



ANÁLISE DA RESISTÊNCIA A FLEXÃO EM LIGAÇÕES TUBULARES FLANGEADAS

Guilherme Cássio Elias ^a

Caio Orsi Vieira Ramos Pereira ^b

Arlene Maria Cunha Sarmanho ^a

Gabriel Vieira Nunes ^c

Luiz Henrique de Almeida Neiva ^a

Ana Flávia Barbosa e Castro ^a

Ellen Martins Xavier ^a

gc.elias@yahoo.com.br

caio.orsi.pereira@gmail.com

arlene.sarmanho@gmail.com

gabriel.nunes@ifmg.edu.br

lhalmeidaneiva@gmail.com

anyflay@yahoo.com.br

ellen.mxavier@hotmail.com

^a Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) - R. Diogo de Vasconcelos, 122, Pilar, Ouro Preto - MG, 35400-000, Brasil

^b Universidade José do Rosário Vellano (UNIFENAS) - Rod. MG 179, Km 0, Bairro Trevo, Alfenas - MG, 37130-000, Brasil

^c Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG) - Campus Congonhas - Av. Michel Pereira de Souza, 3007, Campinho, Congonhas - MG, 36415-000, Brasil

Resumo. O presente trabalho analisa a ligação flangeada submetida a flexo-tração por meio de análise em elementos finitos via software comercial. A análise numérica da ligação foi feita considerando elementos de casca, sólidos e elementos de contato. O carregamento excêntrico considerado foi simulado por meio de um mecanismo que permite a rotação nas extremidades da ligação. Com isso, foi possível estudar a flexão dos flanges e também o efeito alavanca gerado nos parafusos quando utilizados flanges mais esbeltos. Os resultados numéricos foram comparados a resultados teóricos.

Palavras-chave: Estruturas metálicas, Perfis tubulares, Ligação flangeada, Análise numérica

1 INTRODUÇÃO

As estruturas metálicas em perfis de aço tubulares possuem diversas aplicações, sendo usual em coberturas de grandes vãos e em sistemas treliçados. Uma das alternativas para montagem dessas estruturas é a utilização de emendas das barras com ligações tipo flangeadas.

A ligação flangeada é composta por duas placas soldadas nos tubos a serem conectados, e estas placas são parafusadas entre si finalizando a ligação. A Figura 1 apresenta um detalhe da estrutura do telhado do Aeroporto Internacional Tancredo Neves (Confin - MG), ilustrando o uso deste tipo de ligação em construções metálicas.

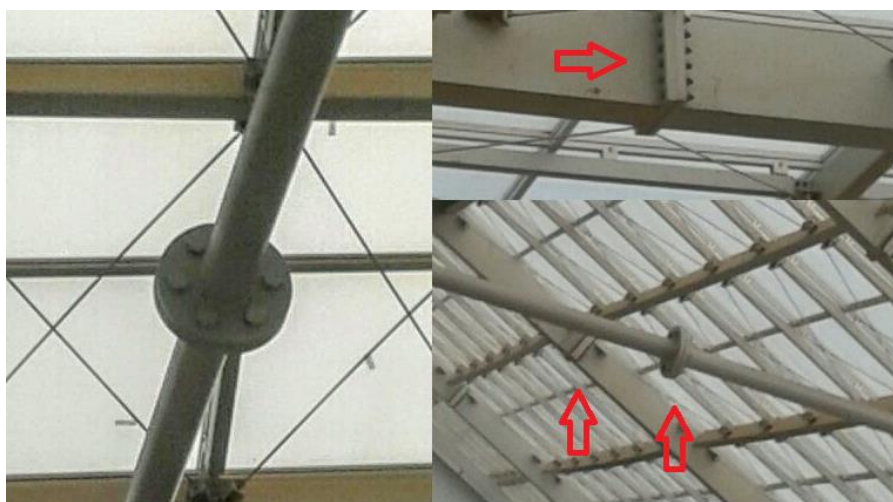


Figura 1. Ligações Flangeadas circulares e retangulares do Aeroporto Internacional Tancredo Neves em Confin - MG (FONTE: Pereira, 2016)

A ligação do tipo flangeada transmite a força axial e de flexão entre as barras conectadas. A chapa de composição do flange pode ser flexionada em função da rigidez da própria placa associada a conexão pelo parafuso.

Este trabalho teve como objetivo analisar o comportamento das ligações do tipo flangeadas em tubos de seção circular quanto à flexão e carregamento axial de tração por meio de um estudo numérico em que a capacidade resistente e o comportamento da ligação foram observados.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para as análises foi utilizado o *software* em elementos finitos ANSYS 12.1 (ANSYS, 2009). Para a avaliação da flexão nas ligações, foram aplicadas cargas de tração em tubos que estão conectados por uma ligação flangeada, avaliando os limites entre o valor desta carga e a espessura da placa do flange. Foram avaliadas as relações entre os dois parâmetros desde o momento onde não ocorre o efeito de flexão na placa do flange (efeito alavanca) até onde ocorre o seu escoamento.

3 EFEITO ALAVANCA

O efeito alavanca, conhecido também como *prying*, é causado pela flexão de chapas. Este efeito faz com que os parafusos da ligação fiquem solicitados por um carregamento maior do que o esforço normal de tração dividido pelo número de parafusos, podendo fazer com que os mesmos falhem. A Figura 2 representa este efeito para uma ligação entre perfis abertos e chapa.

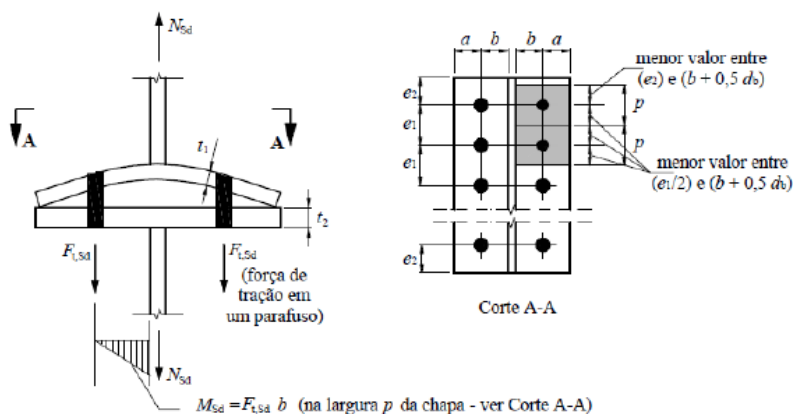


Figura 2. Efeito alavanca (FONTE: ABNT NBR 8800:2008)

A influência do efeito alavanca é proporcional à esbelteza das chapas de ligação, ou seja, quanto mais finas forem as chapas, maior será o efeito transmitido aos parafusos da ligação.

Elias (2016) avaliou este efeito para tubos circulares conectados por ligação flangeada, por meio de análise numérica que considerou a relação entre a espessura dos flanges e o efeito da flexão. As espessuras de chapas consideradas foram: 9,5mm, 12,5mm, 16mm, 19mm, 22,4mm, 25mm, 31,5mm e 37,5mm, de acordo com a disponibilidade de chapas disponíveis no mercado. A força aplicada foi de 350 kN, centrada, aplicada e dividida entre os nós de cada parafuso e a reação de contato. O carregamento foi feito simulando o flange como uma placa rígida, para serem melhor avaliados os resultados da ligação. A Tabela 1 resume as reações obtidas a partir desta análise via *software* ANSYS 12.1.

Tabela 1. Reações para as espessuras de flange consideradas

Espessura dos flanges E_f (mm)	Reação no Contato (kN)
9,5	194,87
12,5	131,34
16,0	86,202
19,0	44,698
22,4	$0,147 \times 10^{-4}$
25,0	$0,597 \times 10^{-7}$
31,5	$0,502 \times 10^{-6}$
37,5	$0,353 \times 10^{-6}$

É possível observar na Tabela 1 que, conforme aumenta-se a espessura dos flanges, a reação que um flange exerce sobre o outro diminui, até que se chegue a um valor mínimo. Na ligação com chapa de espessura 22,4 mm, a reação de contato com o flange foi igual a zero, assim como nas espessuras superiores consideradas. Este é o ponto de zero Alavanca, ou seja, onde a partir do qual não ocorre o efeito alavanca.

4 ANÁLISE TEÓRICA

Fidalgo (2014) estudou a ligação flangeada considerando excentricidade de carregamento, propondo equações que permitem o cálculo das espessuras dos flanges conforme seu carregamento excêntrico. Para cada excentricidade de carregamento considerada, variando de 0 a 24% do diâmetro do tubo, foi proposta uma equação diferente, que estão representadas de forma matricial pela Eq. (1).

$$\{f\} = [A] \cdot \{x\} \quad (1)$$

$$\begin{Bmatrix} f_{0\%} \\ f_{6\%} \\ f_{9\%} \\ f_{12\%} \\ f_{15\%} \\ f_{18\%} \\ f_{21\%} \\ f_{24\%} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -1,1659 & 102,15 & -172,22 & 125,67 & -37,527 & 8,1337 & 1,1127 \\ -1,1659 & 102,15 & -172,22 & 125,67 & -37,527 & 8,1337 & -0,572 \\ -1,1659 & 102,15 & -172,22 & 125,67 & -37,527 & 8,1337 & -2,132 \\ -1,1659 & 102,15 & -172,22 & 125,67 & -37,527 & 8,1337 & -2,922 \\ -1,1659 & 102,15 & -172,22 & 125,67 & -37,527 & 8,1337 & -3,392 \\ -1,1659 & 102,15 & -172,22 & 125,67 & -37,527 & 8,1337 & -3,702 \\ -1,1659 & 102,15 & -172,22 & 125,67 & -37,527 & 8,1337 & -3,932 \\ -1,1659 & 102,15 & -172,22 & 125,67 & -37,527 & 8,1337 & -4,092 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} x^6 \\ x^5 \\ x^4 \\ x^3 \\ x^2 \\ x^1 \end{Bmatrix}$$

Os valores dos vetores $\{f\}$ e $\{x\}$ são dados pela Eq. (2) e Eq. (3) em valor nominal, sendo $N_{t,SD}$ a força axial de tração solicitante de cálculo, f_y a tensão de escoamento, t_f a espessura do flange, D_t o diâmetro do tubo, t_t a espessura do tubo e e_1 a distância entre a lateral externa do tubo e o centro dos furos dos parafusos.

$$f_i = \frac{2 \cdot N_{t,SD}}{f_y \cdot \pi \cdot t_f^2} \quad (2)$$

$$x_i = \frac{D_t - t_t}{D_t - t_t + 2 \cdot e_1} \quad (3)$$

Neste trabalho, para a definição da geometria da ligação foi considerado carregamento solicitante equivalente a 70 % da força axial de tração de cálculo para que toda seção bruta do tubo utilizado atingisse o escoamento. Assim, foi possível obter uma ligação com flanges menos resistentes, fazendo com que o critério de falha da ligação ocorresse devido à flexão dos flanges.

As equações utilizadas para o dimensionamento dos flanges estão representadas pelas Eq. (4) a (10), definidas pela norma ABNT NBR 16239:2013, onde $N_{t,SD}$ é a força axial de tração solicitante de cálculo, f_y é a tensão de escoamento do aço do flange, f_3 é o coeficiente de forma

da ligação, r_1 , r_2 e r_3 os valores de raios do flange, parafusos e tubos, respectivamente, conforme mostrado na Fig. 3.

$$t_{f,min} = \sqrt{\frac{2 \cdot \gamma_{a1} \cdot N_{t,SD}}{f_y \cdot \pi \cdot f_3}} \quad (4)$$

$$f_3 = \frac{1}{2 \cdot k_1} \cdot \left(k_3 + \sqrt{k_3^2 - 4 \cdot k_1} \right) \quad (5)$$

$$k_1 = \ln\left(\frac{r_2}{r_3}\right) \quad (6)$$

$$k_3 = k_1 + 2 \quad (7)$$

$$r_1 = \frac{D_t}{2} + 2 \cdot e_1 \quad (8)$$

$$r_2 = \frac{D_t}{2} + e_1 \quad (9)$$

$$r_3 = \frac{D_t - t_t}{2} \quad (10)$$

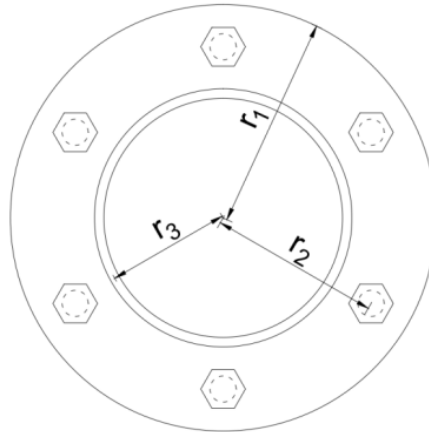


Figura 3. Representação dos raios definidos pelas Eq. (8), (9) e (10) (FONTE: Pereira, 2016)

5 ANÁLISE NUMÉRICA

A análise numérica foi desenvolvida por meio do *software* ANSYS, que utiliza o método dos elementos finitos. Para a simulação da ligação foi implementada a linguagem APDL (“ANSYS Parametric Design Language”).

Foram utilizados diversos elementos para definir o modelo da ligação. O elemento de sólido foi utilizado para representar os flanges, parafusos, arruelas, porcas e a solda. Definido segundo a biblioteca do ANSYS como SOLID95 como um elemento que possui 20 nós, sua geometria pode variar do padrão cúbico para tetraédrico, piramidal e prismático e apresenta três graus de liberdade por nó, sendo a translação nos seus eixos coordenados x , y e z . O elemento de sólido utilizado está representado na Fig. 4.

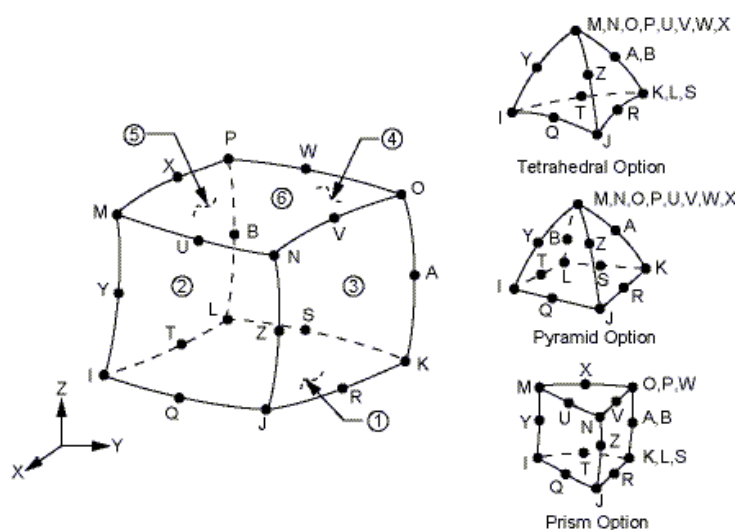


Figura 4. Elemento de sólido, SOLID95 (FONTE: ANSYS, 2009)

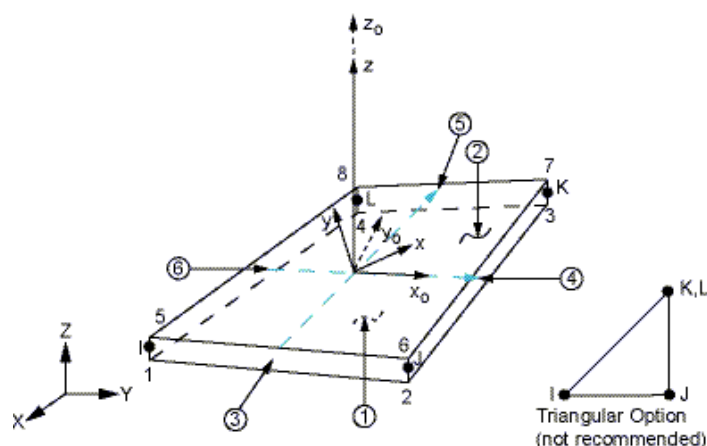


Figura 5. Elemento de casca, SHELL181 (FONTE: ANSYS, 2009)

O elemento de casca foi utilizado para representar os tubos e a área de contato. Definido segundo a biblioteca do ANSYS como SHELL181 como sendo um elemento que possui 4 nós, um em cada vértice, sua geometria pode variar de quadrada, retangular e triangular e apresenta seis graus de liberdade por nó. O elemento de casca utilizado está representado na Fig. 5.

O elemento de viga foi aplicado na extremidade dos tubos para aumentar a rigidez nos pontos de aplicação do carregamento, uniformizando o carregamento ao longo de toda a seção transversal dos tubos. Definido segundo a biblioteca do ANSYS como BEAM188 sendo um elemento que possui 3 nós, sua geometria é descrita através de uma linha e apresenta de 6 a 7 graus de liberdade por nó, sendo a rotação e translação nos seus eixos coordenados x , y e z , e também considera opcionalmente o empenamento. O elemento de viga utilizado está representado na Fig. 6.

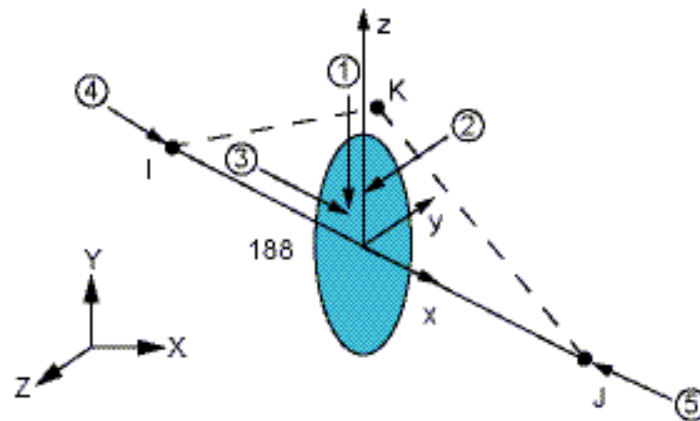


Figura 6. Elemento de viga, BEAM188 (FONTE: ANSYS, 2009)

Para a região de contato entre o flange e os parafusos, foram considerados os elementos de volumes como colados. Utilizou-se dois pares de contato, com duas finalidades distintas. O primeiro par, CONTA175 e TARGET170, considera a transmissão de esforços do primeiro elemento para o segundo por meio de uma placa rígida. Este par de contato foi utilizado tanto para a simulação do carregamento excêntrico quanto para a consideração de uma placa que simula o efeito do flange que foi omitido na simulação numérica devido à simetria da ligação. O segundo par de contato, CONTA174 e TARGET170, foi utilizado para a simulação do contato entre os flanges.

Considerando os elementos utilizados para a análise, a configuração final da malha de elementos finitos está representada pela Fig. 7.

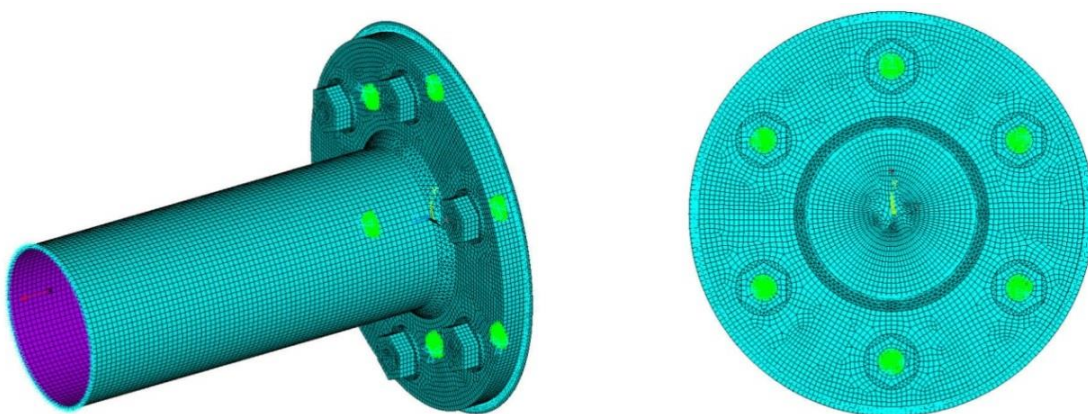


Figura 7. Ligação flangeada - Malhas (modelo simétrico)

Para avaliar o efeito da excentricidade na ligação, estudou-se a distribuição de carregamento por nó na extremidade dos tubos, após aplicação de carga. A Figura 8 mostra esta distribuição de carregamento, que como pode ser observado se dá através de uma distribuição linear.

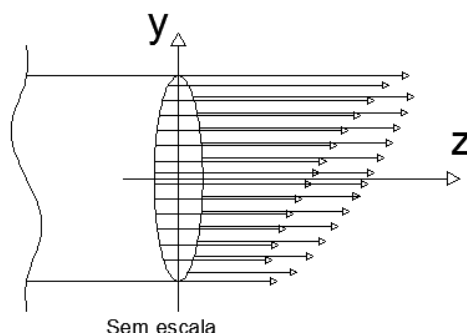


Figura 8. Distribuição de carregamento na extremidade dos tubos

Para um valor de excentricidade igual a zero, as tensões são constantes em toda a extremidade do tubo. Conforme aumenta-se a excentricidade, aumenta-se o grau da equação gerada pela relação entre a força aplicada na ligação *versus* o carregamento por nó na extremidade do tubo. No gráfico da Figura 9 pode-se observar a transmissão de carregamentos para a posição de cada nó da extremidade do tubo, para excentricidades variando de 0 a 24% do diâmetro do mesmo.

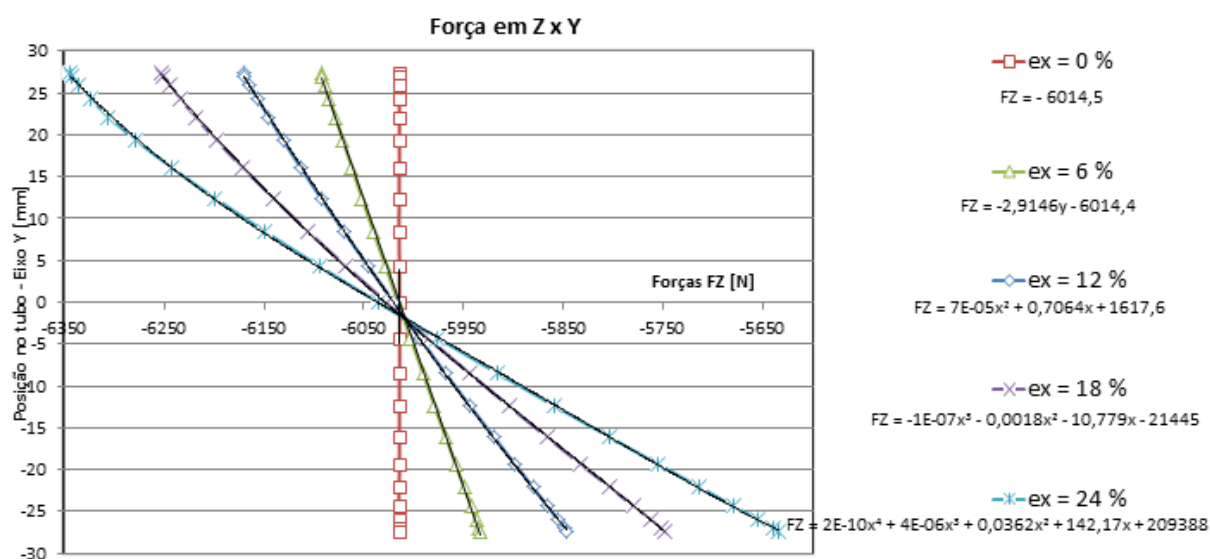


Figura 9. Carga por nó na extremidade do tubo de acordo com excentricidades consideradas

Devido à dificuldade em dimensionar o carregamento por nó na extremidade dos tubos conforme a variação da excentricidade, utilizou-se um elemento de contato para simular a tração excêntrica por meio do acréscimo de apenas um nó extra. Este nó foi posicionado na extremidade do tubo com um deslocamento a partir do centro referente à excentricidade desejada, conforme mostrado na Fig. 10.

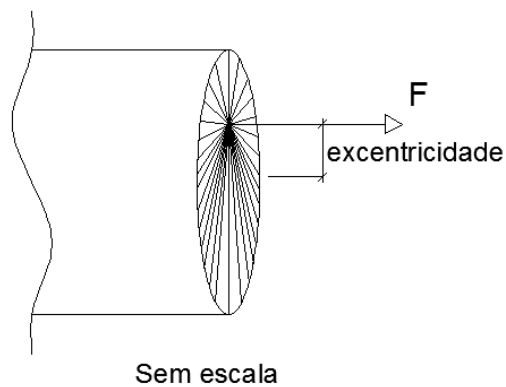


Figura 10. Carregamento transmitido por meio de elementos de contato

6 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS NUMÉRICOS E TEÓRICOS

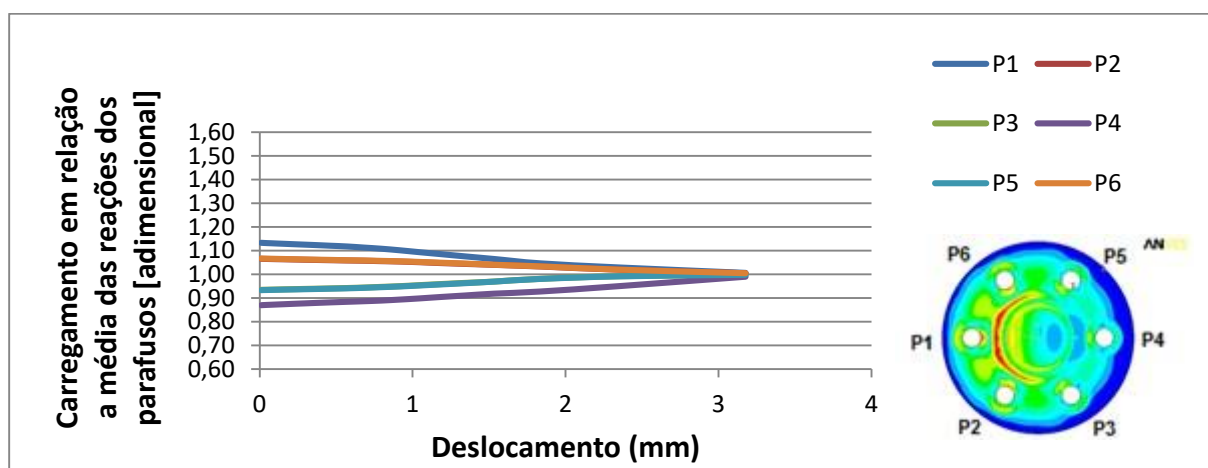
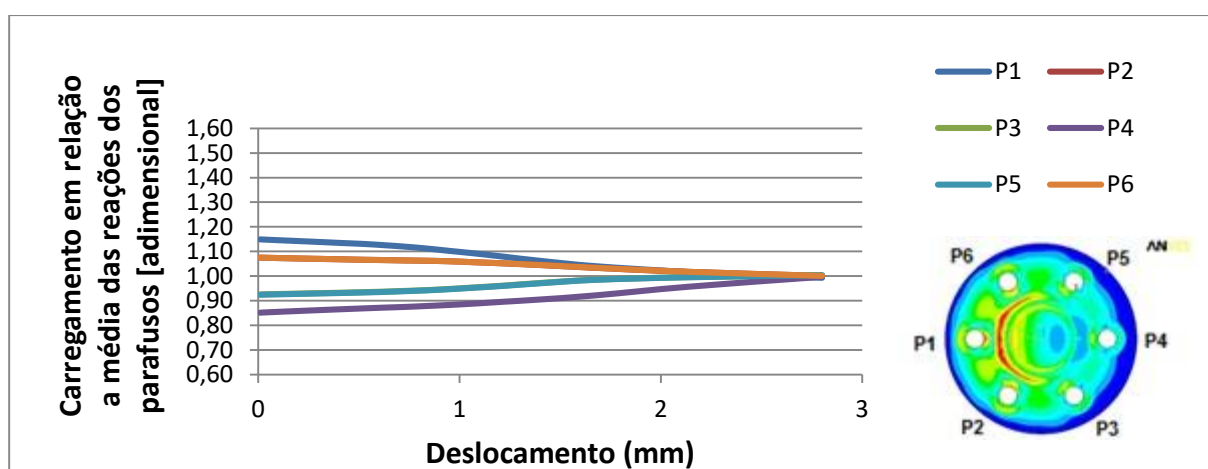
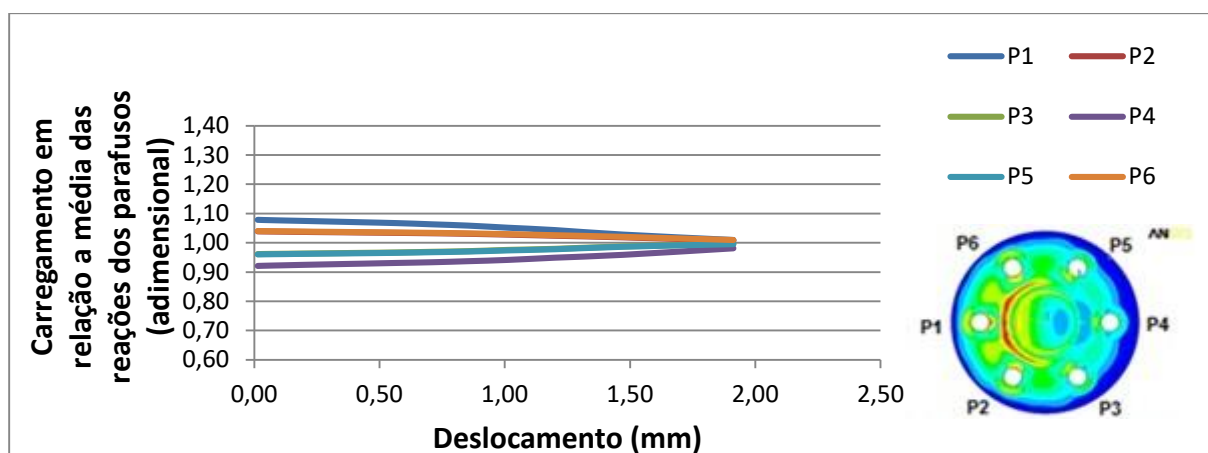
Pereira (2016) estudou as equações propostas por Fidalgo (2014), e as comparou com seus resultados numéricos. Dentre as geometrias analisadas na análise teórica, foram escolhidos dois tipos de protótipos para comparação com análise numérica: Protótipos Pr1 e Pr3, onde Pr representa protótipo, e os números 1 e 3 referem-se às geometrias dos tubos analisados para estas ligações. Na Tabela 2 encontram-se resumidamente as dimensões dos tubos dos protótipos estudados.

Tabela 2. Geometria dos tubos dos protótipos

Protótipos	$D_t \times t_t$ (mm)
Pr1	61,1 x 6,0
Pr2	63,5 x 4,5
Pr3	73,0 x 5,5
Pr4	81,2 x 4,5
Pr5	88,9 x 6,0
Pr6	88,9 x 4,5

6.1 Distribuição do carregamento por parafuso

Determinou-se a distribuição do carregamento da ligação para cada parafuso, podendo-se analisar a ocorrência ou não do efeito alavanca. Para carregamento excêntrico na ligação, observou-se que a carga solicitante em cada parafuso varia conforme a sua distância ao centro de aplicação da carga. Os gráficos das Fig. 11, 12, 13 e 14 representam a distribuição do carregamento para os parafusos dos modelos de excentricidade de 8 % e 16 %, dos protótipos Pr1 e Pr3, em relação ao deslocamento longitudinal da ligação.



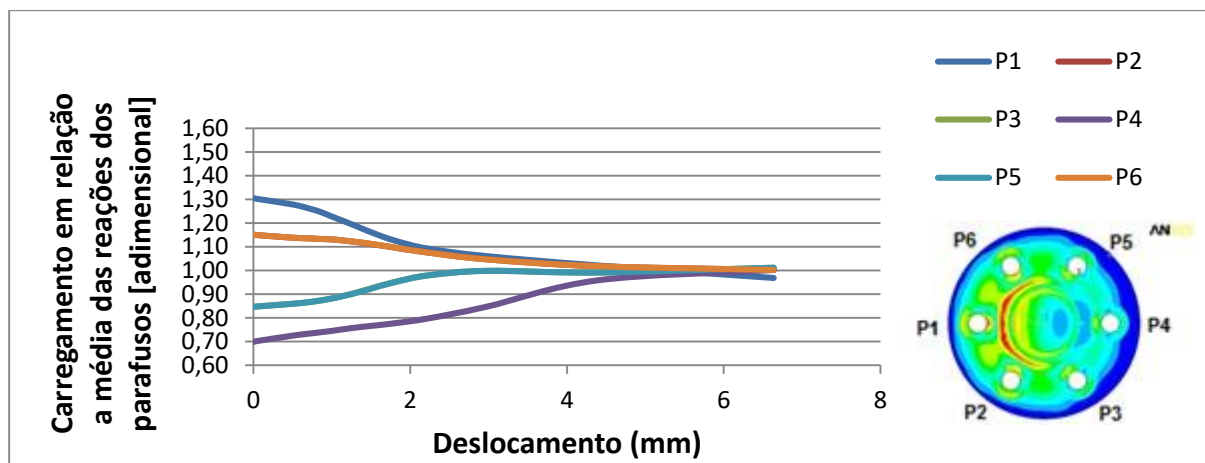


Figura 14. $(F_{\text{parafuso}} / F_{\text{média}}) \times \text{Deslocamento}$ - Pr3 Exc. 16%

A partir dos gráficos das Fig. 11 a 14 é possível observar alguns pontos. De maneira geral, os parafusos P1 foram os mais solicitados e os parafusos P4 os menos solicitados. E ainda, em relação à média dos outros parafusos, o acréscimo de carga ocorrido em P1 foi o mesmo que diminuiu em P4.

Devido ao modelo numérico apresentar uma simetria de carregamento, os valores suportados pelos parafusos P2 foram iguais ao P6 e o P3 igual ao P5. Esta simetria é considerada, pois os valores de excentricidade acidental são menores que as excentricidades planejadas, gerando efeitos que podem ser desprezados.

Conforme aumenta-se a excentricidade dos protótipos, há uma maior variação do carregamento suportado pelos parafusos. E variando-se a geometria da ligação, o valor de carregamento suportado pelos parafusos quase não variam.

Conforme há a evolução do carregamento imposto na ligação, há uma uniformização da parcela do carregamento suportado por cada parafuso, tendendo a um valor médio, representado pelo valor igual a 1 do eixo Y dos gráficos. O ponto em que os valores de carregamento dos parafusos são iguais, foi atingido para o modelo do protótipo Pr1 com um carregamento de 292 kN e para o modelo do protótipo Pr3 de 323 kN, independente da excentricidade.

6.2 Comparação das equações de Fidalgo (2014) com equações da norma NBR 16239:2013

Para comparação das equações de Fidalgo (2014), Eq. (1) a (3), e da norma NBR 16239:2013, Eq. (4) a (10), foi utilizado o protótipo de geometria Pr3. Este protótipo encontra-se resumido na Tabela 3, em que a ligação é dimensionada para uma força igual à força axial de tração resistente ao escoamento da seção bruta do tubo da ligação, N_{Rd} , de 403,97 kN.

Tabela 3. Dados do protótipo Pr3

Tubos				Flanges	
D_t (mm)	t_t (mm)	f_y (MPa)	e_1 (mm)	D_f (mm)	f_{yp} (MPa)
73,0	5,5	381	22,86	170	302

O valor de e_1 foi definido como 1,8 vezes o diâmetro do parafuso utilizado (12,7mm) e o valor dado pela carga resistente foi calculado pela fórmula de tração de escoamento da seção bruta dos tubos pela norma NBR 8800: 2008.

Foram calculadas, então, novas espessuras de flange para a ligação utilizando as Eq. (1), (2) e (3). Estes novos valores foram utilizados na análise numérica do modelo estudado. Os resultados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Valores de espessura do flange

	NBR 16239				Fidalgo				
Excentricidade	0%	0%	6%	9%	12%	15%	18%	21%	24%
f_i	4,111	5,138	3,453	1,893	1,103	0,633	0,323	0,093	-0,067
x	0,596				0,596				
t_f (mm)	15,50	13,50	16,50	22,50	29,50	38,50	54,00	100,5	-

O valor do carregamento aplicado na ligação foi fixado em 304 kN, referente ao início de escoamento dos flanges dimensionados. Para considerar o escoamento do flange, foi definido o valor de carregamento que faz com que o diagrama apresente valores de tensões superiores aos 302 MPa, que é a tensão de escoamento definida pela caracterização do flange, ao longo de toda sua espessura.

As Figuras 15 e 16 apresentam a distribuição de tensões de von Mises dos flanges e tubos da ligação.

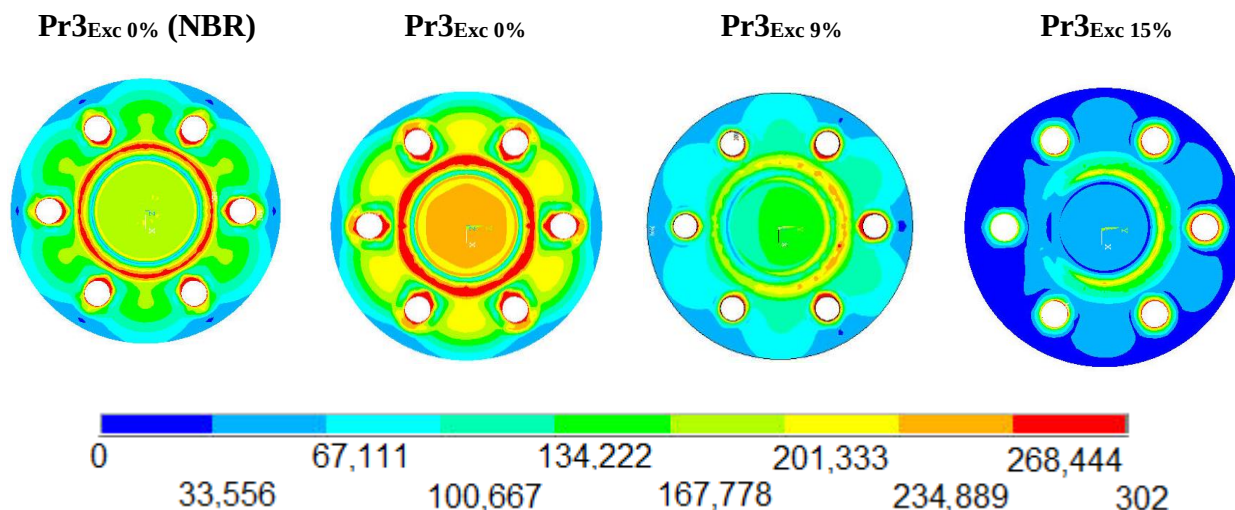


Figura 15. Tensão de von Mises dos flanges para carregamento de 304 kN com excentricidades de 0%, 9% e 15%

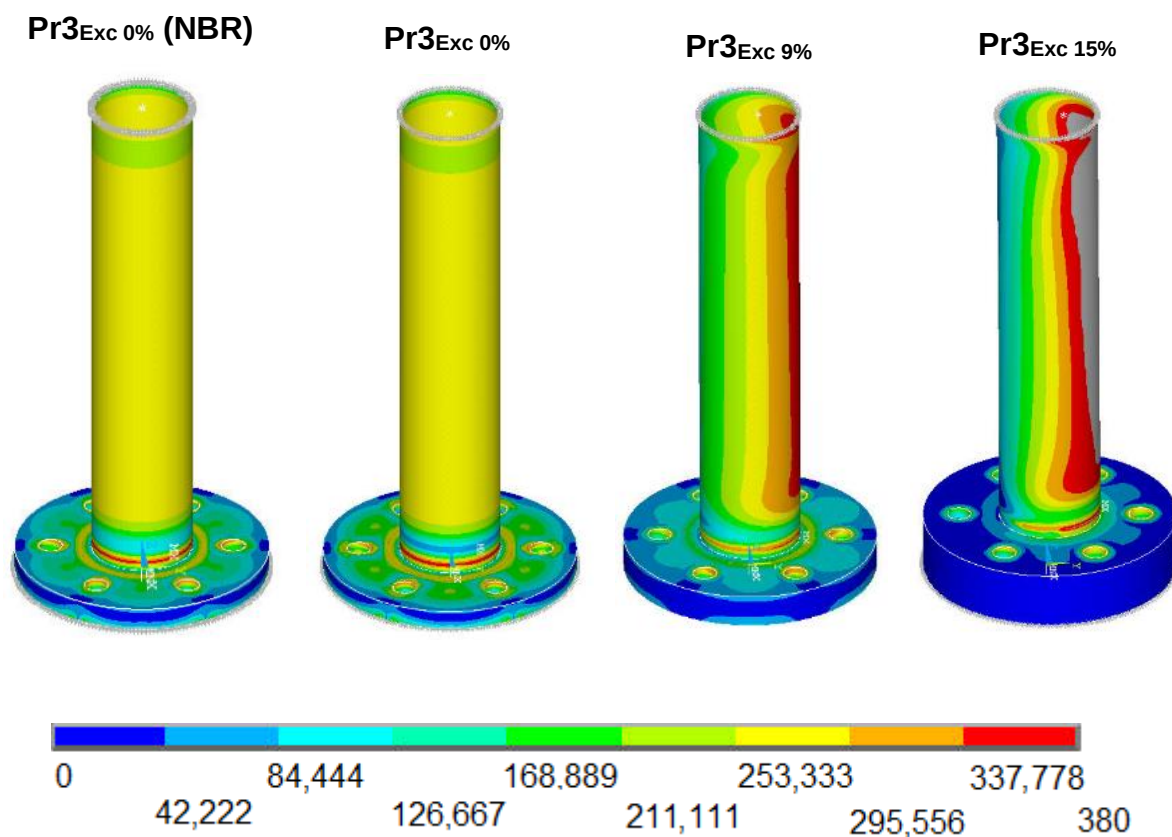


Figura 16. Tensão de von Mises dos tubos e flanges para carregamento de 304 kN e com excentricidades de 0%, 9% e 15%

Nas imagens que consideram a ligação sem excentricidade calculadas pelas Eq. (1), (2) e (3) ($Pr3_{Exc} 0\%$) os valores de tensões são inferiores à tensão limite de escoamento do flange, porém superiores às tensões do flange calculada pela norma brasileira. Isto era esperado, já que a espessura do flange é menor.

Nas ligações com excentricidade de 9% ($Pr3_{Exc} 9\%$) tem-se uma distribuição de tensões inferiores à de escoamento do flange e do tubo. Para valores de excentricidade maiores, os flanges apresentam valores excessivos de espessura, impedindo que o flange trabalhe com sua capacidade máxima. Assim, conclui-se que quando imposto um carregamento excêntrico na ligação flangeada, a equação prevê flanges com espessura elevada, que leva a um comportamento menos dúctil da ligação.

Os valores referentes às reações de contato entre os flanges são apresentadas no gráfico da Fig. 17. Neste gráfico estão os valores da força de reação na região radial (distante de $e_2 - D_p/2$ até a borda do flange, sendo e_2 a distância entre o centro dos furos dos parafusos à extremidade do flange) que um flange exerce sobre o outro. Esta reação, chamada no gráfico Contato dos flanges, é a responsável pelo o efeito alavanca. Pode-se observar que as ligações com excentricidade de 0% apresentam efeito alavanca considerável. Para as demais excentricidades, este efeito é desprezível.

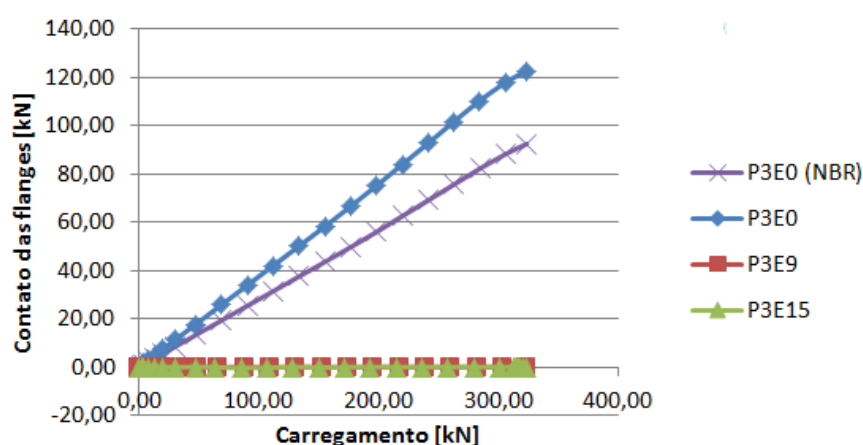


Figura 17. Carregamento x Contato dos flanges

7 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos com as espessuras de flange fornecida pela norma NBR 16239: 2013 e de Fidalgo (2014) foram comparados utilizando os diagramas de tensões de von Mises gerados pelo modelo numérico desenvolvido. É importante destacar que a norma não oferece um procedimento de cálculo que considere a excentricidade, mas este fato foi ignorado, comparando-se apenas as tensões geradas no modelo, já que o material é o mesmo e falha com as mesmas tensões.

Com relação ao estudo comparativo de carregamentos centrados, os valores de tensões apresentaram diagramas com a falha ocorrendo por escoamento dos flanges, o que torna a ligação menos resistente que os tubos a ela conectados. Portanto, os resultados são contra a segurança. Nos casos de carregamento excêntrico, pode-se concluir que a ligação funciona de

maneira satisfatória, apresentando resistência maior que a dos tubos conectados a ela. No entanto, as novas espessuras de flange obtidas apresentaram valores muito elevados. Como consequência, a ligação trabalhou a favor da segurança, e o efeito alavanca causado pela flexão dos flanges foi anulado.

Também foi possível observar que quando considerada excentricidade na ligação, os parafusos mais próximos do ponto de aplicação de carga têm até 36% (caso mais excêntrico) de carregamento superior à média dos parafusos da ligação, e os mais distantes deste ponto apresentam a mesma porcentagem a menos. Observou-se também que conforme o carregamento é aplicado e a flexão do flange ocorre, os valores de solicitação nos parafusos se uniformizam, fazendo com que os parafusos recebam a mesma carga.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais - FAPEMIG, CNPq, CAPES e UFOP.

REFERÊNCIAS

ABNT, 2008. NBR 8800, 2008. *Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

ABNT, 2013. NBR 16239, 2013. *Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edificação com perfis tubulares*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

ANSYS, 2009. *User's Manual*. Help, Inc. theory reference (version 12.1).

Elias, G. C., 2016. Análise numérico experimental de resistência a flexão em ligações tubulares flangeadas. *Trabalho de conclusão de curso*. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil.

Fidalgo, A. M., 2014. Estudo Teórico e Numérico do Comportamento de Ligações tipo Flange Circular para Estruturas Tubulares de Aço. *Dissertação de Mestrado*. Faculdade de Engenharia Civil. Arquitetura e Urbanismo, UNICAMP, Campinas, Brasil.

Pereira, C. O. V. R., 2016, Análise numérico-experimental de resistência a flexão em ligações tubulares flangeadas. *Dissertação de Mestrado*. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil.