Anais das XXXII Jornadas Sulamericanas de Engenharia Estrutural
Maio / 2006 ISBN 85-99956-01-9
Investigações Teóricas, Experimentais, Numéricas e Computacionais
Trabalho JOR0585 - p. 3398-3407

UMA INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DE LIGAÇÕES SOLDADAS DE BARRAS TUBULARES DE AÇO, DO TIPO K, UTILIZADAS EM TRELIÇAS PLANAS

R. F. Vieira [(1)], J. A. V. Requena [(2)], A. M. S. Freitas [(3)], D. G. V. Minchillo [(4)]
[(1) (2) (4)] *UNICAMP - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo*
Depto de Estruturas, Cx. Postal 6021
CEP 13083-970 - Campinas-SP - Brasil – rosi@fec.unicamp.br; requena@fec.unicamp.br; danielag@fec.unicamp.br
[(3)] *EM/UFOP – Escola de Minas / Universidade Federal de Ouro Preto*
DECIV, Campus Universitário Morro do Cruzeiro
CEP 35400-000 – Ouro Preto-MG – Brasil – arlene@em.ufop.br

RESUMO

Este paper apresenta os resultados de uma análise experimental, de uma ligação afastada ensaiada com carga axial de compressão no montante, utilizada em estruturas metálicas planas, tendo como ponto de partida a verificação do comportamento global da ligação. Será avaliada uma ligação de treliça do tipo K com barras afastadas. As barras que compõem a ligação, aqui apresentada, possuem seções transversais tubulares circulares soldadas entre si. O modo de colapso da ligação foi devido a plastificação da parede do banzo (uma diagonal tracionando a parede do banzo e o montante comprimindo). Um efeito de ovalisação da seção transversal do banzo na região do afastamento foi observada. O dimensionamento da ligação segue o Método dos Estados Limites, no qual as resistências de cálculo são verificadas. As barras envolvidas nesta ligação também sofrem a influência de momentos adicionais provocados por excentricidades. O estudo será feito através de uma análise comparativa entre uma solução analítica fornecida por normas técnicas internacionais, uma análise experimental e uma modelagem numérica via Ansys. Na modelagem numérica foi utilizado o elemento shell 181, com 4 nós por elemento. A finalidade deste estudo é o entendimento do comportamento desta ligação, possibilitando assim, a disseminação desta concepção estrutural ainda pouco explorada no Brasil para viabilizar a execução de projetos otimizados.

Palavras-chave: Estruturas de Aço, Ligações, Barras Tubulares, Análise Experimental.

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta um estudo teórico-experimental sobre uma ligação soldada de barras tubulares tipo K, chamada aqui de ligação YT devido sua configuração, tendo barras afastadas (gap) e excentricidade positiva. Essa avaliação é mostrada através do dimensionamento de uma ligação YT através das recomendações de projeto para os estados limites propostas nos trabalhos de PACKER & HENDERSON [1], CIDECT [2] e RAUTARUUKKI [3]. Os protótipos assim dimensionados foram fabricados com tubos laminados sem costura cedidos pela V&M do Brasil em um total de quatro. Um Pré-ensaio foi realizado com instrumentação reduzida para avaliar as condições de estabilidade do pórtico de ensaio e definição do procedimento de ensaio.

2 PROTÓTIPO

A definição do protótipo e de sua instrumentação teve vários fatores. Um deles foi o tamanho do pórtico de ensaio que limitou o seu comprimento, outro fator foi a disponibilidade dos perfis V&M que definiu os tubos a serem utilizados. A instrumentação inicial teve por base o trabalho de FUNG et al [4] e [5]. O protótipo assim definido é mostrado na figura 1.

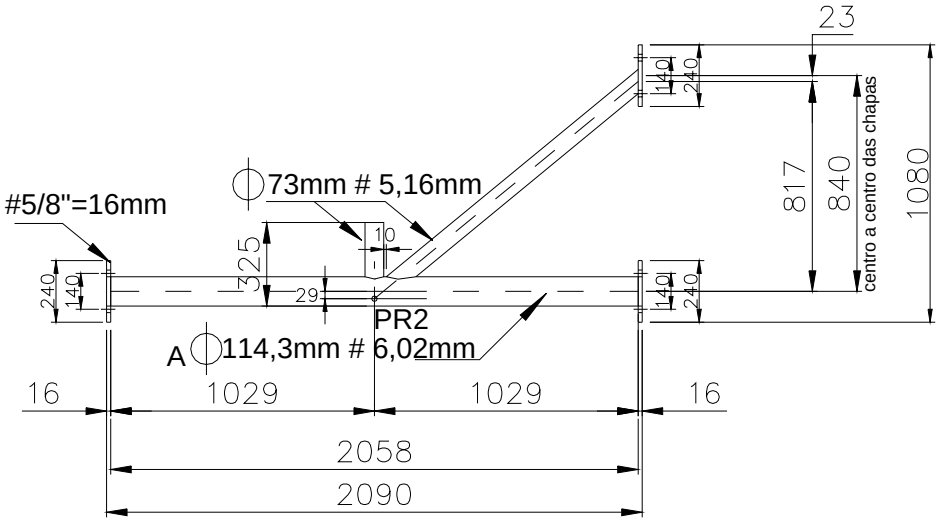


Figura 1 - Protótipo da ligação YT.

3 DIMENSIONAMENTO DA LIGAÇÃO YT

O dimensionamento da ligação YT foi apresentado por VIEIRA [6]. No dimensionamento esta ligação foi considerada satisfatória para N=135kN de compressão no topo do montante.

4 ENSAIOS

Foram realizados três ensaios chamados Ensaio I, Ensaio II e Ensaio III. A figura 2 mostra um esquema estrutural idealizado na forma de diagrama de linha e o

esquema estrutural real do protótipo da ligação YT, onde uma célula de carga aplica uma força de compressão no topo do montante. A fixação do protótipo no pórtico se dá através de quatro parafusos por chapa de extremidade simulando um semi engaste.

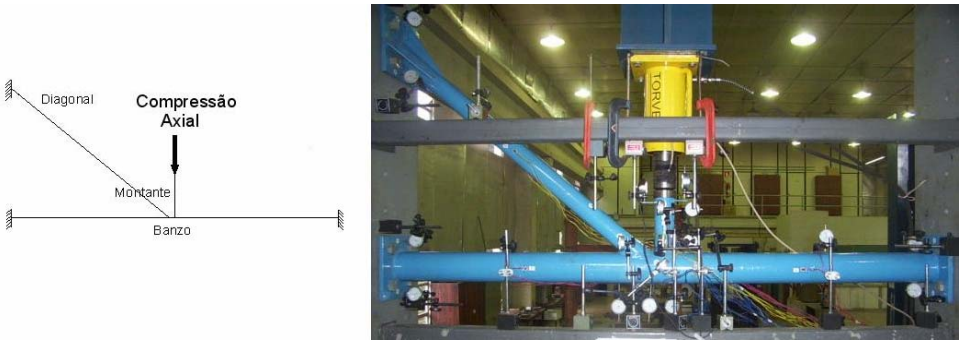


Figura 2 - Diagrama de linha da ligação YT.

O topo do montante recebe o carregamento axial de compressão da célula de carga através de rótulas côncava e convexa, ver figura 3. A rótula côncava para o topo do montante foi rebaixada na face inferior para um melhor encaixe. Isto permite que a carga seja aplicada de forma o mais centrada possível para diminuir possíveis excentricidades. A ligação entre a rótula da célula de aplicação de carga e a rótula do topo do montante foi bastante lubrificada para diminuir o atrito si.

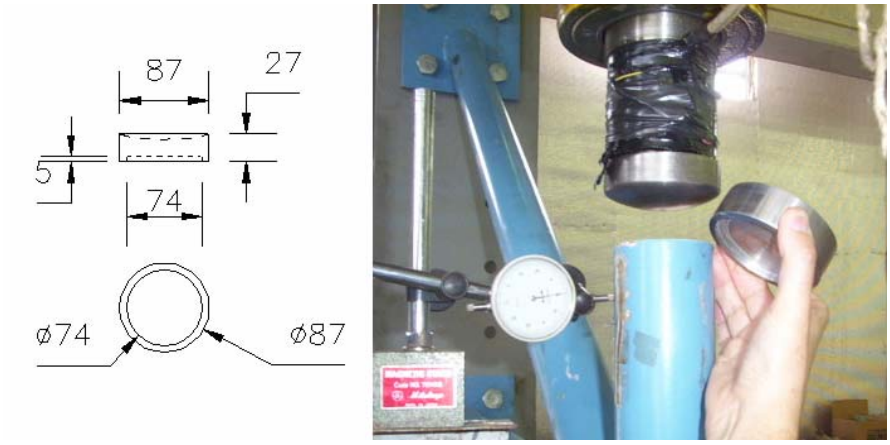


Figura 3 – Rótulas côncava e convexa para aplicação de carga.

4.1 Extensômetros

Foi definida a colocação de 16 extensômetros inicialmente (aqui chamados de EXT) do tipo KFG-5-120-C1-11 para aço, de 5mm de comprimento e medida de deformação em "microstrain" (10^6). Estes EXTs foram colados nos protótipos em lugares pré definidos, inicialmente com base no trabalho de FUNG et al [4], para medir as deformações longitudinais. Eles foram colados longitudinalmente em intervalos de 90^0 no meio de cada barra, conforme figura 4. Para o Ensaio III foram acrescentados os EXT-17, EXT-18, EXT-19 e EXT-20 para medir as deformações localizada na intersecção da ligação, doravante chamada de nó da ligação.

4.2 Transdutores de Deslocamentos

Os transdutores de deslocamentos utilizados (aqui chamados de LVDT) conseguem medir um deslocamento de no máximo 10mm. Um total de 19 LVDTs de leituras manuais e 2 de leituras digitais foram posicionados no protótipo da ligação YT para medir os deslocamentos durante a realização do ensaio. A figura 4 mostra a posição destes LVDTs. Do LVDT-1 até o LVDT-6 são usados para determinar os deslocamentos nas extremidades das barras para avaliar a real condição de contorno. Os LVDT-7 e LVDT-8 são posicionados para determinar o modo de flexão do montante, bem como, a rotação da ligação. Do LVDT-9 até o LVDT-13 são colocados para determinar o movimento do banzo. Os LVDT-14 e DT-15 são usados para avaliar o deslocamento da diagonal. Os LVDT-16 e LVDT-17 são posicionados para medir o deslocamento fora do plano da ligação. O LVDT-18 no banzo e LVDT-19 na diagonal são instalados para capturar o comportameno local do nó da ligação YT. Os LVDT-20 e LVDT-21, que são os transdutores digitais, são usados para medir o deslocamento vertical do topo do montante e também o movimento do atuador de carga.

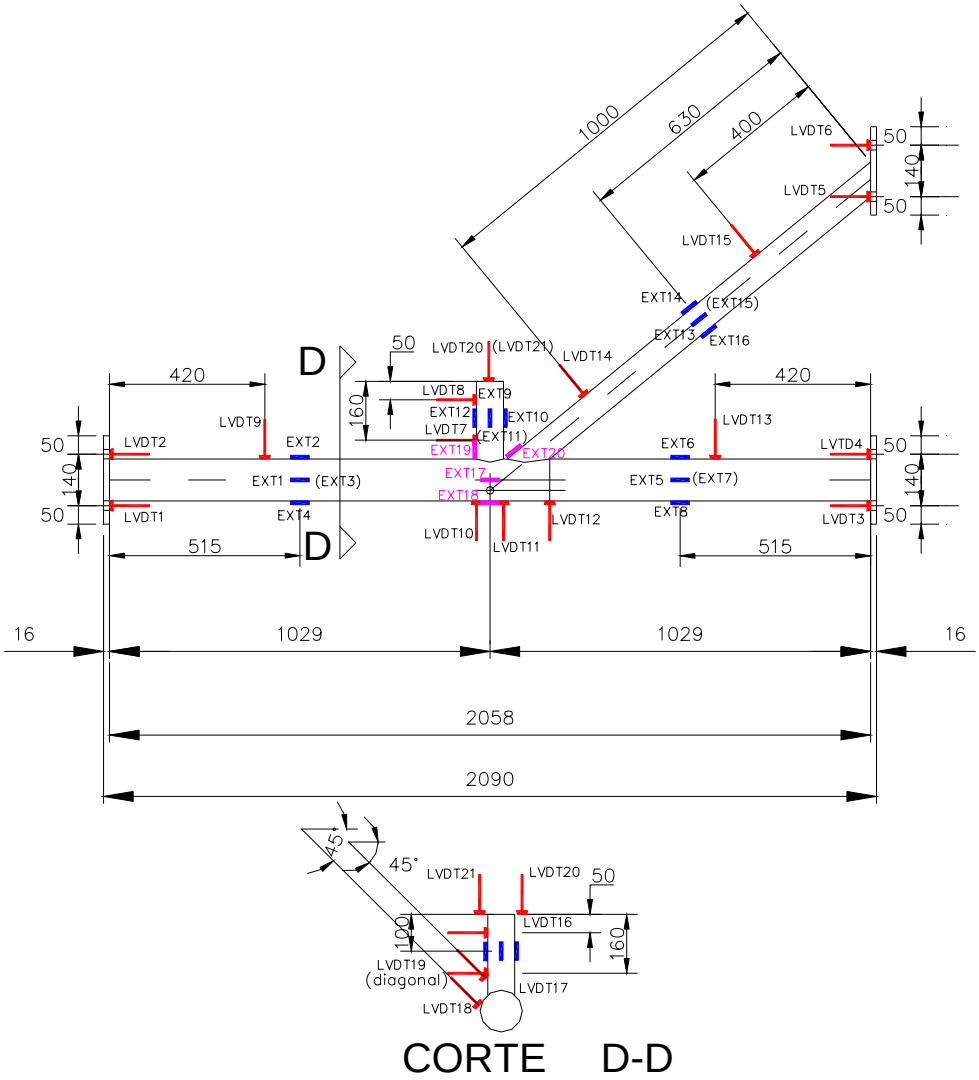


Figura 4 - Localização dos extensômetros e LVDTs na ligação YT.

4.3 Procedimento de Ensaio

Para a realização dos três ensaios foram adotados os seguintes procedimentos:
Estágio I - Antes de começar de fato a realização do ensaio, o protótipo foi submetido a um ciclo de 10 carregamentos, de aproximadamente 20% da carga de colapso estimada para a ligação, para minimizar o atrito e as forças de aperto.Com base no Pré-ensaio essa carga foi estimada em 50kN. Este nível de carga esta dentro do limite elástico do material. A carga foi aplicada em pequenos incrementos até o carregamento máximo suportado pela ligação YT, e depois foi feito o descarregamento.
Estágio II - Durante o ensaio a velocidade do atuador de carga foi o mais lenta e constante possível tanto para o caso de carregamento quanto para o descarregamento. O passo de carga foi previamente definido dependente da fase suposta para cada carregamento. A cada passo de carga, ao atingir a carga pré definida, esperava-se estabilizar as leituras dos transdutores e após eram realizadas as leituras dos 19 transdutores. Através de um paquímetro foi feita a leitura da deformação lateral do banzo (ovalização) no nó da ligação.
Estágio III - Depois da carga última ser atingida, tomada como sendo a última carga suportada pelo protótipo na qual era possível realizar as leituras dos LVDTs, carregava-se até o colapso visível do protótipo. Após o colapso o protótipo era descarregado.

4.4 Resultados do Ensaios

No Ensaio I a solda da diagonal com o banzo rompeu com a carga de 240kN. Por isso a solda no nó da ligação foi reforçada para Ensaio II e III. No Ensaio II, na tentativa de conter o deslocamento fora do plano da estrutura, foram colocadas vigas de contenção lateral na altura do topo do montante e foram feitos ciclos de carregamento e descarregamento para observar o início do escoamento, esse ensaio apresentou um ganho de resistência comprovado pela sua carga última de 270kN. No Ensaio III foram aumentados o número de extensômetros no nó da ligação, esse ensaio apresentou uma carga última de 250kN. Essa carga última do Enasio III foi adotada como a carga última de ensaio para ligação YT. Nos três ensaios a formação do “S” foi bastante evidente indicando que o Modo de colapso predominante é o MODO A, ou seja, plastificação da parede do banzo, ver figura 5.

Figura 5 - Modo A de colapso por plastificação da parede do banzo.

5 MODELAGEM NUMÉRICA

Foi realizada no ANSYS 9.0 utilizando o elemento SHELL 181 para os tubos e SHELL 63 para as chapas de fixação, ver figura 6. Foi levado em conta o efeito da não linearidade física e geométrica. Para a não linearidade física as curvas de Tensão x Deformação foram obtidas através de ensaio de tração, ver figura 7. Essas curvas foram incorporadas no ANSYS através do modelo "Ansys Bilinear" com material do tipo Bilinear Isotropic Hardening (BISO)" e um modelo "Ansys Multilinear" com material do tipo Multilinear Isotropic Hardening (MISO). As condições de contorno foram simuladas no ANSYS através de apoios elásticos. A figura 8 mostra a deformada e a figura 9 mostra as tensões principais (S1) para cada modelo.

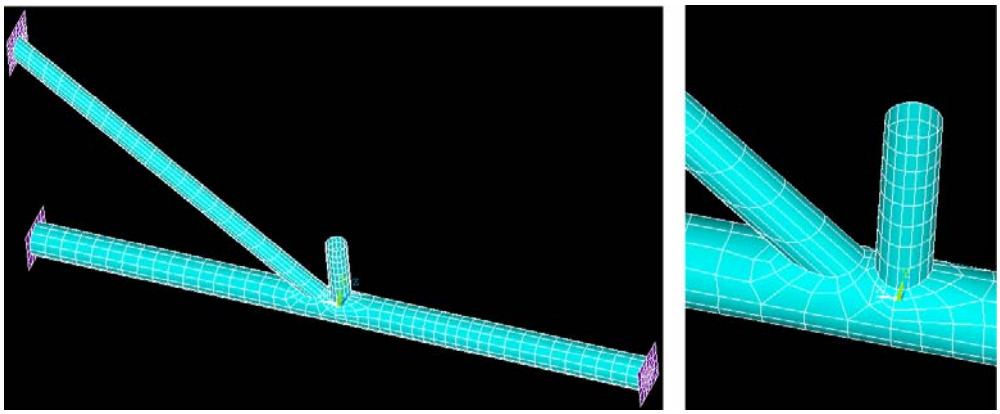


Figura 6 – Modelo de elementos finitos Ansys.

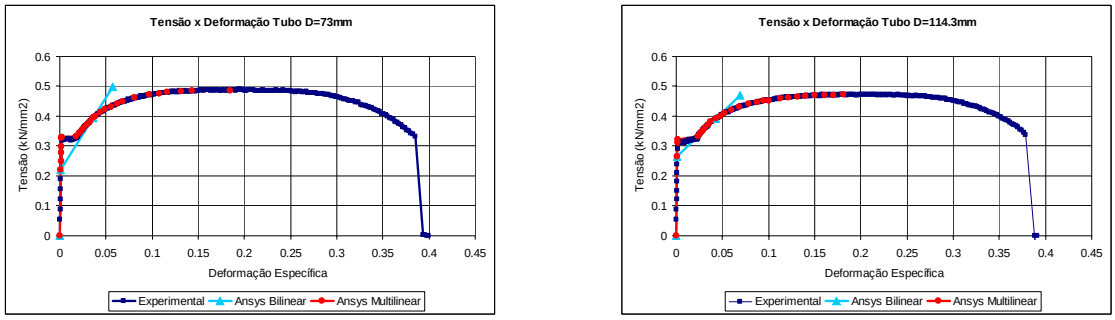


Figura 7 – Curvas Tensão x Deformação.

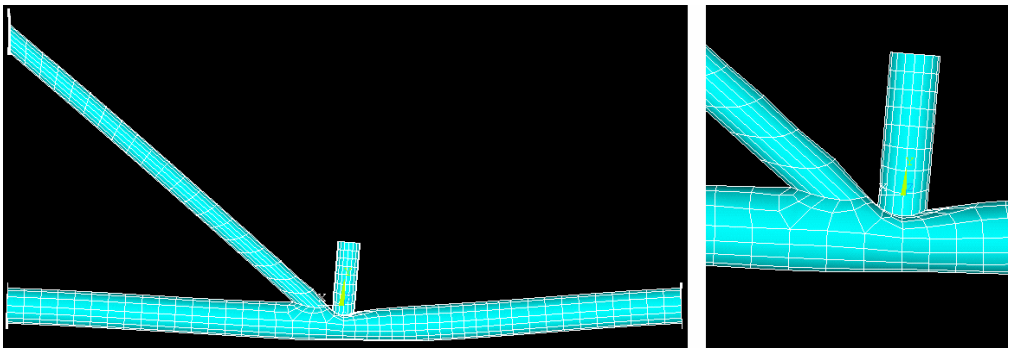


Figura 8 – Protótipo deformado no ANSYS.

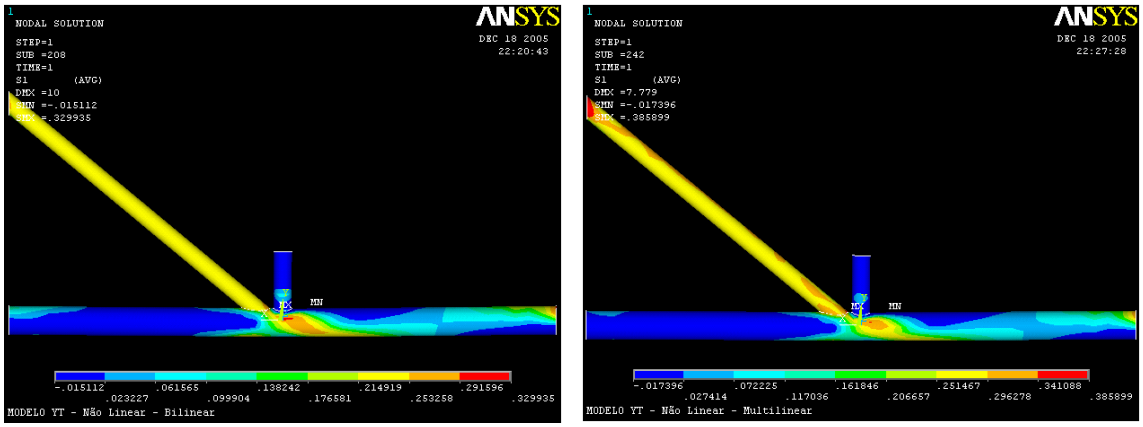
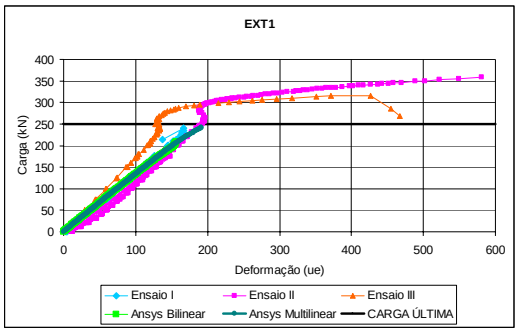
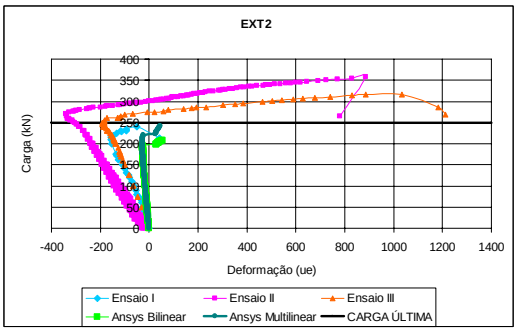


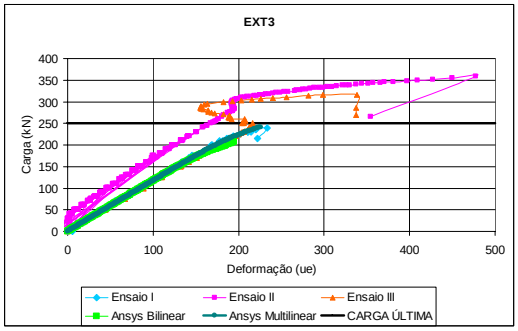
Figura 9 – Tensões principais (S1) para modelo Ansys Bilinear e Ansys Multilinear.

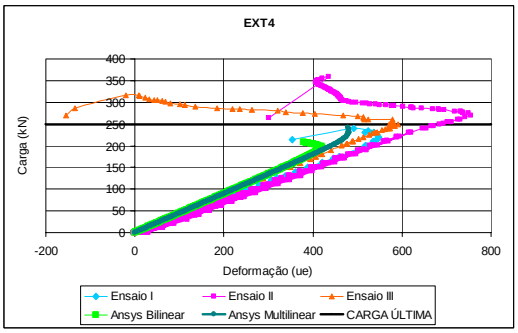
6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

As análises de comparação entre o modelo experimental e o modelo numérico foram baseadas nos resultados das deformações obtidas pelos extensômetros e as deformações obtidas na análise numérica via ANSYS para o modelo Ansys Bilinear e modelo Ansys Multilinear. Esses resultados são mostrados nas Figuras 10, 11, 12 e 13 em forma de gráficos. Tanto a análise do comportamento experimental como as análises numérica identificaram que a região mais crítica da ligação é localizada na região do nó da ligação onde tem-se as maiores tensões, ver figura 9. O modo de colapso encontrado para os três ensaios foi o colapso por plastificação da parede do banzo, MODO A, com nítida formação do "S".









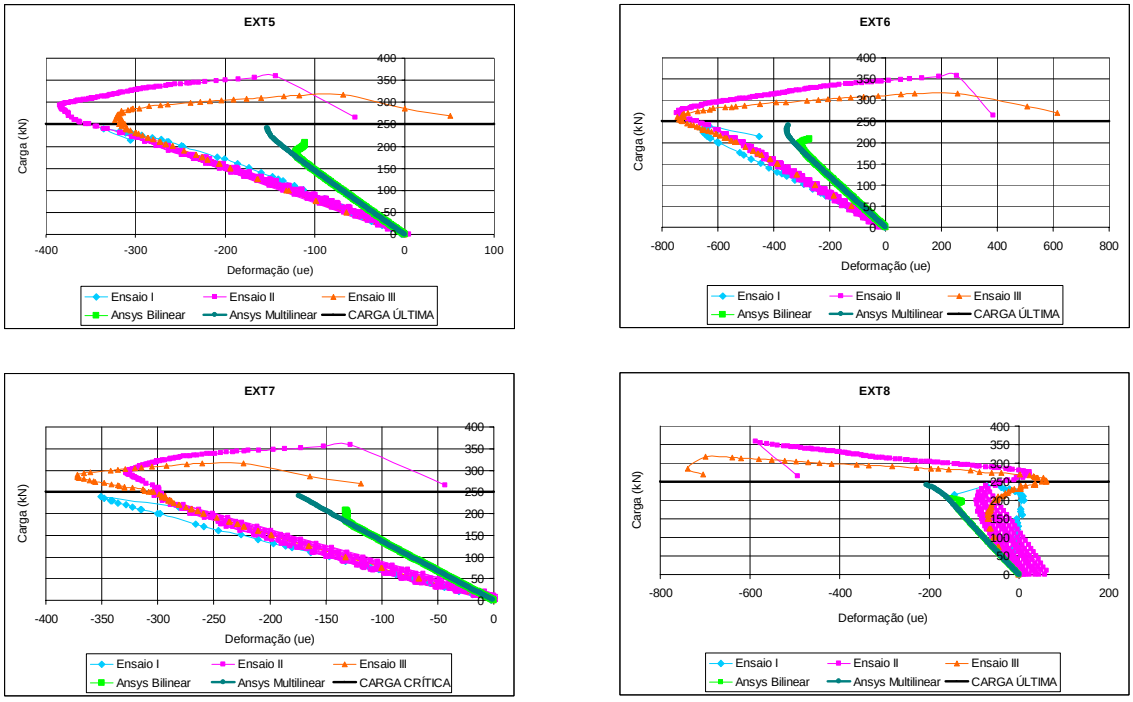


Figura 10 – Deformações no banzo da ligação YT.

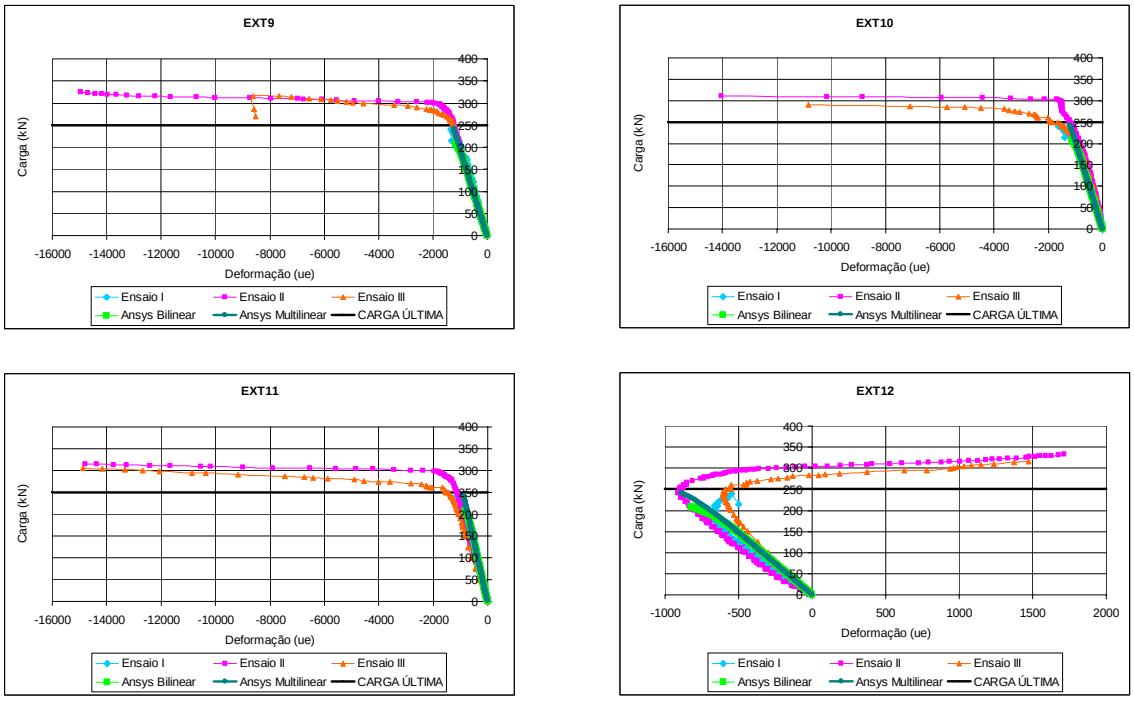


Figura 11 - Deformações no montante da ligação YT.

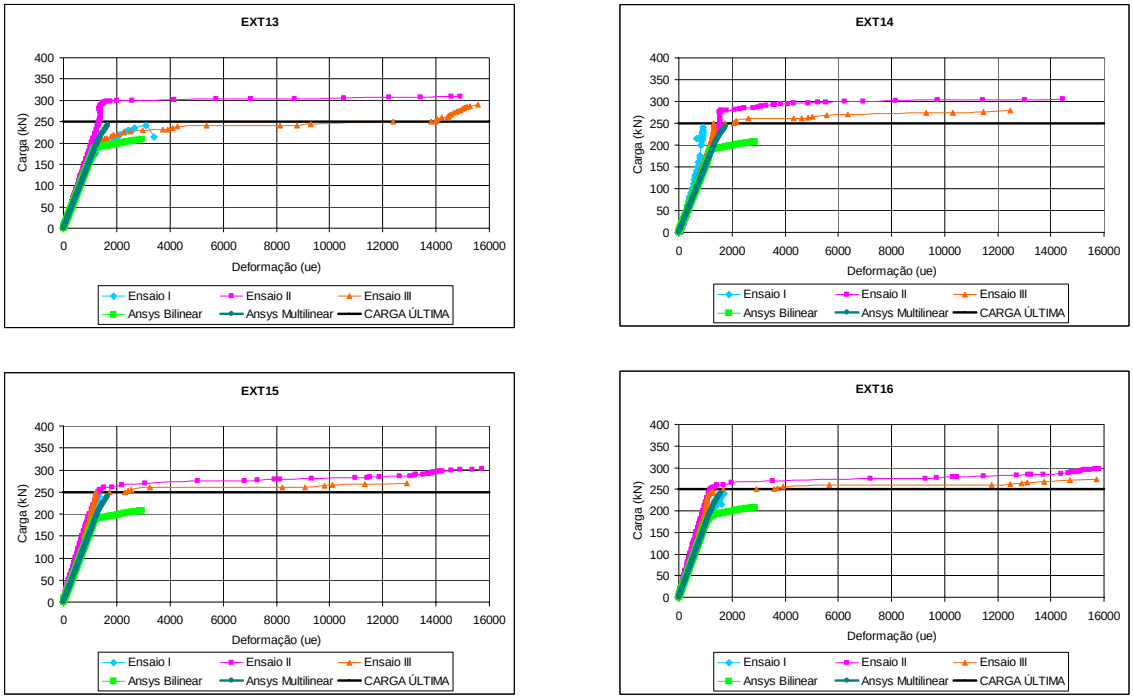


Figura 12 - Deformações na diagonal da ligação YT.

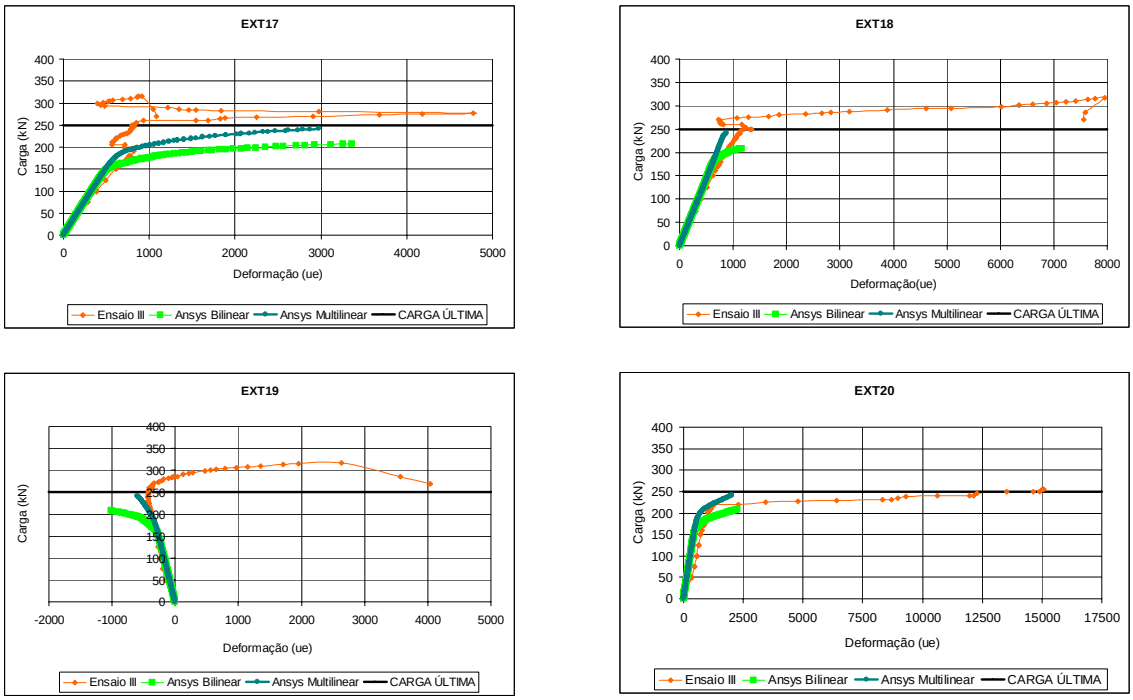


Figura 13 - Deformações no nó da ligação YT.

O modelo Ansys Bilinear não consegue expressar as deformações plásticas que ocorrem no montante e que é confirmada pelos extensômetros e pelo modelo Ansys Multilinear. A carga última do modelo Ansys Bilinear é de 208kN bem abaixo

da carga última de 250kN estimada pelos ensaios e da carga última do modelo Ansys Multilinear que é de 242kN.

7 CONCLUSÕES

Desta forma conclui-se que a análise numérica realizada no modelo de elementos finitos Ansys Bilinear não é capaz de representar a análise experimental realizada nestes protótipos de ligação YT. Para representar o comportamento experimental de ligações tubulares via Ansys recomenda-se a utilização de um modelo numérico cujo material seja representado por curvas multilineares de Tensão x Deformação (MISO).

8 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a V&M do Brasil pelo financiamento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] PACKER, J. A., HENDERSON, J. E. *Hollow structural section connections and trusses: a design guide*. 2nd ed. Ontario: Canadian Institute of Steel Construction. 1997. 446 p.

[2] CIDECT-CONSTRUCTION WITH HOLLOW STEEL SECTIONS. For circular hollow section (CHS) joints under predominantly static loading. - Design guide.1992.

[3] RAUTARUUKKI, OYJ. H. V. *Design handbook for rautaruukki structural hollow sections*. Hämeenlinna. Finland: Otava. 1998. 351 p.

[4] FUNG, T. C., SOH, C. K., GHO, W. M., QIN, F. Ultimate capacity of completely overlapped tubular joints. I: An experimental investigation. *Journal of Constructional Steel Research*. Singapore. v. 57. n. 8. p. 855-880. Aug. 2001.

[5] FUNG, T. C., SOH, C. K., GHO, W. M., QIN, F. Ultimate capacity of completely overlapped tubular joints. II: Behavioural study. *Journal of Constructional Steel Research.* Singapore. v. 57. n. 8. p. 855-880. Aug. 2001.

[6] VIEIRA, R.F. et al. Análise Experimental de Ligações Soldadas de Barras Tubulares de Aço, Utilizadas em Treliças Planas. *III Congresso Internacional da Construção Metálica – III CICOM*. Ouro Preto, MG, Brasil. 2006.