

FORÇA-DESLOCAMENTO EM NÓS TIPO K DE PERFIS TUBULARES RETANGULARES DE AÇO

Delma P. Caixeta*, Raquel S. L. Rade* e Francisco A. R. Gesualdo*

* Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC)
Universidade Federal de Uberlândia, UFU
Av. João Naves de Ávila, 2121, B. Santa Mônica
38 408-902 Uberlândia, MG, Brasil
e-mail: delmapc@mecanica.ufu.br

^ Faculdade de Física (FAFIS)
Universidade Federal de Uberlândia, UFU
Av. João Naves de Ávila, 2121, B. Santa Mônica
38 408-902 Uberlândia, MG, Brasil
e-mail: rslr@ufu.br

* Faculdade de Engenharia Civil (FECIV)
Universidade Federal de Uberlândia, UFU
Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1Y
38 408-902 Uberlândia, MG, Brasil
e-mail: gesualdo@ufu.br

Key words: nós tubulares, modelagem em elementos finitos, carga última, nó tipo K, solda.

Abstract: *Este artigo descreve a análise elásto-plástica em elementos finitos de nós tipo K uniplanares de seção quadrada simplesmente apoiados com ou sem solda, sob ação exclusiva de força axial aplicada nas diagonais, variando-se a malha, número de elementos na espessura da barra e comprimento das mesmas, a fim de verificar as respostas não lineares através do gráfico força-deslocamento. Utiliza-se o critério da deformação limite de LU et al (1994) para determinar a força última do nó com e sem solda, e apresenta-se uma análise comparativa das características da malha, bem como a quantidade de elementos na espessura da barra e os valores das forças últimas.*

1 INTRODUÇÃO

O uso das seções estruturais tubulares tem crescido significativamente ao longo dos últimos anos não só no Brasil, mas também em todo o mundo, principalmente a partir da década de 70, quando arquitetos, projetistas e construtores buscavam tecnologias construtivas de estruturas que tivessem boa aparência, mas que também fossem resistentes aos mais variados tipos de solicitações.

Nós tubulares soldados são amplamente utilizados em estruturas de plataformas marítimas de gás ou óleo e na construção metálica como um todo. Porém, tais nós representam pontos estruturais vulneráveis e conseqüentemente torna-se necessário desenvolver métodos confiáveis para a determinação da sua força última.

O nó tubular de uma estrutura é o resultado da união de barras de seção tubular através da solda, resultando em um elemento capaz de transmitir os esforços das barras diagonais às barras do banzo. A solda cria mudanças nas propriedades mecânicas do material junto à ligação, tais como: capacidade última do material, ductilidade do aço e variações no limite de escoamento. Estas variações podem ser medidas através de um modelo computacional, utilizando elementos finitos ou elementos de contorno, por exemplo, ou através de medidas experimentais em laboratório. A dificuldade básica em medir tais variações através de experimentação está em controlar as condições de apoio do nó, já que deve-se criar uma condição de apoio que represente com fidelidade a continuidade das barras (banzo ou diagonal) até o nó.

Testes com este tipo de estrutura em escala real têm um alto custo, além de consumir um tempo muito grande para obter um número razoável de resultados. Poder-se-iam fazer testes em um modelo reduzido ou usar outros materiais que não o aço (resinas por exemplo), mas isto também geraria o problema de relacionar os resultados dos testes ao comportamento dos nós em escala real e o material aço, respectivamente. Diante deste quadro, optou-se pela análise numérica, em que obtêm-se bons resultados de maneira rápida e com custos reduzidos. A precisão dos resultados em elementos finitos depende substancialmente de fatores como a característica da malha utilizada, o tipo de elemento e formulação empregada. Embora a análise em elementos finitos seja usada em grande escala para a determinação da resistência estática de nós tubulares, ainda existem poucas publicações relativas ao modelagem de nós tipo K empregando perfis quadrados.

Apresenta-se neste trabalho, um estudo numérico da resistência estática de nós tubulares planares tipo K com “gap” de seção quadrada, usando o método dos Elementos Finitos, através do programa computacional ANSYS^{®1}. O objetivo deste trabalho é estabelecer os primeiros parâmetros que influenciam a resistência estática deste tipo de estrutura, tais como, forma mais adequada de modelagem do nó, escolha do tipo de malha e elemento, condições de contorno, modo de carregamento e comprimento do banzo/diagonais.

Utilizou-se para a modelagem em elementos finitos, elementos tridimensionais (SOLID45, ANSYS[®]) para obter grandes deformações, soluções elasto-plásticas para a resistência estática de nós simplesmente apoiados tipo K, sujeitos exclusivamente a força axial de tração e compressão aplicada nas diagonais. Estas análises foram feitas a fim de determinar a

influência dos vários parâmetros que interferem na resistência do nó, tais como, tipo do material, característica da malha, número de elementos através da espessura das barras, número/tamanho dos elementos utilizados e condições de apoio do banzo.

Para a determinação da força última do nó, utilizou-se um critério⁷ que abrange todos os tipos de nós tubulares soldados.

Apresentam-se também recomendações com relação ao tipo de elemento, modelo do material, comprimento das barras e característica da malha, de forma a obter maior precisão na determinação da força máxima.

2 PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DO NÓ ANALISADO

As dimensões básicas que descrevem um nó tubular K de seção quadrada são o lado da seção do banzo (b_0), o lado da seção das diagonais 1 e 2 (b_1 e b_2), a espessura do banzo (t_0), a espessura das diagonais 1 e 2 (t_1 e t_2), o ângulo entre o eixo das diagonais e o eixo do banzo (θ_1 e θ_2) além do comprimento do banzo e diagonais 1 e 2 (L_0 , L_1 e L_2 respectivamente).

Quando se estuda o comportamento de um nó tubular devem ser levadas em consideração variações nos parâmetros geométricos adimensionais deste nó. Os principais parâmetros que influenciam no comportamento de um nó tubular são: β , α , γ e τ . A relação β dá uma idéia de quanto a junta se apresenta compacta, o que influencia na concentração de tensões do nó na região de interseção, relacionando de uma forma direta com as deformações locais das paredes dos tubos⁹. O máximo de concentração de tensões acontece para relações β em torno de 0,5; a relação α fornece uma indicação do comportamento do banzo à compressão, assemelhando-se a uma viga; já a relação γ fornece valores da rigidez radial do tubo, dando uma indicação de quanto o banzo pode ser considerado como um tubo de parede fina, sendo que os fatores de concentração de tensões (FCT) crescem com o aumento de γ ; e por último a relação τ dá a indicação se o banzo pode falhar ou não antes que a seção transversal das diagonais fracture. O aumento de τ faz aumentar também FCT. Outro fator que precisa ser analisado é a variação do “gap” (g) e conseqüentemente da excentricidade (e).

A tabela 1 apresenta os parâmetros geométricos do nó analisado.

Tabela 1 – Parâmetros Geométricos do nó

Banzo		Diagonal 1		Diagonal 2		γ_0	β_1		τ_1	γ_1	β_2		τ_2	γ_2	τ_2	α_0	α_1	α_2
b_0 (mm)	t_0 (mm)	b_1 (mm)	t_1 (mm)	b_2 (mm)	t_2 (mm)	$b_0/2t_0$	b_2/b_0	t_2/t_0	$b_2/2t_2$	b_2/b_0	t_2/t_0	$b_2/2t_2$	t_1/t_2	$2L_0/b_0$	$2L_1/b_1$	$2L_2/b_2$		
178	9,5	102	4,8	102	4,8	9,37	0,57	0,51	10,63	0,57	0,51	10,63	1,00	22,47	35,29	35,29		

A figura 1 representa as características do nó analisado bem como as condições de apoio e carregamento do nó.

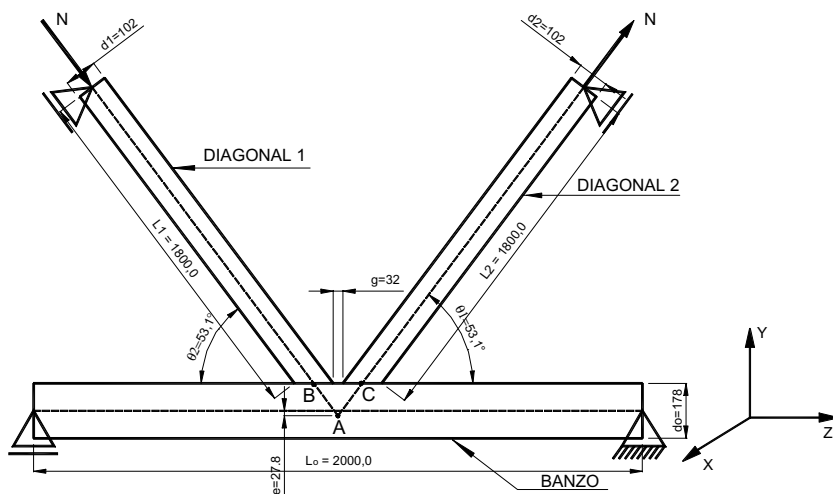


Figura 1 – Configuração do nó

3 MODELAGEM DOS NÓS RETANGULARES

A modelagem em elementos finitos garante bons resultados, pois facilita o controle da variação dos parâmetros geométricos dos elementos, tais como as relações β , γ , τ e α , condições de contorno e a consideração ou não da solda. Já na análise experimental, muitas destas variáveis acontecem ao mesmo tempo, dificultando a identificação correta e em separado dos seus efeitos. Porém esta modelagem compreende a etapa mais difícil da análise do nó, já que o volume do nó necessita ser subdividido em volumes menores para a perfeita compatibilização da geometria do elemento adotado, no caso o elemento tetraedro com oito nós (ANSYS[®], SOLID45).

Com relação aos elementos disponíveis para a modelagem², o elemento quadrilátero tipo SHELL é bom quando se deseja analisar efeitos de deslocamento e flexão para forças de membrana e curvaturas. Elemento com quatro nós permite uma variação linear entre os nós dos cantos, enquanto que no elemento de oito nós quadrático é possível a variação através da seleção dos nós de canto e intermediários, sendo que esta variação é definida por uma função de forma. Alternativamente pode-se ter o elemento com 20 nós, utilizado quando se deseja modelar soldas, embora este elemento conduza a erros na análise não linear.

Diminuindo o tamanho do elemento, aumenta-se a precisão dos resultados, porém isto traz um custo muito grande em termos de capacidade computacional, já que faz aumentar o número de elementos e consequentemente o número de nós de interação e equações a resolver.

Procurou-se trabalhar com elementos sólidos com as três dimensões tendo aproximadamente mesma ordem de grandeza, principalmente na região de contato entre banzo e diagonais, ou seja, com um elemento cuja forma se aproximava ao máximo de um cubo, já que elementos muito alongados (paralelepípedos) perdem a precisão na transferência dos dados de um nó para outro. Isto dificulta mais ainda a modelagem da curva do nó tubular. Alternativamente, cria-se volumes para que os elementos, principalmente na região da interseção banzo-diagonais, tornem menos pontiagudos (ângulos entre 20 e 30°, recomendado pelo programa ANSYS^{®1}) e desta forma possa manter os elementos alinhados perpendicularmente a direção dos altos gradientes de tensões. Já em regiões distantes da região de interseção a malha pode ser menos densa, já que esta região não apresenta resultados de interesse para o referente estudo.

A curvatura do canto da seção das juntas na modelagem pode ser desconsiderada⁸, pois, basicamente a curvatura do canto não altera o resultado da força última, e obtém-se um ganho em termos de tempo de análise computacional. Já outros autores a consideram importante na análise⁶. No presente trabalho foi considerado o seu efeito, sendo para a superfície externa, raio igual a duas vezes a espessura da barra (banzo ou diagonal) e raio igual a uma vez a espessura do tubo para superfície interna.

Para diminuir “esforço” computacional trabalha-se com a simetria da seção do tubo, uma vez que o mesmo é quadrado, retangular ou circular. Esta simetria pode ser de um oitavo, um quarto ou metade do nó, dependendo da geometria. No presente trabalho optou-se modelar apenas metade do tubo, pois este é simétrico em relação ao eixo Z, impondo aos eixos de simetria as condições de contorno necessárias para garantir a continuidade do tubo, ou seja, a translação no eixo X foi impedida, conforme eixos representados na figura 1. Com isto consegue-se trabalhar com uma malha mais refinada, com um número maior de elementos por área, porém com menor número de elementos no modelo total, melhorando a precisão dos resultados. A tabela 2 fornece as características de cada malha. Esta tabela fornece a quantidade total de elementos por modelo bem como o tempo computacional aproximado de cálculo dos mesmos, considerando análise não linear tanto geométrica quanto do material. Para computar este tempo considerou-se o equipamento disponível, um processador de 1,2 GB e 512 MB de memória RAM.

Tabela 2 – Características das malhas

Tipo de malha	Nro de elementos na espessura	Nro total de Elementos	Nro total de nós	Tempo de cálculo (min)
Média com solda	1	2148	4428	19
	2	4262	6714	49
Grossa com solda	1	1380	2862	10
	2	2732	4353	24
Grossa sem solda	1	2502	1156	9

Foram realizadas nove análises com o objetivo de verificar o comportamento do nó em termos de força máxima.

4 PARÂMETROS ANALISADOS

A tabela 3 apresenta as características das análises feitas em Elementos Finitos utilizando o software ANSYS®, onde foram realizadas nove análises variando o tipo de malha, número de elementos na espessura, comprimento do banzo e diagonais, direção de aplicação das forças nas diagonais, condições de apoio do banzo e modelo com e sem solda. Para cada análise foram medidas as forças máximas de acordo com o critério de deformação limite adotado⁷ com objetivo de verificar a influência da variação dos parâmetros citados acima no valor desta força. Este critério pode ser resumido da seguinte forma:

- Para um nó que tem uma força pico a uma deformação menor que $3\%b_0$, a força pico é considerada como a força última, onde b_0 é a largura da barra do banzo;
- Para um nó que não tem uma força pico evidente, a deformação limite última depende da relação da força última ($\hat{a} 3\%b_0$) para a força de serviço ($\hat{a} 1\%b_0$). Se esta relação for maior que 1,5, a deformação limite é $1\%b_0$, ou seja, a força de serviço governa o comportamento do nó. Se a relação for menor que 1,5, a deformação limite é $3\%b_0$, ou seja, a resistência do nó é quem governa seu comportamento.

A tabela 4 apresenta os resultados obtidos nas análises das forças à $1\%b_0$ e $3\%b_0$, para as diagonais tracionadas e comprimidas, bem como o valor da relação $N 3\%b_0 / N 1\%b_0$. Através dos resultados pode-se verificar que em todos os casos esta relação deu menor que 1,5. Portanto, a força última considerada foi a relativa à deformação limite de $3\%b_0$.

Tabela 3- Características dos modelos em EF

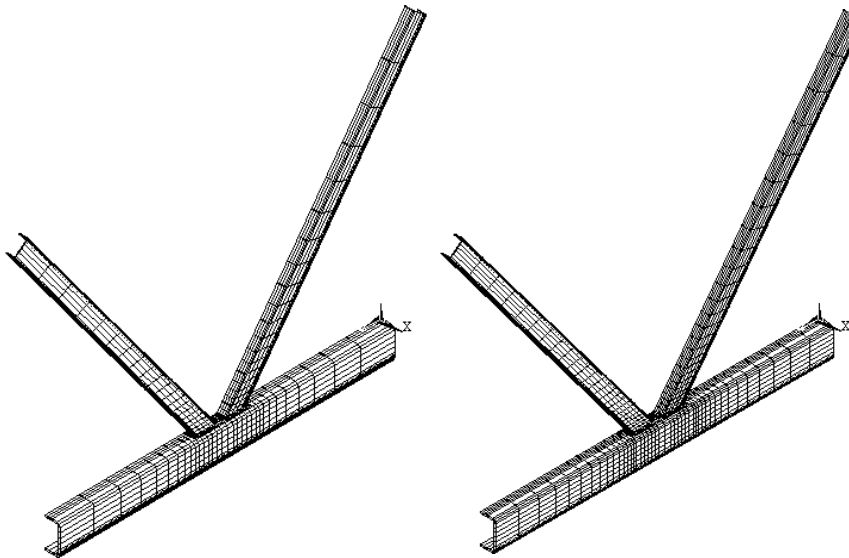
Análise	Direção da Força aplicada		Comprimento das barras (mm)			Elemento na espessura
	D1	D2	Banzo	D1	D2	
1	- N	+ N	2 000	1 800	1 800	1
2	- N	+ N	2 000	1 800	1 800	2
3	- N	+ N	2 000	1 800	1 800	1
4	- N	+ N	2 000	1 800	1 800	2
5	- N	+ N	2 000	1 800	1 800	1
6	- N	+ N	1 000	1 800	1 800	1
7	- N	+ N	1 000	900	900	1
8	+ N	- N	1 000	900	900	1
9	+ N	- N	1 000	900	900	1

Tabela 4- Resultados para as diagonais

Análise	N 1%bo (kN)		N 3%bo (kN)		N 3%bo/N 1%bo		N máx (kN)	
	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2
1	-276,74	+247,55	-305,22	+326,52	1,10	1,32	-305,22	+326,52
2	-219,48	+217,19	-249,91	+280,11	1,14	1,29	-249,91	+280,11
3	-257,55	+255,71	-283,10	+329,27	1,10	1,29	-283,10	+329,27
4	-177,63	+183,73	-194,56	+225,18	1,10	1,23	-194,56	+225,18
5	-264,41	+259,69	-296,08	+317,97	1,12	1,22	-296,08	+317,97
6	-276,52	+278,52	-302,28	+346,10	1,09	1,24	-302,28	+346,10
7	-270,41	+273,49	-314,87	+346,33	1,16	1,27	-314,87	+346,33
8	+286,73	-271,36	+350,87	-320,85	1,22	1,18	+350,87	-320,85
9	+281,45	-271,49	+346,41	-321,90	1,23	1,19	+346,41	-321,90

4.1 Influência do refinamento da malha

Para verificar a influência do aumento da densidade da malha foram analisadas duas malhas com densidades diferentes de elementos (análises 1 e 3 – figura 2(a) e figura 2(b) respectivamente).



(a) Malha menos refinada (1380 elementos)

(b) Malha mais refinada (2148 elementos)

Figura 2 – Refinamento da malha: análises 1 e 3

Procurou-se trabalhar com uma malha de elementos bem pequenos na região de interseção das diagonais com o banzo, já que aí se tem um gradiente de tensões muito alto (“hot spot”). Nas extremidades das barras, onde as concentrações de tensões são baixas, trabalhou-se com elementos maiores. O ideal seria trabalhar com todos os elementos de mesma proporcionalidade, e preferencialmente com elementos sólidos aproximando-se de um cubo, com as três dimensões praticamente da mesma ordem de grandeza. Isto melhora os resultados. Por outro lado, isto geraria uma quantidade muito grande de elementos o que tornaria o cálculo quase impossível, haja vista os equipamentos computacionais disponíveis até o presente momento. A figura 3 mostra em detalhes o refinamento da malha do modelo com malha menos refinada com e sem solda respectivamente (a) e (b).

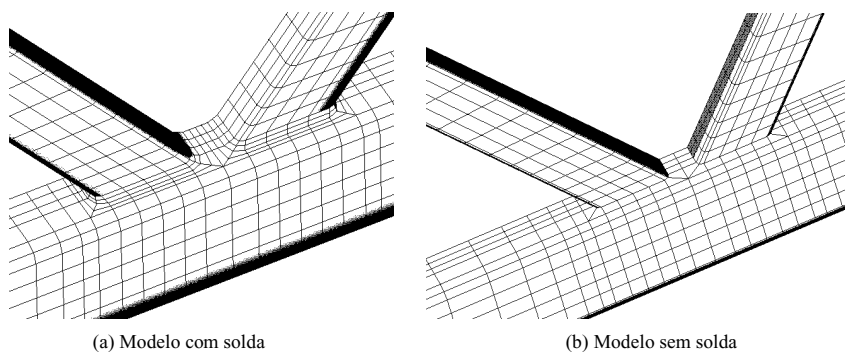


Figura 3- Detalhe do refinamento da malha

A figura 4 mostra a curva força x deslocamento para estas duas análises. A medida do deslocamento foi tomada como a mudança no comprimento entre dois pontos A e B para diagonal 1 e A e C para a diagonal 2, como indicado na figura 1. O ponto A foi tomado em um nó localizado o mais próximo possível do eixo de simetria do banzo, na parte externa da barra. Já os pontos B e C foram tomados na interseção do eixo de simetria do banzo com o eixo de simetria das diagonais 1 e 2 respectivamente. Verifica-se que há uma variação pequena no valor da força última quando se varia a quantidade de elementos na malha, não chegando a 8% no caso da diagonal comprimida.

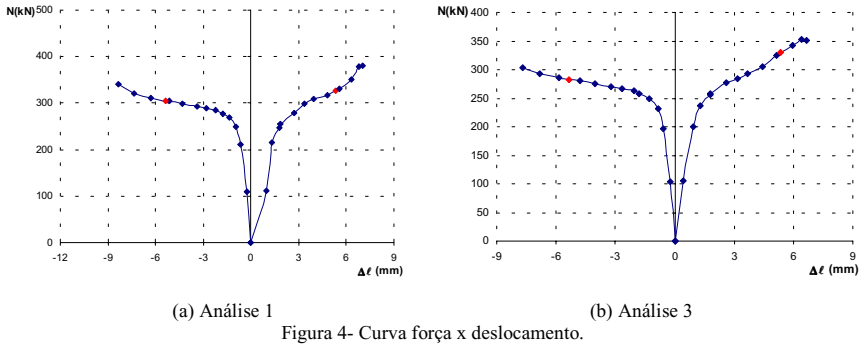


Figura 4- Curva força x deslocamento.

4.2 Influência do número de elementos na espessura

A figura 5 apresenta os gráficos força x deslocamento para as análises 2 e 4 em que tem-se a força última para modelos com dois elementos na espessura das barras. Estes gráficos podem ser comparados com as análises 1 e 3 (análise 1 com análise 2; análise 3 com análise 4) para verificar a influência da variação do número de elementos ao longo da espessura da barra. Verifica-se que para malha menos refinada essa variação não chega a 23% da análise 1 para a análise 2. Já com uma malha mais refinada esta redução é bem significativa, em torno de 46% de redução da análise 3 para a análise 4.

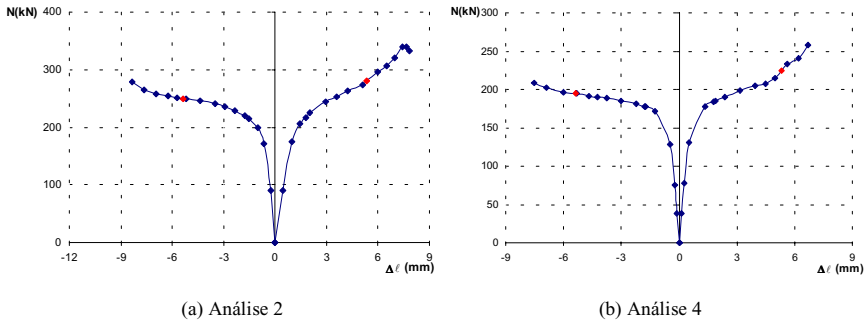


Figura 5 – Curva força x deslocamento.

4.3 Condições de contorno e carregamento das barras

Utilizaram-se as condições de apoio fixo e móvel nas extremidades do banzo e apoio móvel nas diagonais. Como foi usado o elemento SOLID45, o apoio fixo pode ser entendido como um engaste, já que este tipo de elemento apresenta apenas 3 graus de liberdade, que são as translações nos respectivos eixos cartesianos X, Y e Z. Impedindo-se estas 3 translações,

impede-se todos os deslocamentos, inclusive as rotações. A figura 6 abaixo mostra as condições de apoio e carregamento adotadas.

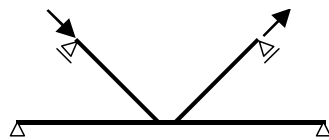


Figura 6 – Condições de apoio e de carregamento do nó analisado

O carregamento foi aplicado, dando-se um deslocamento na extremidade de cada barra diagonal na direção de seu próprio eixo, sendo de tração e/ou compressão. Nas primeiras análises o carregamento é aplicado nas duas diagonais de forma balanceada, já que foi aplicado o mesmo deslocamento de tração ou compressão para as duas diagonais. As análises 7 e 8 são invertidas com relação ao deslocamento aplicado nas diagonais. As análises 8 e 9 são invertidas com relação às condições de apoio aplicadas no banzo. As figuras 7(a) e 7(b) mostram os gráficos força x deslocamento para as análises 8 e 9, respectivamente.

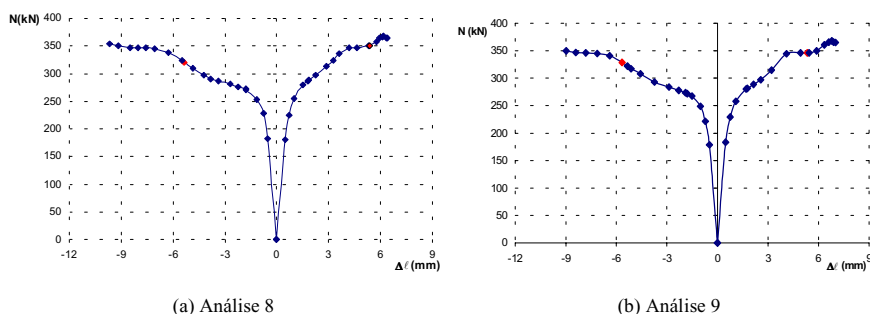


Figura 7 – Curva força x deslocamento

4.4 Propriedades dos materiais das barras

Modelou-se na análise tanto a não linearidade geométrica quanto a do material, de forma a obter resultados o mais próximos dos reais. A análise linear não está de acordo com o comportamento real do material, já que este apresenta fase elástica e fase plástica, e na análise linear só se observa a fase elástica, descrevendo, portanto, um comportamento irreal.

A não linearidade geométrica se faz necessária neste tipo de análise, de maneira a permitir mudanças significativas na forma da parede do banzo durante a deformação³, não permitindo mais a superposição de efeitos. Na análise em elementos finitos considerou-se para o comportamento do material o diagrama tensão-deformação como sendo elásto-plástico com curvatura bi-linear. No software ANSYS^{®1} isto equivale a dizer que foi usado material plástico com encruamento isotrópico (material tipo BISO). A figura 8 mostra um aspecto

geral deste tipo de diagrama. Trabalhou-se aqui com valores da tensão de escoamento (σ_y) e tensão de ruptura (σ_u) encontrados em catálogos de fabricantes brasileiros de perfis tubulares¹⁰ para aço tipo SAE 1020 com alongamento mínimo de 23%. Tanto a NBR 8800 quanto o catálogo do fabricante consideram a tensão de ruptura do material σ_u aproximadamente igual a 1,45 vezes a tensão de escoamento σ_y . Os valores adotados foram de 240 MPa e 415 MPa para a tensão de escoamento e tensão de ruptura respectivamente. O módulo de elasticidade (E) na fase elástica foi adotado igual a 205000 MPa e coeficiente de Poisson (ν) igual a 0,3. Alguns autores¹¹ analisaram o efeito da variação da relação σ_u/σ_y na determinação da força última do nó utilizando a curva tensão-deformação multilinear e verificaram que a variação da relação σ_u/σ_y bem como a forma da curva têm significativa influência na resistência estática do nó e, uma previsão de resistência mais precisa, necessitando levar em consideração ambas variações.

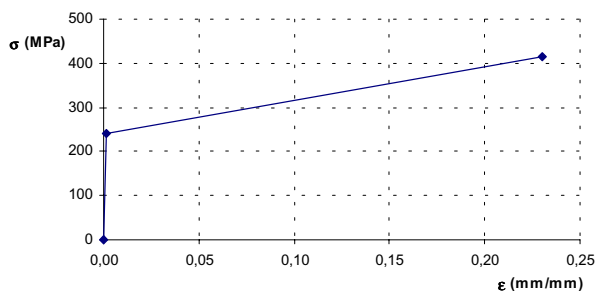


Figura 8- Curva tensão-deformação do modelo bi-linear isotrópico

O material descrito acima foi adotado tanto para as diagonais quanto para o banzo.

Adotou-se o critério de Von Mises para tensão e deformação equivalentes na plasticidade, para verificação das tensões e deformações máximas na interseção das barras.

4.5 Efeito da variação da relação α ($2L_i/b_i$)

Nas análises 6 e 7 variou-se o comprimento das barras, ou seja, variou-se a relação α do banzo e diagonais respectivamente. As figuras 9(a) e 9(b) mostram os gráficos força x deslocamento para as análises 6 e 7. A análise 6 deve ser comparada com a análise 1 (figura 4(a)), já que desta para a primeira variou-se apenas o comprimento do banzo, ficando constante o tipo malha (grossa), a quantidade de elementos na espessura (um elemento) e o comprimento das diagonais. Já a análise 7 deve ser comparada com a análise 6, uma vez que a análise 7 mantém as mesmas características desta última, variando apenas o comprimento das diagonais. Observa-se que variar a relação α tanto para o banzo (análise 6) quanto para as diagonais (análise 7) produz um efeito desprezível no valor da força última.

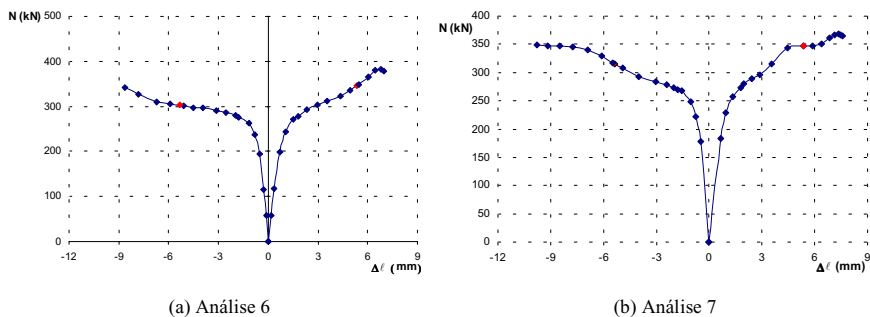


Figura 9 – Curva força x deslocamento

4.6 Efeito da solda

As análises 1 e 5 comparam modelos com e sem solda respectivamente. Considerou-se o mesmo tamanho da perna da solda em todo o contorno das barras diagonais por questões de simplificação da modelagem em elementos finitos. A solda é do tipo filete com $t_w = t_0$. Embora o modelo 5 seja considerado irreal, este foi incluído aqui para fins de comparação para se verificar os efeitos da solda na capacidade última de força do nó. Verifica-se pouca variação do modelo com solda para o modelo sem solda, porém nota-se um aumento na capacidade do nó quando se considera a solda, pois este tem uma rigidez maior devido ao volume da solda. A figura 10 mostra a curva força x deslocamento para esta análise.

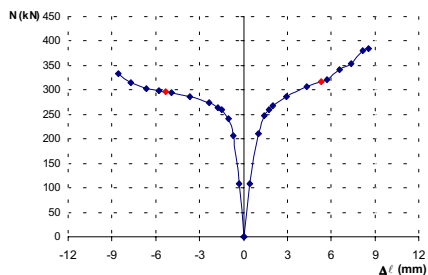


Figura 10 – Curva força x deslocamento para diagonais da análise 5.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observando as figuras 4, 5, 7, 9 e 10 pode-se avaliar o comportamento das barras diagonais quando sujeitas a forças axiais de tração ou compressão para as diversas situações propostas. A tabela 5 faz um paralelo em termos de porcentagens para as nove análises propostas. Uma análise geral dos gráficos mostra que para todas as análises, a força da diagonal tracionada

sempre foi maior que a da diagonal comprimida. Em nós KK multiplanares, alguns autores observaram⁵ o mesmo resultado em seus experimentos, ou seja a barra tracionada resistiu mais que a barra comprimida.

Tabela 5 - Paralelo entre as análises

Análises	Varição (d1) (%)	Varição (d2) (%)
1 e 2	22,13	16,57
3 e 4	45,51	46,23
1 e 3	7,81	-0,84
2 e 4	28,45	24,39
1 e 5	3,09	2,69
1 e 6	0,97	- 5,66
6 e 7	- 4,00	-0,07
7 e 8	- 1,86	- 1,29
8 e 9	1,29	- 0,33

Das análises 1 e 2 em que se pretende analisar a variação do número de elementos na espessura, verifica-se que a análise com dois elementos na espessura apresenta uma capacidade de força menor do que com um elemento na espessura. Estas análises utilizaram uma malha menos refinada, com menor quantidade de elementos na região da interseção entre banzo e diagonais. Também se verifica uma variação maior da força última quando a barra está comprimida do que quando tracionada. Já as análises 3 e 4, que utiliza uma malha mais refinada, verifica-se que a capacidade de carga para as duas diagonais (tracionada e comprimida) apresenta variação praticamente igual e alta, acima de 45%. Já na malha menos refinada esta variação não atingiu 23%. Portanto, conclui-se que variar a quantidade de elementos na espessura das barras do nó causa menor variação da força última para uma malha menos refinada do que para uma malha mais refinada, e que a malha com um elemento na espessura produz uma força última maior do que a malha com dois elementos na espessura.

Das análises 1 e 3 ou 2 e 4 verifica-se a influência de se usar malhas diferentes conservando a mesma quantidade de elementos na espessura. Vê-se que a malha menos refinada apresenta valores de força última bem superiores daquela com a malha mais refinada e que a malha com dois elementos na espessura apresenta variação muito maior do que aquela com um único elemento, não sendo esta variação superior a 29% no caso da diagonal comprimida.

Os resultados da análise 6 com um comprimento de banzo 50% menor do que o da análise 1, mas com a mesma malha na região de interseção, mostrou uma variação muito pequena na força última de ambas diagonais, não sendo esta variação superior a 6%. Esta mesma conclusão foi tirada pela maioria dos autores que já analisaram outros tipos de nós, ou seja, o comprimento do banzo tem pouca influência na força última do nó. O mesmo acontece

quando se varia o comprimento das diagonais (análises 6 e 7). A relação entre as forças últimas para estas análises foi menor do que no caso do banzo, atingindo um máximo de 4%. Nas análises 6 e 7, as relações α_1 e α_2 são maiores que 15 ($\alpha_1=\alpha_2=35,29$ para análise 6 e $\alpha_1=\alpha_2=19,61$ para análise 7), logo o efeito de perturbação nas extremidades das barras é desprezado⁴, o que pode ser verificado pela porcentagem pequena de variação entre as duas relações. O mesmo se observa na análise 1, relação maior que 15. Já na análise 6, a relação α_b é menor que 15 ($\alpha_b=11,24$), ocorrendo perturbações na extremidade das barras que podem interferir no valor da força última, principalmente na diagonal tracionada. A variação neste caso quase chegou a 6%.

As análises 7 e 8 mostram o que ocorre em termos de força última quando se inverte a forma de aplicação da força nas diagonais, ou seja, a barra tracionada passa a ser comprimida e a barra comprimida a ser tracionada. O que se verifica é uma variação muito pequena na barra que passa a ser tracionada e uma variação um pouco maior na barra que passa a ser comprimida.

A inversão das condições de apoio do banzo, tal que o apoio fixo passe a trabalhar como apoio móvel e o apoio móvel como fixo (análises 8 e 9) não causa nenhum efeito na força última das diagonais. A variação não chegou a 1,5% no caso da diagonal tracionada, portanto pode-se desprezar este efeito. Logo não tem grande importância para determinação da força última saber qual extremidade do banzo está com apoio fixo ou apoio móvel. O importante é considerar um fixo e outro móvel, ou seja o banzo funcionando como uma viga bi-apoiada.

6 CONCLUSÕES

O trabalho apresentado até aqui serviu como início à compreensão sobre o comportamento dos nós tubulares tipo K com “gap” em termos de modelagem da região de interseção banzo/diagonal e para determinação da força última do nó. Do estudo feito pode-se concluir que:

- É necessário experimentar várias malhas até se chegar à que apresente uma configuração compatível com o elemento utilizado. Como utilizou-se elemento sólido (ANSYS, SOLID45), a malha deve privilegiar os elementos em cubo. A etapa da modelagem compreende a etapa mais difícil e trabalhosa na análise de nós tubulares;
- A inversão das condições de apoio do banzo praticamente não tem interferência na resistência do nó, bem como a inversão de aplicação das forças de compressão e tração nas diagonais;
- A variação do comprimento no banzo tem pouca influência na força última das diagonais, bem como o comprimento das diagonais;
- Variar a quantidade de elementos na espessura provoca maiores variações na força última para a malha mais refinada do que na menos refinada, sendo para este caso a barra tracionada a que sofre maior variação;
- O tempo de cálculo aumenta consideravelmente quando se refina mais a malha próximo da interseção banzo/diagonal. Malhas muito refinadas acabam se tornando inviáveis para cálculo em elementos finitos considerando-se o equipamento disponível para cálculo;

- Utilizando o Método dos Elementos Finitos para determinar a força última dos nós tubulares quadrados uniplanares, a solda deve ser incluída no modelo e deve-se utilizar elementos tri-dimensionais para gerar as malhas tanto das barras quanto da solda;
- A solda deve ser considerada na modelagem da ligação, para tornar o modelo realístico. A sua inclusão acarreta um aumento na capacidade última do nó.

Portanto, pode-se trabalhar com uma malha menos refinada, com um elemento na espessura. Esta malha apresenta bons resultados em termos de carga última e o tempo de processamento não é muito grande, considerando o equipamento disponível. Também o comprimento do banzo e diagonais não precisa ser muito grande, podendo trabalhar com uma relação α pequena (em torno de 15), que obtêm-se bons resultados.

7 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] ANSYS user's manual, version 5.5. Swanson Analysis Systems Inc, 1997.
- [2] DAVIES, G. (1998) – *Static Behaviour of Welded Rectangular Hollow Section Connections*. University of Nottingham, Nottingham, UK. 1998.
- [3] HYDE, T.H.; SAAD, S.B.; KHALID, Y.; LEEN, S.B. & WARRIOR, N.A. (1998b)– *A Critical Assessment of the Finite Element Method for Predicting the Static Strength of Tubular T- and YT-joints*. Proceeding: Tubular Structures VIII, Sin"gap"ore, 26 a 28 de agosto de 1998, A.A.Balkema Publisher, pp. 293-302.
- [4] KANG, C.T., MOFFAT, D.G., MISTRY, J. & ONG, K.T. (1998) – *The Effects of Weld Size on the Ultimate Strength of a Double-tee Tubular Joint under Brace Axial Compression or Bending*. Proceeding: Tubular Structures VIII, Sin"gap"ore, 26 a 28 de agosto de 1998, A.A.Balkema Publisher, pp. 227-283.
- [5] LEE, M.M.K. & WILMSHURST, S.R. (1995) - *Numerical Modelling of CHS Joints with Multiplanar Double-K Configuration*. Journal of Constructional Steel Research 32, 1995 281-301.
- [6] LIU, D.K.; YU, Y.; WARDENIER, J. (1998) - *Effects of boundary conditions and chord preload on the strength of RHS uniplanar "gap" K-joints*. Proceeding: Tubular Structures
- [7] LU, L.H., WINKEL, G.D. de, YU, Y. and WARDENIER, J. (1994) – *Deformation Limit for the Ultimate Strength of Hollow Section Joints*, Tubular Structures VI, 341-347, Rotterdam: Balkema.
- [8] OWEN, J.S.; DAVIES, G.; KELLY, R. B. (1996) - *A comparison of the behaviour of RHS bird beak T-joints with normal RHS and CHS systems*. Proceedings, Tubular Structures VII, Balkema, Rotterdam, p.173-180.
- [9] RIPOLI, R.R. (1992) – *Estudo de Concentração de Tensões em Estruturas Oceânicas: Juntas Tubulares Tipo Y e T*. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da USP, São Paulo. 1992.
- [10] VALLOUREC & MANNESMANN TUBES (2000) – *Tubos Estruturais de Seção Circular (MHS): Dimensões, Propriedades Geométricas e Materiais* – Informações Técnicas. Edição Setembro de 2000 VMB.

- [11] WILMSHURST, S.R., MORITA, M. SAKAE, S. & MAKINO, Y. (1998) – *Static Strength tests of CHS KT-joints under axial loading*. Proceeding: Tubular Structures VIII, Singapore, 26 a 28 de agosto de 1998, A.A.Balkema Publisher, pp. 269-276.