 361–373.