

## FATIGUE STUDY OF THE STEEL SPACE TRUSSES WITH STAKING END-FLATTENED CONNECTIONS.

Cleirton A. S. de Freitas<sup>a</sup>, Luciano M. Bezerra<sup>b</sup> e Maria S. Vieira<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Grupo de Pesquisa em Engenharia Estrutural do Cariri, Universidade Federal do Ceará – Campus Cariri, Av. Tenente Raimundo Rocha S/N, Cidade Universitária, Juazeiro do Norte, Ceará, Brasil andrefreitas@cariri.ufc.br, <http://www.cariri.ufc.br>*

<sup>b</sup>*Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, Campus Darcy Ribeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, Distrito Federal, Brasil lmbz@unb.br, <http://www.unb.br>*

**Keywords:** Stamped connection, Space Truss, fatigue.

**Abstract.** Three-dimensional structures consist of steel bars, generally, connected by bolts at nodes. In Brazil, the connection usually employed in these 3D trusses is the so called typical node, which is produced by stamping the ends of the bars, thus generating a low cost connection. This typical node is also known as a stamped connection. This research presents suggestions to ensure greater safety for truss structures that use the typical node. It is proposed, initially, the use of reinforcement and constructive correction in the connection in order to increase its capacity. Since large roofs are subject to cyclic wind action, this work also examines, for the first time, the behavior of the typical node concerning the fatigue strength. This research, verifies, experimentally and numerically, the strength increase achieved with the proposed construction corrections with regard to static loads and fatigue. At the end of work, it is concluded that the suggestions presented improve the strength and safety of steel space trusses with stamped connections.

## 1 INTRODUÇÃO

As estruturas espaciais são caracterizadas por possuírem elementos de barras entre dois nós descritos em coordenadas tridimensionais. A Figura 1 apresenta os elementos que compõem uma estrutura espacial típica. A ligação é o ponto de intercessão das barras (banzos e diagonais). O sistema de ligação formado com o nó típico é o mais aplicado no Brasil, ver Figura 2. Esse nó típico é constituído por barras com extremidades amassadas unidas por apenas um parafuso. Esse tipo de ligação é o que apresenta maior número de problemas estruturais. Este nó apresenta excentricidade dos esforços, formação de charneira plástica, excesso de rotação e colapso dos elementos com carga inferior as previstas (Souza, 2003).

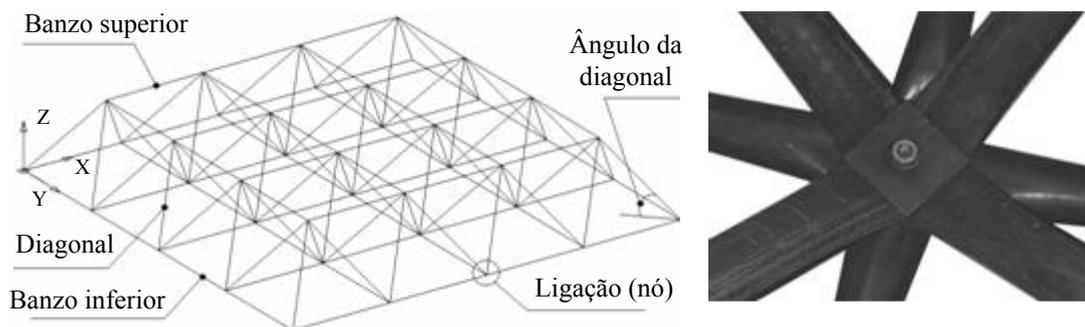


Figura 1: Elementos de uma estrutura espacial (Freitas, 2008)

Figura 2: Nó típico (Souza, 2003)

Freitas (2008) apresentou em sua tese de doutorado uma proposta para aumentar a resistência de estruturas espaciais com nó típico. Inicialmente, destacam-se as excentricidades, “ $E_1$ ” (horizontal, região amassada), e “ $E_2$ ” (vertical, distância entre os pontos A e B), ver Figura 3. Em seguida, Freitas (2008) propôs uma correção na excentricidade da ligação, utilizando um distanciador, Figura 4. Note a correção da excentricidade “ $E_2$ ”, aplicando uma distância “ $d$ ” igual a “ $E_2$ ”, entre os banzos e diagonais. Desta forma os pontos A e B podem ser considerados como sobrepostos.

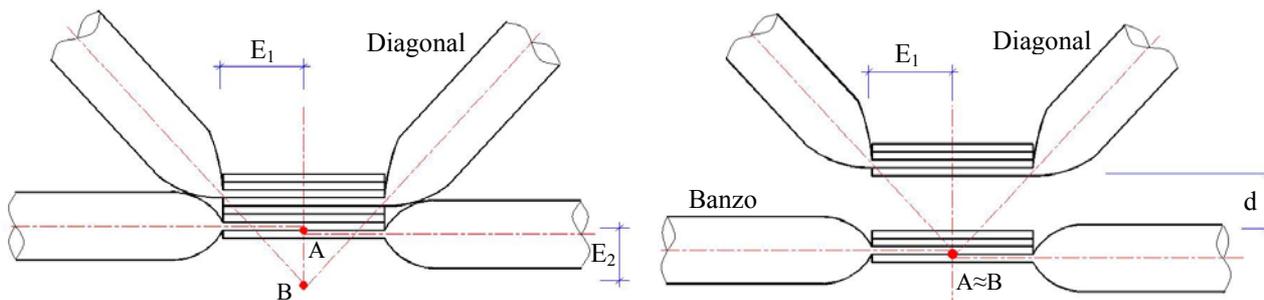


Figura 3: Excentricidade no nó típico

Figura 4: Correção da excentricidade

Freitas (2008) propõe uma distância “ $d$ ”, para o distanciador, de acordo com a Equação (1). Sendo: “ $H$ ” a altura da estrutura, “ $l$ ” o comprimento de um módulo da estrutura, “ $E_1$ ” a metade do comprimento amassado do tubo, “ $t$ ” a espessura do tubo. Esta formulação é válida para estruturas espaciais com configuração quadrado sobre quadrado, com diâmetro dos elementos do banzo igual ao diâmetro das diagonais. Para verificação da teoria proposta foram realizados estudos numéricos, em elementos finitos (Figura 5), e experimentais, em laboratório (Figura 6).

$$d = \frac{2HE_1}{\ell\sqrt{2} - 4E_1} - 8t \quad (1)$$

Inicialmente foram realizados estudos numéricos comparando resultados de estruturas com nó típico e a configuração proposta. Resultados positivos quanto proposta de melhoria da ligação estimularam a realização de ensaios experimentais, para comprovação.

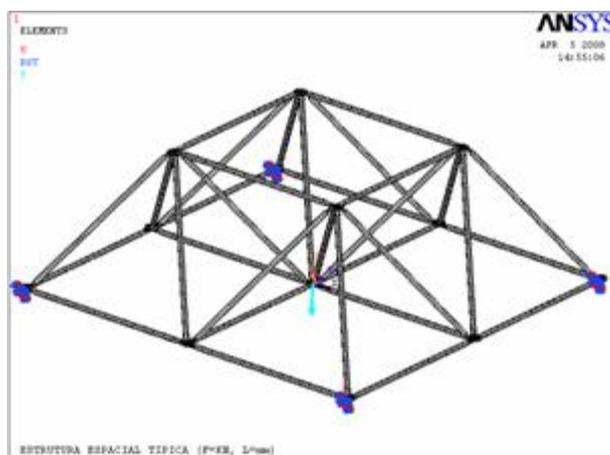


Figura 5: Estudo em elementos finitos (Freitas, 2008)



Figura 6: Ensaio experimental (Freitas, 2008)

Foram comparados, numérico e experimentalmente, estruturas com ligação típica (Figura 7) e estruturas com ligação típica, distanciador e chapa cobrejunta (Figura 8) e ensaiados dois modelos de estruturas, diferenciadas pelo detalhe da ligação. Nos dois modelos foram mantidas as dimensões dos banzos e diagonais.

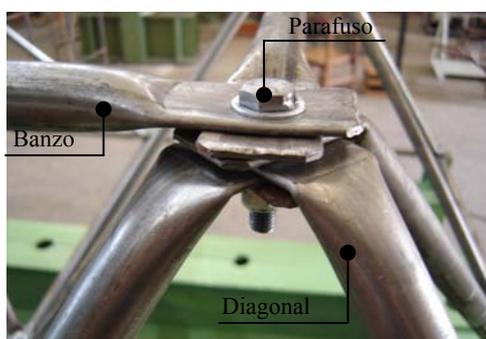


Figura 7: Ligação típica – LT

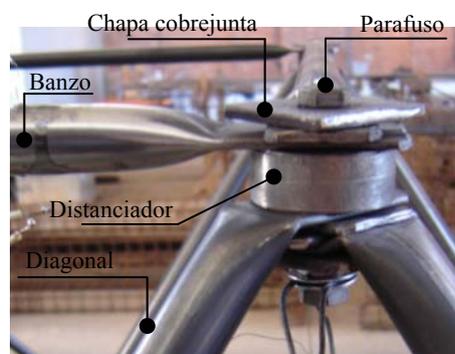


Figura 8: Ligação proposta - LTDC

O gráfico da Figura 9 apresenta os valores de carga de colapso para a estrutura espacial estudada nos ensaios experimentais. São expostos os resultados das estruturas com nó típico (LT) e estruturas com nó típico reforçado (LTDC). Foi calculada a carga de colapso através da aplicação de normas AISC-LRFD (1999), NBR8800 (1986) e EUROCODE (1992). Os ensaios com carregamentos estáticos comprovaram que a utilização do reforço aumenta a resistência da carga de colapso em relação a estruturas com nó típico sem reforço. O colapso da estrutura com reforço (LTDC) é regido pela flambagem da barra, mantendo-se o nó sem deformações, ao contrário do nó típico.

O reforço do típico utilizando distanciador e chapa cobrejunta (LTDC), atende aos critérios de segurança das normas AISC-LRFD (1999), NBR8800 (1986) e EUROCODE (1992). Foi constatado um aumento da rigidez da estrutura LTDC (nó

típico com distanciador e chapa cobrejunta), devido a menores deslocamentos para maiores carregamentos aplicados em relação à estrutura com nó típico (LT). Tal fato ressalta a necessidade de um estudo experimental dinâmico, para verificar se este aumento de rigidez não afeta negativamente a resistência à fadiga da estrutura.

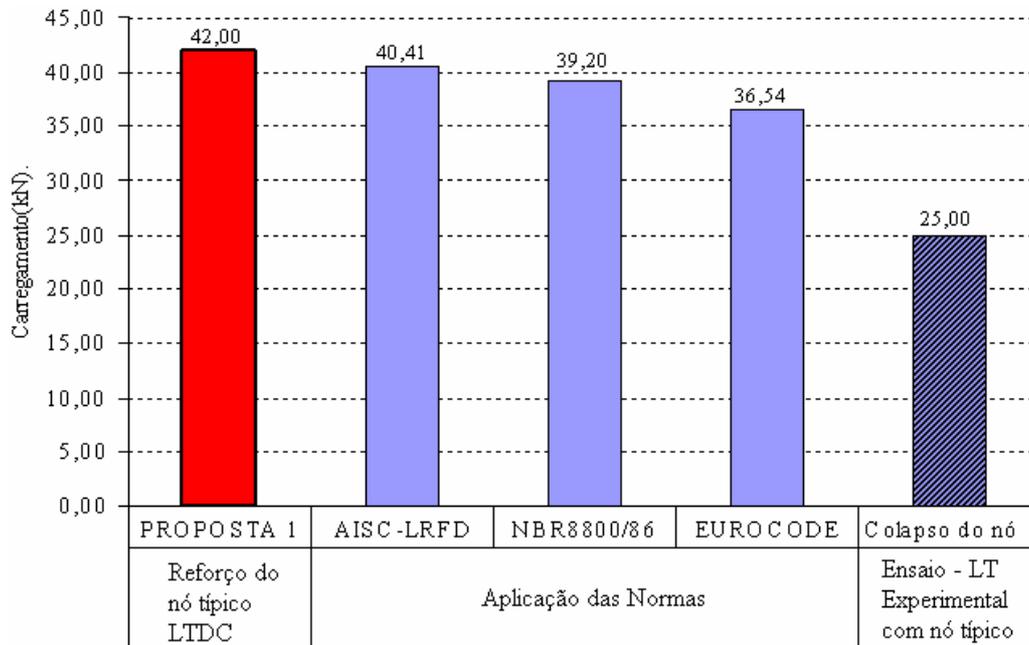


Figura 9: Comparação das cargas de colapso

## 2 ESTUDO EXPERIMENTAL DINÂMICO

### 2.1 Considerações iniciais

Foi adotado um modelo de treliça tridimensional padrão de acordo com a Figura 10. Note um sistema modular com pirâmides com base de 1000mm e altura de 707mm. O ângulo de inclinação das diagonais é de 45°. Os banzos e diagonais são compostos com tubos diâmetro 25,4 milímetros e parede de 1,5mm e aço ASTM A36, tensão de escoamento aproximadamente 250MPa. As extremidades são amassadas e furadas Ø10mm. Para fixação foram utilizados parafusos (ASTM A325) de Ø10mm.

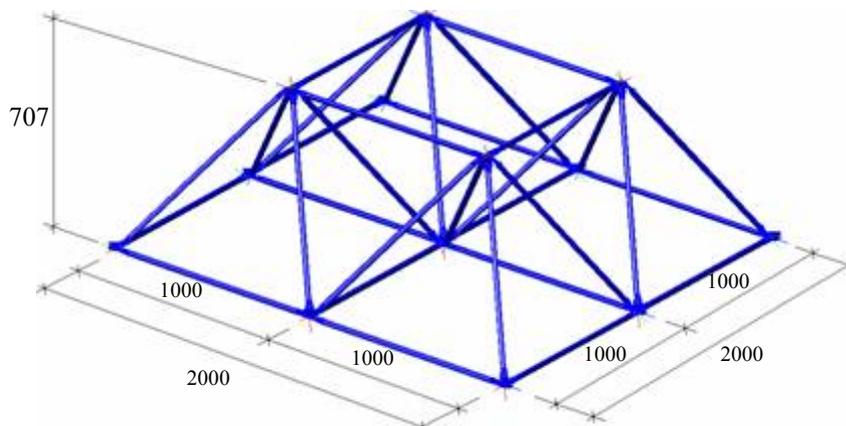


Figura 10: Modelo da estrutura treliçada tridimensional adotada, cotas em milímetro

## 2.2 Rótulos de identificação dos protótipos

Foram realizados quatro ensaios com cada um dos dois modelos de ligação, totalizando oito ensaios dinâmicos. A Tabela 1 mostra a lista dos rótulos adotados nos protótipos, a fim de organizar a realização dos ensaios e processamento dos resultados.

Abreviatura utilizada	Significado
LTD1	Ligação típica - ensaio dinâmico 1
LTD2	Ligação típica - ensaio dinâmico 2
LTD3	Ligação típica - ensaio dinâmico 3
LTD4	Ligação típica - ensaio dinâmico 4
LTDCD1	Ligação típica c/ distanciador e cobrejunta - ensaio dinâmico 1
LTDCD2	Ligação típica c/ distanciador e cobrejunta - ensaio dinâmico 2
LTDCD3	Ligação típica c/ distanciador e cobrejunta - ensaio dinâmico 3
LTDCD4	Ligação típica c/ distanciador e cobrejunta - ensaio dinâmico 4

Tabela 1: Lista de abreviatura dos protótipos dos ensaios experimentais dinâmicos

## 2.3 Fixação da estrutura em base de ensaio

Para o ensaio dinâmico foi utilizada a mesma base de ensaio apoiada sobre blocos de concreto. Note na Figura 11 a localização dos blocos de concreto, bem como a colocação de uma viga para suporte do sistema mecânico.

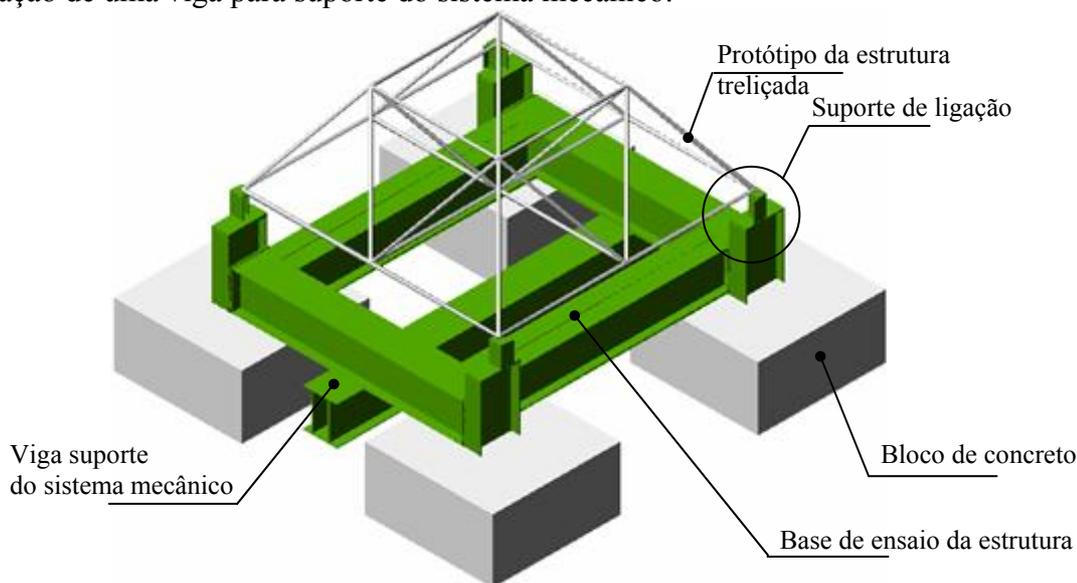


Figura 11: Estrutura base para ensaio dos protótipos do estudo dinâmico

## 2.4 Sistema de aplicação de carga alternada nos protótipos

Foi imposta nos protótipos, do ensaio dinâmico, uma oscilação forçada cuja intensidade varia de uma posição neutra a uma posição de deslocamento máximo negativo. Para oscilação do protótipo foi utilizando um sistema mecânico como mostra a Figura 12. Note que este sistema mecânico foi fixado na base de ensaio. A Figura 13 mostra em detalhe o sistema mecânico de oscilação utilizado no ensaio. Este sistema é formado por um motor elétrico trifásico (5HP – 1715rpm), polias de alumínio (dois gornes), correias industriais (gorne tipo A), mancais industriais com rolamentos de

esferas, eixo usinado de aço, contador de ciclos, excêntrico mecânico regulável e uma peça de ligação (no nó 9). Note que o parafuso central da ligação das barras (banzos e diagonais) do nó 9 é utilizado para conectar o protótipo ao sistema de oscilação através de uma peça de ligação. O sistema de controle de rotações, painel de leitura do contador de ciclos, bem como os equipamentos de alimentação de energia. A frequência do excêntrico foi constante para todos os ensaios e foi de 220rpm.

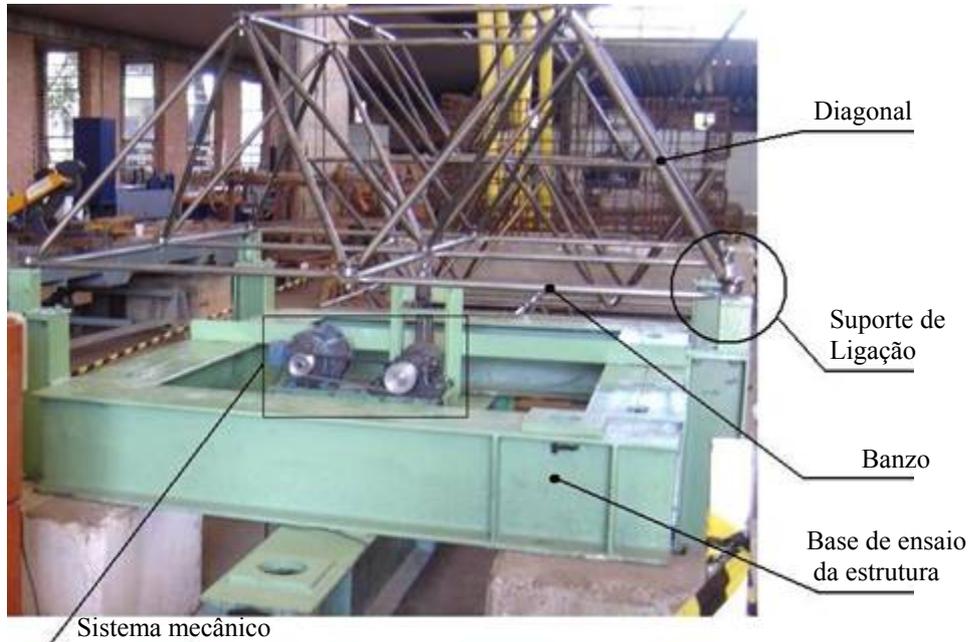


Figura 12: Elementos de composição dos protótipos do ensaio dinâmico

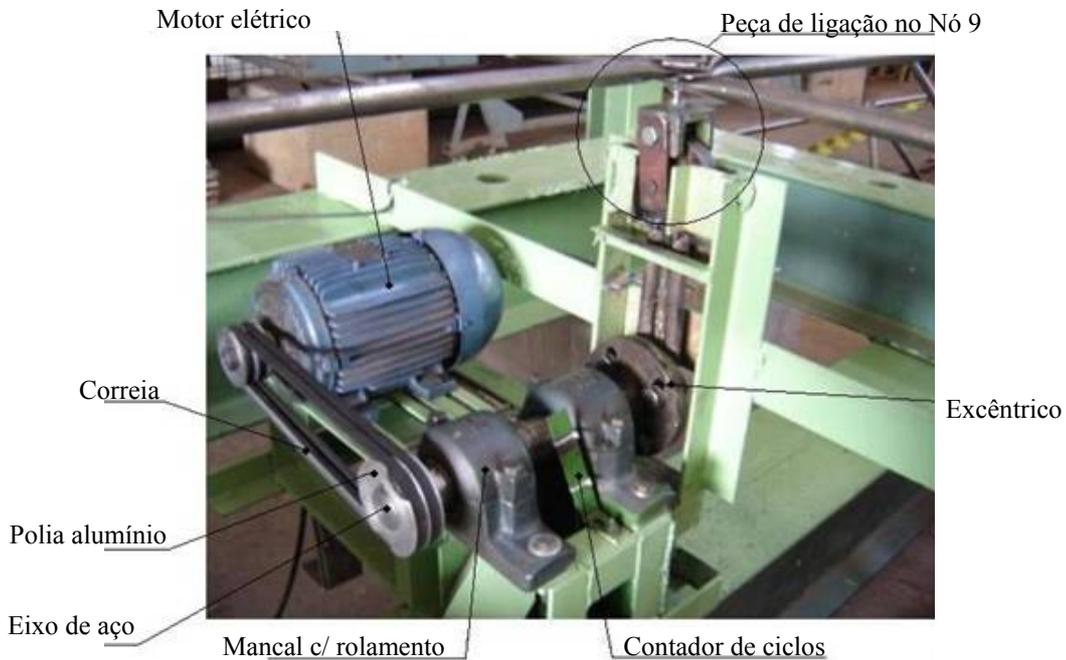


Figura 13: Sistema mecânico de oscilação do ensaio dinâmico

A Figura 13 mostra o sistema de contagem dos ciclos do ensaio dinâmico. Uma peça metálica foi fixada no eixo do excêntrico. Quando o eixo entra em funcionamento esta peça corta o sinal do sensor. O sinal do sensor é enviado por um fio um painel de

leitura, Figura 14. Este painel possui um circuito programado para codificar o sinal do sensor e gerar uma saída visual em um visor de cristal líquido. Este painel é alimentado por uma corrente de 12v. Um inversor de frequência foi utilizado para o controle de velocidade do motor. Este ajusta a diferença de potencial elétrico para a frequência do motor desejada. A Figura 15 mostra o variador de frequência WEG (série CFW-08).



Figura 14: Painel de leitura dos ciclos



Figura 15: Inversor de frequência do motor elétrico

## 2.5 Ajustes finais antes do ensaio

O deslocamento imposto no protótipo pelo sistema de oscilação foi aferido com um defletômetro digital (Mitutoyo). A Figura 16 mostra um detalhe do procedimento adotado para o ajuste do deslocamento. O defletômetro foi posto sobre a estrutura da base de ensaio, uma morsa foi apertada no eixo móvel vertical do excêntrico e com o ajuste dos discos excêntricos pode-se controlar a amplitude da oscilação.

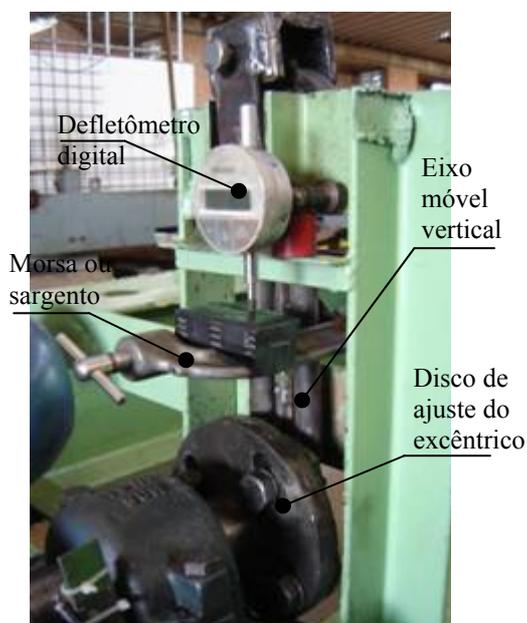


Figura 16: Ajuste do sistema de oscilação

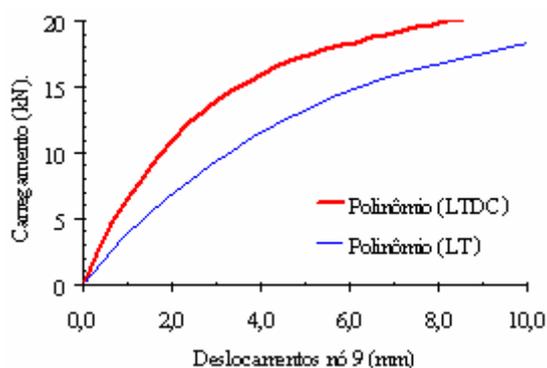


Figura 17: Carregamento versus deslocamento

Considerando o fenômeno de fadiga dentro do regime elástico, os ensaios dinâmicos foram realizados com pequenos deslocamentos que não plastificassem os elementos dos

protótipos. O gráfico da Figura 17 mostra o comportamento dos ensaios estáticos dos protótipos LT (ligações típicas com distanciador – ensaio estático) e LTDC (ligações típicas com distanciador e chapa cobrejunta – ensaio estático) obtidos na etapa de ensaio estático. Note neste gráfico a região de comportamento elástico do material considerada. Desta forma foram aplicados deslocamentos menores que 4mm no nó central dos protótipos no ensaio dinâmico. A Tabela 2 expõem os deslocamentos aplicados nos protótipos do ensaio dinâmicos, e respectivas cargas resultantes. Os apertos dos parafusos das ligações da estrutura treliçada foram realizados com torquímetro analógico (vareta). Para garantir que as ligações não folgassem durante o ensaio dinâmico foram colocadas contra-porcas de pressão.

Protótipos do ensaio	Deslocamento (mm)	Carga (kN)
LTD1	1,50	5,77
LTD2	2,10	7,57
LTD3	2,50	8,63
LTD4	3,80	11,44
LTDCD1	1,50	8,83
LTDCD2	2,10	11,21
LTDCD3	2,64	12,93
LTDCD4	3,80	15,58

Tabela 2: Deslocamentos aplicados no nó 9 dos protótipos dos ensaios dinâmicos

## 2.6 Resultado dos ensaios das estruturas

A Figura 18 mostra em planta a localização dos locais de ruptura das barras para os protótipos. Foi possível observar que as rupturas ocorreram sempre nas diagonais das estruturas espaciais LTD e LTDCD.

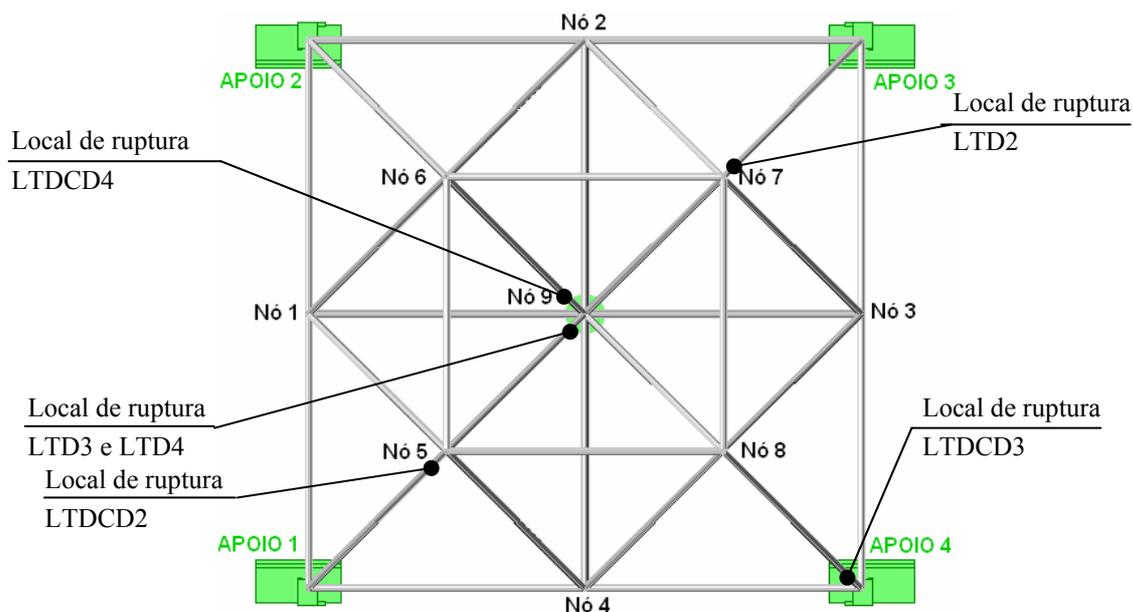


Figura 18: Planta de localização das barras rompidas no ensaio dinâmico

Nos protótipos LTD1 e LTDCD1, com 1,5mm de amplitude de deslocamento, não houve ruptura após 1.200.000 ciclos e o ensaio foi finalizado. As Figuras 19 a 24, mostram os detalhes das rupturas dos elementos dos protótipos com ligação típica (LTD2, LTD3 e LTD4) e com ligação típica com distanciador e cobrejunta (LTDCD2, LTDCD3 e LTDCD4). Observe nestas o valor da amplitude do deslocamento em relação ao número de ciclos de ruptura por fadiga.



Figura 19: LTD2 (2,1mm/220.476 ciclos)



Figura 20: LTDCD2 (2,1mm/243.969ciclos)



Figura 21: LTD3 (2,5mm/214.033ciclos)



Figura 22: LTDCD3 (2,6mm/190.000ciclos)



Figura 23: LTD4 (3,8mm/16.423ciclos)



Figura 24: LTDCD4 (3,8mm/27.111ciclos)

A Tabela 3 mostra o resultado dos ensaios dinâmicos. Nesta pode se apreciada o número de ciclos obtidos em relação à amplitude do deslocamento imposto ao nó 9. As Figuras 25 e 26 mostram graficamente o comportamento do deslocamento em relação aos ciclos obtidos. É possível notar que quanto menor a amplitude do deslocamento maior o número de ciclos que a estrutura pode suportar antes da ruptura.

Protótipos do ensaio	Deslocamento (mm)	No de ciclos
LTD1	1,50	>1.200.000
LTD2	2,10	220.476
LTD3	2,50	214.033
LTD4	3,80	16.423
LTDCD1	1,50	>1.200.000
LTDCD2	2,10	243.969
LTDCD3	2,64	190.000
LTDCD4	3,80	27.111

Tabela 3: Resultado dos ensaios dinâmicos

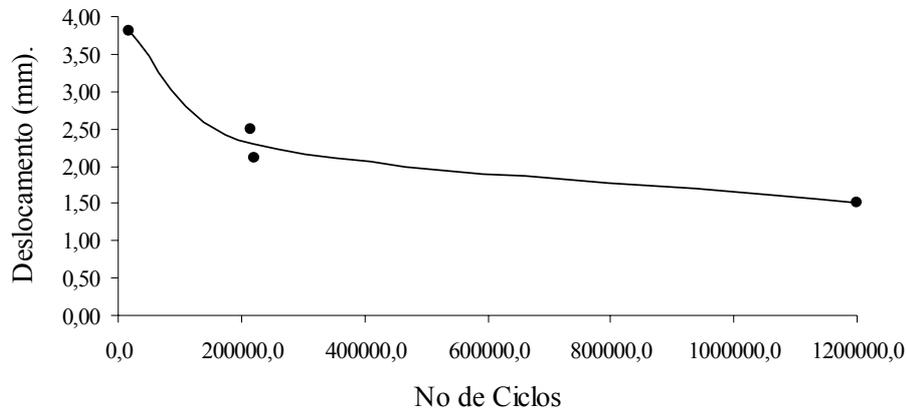


Figura 25: Diagrama deslocamento no nó 9 versus número de ciclos - LTD

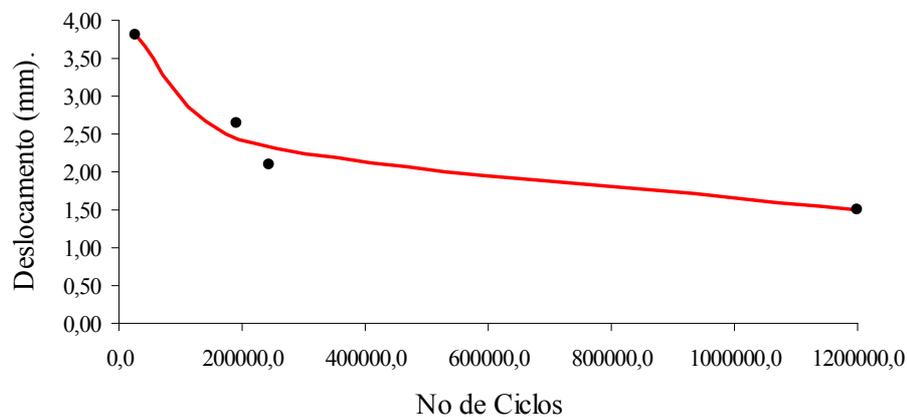


Figura 26: Diagrama deslocamento no nó 9 versus número de ciclos - LTDCD

## 2.7 Comparação dos resultados dos protótipos LTD e LTDCD

A Figura 27 mostra um comparativo entre os protótipos LTD e LTDCD em um diagrama carregamento versus número de ciclos. É possível perceber que os protótipos LTDCD apresentaram um acréscimo de resistência à fadiga da ordem de 51% em relação aos protótipos LTD. Pode-se concluir que as estruturas com nó típico distanciador e chapa cobrejunta são mais resistentes à fadiga que as estruturas com nó típico.

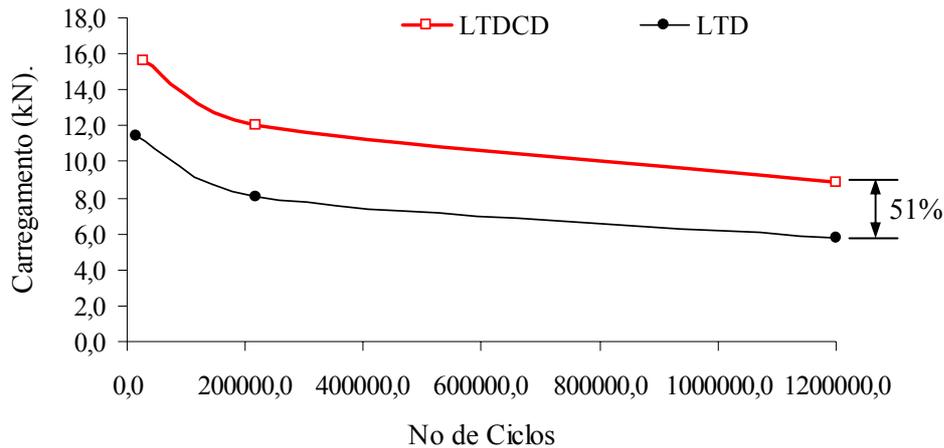


Figura 27: Diagrama carregamento versus número de ciclos – LTD e LTDCD

Apesar da Figura 27 ter possibilitado a análise comparativa dos dois sistemas de nós (LTD e LTDCD), este tipo de gráfico (carregamento x número de ciclos) não é usual no estudo da fadiga. O gráfico mais recomendado é o que apresenta a curva S-N (tensão x número de ciclos). Pois a estrutura espacial em aço apresenta um elevado número de ciclos antes da ruptura por fadiga. Para plotar tal gráfico é necessário um estudo de tensões no regime elástico do material. A seguir pode ser apreciado um estudo numérico pelo método dos elementos finitos.

### 3 ESTUDO NUMÉRICO

O programa de análise, fundamentado no método de elementos finitos, aplicado no estudo foi o SAP2000. Este considera uma análise física linear (material). Os elementos das treliças (banzos e diagonais), bem como, parafusos e distanciadores foram discretizados com elementos de placa. Foi admitido um módulo de elasticidade do aço de  $205.000\text{MPa}$ , tensão de escoamento de  $250\text{MPa}$ , peso específico do material de  $7,7 \times 10^{-7}\text{ kN/mm}^2$  e coeficiente de Poisson de  $0,3$ .

#### 3.1 Elemento de placa (SHELL)

O elemento “SHELL” é um elemento de placas do programa de elementos finitos SAP2000, usado para uma modelagem bidimensional ou tridimensional. Esse elemento é definido com três ou quatro nós, tendo seis graus de liberdade por nó (deslocamentos: UX, UY e UZ e rotações: RotX, RotY e RotZ) no modelo 3D ou dois graus de liberdade por nó (deslocamentos: UX e UY e rotações: RotX e RotY) no modelo 2D (Figura 28).

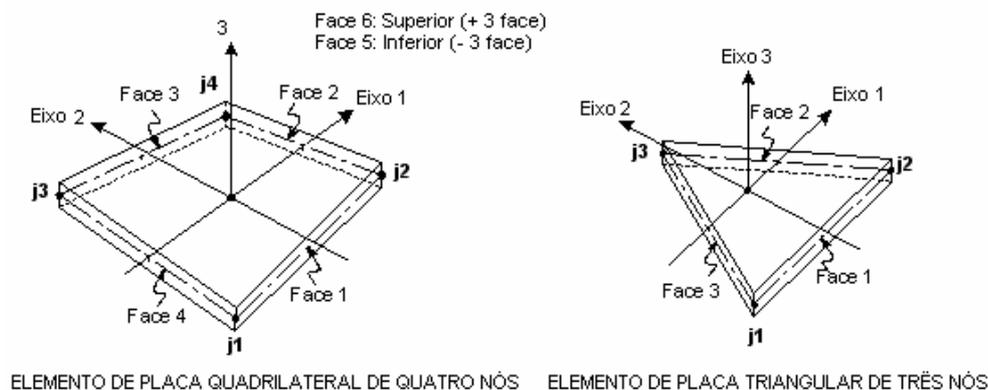


Figura 28: Elemento de Placa (SHELL)

### 3.2 Restrições e carregamentos no modelo

A Figura 29 mostra a treliçada tridimensional discretizada em elementos de placa. Observe nesta figura os nós de apoio (Apoio 1, 2, 3 e 4) onde foram aplicadas as restrições. O carregamento foi aplicado no nó 9. Foram impostas restrições de 2º gênero aos nós dos apoios (Apoios 1, 2, 3 e 4). O carregamento foi aplicado no perímetro do furo do nó 9.

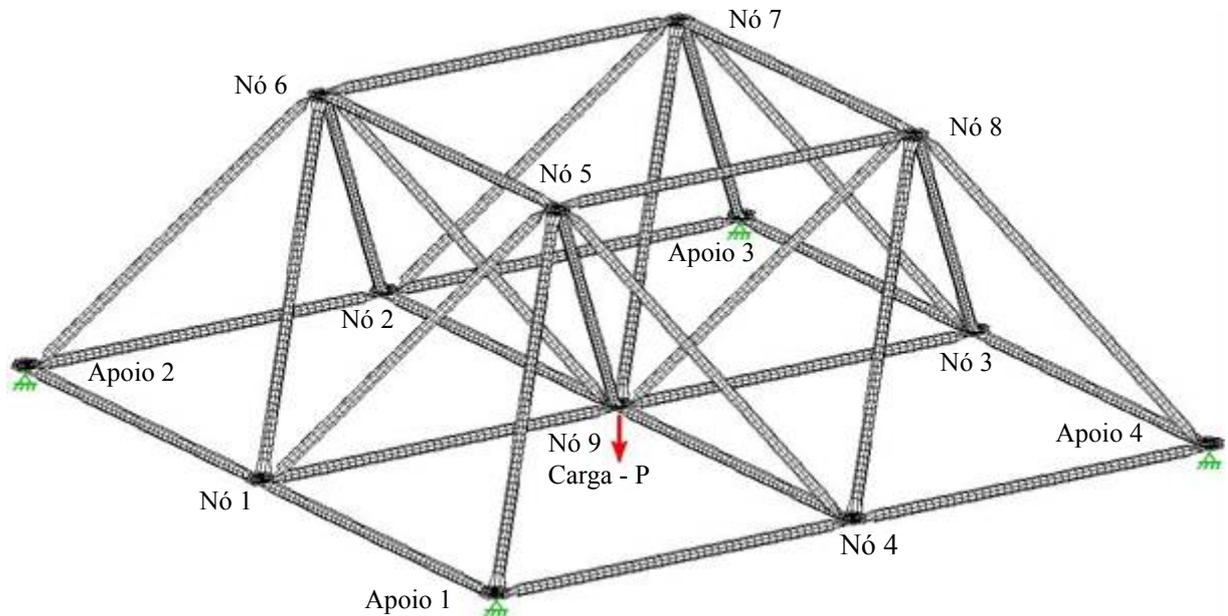


Figura 29: Discretização da malha da estrutura treliçada LT e LTDC

Nas estruturas treliçadas com ligação típica (LT) e estrutura treliçada constituída com ligação típica, distanciador e chapa cobrejunta (LTDC) foram aplicados quatro passos de carregamentos. Estes são referentes às cargas aplicadas no estudo experimental dinâmico. Desta forma será possível fazer um comparativo com a etapa experimental e traçar o diagrama de tensão versus número de ciclos. As Tabelas 4 e 5 expõem os carregamentos aplicados no estudo computacional.

Passos de carga	Carga (kN)	Deslocamento (mm)
Carga 1	5,77	1,5
Carga 2	7,57	2,1
Carga 3	8,63	2,5
Carga 4	11,44	3,8

Tabela 4: Carregamentos aplicados no estudo da estrutura com ligação típica (LT)

Passos de carga	Carga (kN)	Deslocamento (mm)
Carga 1	8,83	1,5
Carga 2	11,21	2,1
Carga 3	12,93	2,64
Carga 4	15,58	3,8

Tabela 5: Carregamentos aplicados no estudo da estrutura com ligação típica, distanciador e chapa cobrejunta (LTDC)

### 3.3 Detalhes da discretização da estrutura com nó típico (LT)

Na discretização da estrutura treliçada tridimensional constituída com nó típico (similar a Figura 29) foram utilizados 14.408 elementos de placa (SHELL), com um total de 12.560 nós. Entre estes elementos tem-se 12.560 elementos de placa com espessura de 1,50mm para os tubos (banzo e diagonais), 1536 elementos de placa com espessura de 3mm para as extremidades amassadas e 312 elementos de placa com 5mm de espessura para composição dos parafusos. O comprimento do parafuso foi considerado a distância entre o centro das diagonais e banzos. O parafuso foi discretizado com 24 elementos de placa. A ligação entre os elementos dos banzos, diagonais e parafusos foi realizado com os nós do perímetro do furo das barras com os nós do perímetro do parafuso. A Figura 30 dá ênfase ao detalhe da ligação.

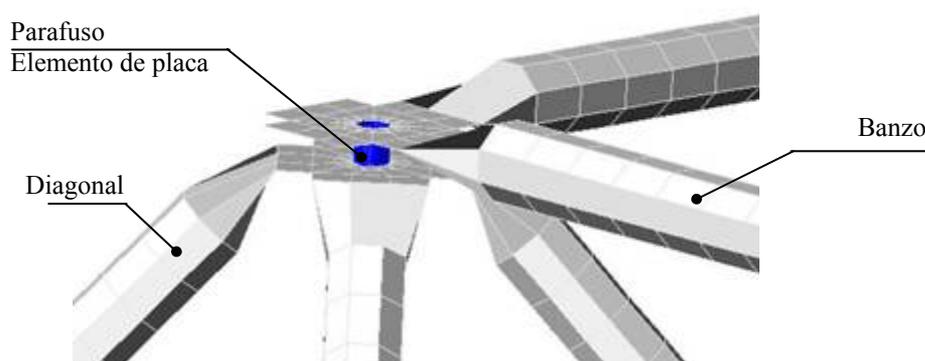


Figura 30: Detalhe da ligação com nó típico (LT)

### 3.4 Detalhe na discretização da estrutura com nó típico e distanciador (LTDC)

Na discretização da estrutura treliçada tridimensional com típico, distanciador e chapa cobrejunta (similar a Figura 29) foram utilizados 14.564 elementos de placa (SHELL), com um total de 13.920 nós. Entre estes elementos tem-se 12.560 elementos de placa com espessura de 1,5mm para os tubos (banzo e diagonais), 1536 elementos de placa com espessura de 8mm (3mm para o tubo + 5mm para a chapa cobrejunta) para as extremidades amassadas, 156 elementos de placa com 7,5mm de espessura para os distanciadores e 312 elementos de placa com 5mm de espessura para os parafusos.

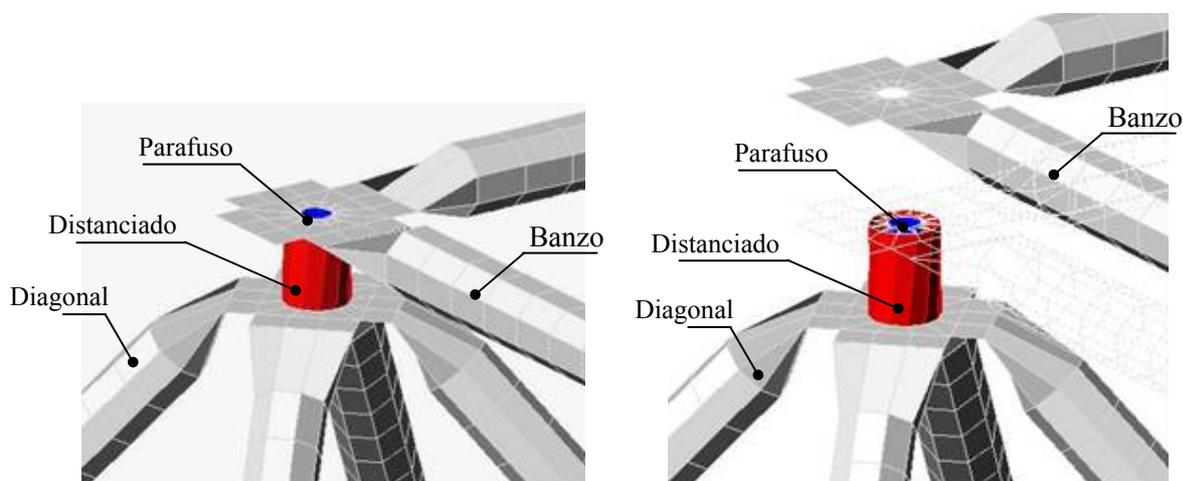


Figura 31: Detalhe da ligação (LTDC)

Figura 32: Detalhe da localização dos elementos

As Figuras 31 e 32 detalham a discretização da ligação LTDC. Note que a ligação entre os elementos dos banzos, diagonais e parafusos foi realizado com os nós do perímetro do furo das barras com os nós do perímetro do parafuso. Assim como, os nós do distanciador são coincidentes com nós nos banzos e diagonais. O comprimento do parafuso e do distanciador foi considerado a distância entre o centro das diagonais e banzos, acrescido da distância de correção de excentricidade de 20mm. O parafuso foi discretizado com 24 elementos de placa e a malha do distanciador, discretizada em 12 elementos de placa (SHELL). A cobrejunta foi considerada a partir do acréscimo de espessura na ligação.

### 3.5 Resultados do estudo numérico

As Tabelas 6 e 7 expõem o resumo das tensões de VON MISES nos elementos da estrutura para os quatro carregamentos considerados, respectivamente para os modelos LT e LTDC. Nestas tabelas constam as tensões do elemento 1645 localizado na extremidade da diagonal (EXT.DIAG. EL.1645), do elemento 1445 localizado na posição média da diagonal (MED.DIAG. EL.1645), do elemento 12169 localizado na extremidade do banzo superior (EXT.BANZ. EL.12169) e do elemento 11993 localizado na posição média do banzo superior (MED.BANZ. EL.11993).

As Figuras 33 e 34 mostram os diagramas de distribuição das tensões, respectivamente para os modelos LT (com carga de 11,44kN) e LTDC (com carga de 15,58kN). É possível observar, após análise destas figuras e das tabelas, que as tensões nas diagonais são maiores que nos banzos. Outra conclusão é que as tensões são mais elevadas nas extremidades das diagonais em relação à estrutura.

CARGA (kN)	EXT.DIAG. EL.1645	MED.DIAG. EL.1445	EXT.BANZ. EL.12169	MED.BANZ. EL.11993
5,77	5,174	1,788	1,809	1,553
7,57	6,784	2,341	2,350	2,039
8,63	7,701	2,672	2,699	2,324
11,44	10,102	3,539	3,569	3,082

Tabela 6: Tensões de VON MISES nos banzos e diagonais - LT (kN/cm<sup>2</sup>)

CARGA (kN)	EXT.DIAG. EL.1645	MED.DIAG. EL.1445	EXT.BANZ. EL.12169	MED.BANZ. EL.11993
8,83	4,247	2,694	2,392	2,129
11,21	5,429	3,420	3,015	2,702
12,93	6,402	3,945	3,499	3,117
15,58	7,600	4,754	4,221	3,756

Tabela 7: Tensões de VON MISES nos banzos e diagonais - LTDC (kN/cm<sup>2</sup>)

Sabendo que as tensões são mais elevadas nas extremidades das diagonais, a Figura 35 (Distribuição de tensões na extremidade da diagonal), mostra a evolução das tensões nas extremidades das diagonais para aplicação das cargas de modo comparativo para LT e LTDC. É possível notar que as ligações típicas (LT), apresentam grande concentração de tensão, e que estas são consideravelmente aliviadas com a utilização do distanciador.

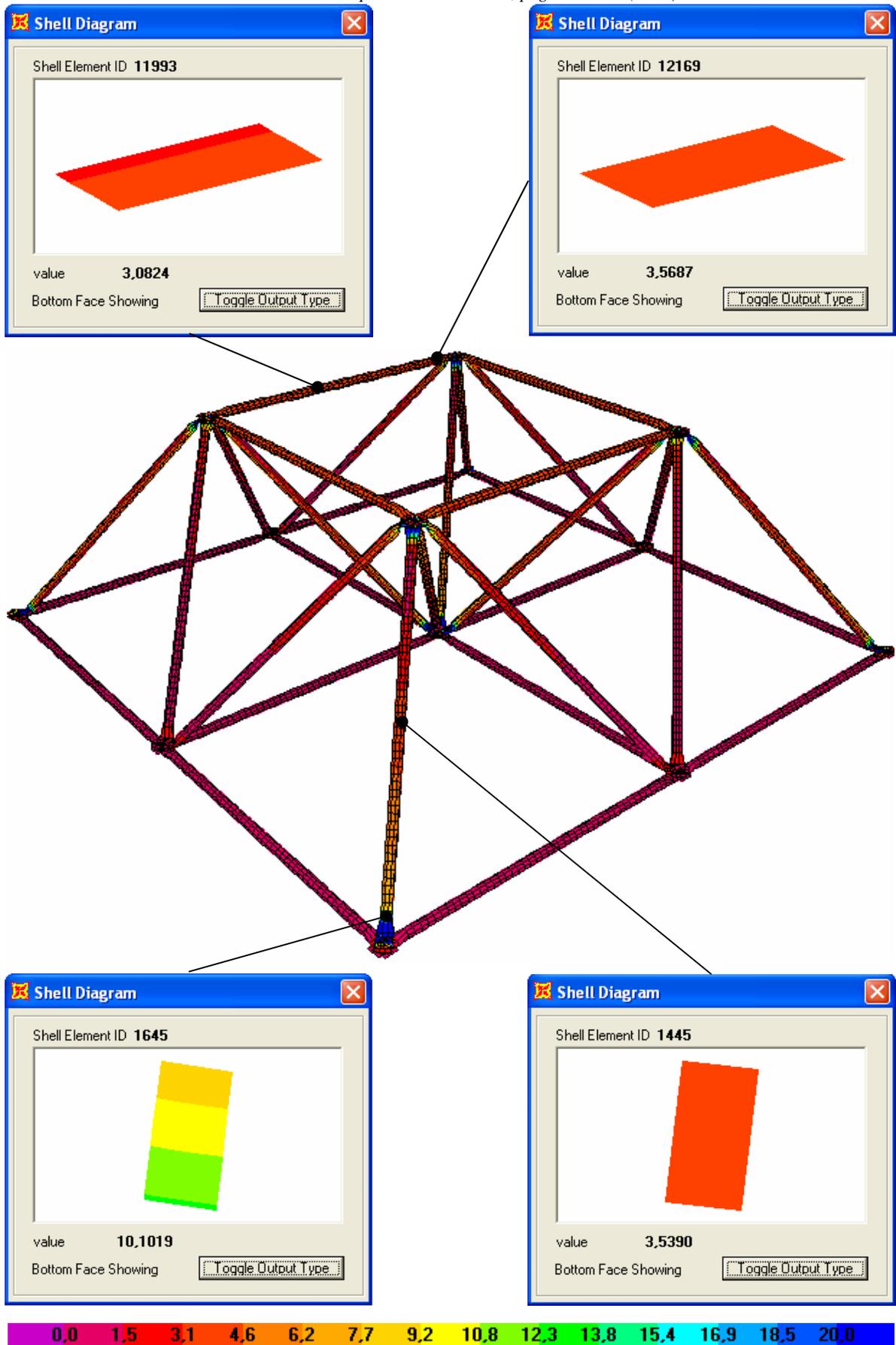


Figura 33: Diagrama de distribución de tensões (kN/cm<sup>2</sup>) – Carga 4= 11,44kN – LT

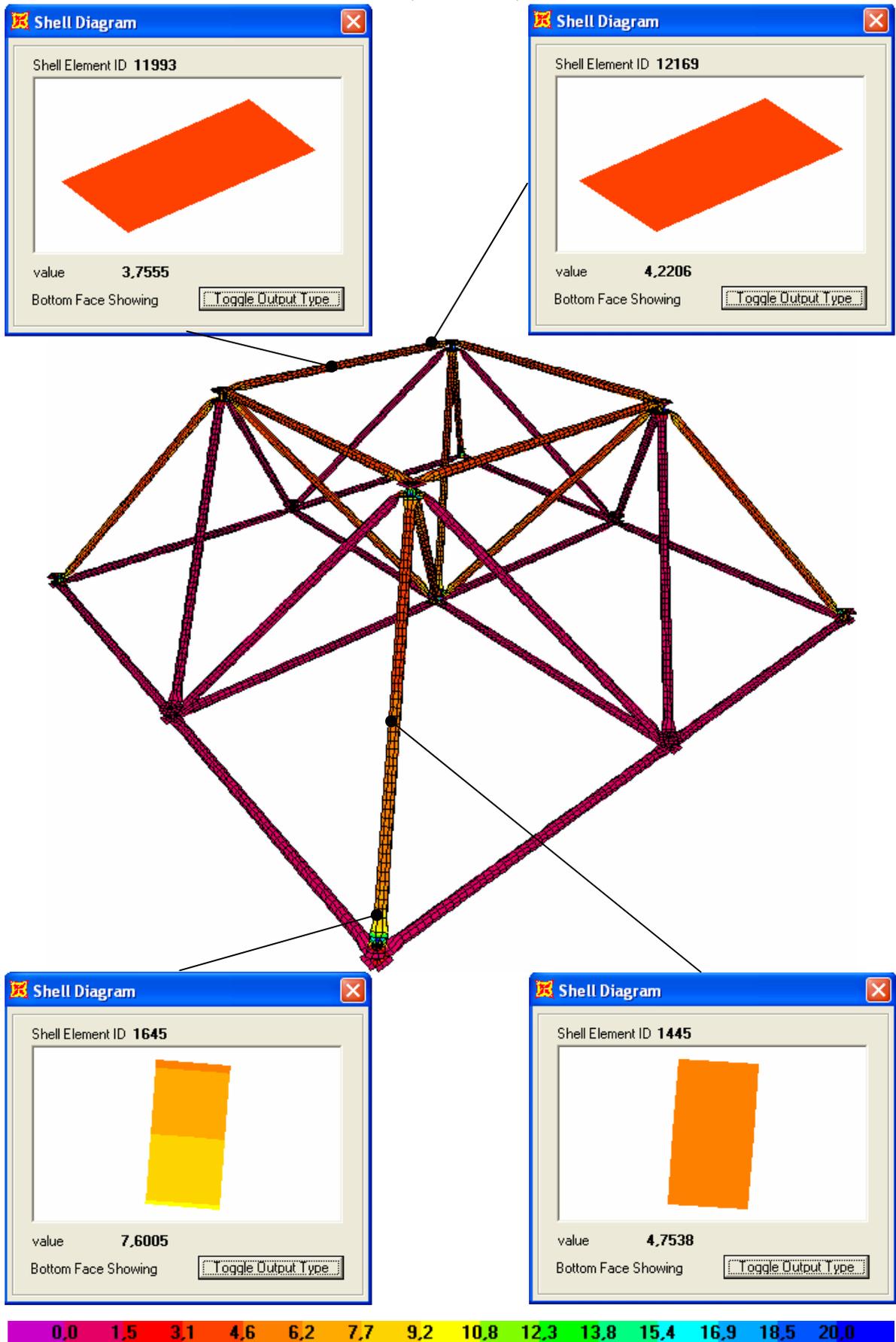


Figura 34: Diagrama de distribuição de tensões (kN/cm<sup>2</sup>) – Carga 4= 15,58kN – LTDC

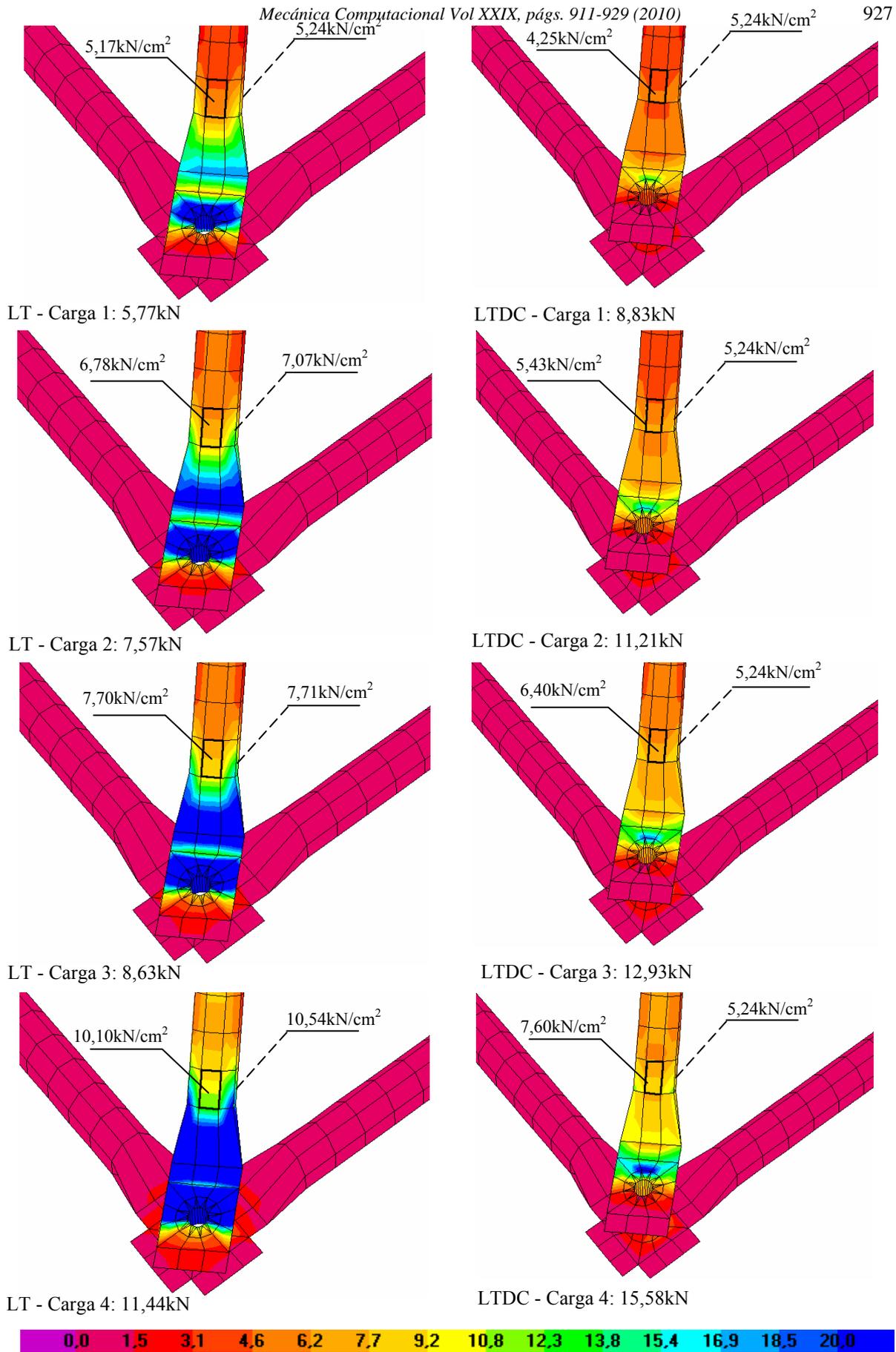


Figura 35: Distribuição de tensões na extremidade da diagonal (kN/cm<sup>2</sup>)

#### 4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Nas Figuras 36 e 37 foram plotadas as curvas “S-N”, tensão x números de ciclos, para as estruturas com ligação típica (LT) e estruturas com ligação típica com distanciador e cobrejunta (LTDC), respectivamente. A caracterização do comportamento da estrutura com as curvas “S-N” é importante para o estudo da fadiga. No entanto não é possível uma comparação direta dos dois modelos pois as cargas que geram as tensões são bem diferentes. As cargas para gerar o gráfico da LTDC foram bem mais elevadas que as cargas da estrutura com LT. No modelo LTDC há uma distribuição nas tensões devido à correção da ligação.

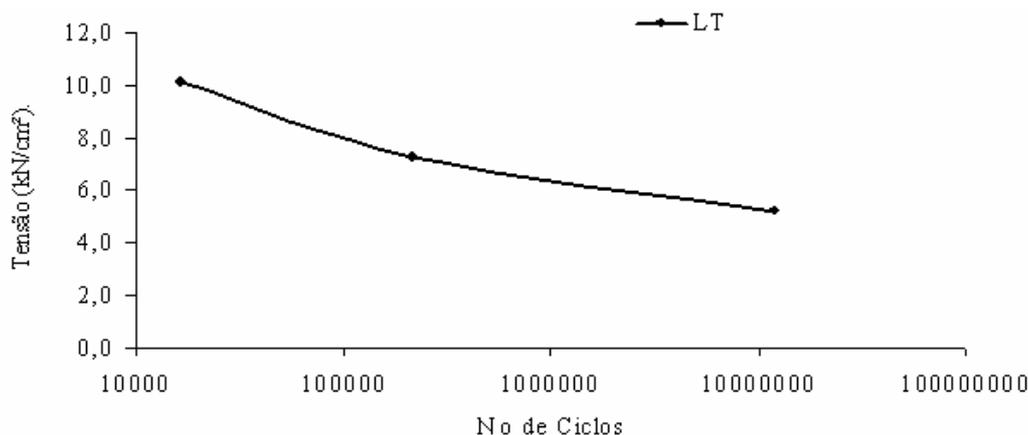


Figura 36: Curva S-N do protótipo com ligação típica

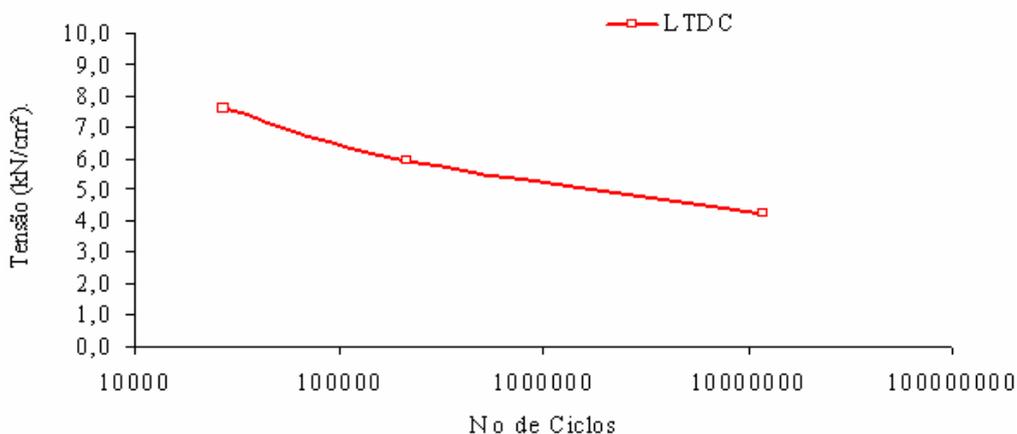


Figura 37: Curva S-N do protótipo com ligação típica com distanciador e cobrejunta

#### 5 CONCLUSÃO

Os protótipos de estruturas espaciais com nós típicos, distanciador e chapa cobrejunta (LTDCD) apresentaram um acréscimo de 51% na sua resistência a fadiga e, comparação com os protótipos com nós típicos. As rupturas por fadiga ocorreram sempre nas extremidades das diagonais, para ambos os modelos de protótipos. As tensões têm maior intensidade nas extremidades do que no meio dos elementos. As diagonais apresentarão maior intensidade de tensão que os banzos. Os modelos com ligação típica, distanciador e chapa cobrejunta apresentaram menores tensões que os modelos com ligação típica.

## **6 AGRADECIMENTOS**

Este artigo é parte de estudos em uma tese de doutorado realizada na Universidade de Brasília (Freitas, 2008). Os autores agradecem ao valioso apoio financeiro do CNPQ e CAPES.

## **REFERÊNCIAS**

- American Institute of Steel Construction. AISC – LRFD – “Manual of steel construction”. Chicago, 1999;
- ANSYS, “Ansys Manual”, Release 5.6, ANSYS, Inc., 2000.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 8800 – “Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios: método dos estados limites”. Rio de Janeiro, 1986;
- European Committee For Standardization. Eurocode 3. Design of steel structures. Part.1.1. General rules and rules for buildings 1992.
- Freitas, C. A. S., Estudos experimental, numérico e analítico de conexões de estruturas espaciais em aço com correção e reforço na ligação típica estampada. Tese de doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2008;
- Freitas, C.A.S.; Bezerra, L.M.; Nagato, Y., Increasing load capacity of steel space trusses with staking end-flattened connections. Journal of constructional steel research – Elsevier, 2008.
- SAP2000 (1995). Manual do usuário - Versão 7.12, Computers and Structures Inc., Berkeley, California.
- Souza, A. S. C., Análise teórica e experimental de treliças espaciais – Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, EESC/USP, São Paulo, 2003;