



ANÁLISE NUMÉRICA DE LIGAÇÕES "K" COMPOSTAS POR PERFIS TUBULARES COM DIAGONAIS CIRCULARES COM ALTA RELAÇÃO ENTRE DIÂMETRO E ESPESSURA

Luana Perpétuo Silva

Ricardo Hallal Fakury

Ana Lydía Reis de Castro e Silva

luanaperpetuo@yahoo.com.br

fakury@dees.ufmg.br

lydia@dees.ufmg.br

Universidade Federal de Minas Gerais

Av. Antônio Carlos, 6627 - Escola de Engenharia - Bloco 1 - 4º andar, sala 4215, Pampulha, Belo Horizonte, CEP 31270-901, Minas Gerais, Brasil

Resumo. As treliças com perfis tubulares de aço apresentam frequentemente ligações soldadas do tipo "K" com afastamento. A norma brasileira ABNT NBR 16239:2013, que trata especificamente do projeto de estruturas de aço com perfis tubulares, apresenta uma formulação para o dimensionamento dessas ligações, mas exige que a relação entre o diâmetro e a espessura das diagonais comprimida e tracionada não ultrapassem $0,05E/f_y$ e 50, respectivamente. Neste trabalho, a partir de análise numérica pelo MEF usando o programa ABAQUS (2013), as prescrições da ABNT NBR 16239:2013 foram avaliadas quanto à possibilidade de aplicação nas situações em que a relação entre o diâmetro e a espessura das diagonais situa-se entre $0,05E/f_y$ e $0,11E/f_y$, sendo o extremo superior igual ao valor máximo de outra norma brasileira, a ABNT NBR 8800:2008, que trata do projeto de estruturas de aço em geral, para que não ocorra flambagem local de barras comprimidas. Ao final, concluiu-se que a formulação da ABNT NBR 16239:2013 não pode ser aplicada com segurança nesse limite ampliado, pois não leva em conta adequadamente a espessura das diagonais no modo de falha relacinado à plastificação da face do banzo, grandeza que influi significativamente nos resultados.

Palavras-chave: Estruturas de aço, Estruturas tubulares treliçadas, Ligações do tipo "K"

1 INTRODUÇÃO

A construção metálica sempre esteve ligada à ideia de modernidade, seja pela arquitetura em si, seja pela tecnologia envolvida, mas vai muito além de um aspecto visual moderno e atrativo e de procedimentos de projeto avançados. Ela possibilita uma maior velocidade de execução, é compatível com qualquer tipo de material de fechamento, é leve e possibilita a execução de grandes vãos livres com estruturas esbeltas (Medanha, 2006).

A arquitetura contemporânea é caracterizada por uma preocupação maior em mostrar as estruturas das edificações. Outrora, escondê-las era um recurso utilizado pelos arquitetos que, em lugar de tirar partido da beleza do “esqueleto” de um edifício, faziam-no desaparecer por detrás dos elementos de concreto, da alvenaria e de outros materiais de revestimento. O aço pode garantir um efeito arquitetônico equilibrado e esteticamente condizente com os parâmetros atuais, desde que os detalhes das ligações sejam projetados e executados cuidadosamente (Gerken, 2003).

Dentro desse contexto, a utilização de perfis tubulares na construção civil encontra-se em crescimento devido à eficiência estrutural relacionada à geometria da seção transversal, que proporciona alta capacidade resistente a torção e a forças axiais. Assim, sob atuação desses esforços, os perfis tubulares apresentam melhor desempenho quando comparados aos perfis de seção aberta. Adicionalmente, também por causa da forma da seção transversal, os perfis tubulares proporcionam redução de custos com pintura, menor suscetibilidade ao fogo devido à pequena área exposta, condições de transporte mais econômicas e custo reduzido de manutenção (Requena e Santos, 2007). Como ilustração, a Figura 1 mostra o edifício do Centro Administrativo da Vallourec, onde a estrutura principal foi constituída per perfis tubulares (pilares em perfis circulares e vigas treliçadas formadas por perfis retangulares nos banzos e circulares nas diagonais e nos montantes).



Figura 1: Centro Administrativo da Vallourec em Belo Horizonte (fonte: Vallourec)

A exemplo do Centro Administrativo da Vallourec, as treliças com perfis tubulares são muito usadas como vigas de piso e de cobertura, nas quais as ligações soldadas do tipo "K" com afastamento (o afastamento significa que existe uma distância entre as faces mais

próximas das duas diagonais junto ao banzo) são frequentes (Figura 2). Neste trabalho, são estudadas essas ligações, adaptadas para a condição particular em que:

- os banzos são constituídos por perfis retangulares e as diagonais por perfis circulares;
- as duas diagonais formam com o banzo ângulos iguais;
- as duas diagonais possuem a mesma seção transversal;
- as duas diagonais e o banzo são fabricados com o mesmo aço estrutural.



Figura 2: Ligação do tipo “K” com afastamento (fonte: Vallourec)

A norma brasileira que trata especificamente do projeto de estruturas tubulares, a ABNT NBR 16239:2013, apresenta prescrições para o dimensionamento das ligações do tipo "K" com afastamento. Para as ligações tratadas neste trabalho, além de uma série de restrições, ela exige que a relação entre o diâmetro e a espessura da diagonal circular comprimida seja no máximo igual a $0,05E/f_y$, onde E é o módulo de elasticidade e f_y a resistência ao escoamento do aço utilizado, e da diagonal circular tracionada não ultrapasse 50.

Este trabalho tem por objetivo avaliar se prescrições da ABNT NBR 16239:2013 podem ser aplicadas com segurança em situações em que a relação entre o diâmetro e a espessura das diagonais situa-se entre $0,05E/f_y$ e $0,11E/f_y$. O limite superior representa o valor máximo permitido pela ABNT NBR 8800:2008, a norma brasileira que trata das estruturas de aço em geral, para que não haja redução da capacidade resistente das barras comprimidas em função da flambagem local. Para alcance desse objetivo, foi feita análise numérica pelo Método dos Elementos Finitos usando o programa comercial ABAQUS (2013), com diversos modelos escolhidos após um estudo paramétrico, e os resultados obtidos foram comparados com os da ABNT NBR 16239:2013.

2 PRESCRIÇÕES DA ABNT NBR 16239:2013

Os estudos realizados neste trabalho utilizam como referência a ABNT NBR 16239:2013, a qual apresenta formulações e restrições para o dimensionamento de ligações formadas por perfis tubulares.

Na Figura 3 tem-se a indicação da nomenclatura empregada para as ligações do tipo "K" com afastamento tratadas aqui e descritas no Item 1. Uma diagonal é comprimida e a outra tracionada, sendo ambas representadas pelo subscrito "1" (d_1 é o diâmetro e t_1 a espessura dessas diagonais). O subscrito "0" refere-se ao banzo (h_0 é sua altura, b_0 sua largura e t_0 sua espessura) e o afastamento entre as diagonais junto ao banzo é simbolizado por g .

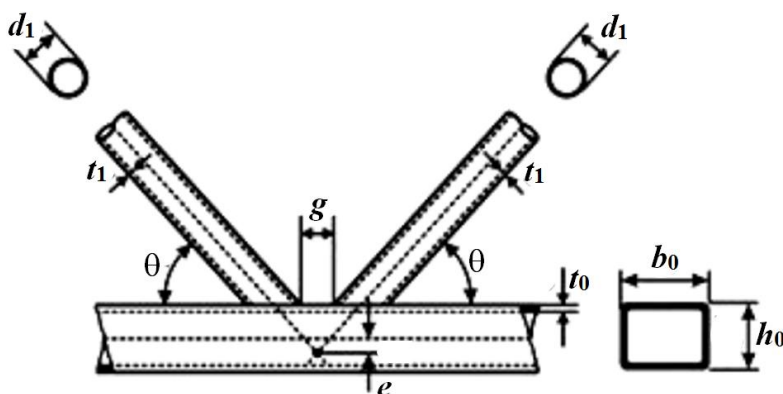


Figura 3: Ligação do tipo "K" com afastamento (adaptado de Mayor, 2010)

O afastamento das diagonais g pode levar a uma excentricidade, e dependendo do ponto onde ocorrerá a intersecção do eixo longitudinal das diagonais em relação ao eixo longitudinal do banzo, essa excentricidade pode ser classificada como nula, negativa (quando a intersecção se dá acima do eixo longitudinal do banzo) ou positiva (quando a intersecção se dá abaixo do eixo longitudinal do banzo). O valor da excentricidade se relaciona diretamente com o afastamento e é dado por (Figura 3):

$$e = \left(\frac{d_1}{\sin \theta} + g \right) \frac{\sin^2 \theta}{\sin(2\theta)} - \frac{h_0}{2} \quad (1)$$

Segundo a ABNT NBR 16239:2013, o momento fletor resultante de excentricidade pode ser desprezado no dimensionamento das diagonais. No entanto, deve ser considerado no dimensionamento dos banzos e deve ser distribuído entre as diagonais, com base em seus coeficientes de rigidez relativa, I/L , onde I é o momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo perpendicular ao plano da treliça, e L o comprimento da barra medido entre os nós. Contudo, o momento fletor resultante de excentricidades pode ser desprezado no dimensionamento de ligações se a excentricidade estiver dentro dos limites estabelecidos pela expressão seguinte:

$$-0,55 h_0 \leq e \leq 0,25 h_0 \quad (2)$$

Os limites para o afastamento das diagonais são dados pelas seguintes expressões:

$$0,5 \left(1 - \frac{d_1}{b_0} \right) b_0 \leq g \leq 1,5 \left(1 - \frac{d_1}{b_0} \right) b_0 \quad (3)$$

$$g \geq 2t_1 \quad (4)$$

Conforme a ABNT NBR 16239:2013, a força resistente de cálculo das ligações deve ser tomada como o menor valor encontrado entre os modos de falha "A" até "F", desde que sejam atendidas as condições a seguir:

a) relação entre o diâmetro das diagonais e a largura do banzo

$$0,4 \leq \frac{d_i}{b_o} \leq 0,8 \quad (5)$$

b) relação entre o diâmetro e a espessura da diagonal comprimida

$$\frac{d_{1,comp}}{t_{1,comp}} \leq 0,05 \frac{E}{f_y} \quad (6)$$

c) relação entre o diâmetro e a espessura da diagonal tracionada

$$\frac{d_{1,trac}}{t_{1,trac}} \leq 50 \quad (7)$$

d) ângulo entre as diagonais e o banzo

$$\theta \geq 30^\circ \quad (8)$$

De acordo com a ABNT NBR 16239:2013, para a ligação em estudo neste trabalho, os modos de falha que devem ser verificados são (Figura 4):

- A: plastificação da face ou de toda a seção transversal do banzo, junto às diagonais;
- C: plastificação ou instabilidade por cisalhamento do banzo, junto às diagonais;
- D: ruptura por punção da parede do banzo na área de contato com as diagonais;
- E: ruptura ou plastificação das diagonais na região da solda oriunda da distribuição não uniforme de tensão.

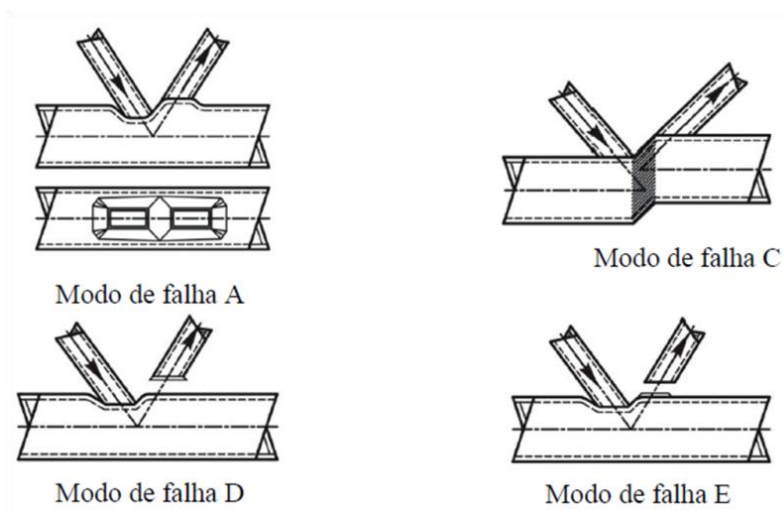


Figura 4: Modos de falha previstos na ABNT NBR 16239:2013 para a ligação estudada (Mayor, 2010)

A seguir, tem-se a força axial resistente de cálculo para os modos de falha descritos (para os Modos de Falha A, D e E, verificam-se apenas as diagonais e, para o Modo de Falha C, as diagonais e o banzo):

a) Modo A

$$N_{1,Rd} = \frac{\pi}{4} \frac{9,79k_n f_y t_0^2 \sqrt{\frac{b_0}{2t_0}} d_1}{\sin \theta} / \gamma_{a1} \quad (9)$$

onde f_y é a resistência ao escoamento do aço, γ_{a1} o coeficiente de ponderação da resistência, igual a 1,10, e

$$n = \frac{\sigma_{0,Sd}}{f_y}$$

$$\sigma_{0,Sd} = \frac{N_{0,Sd}}{A_0} + \frac{M_{0,Sd}}{W_0}, \text{ considerando sinal negativo para compressão}$$

$$\text{Para } n < 0 \rightarrow k_n = 1,3 + \frac{0,4n}{\frac{d_1}{b_0}} \leq 1,0$$

$$\text{Para } n \geq 0 \rightarrow k_n = 1,0$$

b) Modo C

$$N_{1,Rd} = \frac{0,66f_y A_v}{\sin \theta} / \gamma_{a1} \quad (10)$$

$$N_{0,Rd} = 1,1 \left[(A_0 - A_v) f_y + A_v f_y \sqrt{1 - (V_{Sd}/V_{pl,Rd})^2} \right] / \gamma_{a1} \quad (11)$$

onde

A_v é a área de cisalhamento do banzo, igual a $2h_0t_0$

A_0 é a área da seção transversal do banzo

V_{sd} é força cortante solicitante de cálculo no banzo

$V_{pl,Rd}$ é a força cortante resistente de cálculo correspondente à plastificação do banzo

c) Modo D (apenas se $\frac{d_1}{b_0} \leq \left(1 - 1/\frac{b_0}{2t_0}\right)$)

$$N_{1,Rd} = \frac{\pi}{4} \frac{0,66f_y t_0}{\sin \theta} \left(\frac{2d_1}{\sin \theta} + d_1 + b_{1,e,p} \right) / \gamma_{a1} \quad (12)$$

onde

$$b_{1,e,p} = \frac{10}{b_0/t_0} d_1 \leq d_1$$

d) Modo E

$$N_{1,Rd} = \frac{\pi}{4} [1,1f_y t_1 (3d_1 - 4t_1 + b_{1,ef})] / \gamma_{a1} \quad (13)$$

onde

$$b_{1,ef} = \frac{10}{b_0/t_0} \frac{t_0}{t_1} d_1 \leq d_1$$

3 ESTUDO PARAMÉTRICO

Os modelos, para este estudo, foram projetados com aço estrutural de resistência ao escoamento f_y de 300 MPa e resistência à ruptura f_u de 415 MPa, com módulo de elasticidade E de 200.000 MPa e coeficiente de Poisson ν de 0,3. Sua geometria foi definida com base nas condições estabelecidas pela ABNT NBR 16239:2013 para validade das equações da capacidade resistente, exceto a relação entre o diâmetro e a espessura das seções tubulares circulares das diagonais, que se situou entre $0,05E/f_y$ e $0,11E/f_y$. Assim, manteve-se fixo o diâmetro das diagonais d_1 em 76,20 mm, a largura do banzo b_0 em 190,50 mm, o espaçamento entre as diagonais g em 60 mm e o ângulo θ entre as diagonais e o banzo em 45° , para todos os modelos. Dessa forma, partindo-se diâmetro das diagonais, foram estabelecidas seis espessuras para esses elementos cobrindo a faixa objeto deste estudo e, da partindo da largura do banzo, foram estabelecidos dois valores para sua altura, 95,50 mm e 381,00 mm, e dois valores para sua espessura, 5,30 mm e 10,59 mm. No total, foram gerados 12 modelos.

Para facilitar o entendimento, os modelos foram subdivididos em dois grupamentos, A e B, sendo o Grupamento A composto pelos modelos com altura do banzo h_0 de 95,50 mm, espessura do banzo t_0 de 5,30mm e relações b_0/t_0 igual a 35,94 e h_0/t_0 igual a 18,02, conforme é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1- Geometria dos modelos do Grupamento A

Modelo	Diagonais			Banzo				
	d_1 (mm)	t_1 (mm)	d_1/t_1	b_0 (mm)	h_0 (mm)	t_0 (mm)	b_0/t_0	h_0/t_0
K-01-A	76,20	1,04	73,27	190,50	95,50	5,30	35,94	18,02
K-02-A		1,29	59,07					
K-03-A		1,53	49,80					
K-04-A		1,79	42,57					
K-05-A		2,04	37,35					
K-06-A		2,28	33,33					

Já o Grupamento B é composto pelos modelos com altura do banzo h_0 de 381,00 mm, espessura do banzo t_0 de 10,59 mm e relações b_0/t_0 igual a 17,99 e h_0/t_0 igual a 35,98, conforme a Tabela 2.

Tabela 2- Geometria dos modelos do Grupamento B

Modelo	Diagonais			Banzo				
	d_1 (mm)	t_1 (mm)	d_1/t_1	b_0 (mm)	h_0 (mm)	t_0 (mm)	b_0/t_0	h_0/t_0
K-07-B	76,20	1,04	73,27	190,50	381,00	10,59	17,99	35,98
K-08-B		1,29	59,07					
K-09-B		1,53	49,80					
K-10-B		1,79	42,57					
K-11-B		2,04	37,35					
K-12-B		2,28	33,33					

Nos modelos dos dois grupamentos, às diagonais com diâmetro d_1 de 76,20 mm foram atribuídas espessuras t_1 hipotéticas de 1,04 mm, 1,29 mm, 1,53 mm, 1,79 mm, 2,04 mm e 2,28 mm, gerando relações d_1/t_1 iguais a 73,27, 59,07, 49,80, 42,57, 37,35 e 33,42, respectivamente. Obviamente, essas relações encontram-se entre $0,05E/f_y$, que é igual a 33,33, e $0,11E/f_y$, que é igual a 73,33.

4 ANÁLISE NUMÉRICA

4.1 Considerações gerais

Foi efetuada análise numérica não linear física e geométrica, considerando grandes deslocamentos, por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF) usando-se o programa comercial ABAQUS (2013). Nessa análise, foi adotada a relação constitutiva tensão *versus* deformação do aço estrutural mostrada na Figura 5, na qual a tensão σ_{true} representa o valor verdadeiro da tensão, ou seja, o valor em que se considera a variação da seção transversal em função das deformações.

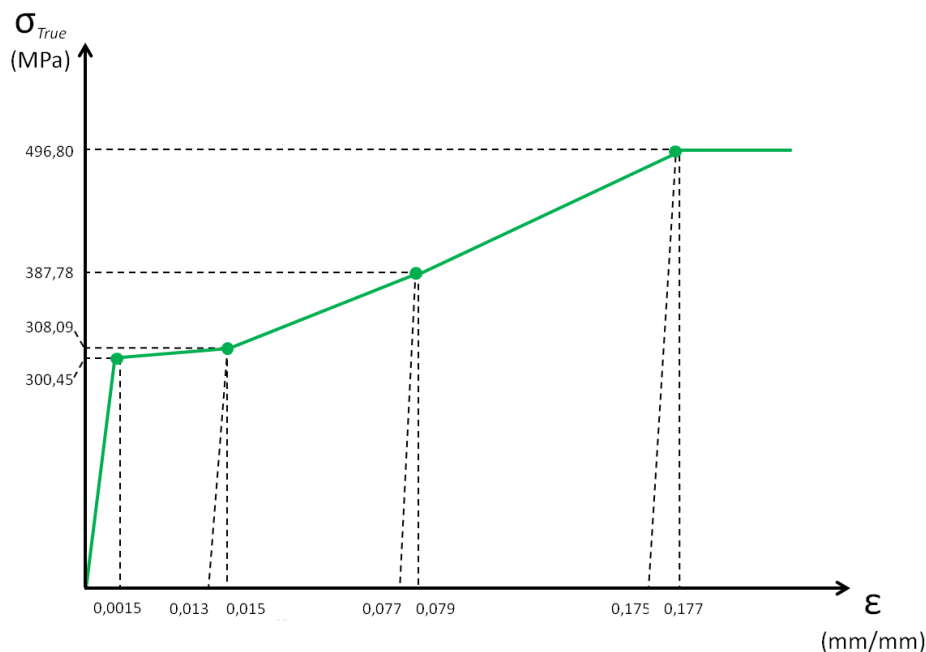


Figura 5: Diagrama tensão *versus* deformação do aço estrutural

A modelagem do raio de curvatura foi baseada no trabalho de Mayor (2010), que considerou a curvatura do vértice do perfil retangular do banzo igual a uma vez e meia a espessura da sua parede.

Para representar adequadamente a região da ligação, o banzo dos modelos foi projetado com 2m de comprimento e as diagonais com 0,40m. No banzo, a modelagem do raio de curvatura foi baseada no de Mayor (2010), que considerou a curvatura do vértice do perfil retangular do banzo igual a uma vez e meia a espessura da sua parede.

Os nós localizados nas duas extremidades do banzo tiveram todos os seus graus de liberdade restringidos. Nas diagonais, os nós localizados nas extremidades foram restringidos nas direções Y e Z em relação às coordenadas locais, conforme ilustra a Figura 6.

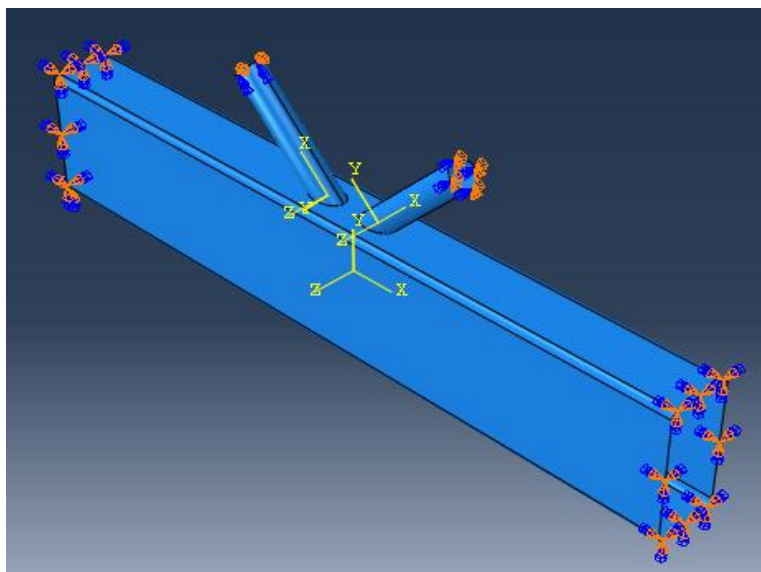


Figura 6: Condições de Contorno

Em cada modelo, o processamento computacional teve início com a aplicação de uma força unitária nas diagonais, uma de compressão e outra de tração, conforme a Figura 7.

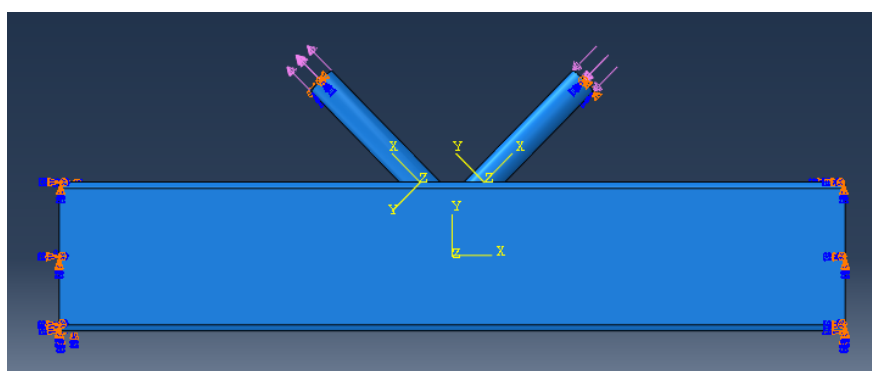


Figura 7: Aplicação da força unitária nas diagonais

A força foi sendo aumentada gradativamente de forma automática, de acordo com o Método de Riks, até que o prosseguimento da sua elevação tornou impossível, como mostra a Figura 8 (a) para o modelo K-03-A e a Figura 8 (b) para o modelo K-09-B, nas quais o deslocamento se situa no encontro entre a diagonal comprimida e o plano de simetria vertical do banzo. Considerou-se que força atuante nessa situação era a força máxima que podia atuar na ligação, ou seja, a força correspondente ao colapso, independentemente do nível de deformação. Evidentemente, se uma deformação acima de algum parâmetro previamente estabelecido fosse considerada como colapso, a força máxima poderia ser menor que os valores obtidos. É bastante interessante notar que o deslocamento na força de colapso é muito superior quando o banzo possui a maior dimensão em contato com as diagonais. O modo de falha foi definido com base em observação visual do nível de distribuição de tensões e das deformações na região de ligação.

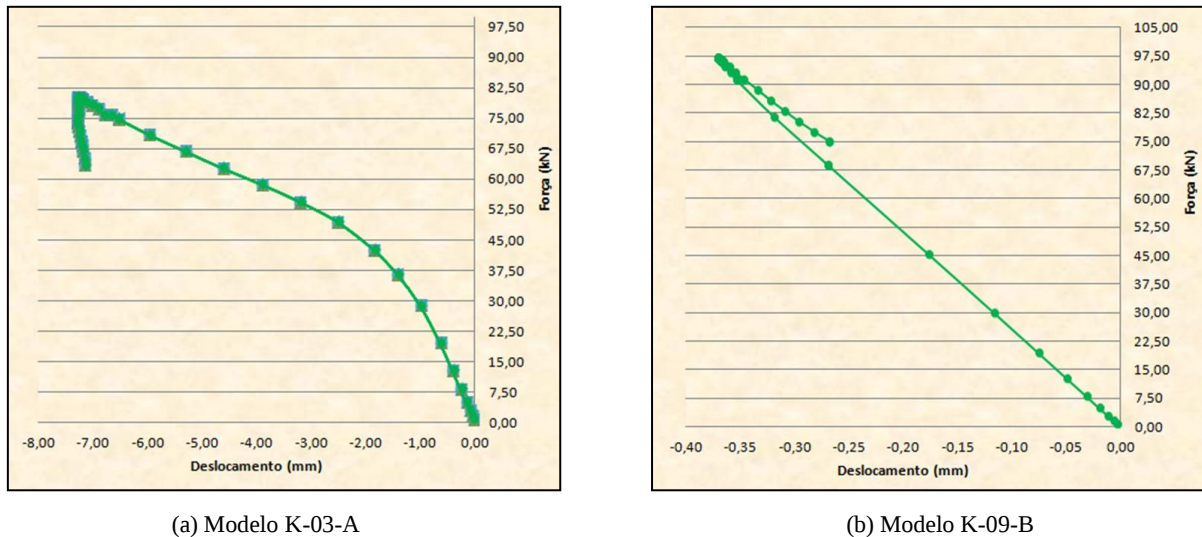


Figura 8: Gráfico de força versus deslocamento na região de ligação

Visando a definir uma malha de elementos finitos que possuísse um número de elementos adequado e com capacidade de adaptação aos contornos dos perfis, foi realizada uma avaliação da influência do refinamento da malha na precisão dos resultados, levando em consideração ainda o tempo de processamento. Para esse estudo, foi utilizado o modelo K-07-B (ver Tabela 2), com 8 configurações de malha compostas por elementos em tamanhos diferentes como descrito na Tabela 3.

Tabela 3 - Estudo de refinamento de malha, modelo K-07-B

Casca tipo	Tamanho do elemento (mm)	Número de elementos
S4R	3	266.126
S4R	6	65.948
S4R	12	16.435
S4R	18	7.677
S8R	3	266.126
S8R	6	65.948
S8R	12	16.435
S8R	18	7.677

Optou-se por utilizar o elemento de casca "S8R" do ABAQUS (2013), que apresenta oito nós por elemento com seis graus de liberdade por nó (translação nas direções X, Y e Z e

rotações em torno desses três eixos), tendo em vista sua capacidade de adaptação aos contornos dos perfis. O tamanho do elemento foi definido como 6, pois o resultado foi bastante similar aos modelos "S8R" com tamanhos 12 e 18 e a redução no tempo de processamento foi significativa. A Figura 9 ilustra a malha S8R tamanho 6, gerada para o modelo K-07-B.

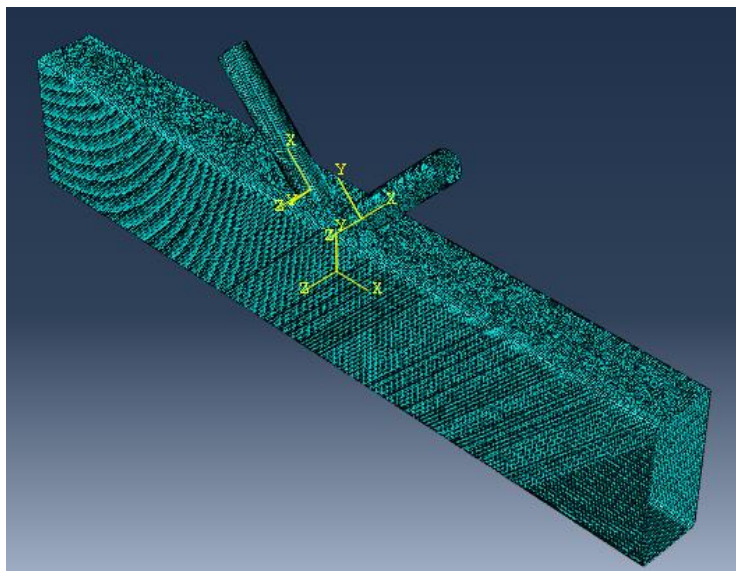


Figura 9: Malha de elementos finitos S8R gerada para o modelo K-07-B

O modelo numérico foi aferido tomando como referência os resultados apresentados por Mayor (2010), que analisou ligações similares às tratadas neste trabalho, mas com relação entre o diâmetro e a espessura das diagonais dentro dos limites preconizados pela ABNT NBR 16239:2013.

4.2 Resultados

As figuras 10 e 11 mostram o estado de deformação e as tensões de von Mises na região de ligação dos modelos K-03-A e K-09-B, respectivamente, no instante em que foi atingida a força máxima. Os demais modelos apresentaram estados de deformação semelhantes. Uma avaliação desses estados e das tensões atuantes indica claramente a ocorrência sempre do Modo de Falha A (plastificação da face do banzo junto às diagonais).

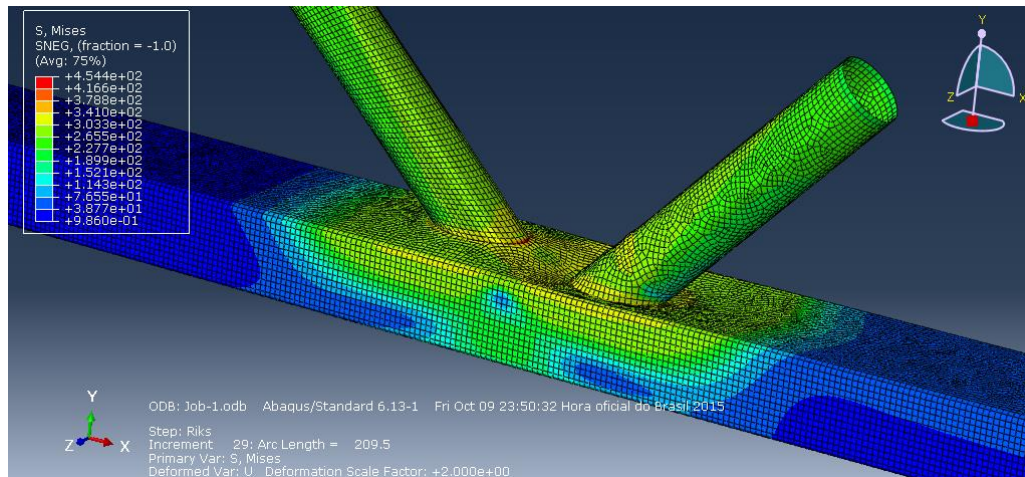


Figura 10: Estado de deformação e tensões de von Mises na região de ligação do modelo K-03-A

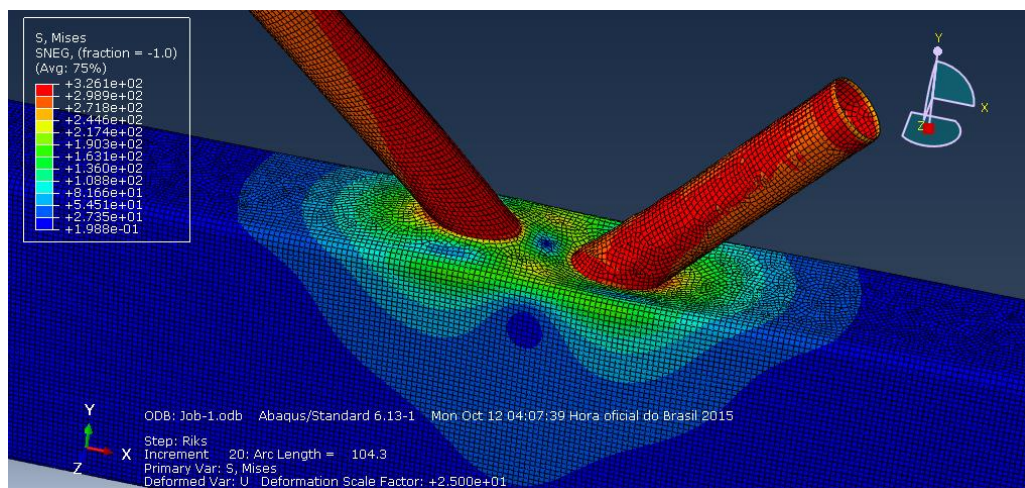


Figura 11: Estado de deformação e tensões de von Mises na região de ligação do modelo K-09-B

Na formulação da ABNT NBR 16239:2013 prevaleceu para todos os modelos o Modo de Falha E (ruptura ou plastificação de diagonais ou montantes na região da solda oriunda da distribuição não uniforme de tensão), exceto para o modelo K-06-A, em que prevaleceu o Modo de Falha A.

Nas tabelas 4 e 5 têm-se os valores das forças resistentes de cálculo obtidas pela formulação da ABNT NBR 16239:2013 e pela análise numérica nos modelos K-01-A a K-06-A e K-07-B a K-12-B, respectivamente, com os modos de falha que prevaleceram e a relação entre essas forças resistentes. Pode-se observar, de modo geral, que os resultados numéricos ficaram entre 9% e 25% inferiores aos resultados normativos, mas com os modos de falha coincidindo apenas no modelo K-06-A. Salienta-se que os resultados apresentados da análise numérica são aqueles gerados pelo processamento computacional divididos pelo coeficiente de ponderação da resistência γ_{a1} , igual a 1,10.

Tabela 4- Resultados obtidos pela formulação da ABNT NBR 16239 e pela análise numérica para os modelos K-01-A a K-06-A

Modelo	b_0/t_0	h_0/t_0	Força resistente (kN) e Modo de Falha		$\frac{F_{MEF,Rd}}{F_{BR,Rd}}$
			NBR 16239 $F_{NBR,Rd}$	Análise numérica $F_{MEF,Rd}$	
K-01-A	35,94	18,02	73,67 (E)	58,69 (A)	0,80
K-02-A	35,94	18,02	91,08 (E)	70,67 (A)	0,78
K-03-A	35,94	18,02	106,68 (E)	80,27 (A)	0,75
K-04-A	35,94	18,02	119,87 (E)	92,66 (A)	0,76
K-05-A	35,94	18,02	132,43 (E)	106,09 (A)	0,80
K-06-A	35,94	18,02	141,28 (A)	120,33 (A)	0,85

Tabela 5- Resultados obtidos pela formulação da ABNT NBR 16239 e pela análise numérica para os modelos K-07-B a K-12-B

Modelo	b_0/t_0	h_0/t_0	Força resistente (kN)		$\frac{F_{MEF,Rd}}{F_{NBR,Rd}}$
			NBR 16239 $F_{NBR,Rd}$	Análise numérica $F_{MEF,Rd}$	
K-07-B	17,99	35,98	73,67 (E)	66,13 (A)	0,90
K-08-B	17,99	35,98	91,08 (E)	82,06 (A)	0,90
K-09-B	17,99	35,98	107,67 (E)	97,22 (A)	0,90
K-10-B	17,99	35,98	125,53 (E)	112,35 (A)	0,89
K-11-B	17,99	35,98	142,58 (E)	129,05 (A)	0,91
K-12-B	17,99	35,98	158,84 (E)	143,88 (A)	0,91

A comparação entre os resultados numéricos e da ABNT NBR 16239:2013 evidenciam que a formulação dessa norma, como ela mesma estabelece, não pode ser aplicada às situações em que as diagonais circulares apresentam relação entre o diâmetro e a espessura na faixa de $0,05E/f_y$ a $0,11E/f_y$ (máximo permitido pela ABNT NBR 8800:2008 para que não ocorra flambagem local). A razão disso não é a ocorrência de flambagem local nas paredes da diagonal comprimida, mas, em princípio, o fato de que a expressão da ABNT NBR 16239:2013 relacionada ao Modo de Falha A não leva em conta a espessura das diagonais. Na faixa em que relação entre diâmetro e espessura desses elementos varia entre $0,05E/f_y$ e

$0,11E/f_y$, essa espessura influi significativamente nos resultados, fazendo com que o Modo de Falha A seja dominante, pelo menos nos modelos analisados. Isso fica bastante evidente, por exemplo, na Figura 12, que mostra os resultados obtidos pelas expressões da ABNT NBR 16239:2013 nos modelos K-01-A a K-06-A, nos quais apenas a espessura das diagonais vai aumentando, para os modos de falha A e E, e os resultados da análise numérica. Vê-se que, pela norma, o Modo de Falha A apresenta força resistente constante, e o Modo de Falha E força resistente crescente, de modo que, a partir de uma determinada espessura, quando a relação entre o diâmetro e a espessura se avizinha do seu limite de validade, o Modo de Falha A passa a prevalecer, da mesma maneira que na análise numérica. Nessa mesma figura, são ainda mostradas as forças resistentes obtidas pela análise numérica, crescentes com a espessura das diagonais.

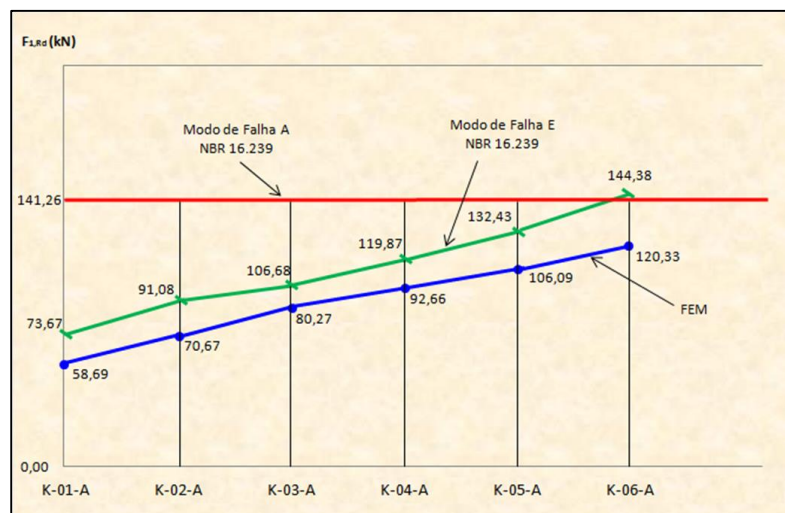


Figura 12: Resultados da ABNT NBR 16239:2013 e numéricos nos modelos K-01-A a K-06-A

A Figura 13 apresenta os mesmos resultados para os modelos K-07-B a K-12-B, mas nesse caso o Modo de Falha A nunca prevalece segundo a ABNT NBR 16239:2013, certamente por causa da maior espessura do banzo.

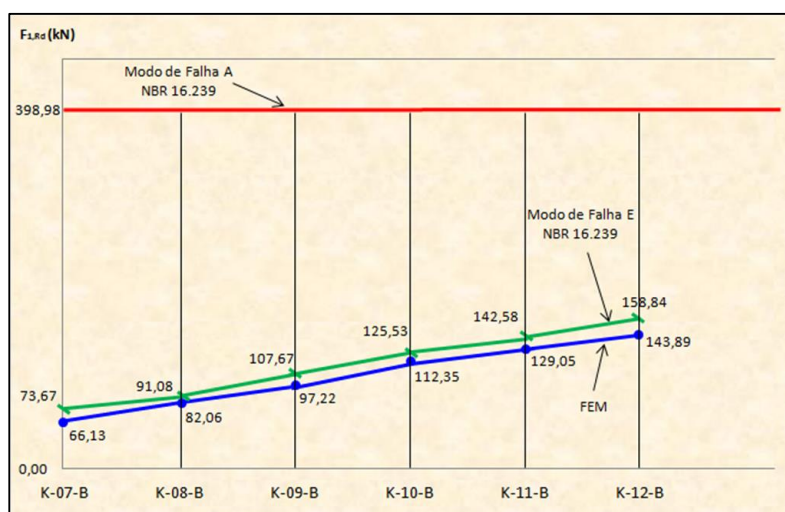


Figura 13: Resultados da ABNT NBR 16239:2013 e numéricos nos modelos K-07-B a K-12-B

5 CONCLUSÕES

As treliças com perfis tubulares apresentam frequentemente ligações soldadas do tipo "K" com afastamento, em que os banzos são constituídos por perfis retangulares e as duas diagonais, a comprimida e a tracionada, por perfis circulares, com essas diagonais possuindo a mesma seção transversal e o mesmo aço estrutural e, ainda, formando com o banzo ângulos iguais. A norma brasileira ABNT NBR 16239:2013, que trata do projeto de estruturas tubulares, apresenta uma formulação para o dimensionamento dessas ligações, mas para sua validade, além de uma série de restrições, exige que a relação entre o diâmetro e a espessura das diagonais comprimida e tracionada não ultrapassem $0,05E/f_y$ e 50, respectivamente.

Este trabalho, a partir de análise numérica pelo MEF usando o programa ABAQUS (2013), envolvendo 12 modelos, procurou avaliar se prescrições da ABNT NBR 16239:2013 poderiam ser aplicadas nas situações em que a relação entre o diâmetro e a espessura das diagonais situa-se entre $0,05E/f_y$ e $0,11E/f_y$, com o limite superior igual ao valor máximo permitido pela ABNT NBR 8800:2008 para não reduzir a capacidade resistente das barras comprimidas em função da flambagem local.

Uma comparação entre os resultados obtidos com a formulação da ABNT NBR 16239:2013 e os resultados numéricos mostrou divergência entre os modos de falhas predominantes nos modelos estudados. Enquanto na norma sempre se atingiu o Modo de Falha E, com uma única exceção, onde foi atingido o Modo de Falha A, na análise numérica foi alcançado o Modo de Falha A em todos os modelos. Complementarmente, em termos de valores finais da força resistente de cálculo, os resultados numéricos se situaram entre 9% e 25% abaixo dos normativos.

Com base no exposto, pode-se deduzir que a formulação da ABNT NBR 16239:2013, como ela mesma estabelece, não pode ser aplicada às situações em que as diagonais circulares apresentam relação entre diâmetro e espessura entre $0,05E/f_y$ e $0,11E/f_y$. Mostrou-se que isso se deve ao fato de que a expressão da ABNT NBR 16239:2013 relacionada ao Modo de Falha A não leva em conta a espessura das diagonais, que influi significativamente nos resultados na faixa citada, fazendo com que o Modo de Falha A seja dominante, ao menos nos modelos analisados.

Finalmente, deve-se salientar que, para conclusões mais definitivas a respeito do assunto abordado neste trabalho, incluindo uma possível formulação para obtenção da capacidade resistente da ligação com diagonais com relação entre diâmetro e espessura superior a $0,05E/f_y$, é necessário prosseguir o estudo, envolvendo análise experimental e, ainda, o processamento de outros modelos numéricos

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio para o desenvolvimento desta pesquisa e para publicação deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Abaqus - *ABAQUS/Standard e ABAQUS/CAE User's Manual version 6.13* (2013) – ABAQUS, Inc. – Rhode Island, United States of America.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 8800:2008 *Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios*, Rio de Janeiro: ABNT.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 16239:2013: *Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações com perfis tubulares*, Rio de Janeiro: ABNT.
- Gerken, F. S. (2003). "*Perfis Tubulares: Aspectos arquitetônicos e estruturais*". Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- Mayor, I. M. S. (2010). "*Análise teórico-experimental de ligações tipo K e KT compostas por perfis tubulares de seção retangular e circular*". Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- Mendanha, F. O. (2006). "*Análise de ligações de perfis tubulares em aço do tipo K e KT*". Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- Requena, J. A. V. e Santos, A. L. E. F. (2007). "*Dimensionamento de ligações em barras tubulares de estruturas metálicas planas*". Coleção Técnico-Científica V&M do Brasil, 44p. Belo Horizonte.