



Tema: Estruturas tubulares de aço

COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE LIGAÇÕES TUBULARES TIPO “K”

Luma de Souza Dias¹

Ludmília de Souza Dias²

Carmem Miranda Lage³

Resumo

O dimensionamento de perfis tubulares é uma tarefa árdua, já que os cálculos demandam a necessidade de diversas verificações e a funcionalidade da geometria depende da combinação de determinados parâmetros. Sendo assim, a automação do processo de dimensionamento se torna uma opção desejável pela praticidade, rapidez e assertividade dos resultados. O objetivo deste trabalho foi o de aplicar os procedimentos normativos para a análise e dimensionamento de uma treliça em estrutura de aço com ligações tubulares tipo “K”, analisando o comportamento da ligação e seus modos de falha, com intuito de possibilitar melhor compreensão da NBR 16239 (2013) [2], além de verificar a viabilidade do uso do *software* “*Ligações Tubulares*” [1]. Inicialmente analisou-se a estrutura através do *software* comercial *SAP2000* [3], verificando seu atendimento quanto à resistência. A partir da verificação das solicitações em um determinado nó, foi realizada a análise no *software* *Ligações Tubulares* [1] e paralelamente foi realizada a análise analítica através da NBR 16239 (2013) [2]. Os resultados foram similares, obtendo-se 87% de aproveitamento da ligação, indicando que o *software* *Ligações Tubulares* [1] apresenta viabilidade e aproveitamento para execução de projetos no mercado de trabalho, além de aferir o cálculo analítico.

Palavras-chave: Perfis tubulares; Estruturas de aço; Ligações.

STRUCTURAL BEHAVIOR OF TUBULAR PROFILES TYPE “K”

Abstract

The design of tubular profiles is an arduous task, since the calculations require multiple checks and geometry's functionality depends on the combination of certain parameters. Thus, the automation of the design process becomes a desirable option for the convenience, speed and assertiveness of results. The objective of this paper was to conduct an analysis of the design of a latticed steel structure with tubular connections type "K" and their failure modes in order to verify the feasibility of using the academic software *Ligações Tubulares* [1], besides to enable better understanding NBR 16239 (2013) [2]. Initially it was verified the structure through commercial software *SAP2000* [3], checking its answer for resistance. From the verification of requests at a particular node, the analysis was performed in the software *Ligações Tubulares* [1] and in parallel analytical analysis was performed by NBR 16239 (2013) [2]. The results were similar; obtaining 87% of connection utilization, indicating that the software *Ligações Tubulares* [1] presents feasibility and usage by market for projects, beyond to assess the analytical calculation.

Keywords: Tubular profiles; Steel structures; Joints.

¹ Engenheira Civil, Aluna de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil-DEVIC, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil.

² Engenheira Civil, Aluna de Mestrado, Departamento de Pós Graduação em Engenharia Civil-DPGEC, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil.

³ Engenheira Civil, Professora M. Sc., Departamento de Tecnologia e Engenharia Civil, Computação e Humanidades – DTECH, Universidade Federal de São João del-Rei, Ouro Branco, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Acompanhando-se as demandas da construção civil brasileira, o consumo de tubos de aço neste setor vem crescendo significativamente no país. As razões para esse crescimento se baseiam nos inúmeros benefícios que a utilização da estrutura tubular pode gerar [4].

Segundo o Catálogo Estrutural Vallourec & Mannesmann Tubes (2011) [5], o uso de perfis tubulares proporciona vantagens como: resistir de maneira econômica a esforços elevados de compressão, torção e efeitos combinados; redução significativa de prazo de construção e custo de gerenciamento do canteiro de obras e redução de desperdícios. Os perfis tubulares possuem propriedades geométricas que tornam possível a elaboração das mais variadas obras com soluções arrojadas e econômicas [6].

Devido ao grande crescimento do uso de estruturas tubulares nos últimos anos, o estudo da ligação entre tubos tornou-se muito importante. Assim, surge a necessidade de uma profunda avaliação comportamental das ligações, uma vez que estas provocam tensões no tubo que devem ser conhecidas para que seja possível a elaboração de projetos otimizados. Na Figura 1 é mostrada uma das formas de se executar uma ligação entre perfis tubulares, onde foi realizada a união direta por solda.



Figura 1: Viaduto Lully [7]

O dimensionamento de barras tubulares é trabalhoso, visto que a funcionalidade da geometria deve respeitar uma combinação de vários parâmetros, o que torna a automação do dimensionamento uma opção desejável, já que o cálculo é uma tarefa árdua devido à necessidade de inúmeras verificações. Desta forma, o peso, a resistência e a rigidez das estruturas podem ser otimizados, modificando a espessura da parede do tubo, sem precisar alterar as dimensões externas da seção ou a geometria da estrutura [8].

1.1 Objetivos

O objetivo desse trabalho foi aplicar os procedimentos normativos para a análise e dimensionamento de uma treliça em estrutura de aço com ligações tubulares tipo “K”, analisando o comportamento da ligação e seus modos de falha, com intuito de possibilitar melhor compreensão da NBR 16239 (2013) [2], além de verificar a viabilidade do uso do software “Ligações Tubulares” [1].

* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

Para o dimensionamento e análise estrutural das ligações, foi utilizada a norma NBR 16239 (2013) [2], além do *software* “*Ligações Tubulares*” [1], desenvolvido pela UNICAMP (Universidade Estadual de Campinas) em parceria com a empresa V & M do BRASIL. Para análise da estrutura tubular foi utilizado o *software* comercial *SAP 2000* e a norma NBR 8800 (2008) [9]. A estrutura analisada é composta por perfis tubulares uniplanares, de seção circular, tanto no banzo quanto nas diagonais, sendo a ligação do tipo “k”, soldada e com afastamento.

1.2 Revisão da literatura

Entre os diversos tipos de perfis de aço empregados na construção civil, têm-se os perfis tubulares de seção transversal circular, quadrada e retangular. A eficiência estrutural desses perfis está relacionada à geometria de sua seção transversal, com capacidade de resistir às altas solicitações de esforços axiais, torção e efeitos combinados de maneira eficiente [10].

Em relação às estruturas construídas com perfis tubulares, podem-se destacar as treliças, em função destas apresentarem excelente desempenho estrutural. As treliças projetadas, a partir de perfis tubulares, apresentam uma capacidade de vencer maiores vãos com menor número de nós, o que torna o custo de fabricação reduzido [11]. O tipo de ligação, entre as diagonais e o banzo, tem grande importância no desempenho estrutural da treliça de perfis tubulares.

Os perfis tubulares circulares recebem a designação de CHS (Circular Hollow Sections) e, quando constituem as estruturas treliçadas, estas apresentam uma melhor distribuição de tensões nas seções, quando comparadas com perfis tubulares de seção tubular retangular. Por outro lado, a ligação soldada, entre perfis tubulares circulares, exige cortes adequados nas extremidades das barras, de modo a ajustar as superfícies de contato antes da soldagem [12].

De acordo com a NBR 16239 (2013) [2], as ligações das diagonais e montantes com os bantos podem ser com afastamento ou com sobreposição. Sendo este afastamento denominado “gap” e a sobreposição conhecida como “overlap”, podendo ocorrer excentricidades em ambas as configurações. Em relação à excentricidade, dependendo do ponto onde ocorrer a interseção da linha central das diagonais em relação ao centro do banzo, estas podem ser classificadas como nulas; positivas (quando o cruzamento ocorre abaixo da linha média do banzo) ou negativas (quando o cruzamento ocorre acima da linha média do banzo) [13]. Na Figura 2 é mostrada uma ligação tubular tipo “k”, com afastamento (g) e excentricidade positiva (e).

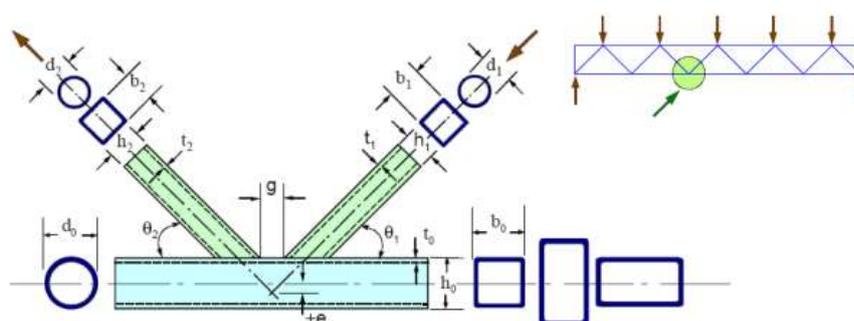


Figura 2: Símbolos usados para ligações do tipo K [11]

Para que o dimensionamento de uma ligação seja seguro, é necessário que haja uma clara identificação de todos os possíveis mecanismos de falha envolvidos na ligação e em seu entorno. Uma avaliação quantitativa da resistência de cada mecanismo é necessária para que se possa obter a correta classificação da resistência da ligação aos vários modos de ruptura, buscando estabelecer uma boa correlação entre a estrutura real e as hipóteses de dimensionamento.

Em ligações com perfis tubulares, o critério de ruína ocorre quando uma região da ligação plastifica-se e não pode mais resistir a um aumento na sollicitação. A literatura apresenta diferentes falhas que podem ocorrer dependendo do tipo de ligação, das condições de carregamento e dos vários parâmetros geométricos [14].

Os modos de falha representam as indicações para avaliação da capacidade resistente das ligações segundo o mecanismo desenvolvido em função da configuração da ligação entre a sollicitação que está submetida [15].

De acordo com a NBR 16239 (2013) [2], para ligações tipo K de seção circular, o modo predominante de falha é a plastificação da parede do banzo (Modo A), embora a flambagem local prematura da diagonal comprimida também seja possível (Modo D), como mostra a Figura 3.

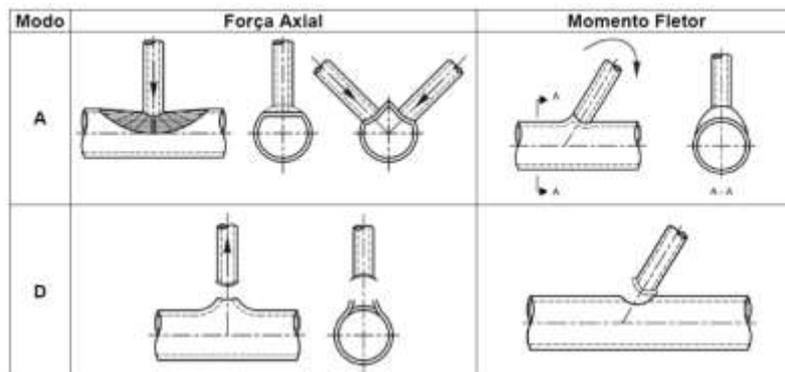


Figura 3: Modos de falha em ligações entre perfis tubulares circulares [2]

Nas ligações soldadas entre perfis circulares, a força resistente de cálculo das ligações deve ser tomada como o menor valor encontrado entre os modos de falha A e D, desde que sejam atendidas às seguintes condições:

- $0,2 \leq d_i / d_0 \leq 1,0$, para todas as ligações;
- $10,0 \leq d_0 / t_0 \leq 50,0$, para todas as ligações, exceto tipo X;
- $10,0 \leq d_0 / t_0 \leq 40,0$, para ligação tipo X;
- $10,0 \leq d_i / t_i \leq 50,0$, para todas as ligações;

Onde:

d_i é o diâmetro de diagonal ou montante em perfil tubular circular ($i = 1, 2, 3$);

d_0 é o diâmetro de banzo em perfil tubular circular;

t_0 é a espessura da parede de banzo em perfil tubular;

t_i é a espessura da parede de diagonal ou montante em perfil tubular ($i = 1, 2, 3$);

Para que os procedimentos de cálculo apresentados na metodologia sejam válidos, devem ser obedecidos os seguintes requisitos:

a) os ângulos θ_i entre o banzo e as diagonais e entre montantes e diagonais adjacentes não podem ser inferiores a 30° ;

b) as extremidades dos tubos que se encontram em uma ligação devem ser preparadas de modo que a forma da seção transversal não seja modificada. Ligações de tubos com extremidades amassadas não são previstas;

c) em ligações com afastamento visando a permitir soldagem adequada, a dimensão g deve ser igual ou superior à soma das espessuras das diagonais ou montantes ligados;

d) 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;

e) quando as barras sobrepostas tiverem espessuras ou resistências ao escoamento diferentes, a barra com menor produto entre essas duas grandezas deve se sobrepor à outra;

f) quando as barras sobrepostas tiverem larguras diferentes no plano da ligação, a barra com menor largura deve se sobrepor à mais larga;

g) para perfis de aço com resistência ao escoamento superior a 350 MPa, a resistência de cálculo deve ser dividida, ainda, por um coeficiente de ajustamento, γ_n , igual a 1,1, com a exceção da resistência da solda;

h) a espessura nominal da parede dos perfis tubulares não pode ser inferior a 2,5mm.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente, realizou-se a verificação da estrutura treliçada no *software SAP 2000* (SAP – Structural Analysis Program) [3], baseado no Método dos Elementos Finitos, segundo o código Eurocode 3 (2005) [16], além da utilização da NBR 8800 (2008) [9]. A partir desse resultado, obtiveram-se as cargas solicitantes atuantes no nó escolhido para posterior análise no *software “Ligações Tubulares”* [1].

O cálculo da ligação tipo “k” foi realizado segundo prescrições da NBR 16239 (2013) [2] e pelo *software “Ligações Tubulares”*, desenvolvido pela UNICAMP (Universidade Estadual de Campinas) em parceria com a empresa V & M do BRASIL.

A análise no *software “Ligações Tubulares”* [1] foi feita alternadamente com a análise no *software SAP 2000* [3]. As dimensões da estrutura foram fixadas, atendendo a faixa de validação dos parâmetros geométricos da NBR 16239 (2013) [2]. Posteriormente, variaram-se

* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

as dimensões, diâmetro e espessura, das seções tubulares, até que se chegasse a um coeficiente máximo de aproveitamento possível, que atendesse simultaneamente a verificação do SAP 2000 [3] e dos parâmetros geométricos.

2.1 Análise pelo programa SAP 2000

Para realizar a análise dimensional da treliça, inicialmente foram inseridas as dimensões dos perfis que compõem a estrutura e o tipo de material (VMB 250). O aço empregado na treliça possui limite de escoamento (f_y) de 250 MPa e limite de resistência à tração (f_u) de 400 MPa. As propriedades dos perfis tubulares foram retiradas do Catálogo Estrutural da Vallourec & Mannesmann Tubes (2011) [5], e são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Seções e propriedades geométricas dos perfis [5]

Barra	Seção	Área (mm ²)	Módulo elástico resistente à flexão (mm ³)
Diagonais	CHS 33,4 x 3,2	304	2100
Banzo	CHS 48,3 x 3,6	506	5260

Com os perfis definidos, fez-se a modelagem da estrutura, com suas dimensões como mostrado na Figura 4. Em seguida definiram-se as condições de apoio da estrutura, e o carregamento atuante na mesma. A treliça foi modelada com continuidade do banzo e diagonais rotuladas (ver figura 5). Para a realização da verificação, foi adotada uma combinação de ações na treliça, levando em conta o peso próprio da estrutura e uma carga aplicada nos nós de 60 kN, com exceção dos nós um e dezessete, onde foi aplicada uma carga de 30 kN. Os coeficientes utilizados na combinação foram adotados de acordo com a NBR 8800 (2008) [9].

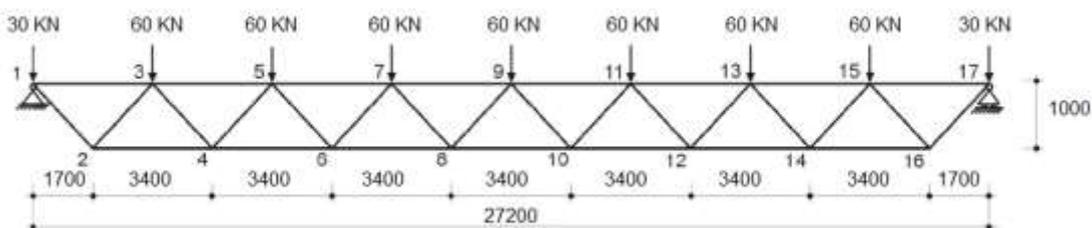


Figura 4: Modelo estrutural utilizado para o dimensionamento (dimensões em mm)



Figura 5: Tipo de análise estrutural: continuidade do banzo e diagonais rotuladas [3]

2.2 Cálculo manual analítico

Para realização do cálculo manual analítico, foram seguidas as prescrições da NBR 16239 (2013) [2], incluindo a espessura nominal da parede dos perfis tubulares, que de acordo com essa norma não pode ser inferior a 2,5 mm. O nó escolhido para os cálculos foi o de número oito da treliça (ver figura 4).

A faixa de validação da NBR 16239 (2013) [2], representada pelas Equações (1) a (4), que devem ser obedecidas, são informadas na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros geométricos e faixa de validação [2]

Parâmetro	Faixa de Validação
β (beta)	$\beta = \frac{d_1 + d_2}{2 \cdot d_0}$ (1)
γ (gama)	$\gamma = \frac{d_0}{2 \cdot t_0}$ (2)
θ (teta)	$\theta \geq 30^\circ$ (3)
g (gap)	$g = t_1 + t_2$ (4)

2.3 Análise pelo programa “Ligações Tubulares”

O software “*Ligações Tubulares*” [1], desenvolvido pela UNICAMP (Universidade Estadual de Campinas) em parceria com a empresa V & M do BRASIL, é um programa de dimensionamento e análise estrutural de ligações entre barras (nós) de treliças, utilizando perfis laminados tubulares sem costura circulares ou quadradas de aço. O software permite que o cálculo seja feito tanto pelo manual do CIDECT 1 (2008) [17], quanto pela norma brasileira NBR 16239 (2013) [2].

As informações necessárias para utilização do software são mostradas na Figura 6. Os valores adotados foram os mesmos do cálculo analítico, visto que a ligação a ser analisada é a mesma. Neste trabalho as ligações tubulares foram analisadas somente segundo a norma NBR 16239 (2013) [2].

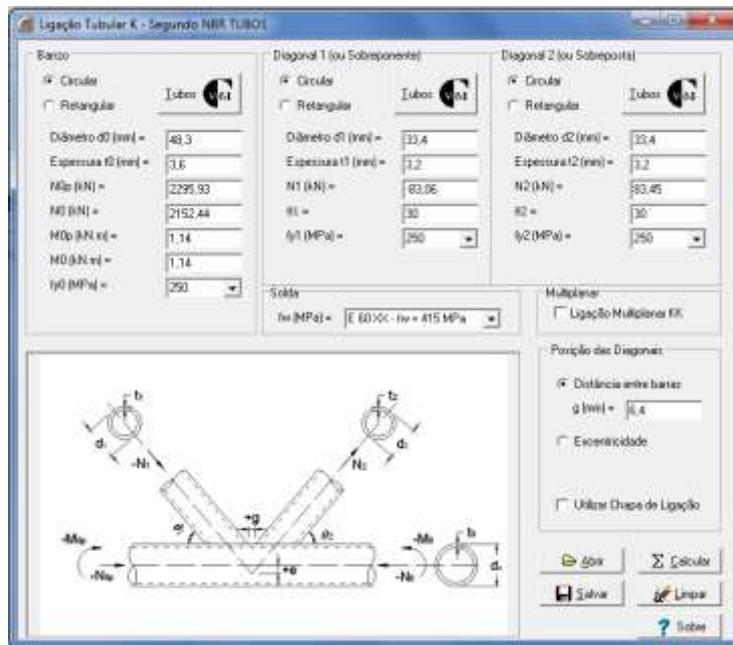


Figura 6: Entrada de dados do software “Ligações Tubulares”[1]

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise pelo programa SAP 2000

A partir do resultado do dimensionamento (ver figura 7) é possível visualizar que todas as barras resistiram à solicitação, ou seja, a estrutura resistiu aos carregamentos. Tal verificação foi importante, visto que, para realizar as posteriores análises nas ligações tubulares, era necessária a garantia de que a estrutura resistiria aos esforços nela aplicados. Este resultado corresponde à análise onde se obteve o máximo coeficiente de aproveitamento da ligação, que foi obtido variando-se as dimensões, diâmetro e espessura, das seções tubulares, de modo que atendesse simultaneamente a verificação do software SAP 2000 [3] e dos parâmetros geométricos.

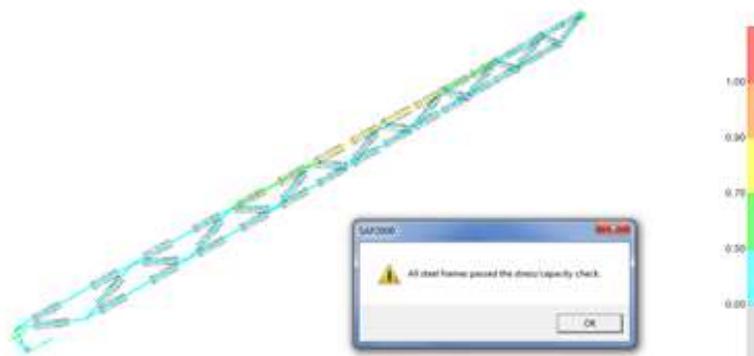


Figura 7: Verificação segundo o Eurocode3 (2005) [3]

A partir do dimensionamento realizado no *software SAP 2000* [3], foram obtidos os valores referentes aos momentos e forças axiais no nó escolhido, como mostrado na Figura 8, para posterior análise pelo *software* “Ligações Tubulares” [1] e pela NBR 16239 (2013) [2].

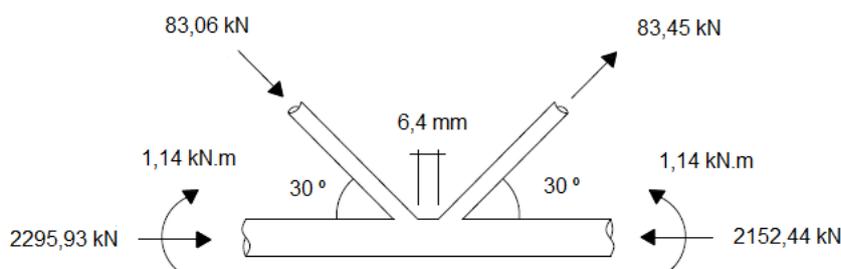


Figura 8: Esforços na ligação de número oito

3.2 Cálculo manual analítico

Utilizando as propriedades geométricas das seções tubulares que foram retiradas do Catálogo Estrutural da Vallourec & Mannesmann Tubes (2011) [5], foi possível obter os parâmetros geométricos dentro da faixa de validação da NBR 16239 (2013) [2], conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros geométricos e faixa de validação da NBR 16239 (2013) [2]

Parâmetro	Faixa de Validação	Valores calculados
β (beta)	$\beta = \frac{d_1 + d_2}{2 \cdot d_0} = \frac{33,4 + 33,4}{2 \cdot 48,3}$	0,69
γ (gama)	$\gamma = \frac{d_0}{2 \cdot t_0} = \frac{48,3}{2 \cdot 3,6}$	6,71
θ (teta)	$\theta \geq 30^\circ$	30°
g (gap)	$g = t_1 + t_2 = 3,2 + 3,2$	6,4 mm

A seguir são descritos os cálculos (Equação 5 a 28) para a verificação da ligação tubular, conforme NBR 16239 (2013) [2].

3.2.1 Verificação dos parâmetros de conexão

$$0,2 \leq \frac{d_i}{d_0} \leq 1,0 \rightarrow 0,2 \leq \frac{33,4}{48,3} \leq 1,0 \rightarrow 0,2 \leq 0,69 \leq 1,0 \quad (5)$$

$$10 \leq \frac{d_i}{t_i} \leq 50 \rightarrow 10 \leq \frac{33,4}{3,2} \leq 50 \rightarrow 10 \leq 10,44 \leq 50 \quad (6)$$

* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

$$10 \leq \frac{d_0}{t_0} \leq 50 \rightarrow 10 \leq \frac{48,3}{3,6} \leq 50 \rightarrow 10 \leq 13,42 \leq 50 \quad (7)$$

$$e = \left(\frac{d_1}{2 \cdot \text{sen} \theta_1} + \frac{d_2}{2 \cdot \text{sen} \theta_2} + g \right) \cdot \frac{\text{sen} \theta_1 \cdot \text{sen} \theta_2}{\text{sen}(\theta_1 + \theta_2)} - \frac{d_0}{2} \quad (8)$$

$$e = \left(\frac{33,4}{2 \cdot \text{sen} 30^\circ} + \frac{33,4}{2 \cdot \text{sen} 30^\circ} + 6,4 \right) \cdot \frac{\text{sen} 30^\circ \cdot \text{sen} 30^\circ}{\text{sen}(30^\circ + 30^\circ)} - \frac{48,3}{2} \quad (9)$$

$$e = -3,02 \text{ mm}$$

Onde: (10)

e: excentricidade;

$$-0,55 \leq \frac{e}{d_0} \leq 0,25 \quad (11)$$

$$-0,55 \leq \frac{-3,02}{48,3} \leq 0,25 \quad (12)$$

$$-0,55 \leq -0,06 \leq 0,25 \quad (13)$$

Como $-0,55 \leq \frac{e}{d_0} \leq 0,25$, os momentos fletores resultantes de excentricidades podem ser desprezados.

3.2.2 Verificação quanto à plastificação da parede do banzo (Modo de falha A)

$$N_{i,Rd} = \frac{k_g \cdot k_p \cdot f_{y0} \cdot t_0^2 \cdot (1,98 + 11,22 \cdot \beta)}{\text{sen} \theta_1 \cdot \gamma_{a1}} \quad (14)$$

Onde:

$N_{i,Rd}$: é a força axial resistente de cálculo de diagonal ou montante na ligação ($i = 1, 2, 3$);
 k_g : fator geométrico para ligação com banzo circular;
 k_p : fator relacionado às tensões no banzo circular;
 f_{y0} : é a resistência ao escoamento do aço do perfil do banzo;
 γ_{a1} : é o coeficiente de ponderação da resistência;
 β : é um parâmetro;

* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

θ_i : é o ângulo entre diagonal e banzo ($i = 1, 2, 3$).

Como o banzo é tracionado:

$$k_p = 1,0 \quad (15)$$

$$k_g = \gamma^{0,2} \cdot \left(1 + \frac{0,024 \gamma^{1,2}}{1 + \exp\left(0,5 \frac{g}{t_0} - 1,33\right)} \right) \quad (16)$$

$$k_g = 6,71^{0,2} \cdot \left(1 + \frac{0,024 \cdot 6,71^{1,2}}{1 + \exp\left(0,5 \frac{6,4}{3,6} - 1,33\right)} \right) \quad (17)$$

$$k_g = 1,673 \quad (18)$$

Logo:

$$N_{1,Rd} = \frac{1,673 \cdot 1,0 \cdot 0,250 \cdot 3,6^2 (1,98 + 11,22 \cdot 0,69)}{\text{sen } 30^\circ \cdot 1,1} \quad (19)$$

$$N_{1,Rd} = 95,98 \text{ kN} \quad (20)$$

$$N_{2,Rd} = N_{1,Rd} \left(\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} \right) = 95,98 \left(\frac{\text{sen } 30^\circ}{\text{sen } 30^\circ} \right) = 95,98 \text{ kN} \quad (21)$$

3.2.3 Verificação quanto à ruptura por punção na face do banzo (Modo de Falha D)

Esta verificação é feita sob a seguinte condição:

$$d_i \leq d_0 - 2 \cdot t_0 \quad (22)$$

$$33,4 \leq 48,3 - 2 \cdot 3,6 \quad (23)$$

$$33,4 \leq 41,1 \quad (24)$$

$$N_{1,2,Rd} = 0,66 \cdot f_{y0} \cdot t_0 \cdot \pi \cdot d_i \cdot \frac{\left(\frac{1 + \operatorname{sen} \theta_i}{2 \cdot \operatorname{sen}^2 \theta_i} \right)}{\gamma_{al}} \quad (25)$$

$$N_{1,2,Rd} = 0,66 \cdot 0,250 \cdot 3,6 \cdot \pi \cdot 33,4 \cdot \frac{\left(\frac{1 + \operatorname{sen} 30^\circ}{2 \cdot \operatorname{sen}^2 30^\circ} \right)}{1,1} \quad (26)$$

$$N_{1,2,Rd} = 169,99 \text{ kN} \quad (27)$$

Logo, a resistência da ligação será:

$$N_{1,2,Rd} = 95,98 \text{ kN} \quad (28)$$

Como $N_{sd} < N_{rd}$, ou seja, o esforço solicitante é menor que o esforço resistente, isso indica que a ligação entre os perfis tubulares suporta a carga aplicada.

3.3 Análise pelo programa “Ligações Tubulares”

Como resultados, o programa fornece um relatório contendo as principais informações calculadas, tais como parâmetros geométricos essenciais, valores das resistências obtidas segundo o regime de ruptura regido pelo tipo de ligação escolhida e o aproveitamento da ligação com base no esforço atuante. A Figura 9 mostra a tela de saída dos resultados do programa para a ligação estudada.

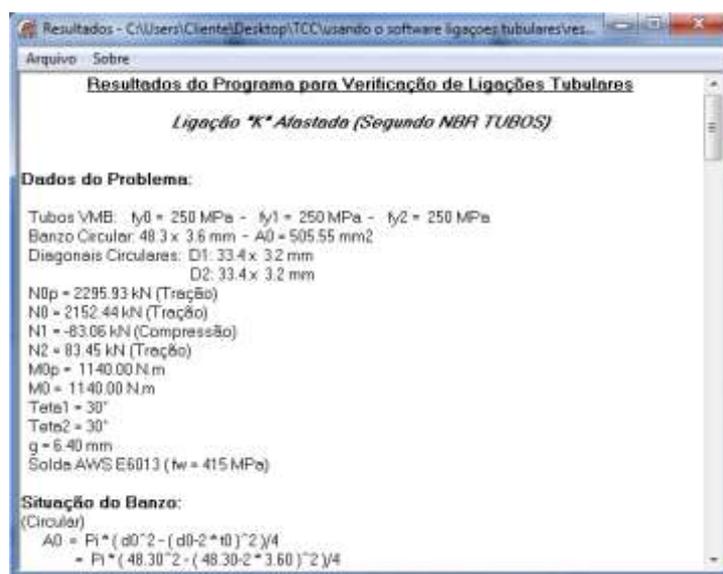


Figura 9: Resultados do software “Ligações Tubulares” [1]

A seguir, tem-se o resultado completo da análise do nó da treliça realizado pelo *software* “*Ligações Tubulares*” [1], como mostrado pelas Equações 29 a 92:

3.3.1 Situação do Banzo:

(Circular)

$$A_0 = \frac{\pi(d_0^2 - (d_0 - 2 \cdot t_0)^2)}{4} \quad (29)$$

$$A_0 = \frac{\pi(48,30^2 - (48,30 - 2 \cdot 3,60)^2)}{4} \quad (30)$$

$$A_0 = 505,55 \text{ mm}^2 \quad (31)$$

Onde:

A_0 : é a área da seção transversal do banzo;

$$W_0 = \frac{\pi(d_0^4 - (d_0 - 2 \cdot t_0)^4)}{(32 \cdot d_0)} \quad (32)$$

$$W_0 = \frac{\pi(48,30^4 - (48,30 - 2 \cdot 3,60)^4)}{(32 \cdot 48,30)} \quad (33)$$

$$W_0 = 5262,30 \text{ mm}^3 \quad (34)$$

Onde:

W_0 : é o módulo de resistência elástico da seção transversal do banzo;

$$\sigma_{0p} = \frac{N_{0p}}{A_0} + \frac{M_0}{W_0} \quad (35)$$

$$\sigma_{0p} = \frac{2295,93}{505,55} + \frac{1140,00}{5262,30} \quad (36)$$

$$\sigma_{0p} = 4,7581 \text{ kN} / \text{mm}^2 \quad (37)$$

Onde:

σ_{0p} : é a tensão no banzo;

$$n_p = \frac{\sigma_p}{f_{y0}} \quad (38)$$

$$n_p = \frac{4,7581}{0,25} \quad (39)$$

$$n_p = 19,03 \quad (40)$$

$$n_p \geq 0 \rightarrow \text{Banzo Tractionado} \quad (41)$$

Onde:

n_p : é a razão de tensão no banzo de ligações com chapa;

3.3.2 Altura de Solda (h_s):

(Solda de Filete - NBR8800: 2008)

Menor espessura do metal-base (t_{\min}):

$$t_{\min} = 3,20 \text{ mm} \quad (42)$$

Perna de Solda (d_w):

$$t_{\min} \leq 6,35 \text{ mm} \rightarrow d_{w,\min} = 3,00 \text{ mm} \quad (43)$$

$$d_{w,\max} = t_{\min} \rightarrow d_{w,\max} = 3,20 \text{ mm} \quad (44)$$

$$d_{w,\min} \leq d_w \leq d_{w,\max} \quad (45)$$

$$3,0 \leq d_w \leq 3,20 \quad (46)$$

$$d_w = 3,20 \text{ mm} \quad (47)$$

$$h_s = \frac{d_w 2^{0,5}}{2} \quad (48)$$

$$h_s = \frac{3,20 \cdot 2^{0,5}}{2} \quad (49)$$

$$h_s = 2,26mm \quad (50)$$

Adota-se:

$$h_s = 2,00mm \quad (51)$$

3.3.3 Verificação da Posição das Diagonais:

Excentricidade:

$$e = \left(\left(\frac{d_1}{2} \cdot \text{sen } \theta_1 \right) + \left(\frac{d_2}{2} \cdot \text{sen } \theta_2 \right) + g \right) \cdot \left(\text{sen } \theta_1 \cdot \frac{\text{sen } \theta_2}{\text{sen}(\theta_1 + \theta_2)} \right) - \frac{d_0}{2} \quad (52)$$

$$e = \left(\left(\frac{33,40}{2} \cdot \text{sen } 30^\circ \right) + \left(\frac{33,40}{2} \cdot \text{sen } 30^\circ \right) + 6,40 \right) \cdot \left(\text{sen } 30^\circ \cdot \frac{\text{sen } 30^\circ}{\text{sen}(30^\circ + 30^\circ)} \right) - \frac{48,30}{2} \quad (53)$$

$$e = -3,02mm \quad (54)$$

Limites para a excentricidade:

$$-0,55 \leq \frac{e}{d_0} \leq 0,25 \quad (55)$$

$$-0,55 \leq -0,06 \leq 0,25 \quad (56)$$

Excentricidade Ok!

3.3.4 Verificação dos Requisitos da Ligação K:

$$\theta_1 \geq 30^\circ \rightarrow 30^\circ \geq 30^\circ \rightarrow ok \quad (57)$$

$$\theta_2 \geq 30^\circ \rightarrow 30^\circ \geq 30^\circ \rightarrow ok \quad (58)$$

$$t_0 \geq 2,5mm \rightarrow 3,60 \geq 2,5mm \rightarrow ok \quad (59)$$

$$t_1 \geq 2,5mm \rightarrow 3,20 \geq 2,5mm \rightarrow ok \quad (60)$$

$$t_2 \geq 2,5mm \rightarrow 3,20 \geq 2,5mm \rightarrow ok \quad (61)$$

Requisitos da Ligação "K" Ok!

3.3.5 Verificação dos Requisitos da Ligação K Afastada:

$$g \geq t_1 + t_2 \quad (62)$$

$$6,40 \geq 6,40 \rightarrow ok \quad (63)$$

Requisitos da Ligação "K" Afastada Ok!

3.3.6 Verificação dos Requisitos da Ligação K Circular:

$$0,2 \leq \frac{d_1}{d_0} \leq 1,0 \rightarrow 0,2 \leq 0,69 \leq 1,0 \rightarrow ok \quad (64)$$

$$0,2 \leq \frac{d_2}{d_0} \leq 1,0 \rightarrow 0,2 \leq 0,69 \leq 1,0 \rightarrow ok \quad (65)$$

$$10 \leq \frac{d_0}{t_0} \leq 50 \rightarrow 10 \leq 13,4 \leq 50 \rightarrow ok \quad (66)$$

$$10 \leq \frac{d_1}{t_1} \leq 50 \rightarrow 10 \leq 10,4 \leq 50 \rightarrow ok \quad (67)$$

$$10 \leq \frac{d_2}{t_2} \leq 50 \rightarrow 10 \leq 10,4 \leq 50 \rightarrow ok \quad (68)$$

Requisitos da Ligação "K" Circular Ok!

3.3.7 Parâmetros da Ligação “K” Afastada Circular:

$$\gamma = \frac{d_0}{2.t_0} = \frac{48,30}{2.3,60} \rightarrow \gamma = 6,71 \quad (69)$$

$$\beta = \frac{(d_1 + d_2)}{2.d_0} = \frac{(33,4 + 33,4)}{2.48,30} \rightarrow \beta = 0,692 \quad (70)$$

$$k_g = \gamma^{0,2} \cdot \left(1 + \frac{(0,024 \cdot \gamma^{1,2})}{\left(1 + e^{\left(\frac{0,5\gamma}{t_0} - 1,33 \right)} \right)} \right) \quad (71)$$

$$k_g = 6,71^{0,2} \cdot \left(1 + \frac{(0,024 \cdot 6,71^{1,2})}{\left(1 + e^{\left(\frac{0,5 \cdot 6,71}{3,60} - 1,33 \right)} \right)} \right) \quad (72)$$

$$k_g = 1,673 \quad (73)$$

$$k_p = 1,0 \quad (74)$$

3.3.8 Modos de Falha referentes às Ligações Tubulares do Tipo K entre perfis Circulares:

3.3.8.1 Resistência quanto ao Modo de Falha A (Plastificação do Banzo):

Diagonal 1:

$$N_{1RdA} = \left(\frac{k_g k_p f_{y0} t_0^2}{\text{sen } \theta_1} \right) \cdot \left(\frac{\left(1,98 + 11,22 \cdot \left(\frac{d_1}{d_0} \right) \right)}{\gamma_{a1}} \right) \quad (75)$$

$$N_{1RdA} = \left(\frac{1,673 \cdot 1,00 \cdot 0,250 \cdot 3,60^2}{\text{sen } 30^\circ} \right) \left(\frac{1,98 + 11,22 \cdot \left(\frac{33,40}{48,30} \right)}{1,1} \right) \quad (76)$$

$$N_{1RdA} = 95,98 \text{ kN} \quad (77)$$

Diagonal 2:

$$N_{2RdA} = \left(\frac{k_g k_p f_{y0} t_0^2}{\text{sen } \theta_2} \right) \left(\frac{\left(1,98 + 11,22 \cdot \left(\frac{d_2}{d_0} \right) \right)}{\gamma_{a1}} \right) \quad (78)$$

$$N_{2RdA} = \left(\frac{1,673 \cdot 1,00 \cdot 0,250 \cdot 3,60^2}{\text{sen } 30^\circ} \right) \left(\frac{1,98 + 11,22 \cdot \left(\frac{33,40}{48,30} \right)}{1,1} \right) \quad (79)$$

$$N_{2RdA} = 95,98 \text{ kN} \quad (80)$$

3.3.8.2 Resistência quanto ao Modo de Falha D (Ruptura do Banzo):

Diagonal 1:

$$d_1 \leq d_0 - 2 \cdot t_0 \quad (81)$$

$$33,40 \leq 48,3 - 2 \cdot 3,60 \quad (82)$$

$$33,40 \leq 41,1 \quad (83)$$

Condição Ok! Necessária a verificação para a Diagonal 1!

$$N_{1RdD} = \frac{\left(0,66 \cdot f_{y0} \cdot t_0 \cdot \pi \cdot d_1 \right) \left(\frac{1 + \text{sen } \theta_1}{2 \cdot \text{sen}^2(\theta_1)} \right)}{\gamma_{A1}} \quad (84)$$

$$N_{1RdD} = \frac{(0,66 \cdot 0,25 \cdot 3,6 \cdot \pi \cdot 33,4) \cdot \left(\frac{1 + \sin 30^\circ}{2 \cdot \sin^2 30^\circ} \right)}{1,1} \quad (85)$$

$$N_{1RdD} = 169,99 \text{ kN} \quad (86)$$

Diagonal 2:

$$d_2 \leq d_0 - 2t_0 \quad (87)$$

$$33,40 \leq 48,3 \leq 2 \cdot 3,60 \quad (88)$$

$$33,40 \leq 41,1 \quad (89)$$

Condição Ok! Necessária a verificação para a Diagonal 2!

$$N_{2RdD} = \frac{(0,66 \cdot f_{y0} \cdot t_0 \cdot \pi \cdot d_2) \cdot \left(\frac{1 + \sin \theta_2}{2 \cdot \sin^2 \theta_2} \right)}{\gamma_{A1}} \quad (90)$$

$$N_{2RdD} = \frac{(0,66 \cdot 0,25 \cdot 3,60 \cdot \pi \cdot 33,4) \cdot \left(\frac{1 + \sin 30^\circ}{2 \cdot \sin^2 30^\circ} \right)}{1,1} \quad (91)$$

$$N_{2RdD} = 169,99 \text{ kN} \quad (92)$$

Diagonal 1:

Força axial atuante = -83.06kN (Compressão)

Resistência quanto à plastificação do banzo = 95.98kN

Resistência quanto à ruptura por punção do banzo = 169.99kN

Aproveitamento = 0,87 < 1 Ok!

Diagonal 2:

Força axial atuante = 83.45kN (Tração)

Resistência quanto à plastificação do banzo = 95.98kN



Resistência quanto à ruptura por punção do banzo = 169.99kN

Aproveitamento = 0,87 < 1 Ok!

Conforme mostrado, obteve-se 87% de aproveitamento da ligação, sugerindo que a ligação foi bem dimensionada. Além de verificar a aplicabilidade do software, o uso desse foi de fundamental importância para aferir o cálculo analítico. Como pode ser visto anteriormente, os resultados encontrados foram semelhantes em ambos.

4 CONCLUSÃO

O estudo comportamental das estruturas tubulares e em particular das ligações é fundamental para um dimensionamento otimizado, permitindo obter de forma coerente o máximo coeficiente de aproveitamento.

Atualmente, com a norma NBR 16239 (2013) [2] disponível, é possível realizar as análises das ligações em perfis tubulares de acordo com a normalização brasileira e, apesar de ser de fácil aplicação e atender a uma gama variada de tipos de ligação, o uso do *software* “*Ligações Tubulares*” [1] se mostra importante, pois proporciona uma verificação dos cálculos, garantindo que o dimensionamento seja feito de forma correta.

Em relação ao desenvolvimento do cálculo analítico, este foi de grande importância para um completo entendimento das expressões da norma NBR 16239 (2013) [2], de forma que a responsabilidade pelo uso do *software* “*Ligações Tubulares*” [1], não fosse “terceirizada” pelo usuário. Além disso, pode-se entender de forma mais clara a metodologia de cálculo do software vista por meio do relatório de “saída de dados”.

Como sugestões para trabalhos futuros, pode-se proceder à análise do comportamento estrutural de ligações tubulares tipo “T” e “KT”, que também são muito usuais. Pode-se ainda fazer um comparativo das ligações tubulares feitas com afastamentos (*gap*) e sobrepostas (*overlap*), além de um estudo normativo das prescrições feitas para as ligações multiplanares.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio recebido pelo DTECH/UFSJ – Departamento de Tecnologia, e Engenharia Civil, Computação e Humanidades da Universidade Federal de São João del-Rei.

REFERÊNCIAS

1 *Software Ligações Tubulares*. Disponível em: <http://www.fec.unicamp.br/~estruturastubulares/software.htm>. Acesso em: 28/05/14.

2 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16239: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações com perfis tubulares. Rio de Janeiro, 2013.

3 *SAP 2000* v. 15. Manual do Usuário.

* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.



- 4 Construção Metálica. Estruturas tubulares ganham espaço no Brasil. São Paulo, 2009, Edição 93. p. 8.
- 5 Catálogo Estrutural V&M. Tubos estruturais, seção circular, quadrada e retangular. São Paulo, nov. 2011. 1ª edição. p.12.
- 6 FIRMO, C. S. (2003). Estruturas tubulares enrijecidas por superfícies de dupla curvatura (hiperbólicas). Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2003. 194 p.
- 7 LAGE, C. M. (2008). Fadiga em estruturas metálicas tubulares soldadas. 103f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais.
- 8 SANTOS, A. L. E. de F. (2003) Ligações de barras tubulares para estruturas metálicas planas. 2003. 155f. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas, São Paulo.
- 9 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.
- 10 FREITAS, A. M. S., REQUENA, J. A. V. Ligações em estruturas metálicas tubulares. In: _____. *Novos estudos e pesquisas em construção metálica*. Passo Fundo: UPF Editora, 2009. 221p. cap. 1, p. 7-29.
- 11 WARDENIER, J. Hollow sections in structural applications. Paris: CIDECT, 2001.
- 12 MENDANHA, F. O.; FREITAS, A. M. S.; FREITA, M. S. R.; MUNIZ, C. F. D. G. Análise de ligações em perfis tubulares de aço do Tipo K e KT com afastamento entre as diagonais e o montante. REM (Revista Escola de Minas). 2007; 60 (2): 419-425.
- 13 MENDES, F. C. (2008) Análise teórica- experimental de ligações tipo “T”, “K” e “KT” com perfis metálicos tubulares, 2008. 121 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais.
- 14 FORTI, N. C. S. (2010). Estudo paramétrico de estruturas tubulares com ligações multiplanares. Tese (Doutorado), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2010.
- 15 FREITAS, A.S.; REQUENA, J.A.V.; FAKURY, R.H.; BATISTA, E.M.; PIMENTA, R.J.; ARAÚJO, A.H.M.(2010). Ligações metálicas com perfis tubulares – comportamento e prescrições de projeto. Construmetal 2010, São Paulo.
- 16 Eurocode 3 (2005). Design of steel structures – part 1.8: Design of joints, CEN, European Committee for Standardisation, Brussels. EN 1993-1-8.
- 17 CIDECT 1 (2008). Design guide for circular hollow section (CHS) joints under predominantly static loading. 2 ed. Köln:Verlag. TÜV Rheinland.

* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.