

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY OF THE STEEL SPACE-TRUSS WITH REINFORCE OF THE STAMPED CONNECTION.

Cleirton A. S. de Freitas^a, Luciano M. Bezerra^b, Carlos E. Melo^a e Geverson M. Araújo^a

^a*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>*

^b*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, Experimental and Numerical Analyses.

Abstract. Space trusses are very frequently used at the construction of roofs. These structures consist of steel bars, generally, connected by bolts at nodes. There are several types of connection for these 3D trusses, many are patented but others are not. 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. However, several accidents in space structures using this type of connection have also been reported in Brazil. 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. The bases for this are the reduction in the eccentricity and the increase in the rigidity of the typical node connection. This research, verifies, experimentally and numerically, the strength increase achieved with the proposed construction corrections with regard to static loads. 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

Estruturas espaciais são estruturas treliçadas tridimensionais formadas por elementos lineares de barras e conectadas por ligações. Estas estruturas são aplicadas, em geral, em coberturas com grandes vãos. A Figura 1 apresenta os elementos que compõem uma estrutura treliçada tridimensional típica.

O nó da estrutura ou ligação é o ponto de intercessão das barras (banzos e diagonais). Nos modelos de cálculo normalmente as ligações são consideradas como nós rotulados com cargas axiais centradas. No entanto, a execução de nós que garantam uma rótula perfeita é muito difícil e onerosa. Desta forma, o que se procura conceber é uma ligação com cargas concêntricas.

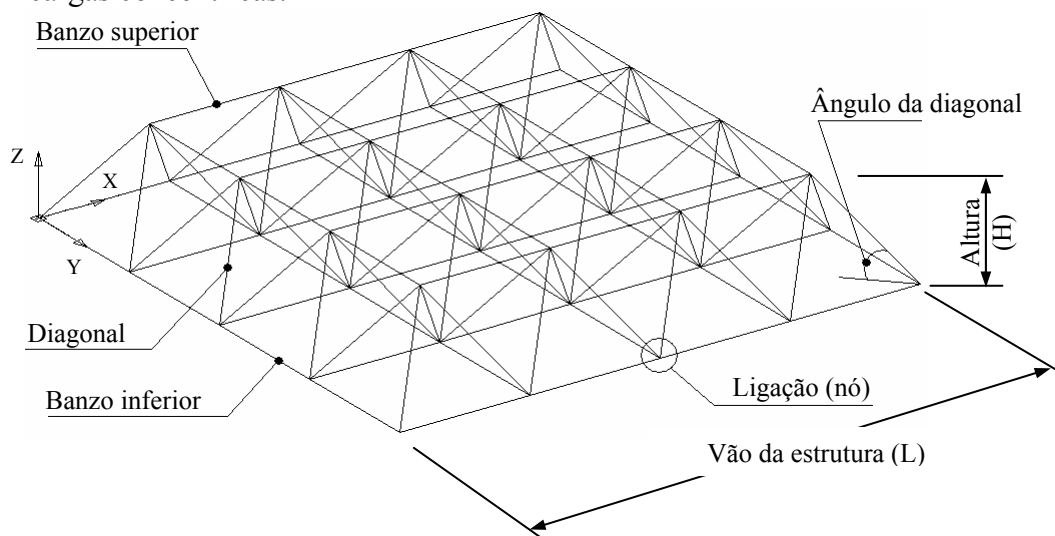


Figura 1: Elementos de uma estrutura treliçada tridimensional (Freitas, 2008)

Os sistemas de ligação podem-se dividir em dois grandes grupos. O primeiro aqueles nós avaliados e caracterizados experimentalmente, com eficiência comprovada, em geral são sistemas patenteados. O segundo grupo, os nós não patenteados, engloba os detalhes de ligação projetados por intuição e experiência, mas que não tem nenhuma comprovação científica.

As ligações não patenteadas utilizadas no Brasil são as ligações com nó típico (Figura 2), ligação com nó típico e chapa complementar (Figura 3), ligação com nó de aço (Figura 4), ligação com nó de aço com ponteira (Figura 5) e ligação com nó de aço com ponteira e aletas enrijecedoras (Figura 6). O sistema de ligação formado com o nó típico é o mais aplicado no Brasil, e é o que apresenta o maior número de problemas. 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 2: Nó típico (Souza, 2003)



Figura 3: Nó típico e chapa complementar (Souza, 2003)



Figura 4: Ligação dos elementos com nó de aço (Vendrame, 1999)

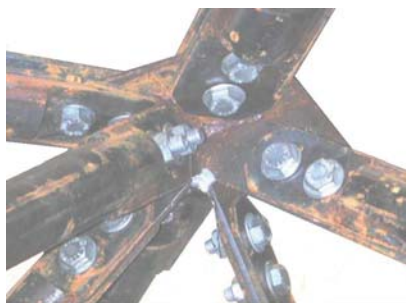


Figura 5: Ligação com nó de aço com ponteira (Souza, 2003)

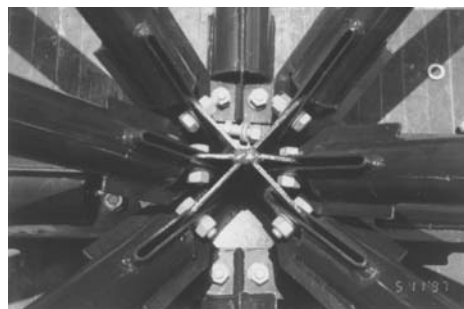


Figura 6: Nó de aço com ponteira e aletas enrijecedoras (Souza, 2003)

A escolha do tipo de ligação é determinante para a segurança as estrutura. Acidentes já foram registrados devido ao colapso do nó. Foi o caso do centro de convenções de Manaus, onde ocorreu em 1994 um colapso global da estruturas da cobertura (Figura 7). O sistema de ligação utilizado foi tubos com extremidades amassadas e com ponteira.

Muitos estudos são realizados em estruturas espaciais com o intuito de conhecer o comportamento estrutural e garantir uma maior segurança. Considerando que a ligação com nó típico é o mais aplicado nas estruturas construídas no Brasil, devido ao baixo custo, e que este tipo de ligação apresenta os maiores problemas dentre os tipos de ligação, este trabalho esta voltado ao estudo da ligação com nó típico.

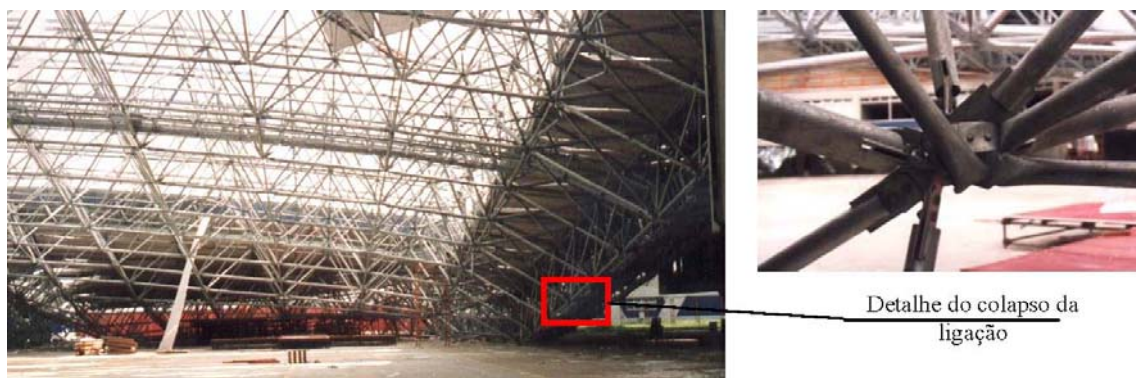


Figura 7: Acidente no centro de convenções de Manaus (Souza, 2003).

2 PROPOSTA DO ESTUDO

Este trabalho tem como propósito estudar uma alternativa para aumentar a resistência de estruturas treliçadas com nó típico, a partir do reforço dos nós que a compõem. Pretende-se, propor recomendações para futuros projetos, além de possibilitar a recuperação de estruturas existentes.

A proposta desta pesquisa é corrigir as excentricidades intrínsecas da ligação com nó típico (Figura 8). Para tanto é aplicado um distanciador entre os banzos e diagonais, conforme pode ser visto na Figura 9. A altura do distanciador deve ser calculada de modo que os eixos de banzos e diagonais coincidam. Além do distanciador são utilizados também chapas cobrejunta para evitar o colapso na região amassada da barra.

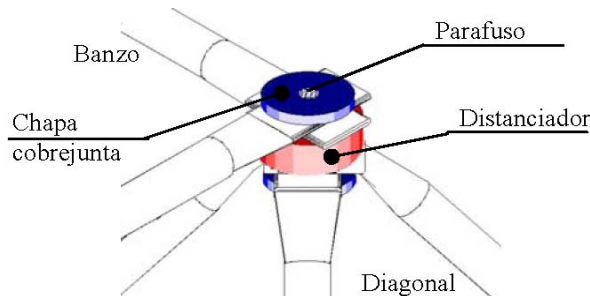
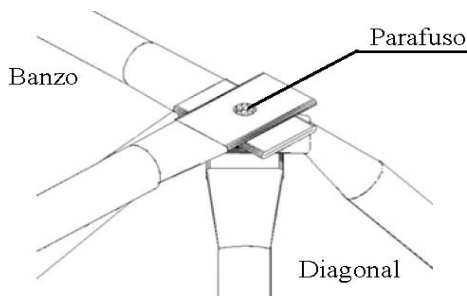


Figura 8: Geometria padrão do nó típico Figura 9: Nó Modificação do nó típico (Freitas, 2008)

Este trabalho 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. Os protótipos de ensaio deste trabalho têm esta configuração, logo foi aplicada esta formulação em particular. A formulação geral para os demais casos pode ser apreciada na tese de doutorado de Freitas (2008).

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

3 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Estudos realizados na tese de Freitas (2008) utilizando apenas o distanciador mostraram uma melhora na resistência estrutural em comparação com a ligação típica sem o distanciador. Estudos realizados na tese de Souza (2003) utilizando apenas chapas cobrejunta na ligação típica mostraram que não houve mudança no modo de colapso da estrutura em comparação com estruturas com ligação típica. Logo neste artigo são apresentados os estudos em ligações típicas com distanciador e chapa cobrejunta, conjuntamente. Este é produto final da proposta da tese de doutorado de Freitas (2008).

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. A especificação comercial do tubo é equivalente ao aço ASTM A36, tensão de escoamento aproximadamente 250MPa. As extremidades são amassadas e furadas com furos de 10mm. Para fixação foram utilizados parafusos sextavados (ASTM A325) de 10mm de diâmetro.

As Figuras 8 e 9 mostram, respectivamente os tipos de ligações estudadas, ligação típica “LT” e ligação típica com distanciador e chapa cobrejunta “LTDC”. Considerando as características geométricas dos protótipos e considerando a Equação (1) foi adotado um distanciador com altura de 20,0mm, diâmetro de 50,0mm e aço ASTM A36. As chapas cobrejunta são quadradas com largura de 50,0mm e espessura de CH#3/4”, A36.

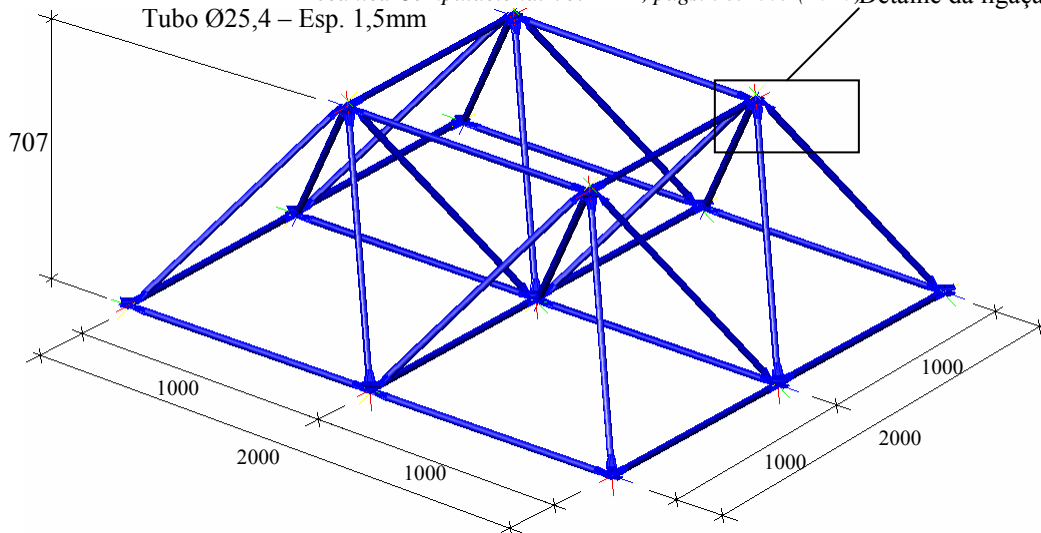


Figura 10: Modelo da estrutura treliçada tridimensional adotada, cotas em milímetro

4 ESTUDO EXPERIMENTAL

4.1 Rótulos de identificação dos protótipos

Foram realizados três ensaios com cada um dos dois modelos de ligação, totalizando seis ensaios estáticos. 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
LTE1	Ligação típica - ensaio estático 1
LTE2	Ligação típica - ensaio estático 2
LTE3	Ligação típica - ensaio estático 3
LTDCE1	Ligação típica com distanciador e cobrejunta - ensaio estático 1
LTDCE2	Ligação típica com distanciador e cobrejunta - ensaio estático 2
LTDCE3	Ligação típica com distanciador e cobrejunta - ensaio estático 3

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

4.2 Montagem da estrutura em base de ensaio

A Figura 11 mostra a estrutura base para ensaio dos protótipos. Esta estrutura base tem o formato de um quadro, e é formada com perfil duplo “I” de aço. Nesta estrutura foram soldados quatro pilares curtos, em perfil “I” de aço, para parafusar os apoios de contato dos protótipos (suporte de ligação). A base de ensaio esta sobre uma laje de reação de concreto.

A laje de reação contém furos para possibilitar a passagem do cabo de reação, para aplicação do carregamento, fios elétricos, dos instrumentos de medição, além das mangueiras do maço hidráulico. Os protótipos foram fixados nos quatro pontos de apoio. A fixação da estrutura deve obedecer a critérios que uniformize as restrições e carregamentos para os diferentes protótipos. As restrições de apoio dos protótipos, no estudo experimental e modelo computacional, devem ser iguais ou mais próximo possível.

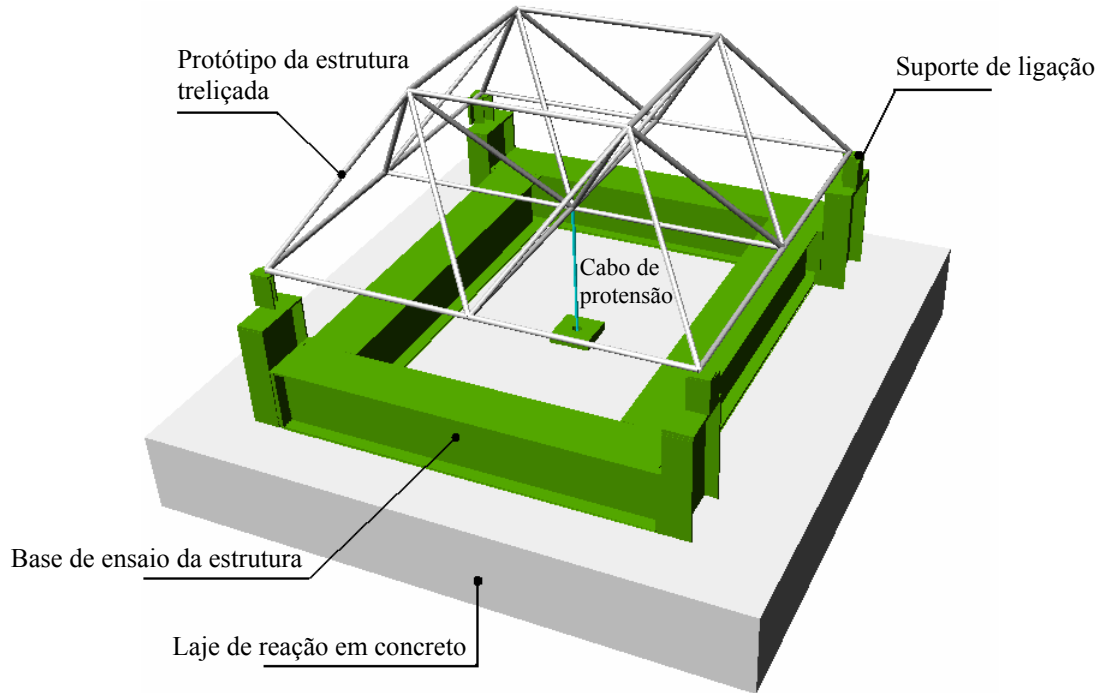


Figura 11: Estrutura base para ensaio dos protótipos

4.3 Disposição dos defletômetros analógicos

Para a medição dos deslocamentos verticais nodais dos protótipos foram utilizados defletômetros analógicos. O curso máximo de medição do aparelho é de 50mm com uma sensibilidade de um centésimo de milímetro. A Figura 12 mostra a planta do protótipo com numeração dos nós instrumentados e apoios. A medição do deslocamento do nó 9, central, é feita de modo direto com defletômetro como mostra a Figura 13.

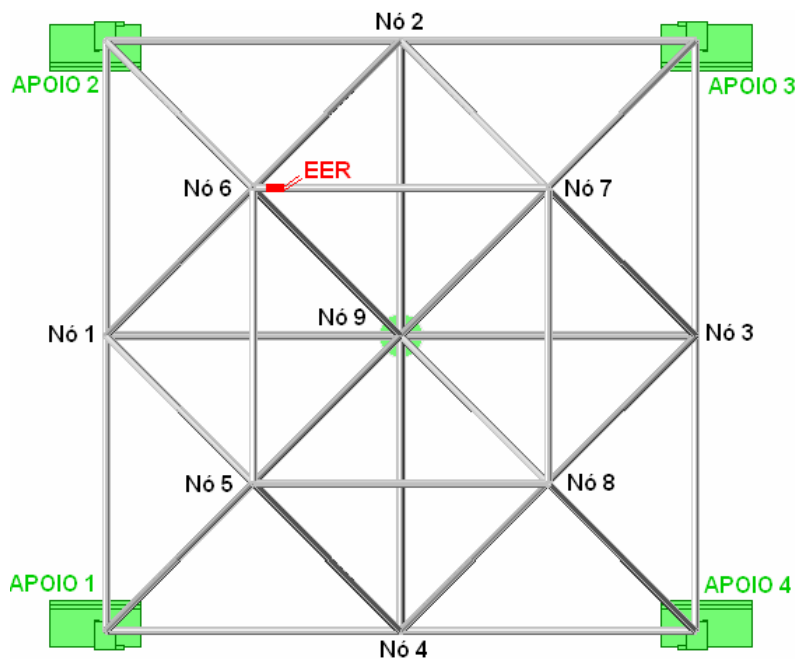


Figura 12: Planta do protótipo com numeração dos nós e apoios



Figura 13: Instrumentação do nó 9 central

Os deslocamentos dos nós 1, 2, 3 e 4 foram obtidos com defletômetro em base magnética, ver na Figura 14. Os deslocamentos dos nós 5, 6, 7 e 8 foram obtidos com defletômetro fixado em base de ensaio e deslocado por um sistema de pêndulo (fio de aço e peso), ver na Figura 15. Uma extremidade do fio de aço é fixada no nó e a outra no peso. Os nós 10, 11, 12 e 13 são respectivamente os apoios 1, 2, 3 e 4, e não apresentam deslocamento vertical, pois estão restringidos pela estrutura.



Figura 14: Instrumentação dos nós 1, 2, 3 e 4



Figura 15: Instrumentação dos nós 5, 6, 7 e 8

4.4 Sistema de aplicação de força nos protótipos

Um sistema de carregamento foi localizado sob a laje de reação. Este é composto por um macaco hidráulico de dupla ação e capacidade de 300kN, uma célula de carga de leitura máxima de 500kN, placas de aço para uniformizar a carga na célula e equilibrar o sistema, e cabo de aço de protensão com sistema de cunha, ver Figura 16.

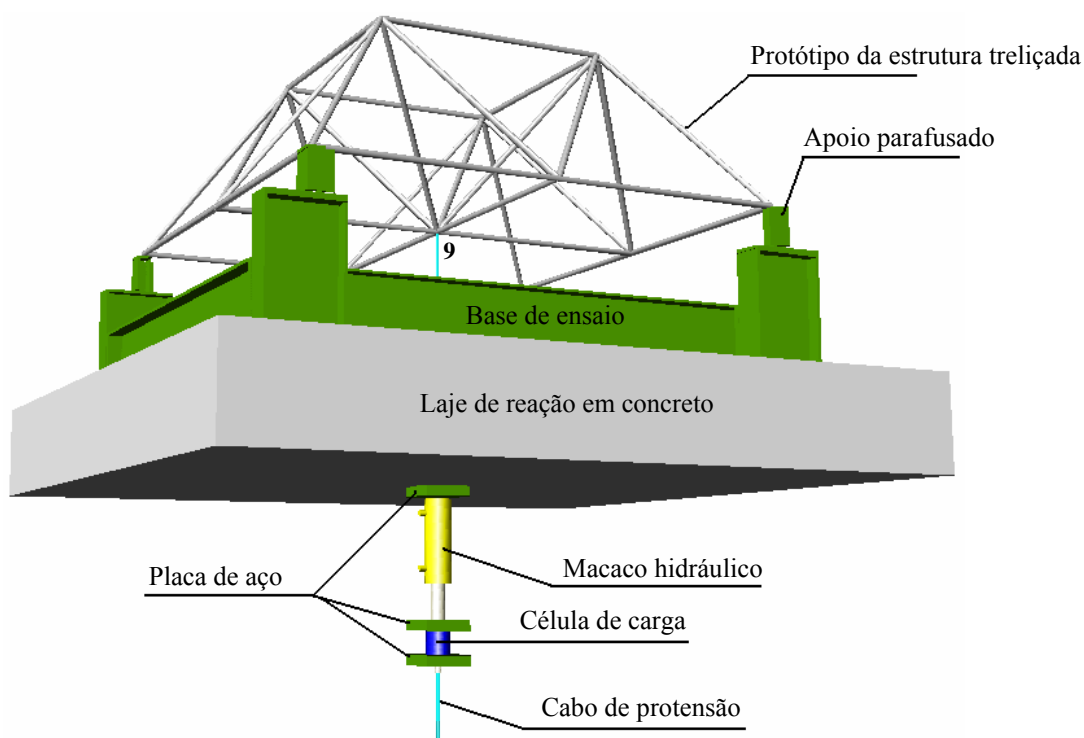


Figura 16: Sistema de carregamento na laje de reação

O cabo de protensão é fixado na estrutura no nó 9. Pode-se observar que o cabo de protensão atravessa a laje de reação por um furo e é fixado com uma peça de ligação e cunha de protensão ao nó 9. O cabo de protensão puxa a estrutura de cima para baixo, pelo nó 9, devido à ação de um macaco hidráulico.

4.5 Procedimento durante o ensaio

Foi aplicado um passo de carga de 1kN, ou 100kgf no painel de leitura (Ver Figura 17). Após a aplicação de cada passo de carga segue a leitura dos defletômetros. Cada leitura foi verificada e anotada em folha de anotação por dois apontadores, de modo a reduzir erros (Figura 18). Ao final destes procedimentos aplicava-se mais um acréscimo de carga de 1kN. O ensaio prosseguiu, passo a passo de carga, até a estrutura não suportar mais carregamento externo. A Figura 19 mostra uma visão geral do acompanhamento dos ensaios por monitores no laboratório de estruturas da Universidade de Brasília (UnB).



Figura 17: Bomba hidráulica de acionamento manual

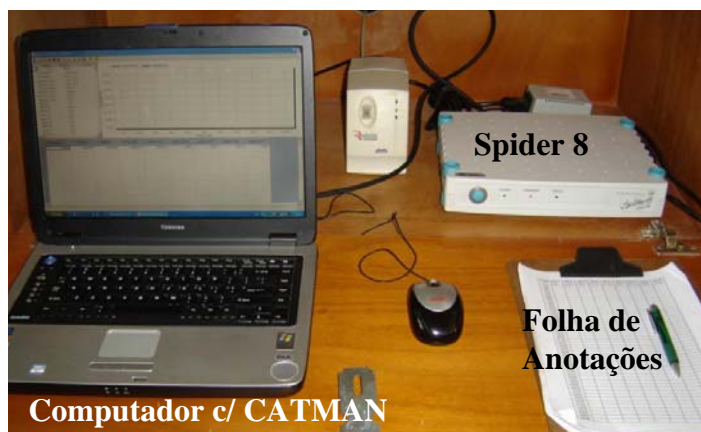


Figura 18: Sistema de aquisição e processamento de dados



Figura 19: Esquema geral do acompanhamento dos ensaios

4.6 Resultados dos ensaios experimentais

Para análise dos deslocamentos nodais foram traçados diagramas de carregamento versus deslocamento nodal. Para possibilitar a comparação entre os dois modelos de protótipos foram fixados os valores máximos dos eixos. No eixo do carregamento (abscissa) foi considerado um valor máximo de 42kN. No eixo dos deslocamentos (ordenada) foi considerado um valor máximo de 50mm (Ver Figura 20).

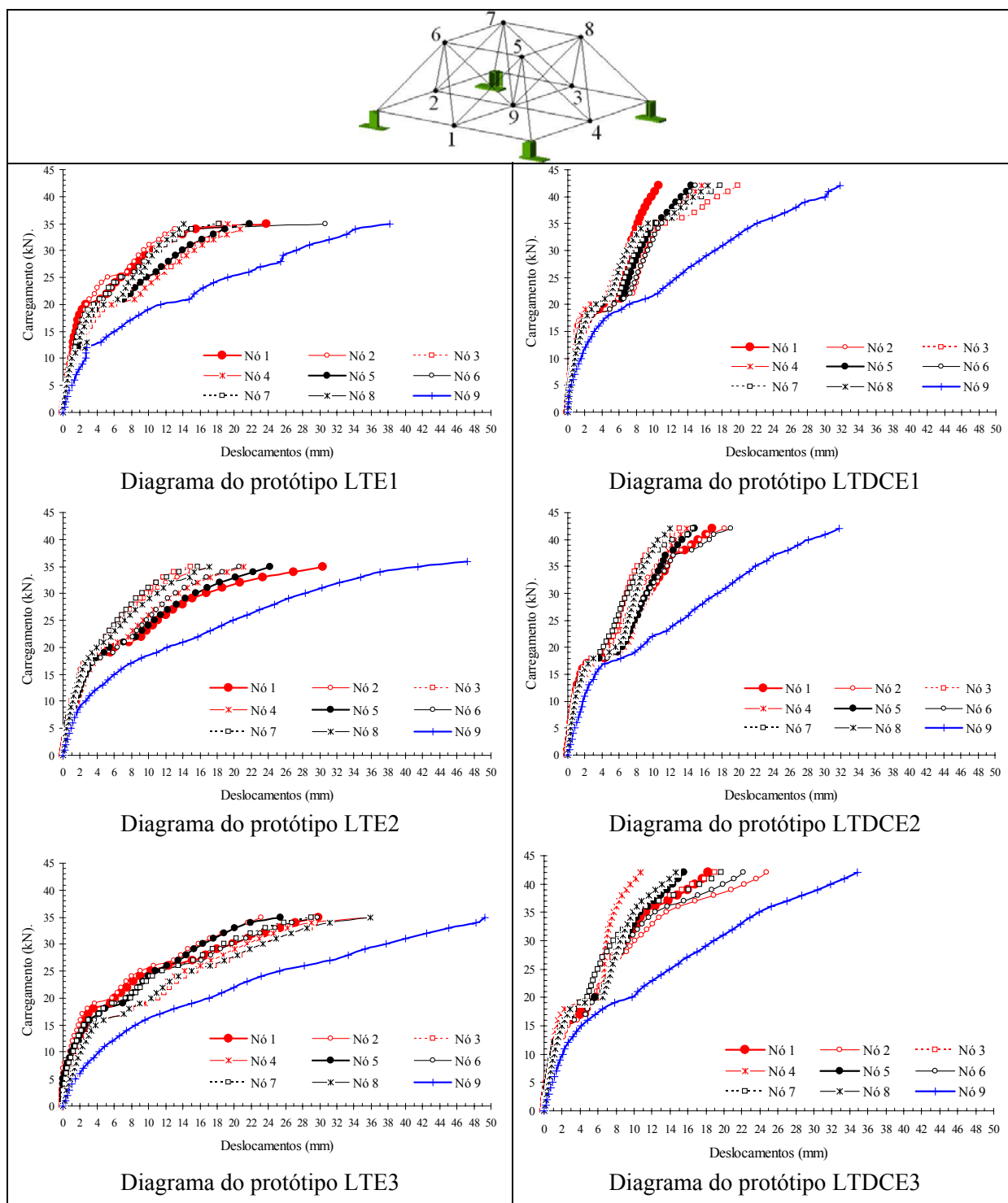


Figura 20: Diagrama carregamento versus deslocamento nodais Protótipos LT e LTDC

Como esperado os maiores deslocamentos verticais foram observados no nó 9, central. Desta forma, apenas os resultados do nó 9 será considerado para comparação dos resultados entre as estruturas com ligações típicas (LTE) e as estruturas com ligações típicas com distanciador e cobrejunta (LTDCE). É apresentada na Figura 21 a sobreposição das linhas de tendência polinomial da média aritmética entre os ensaios realizados para cada modelo.

O ponto “1” (36kN; 46mm) e o ponto “2” (42kN; 32mm) representam os pontos de deslocamentos x carregamentos de colapso global das estruturas, respectivamente para os modelos LTE e LTDCE. Note que os modelos LTDCE apresentam menor deslocamento para uma maior carga de colapso em relação aos modelos LTE. Apesar dos ensaios das estruturas com ligação típica ter prosseguido até a estrutura não absorver mais carregamento (ponto “1”), o colapso é considerado quando esta sofre deformações excessivas com formação de charneiras plásticas, ponto “3” (25kN).

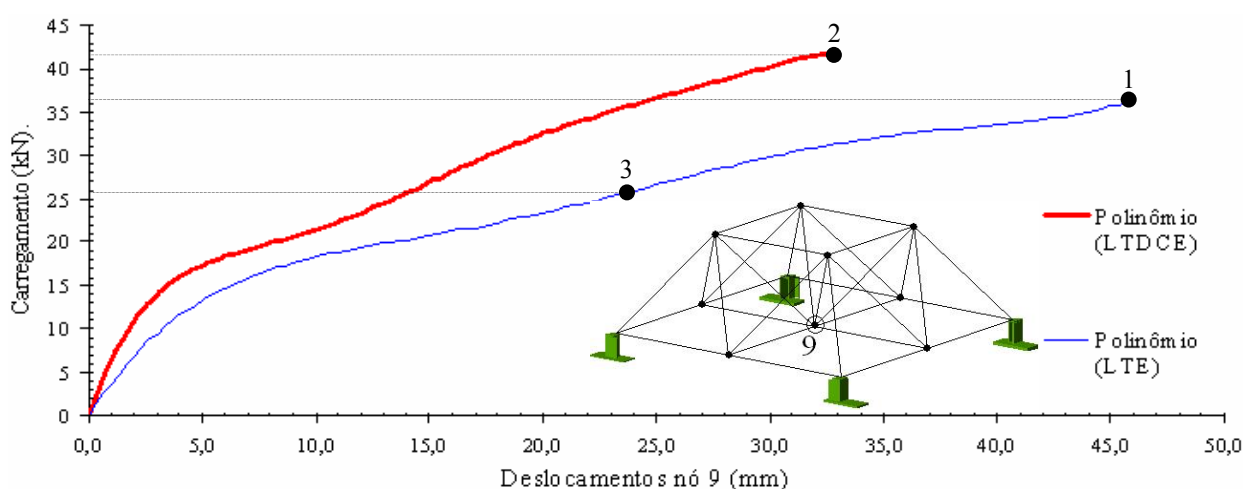


Figura 21: Diagrama carregamento versus deslocamento vertical do nó 9 (LTE e LTDCE)

O colapso local da ligação com nós típicos (LTE) foi com uma carga “P” de 25,0kN no nó 9 (central), caracterizado por um excesso de deformação no nó, Figura 22. O colapso das estruturas espaciais com nó típico reforçado (LTDCE) foi evidenciado a uma carga “P” de 42,0kN no nó 9 (central). Tal colapso foi caracterizado pela flambagem abrupta de um elemento comprimido, Figura 23.



Figura 22: Formação de charneira plástica - LTE (Ponto 3 - 25kN)



Figura 23: Colapso do elemento comprimido – LTDCE (Ponto 2 - 42kN)

5 ESTUDO NUMÉRICO

O estudo numérico foi desenvolvido via método dos elementos finitos, considerando o comportamento elasto-plasto do material. Desta forma, foram estudados dois modelos de estruturas treliçadas tridimensionais. A primeira estrutura é constituída por nó típico “LT”. A segunda estrutura apresenta nó típico com distanciador e chapa cobre-junta “LTDC”, que é o produto final desta etapa do trabalho. Os modelos foram discretizados com elementos de placa.

5.1 Elemento de placa (SHELL43)

O programa de análise, fundamentado no método de elementos finitos, aplicado no estudo foi o ANSYS. Neste foi considerado análise não-linear. Os elementos das treliças (banzos e diagonais), bem como, parafusos e distanciadores foram discretizados com elementos de placa SHELL43 da biblioteca de elementos do ANSYS.

O elemento “SHELL43” é um elemento de placa do programa de elementos finitos ANSYS, 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. A geometria e sistemas de coordenadas podem ser vistos na Figura 24.

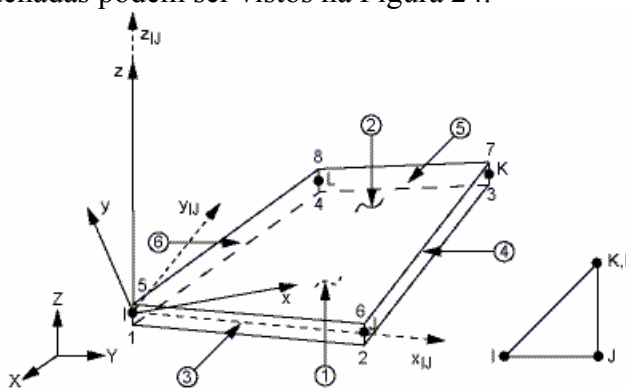


Figura 24: Elemento de Placa (SHELL43)

5.2 Restrições nos modelos – LT e LTDC

A Figura 25 mostra o modelo típico discretizado e as restrições impostas na estrutura treliçada. Estas são válidas tanto para o modelo com ligação típica (LT) como para o modelo com ligação típica, distanciador e chapa cobrejunta (LTDC). A Figura 26 mostra em detalhe os nós de apoio (Apoio 1, 2, 3 e 4) onde foram aplicadas as restrições. Foram aplicadas restrições de 3º gênero no perímetro dos furos, devido ao engaste dos parafusos. Restrições de primeiro gênero, foram aplicadas nos demais nós do apoio, impedindo desta forma o deslocamento vertical do apoio. Tal procedimento permitiu uma maior distribuição das tensões na região do apoio, o que evitou os erros de convergência. Verificou-se também que desta forma o modelo assemelhou-se com o protótipo experimental.

Durante a calibração do modelo foi evidenciado a necessidade de solidarizar banzos e diagonais. Para tanto alguns nós das diagonais e banzos, da região amassada, foram acoplados. Esta consideração gerou resultados satisfatórios, comparados com os resultados de Souza (2003), que utilizou elementos de contato nas faces dos elementos amassados.

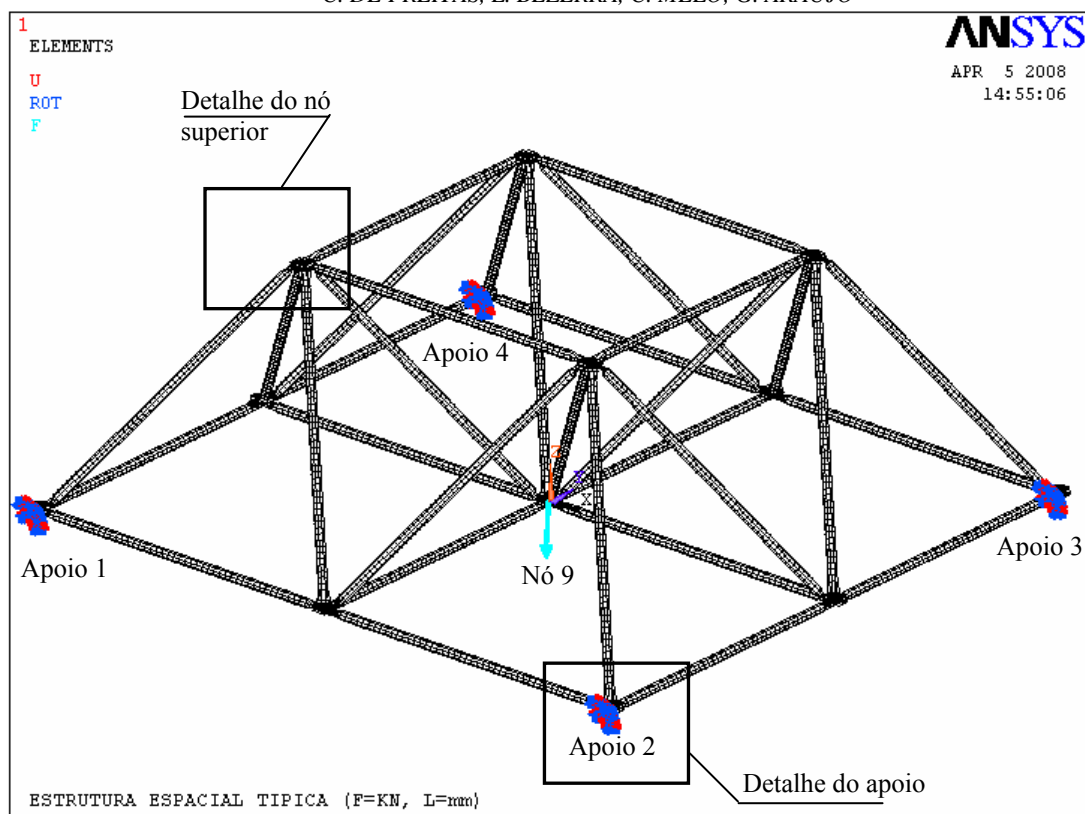


Figura 25: Discretização do modelo típico em elementos finitos

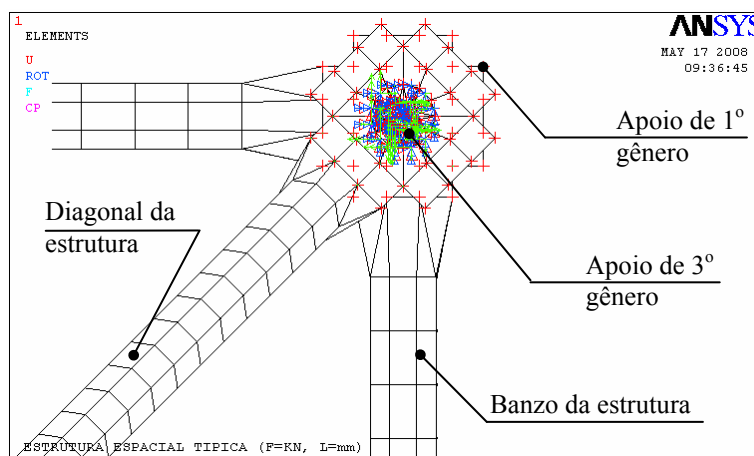


Figura 26: Detalhe das restrições no apoio

5.3 Discretização da estrutura com nó típico (LT)

Na discretização da estrutura treliçada tridimensional constituída com nó típico foram utilizados 14.408 elementos de placa (SHELL43), com um total de 12.560 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 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, e a malha do parafuso, discretizada com 24 elementos de placa.

A Figura 25 mostrou a discretização do conjunto completo da estrutura treliçada tridimensional com nó típico. As dimensões externas são similares às estruturas do ensaio experimental. A Figura 27 dá ênfase ao detalhe da ligação. A ligação entre banzos e diagonais foi feita com parafusos discretizados em elementos de placa (SHELL43), com material tipo 3. Nos elementos da extremidade amassada foram adotados elementos de placa (SHELL43) e o material tipo 2. À distância dos nós de banzos e diagonais foi considerada com o parafuso (Ver Figuras 28 e 29).

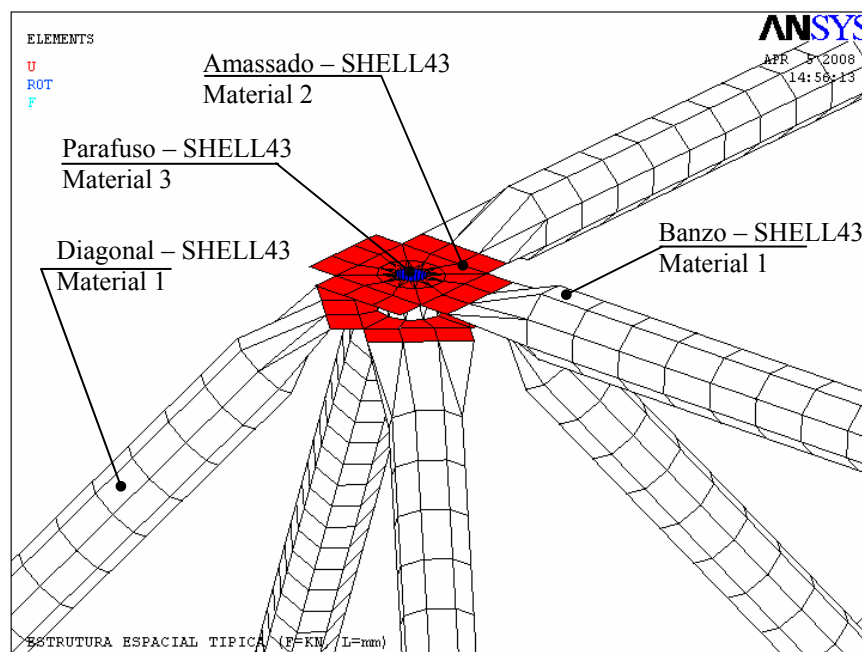


Figura 27: Detalhe da ligação com nó típico (LT)

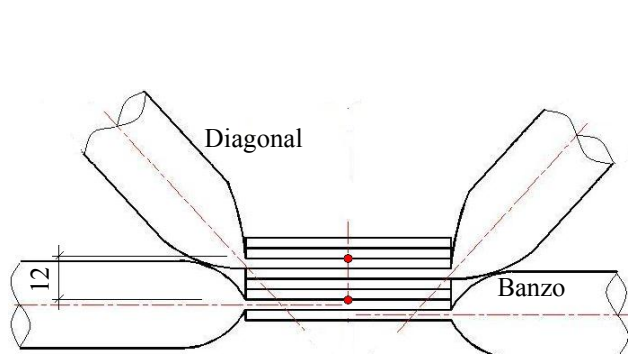


Figura 28: Comprimento do parafuso para ligação com nó típico

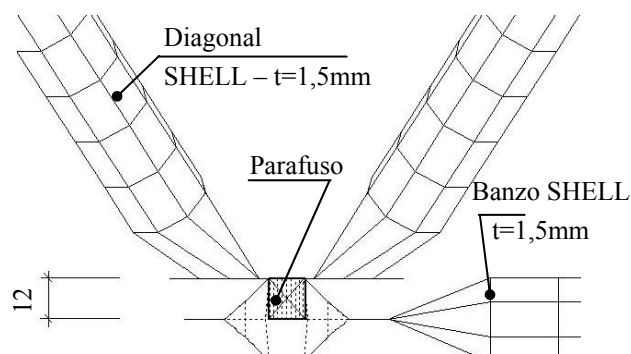


Figura 29: Elementos da ligação com nó típico

5.4 Discretização da estrutura com nó típico, distanciador e cobrejunta (LTDC)

Na discretização da estrutura treliçada tridimensional com típico e distanciador (LTDC) foram utilizados 14.564 elementos de placa (SHELL43), 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 composição dos parafusos.

A Figura 25 mostrou a discretização do conjunto completo da estrutura treliçada com nó típico, para o modelo LTDC é adotado o detalhe mostrado na Figura 30. Note nesta figura a posição dos banzos e diagonais, nestes foi adotado o material tipo 1. A ligação entre banzos e diagonais foi feita com parafusos e distanciadores discretizados em elementos de placa (SHELL43) e material tipo 3. A cobrejunta foi considerada a partir do acréscimo de espessura. Nos elementos da extremidade amassada foram adotados elementos de placa (SHELL43) e o material tipo 2.

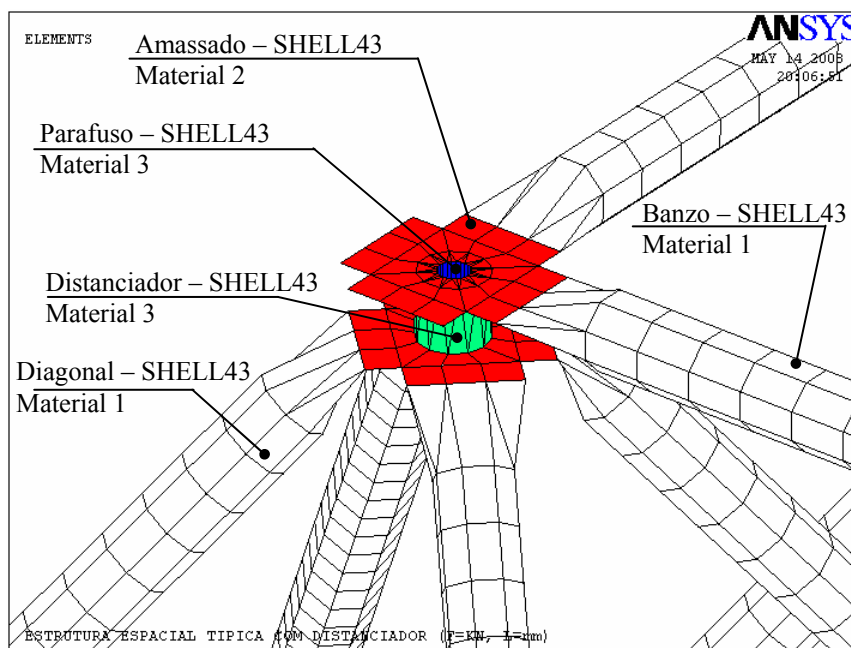


Figura 30: Detalhe da ligação com nó típico, distanciador e cobrejunta (LTDC)

5.5 Carregamentos nos modelos – LT e LTDC

O carregamento foi aplicado no nó 9, como mostrou a Figura 25. Este carregamento foi aplicado na estrutura distribuindo a carga igualmente nos nós do perímetro do furo da ligação central (nó 9). Este perímetro apresenta 24 nós. A carga total aplicada no modelo com ligação típica foi de 48kN, ou seja 2kN/nó. A carga total aplicada no modelo com ligação típica, distanciador e chapa cobrejunta, foi de 72kN, ou seja 3kN/nó. Para ambos os modelos, as cargas aplicadas foram fragmentadas em passos de carregamentos. Estas frações de carga foram determinadas de forma automática e a critério do programa, conforme os processos de convergência durante as análises.

5.6 Materiais e calibração dos modelos

Os parafusos e distanciadores são maciços e os ensaios experimentais comprovaram que não houve deformação nestes componentes. Desta forma estes foram considerados que seus materiais permanecem dentro do regime elástico em todo o ensaio. Assim para os parafusos e distanciadores foi adotado o material tipo 3. Para este foi adotado um aço com módulo de elasticidade de 205.000MPa, peso específico do material de $7,7 \times 10^{-7}$ kN/mm² e coeficiente de Poisson de 0,3.

Para os elementos dos banzos e diagonais foram adotados os resultados do ensaio de caracterização do material. Assim nos elementos dos banzos e diagonais, foi adotado o material tipo 1, que apresenta o módulo de elasticidade do aço de 205.000MPa, tensão de escoamento de 300 MPa, peso específico do material de $7,7 \times 10^{-7}$ kN/mm² e

coeficiente de Poisson de 0,3. A Figura 31 mostra o gráfico do comportamento físico do material tipo 1.

Quanto aos elementos das extremidades amassadas dos banzos e diagonais, foram feitas algumas considerações para atribuição do material. Inicialmente sabe-se que o processo de estampagem provoca concentração de tensões e conseqüentemente alteração no comportamento físico dos materiais. Outro processo que altera o comportamento físico do material é a dobra da extremidade das diagonais para determinar a angulação final. Desta forma não há como caracterizar o material da extremidade amassada de forma direta. Sendo assim, o gráfico do comportamento físico do material tipo 2, Figura 32, foi determinado pela calibração do modelo.

O gráfico do material tipo 2 foi alterado diversas vezes, até que os resultados de deslocamento, da estrutura com nó típico computacional convergi-se para o experimental. Após a calibração do material tipo 2, com base no modelo com ligação típica, foi estudado o modelo com ligação típica, distanciador e chapa cobrejunta, considerando este material. Desta forma foi possível verificar a eficiência do distanciador na ligação típica.

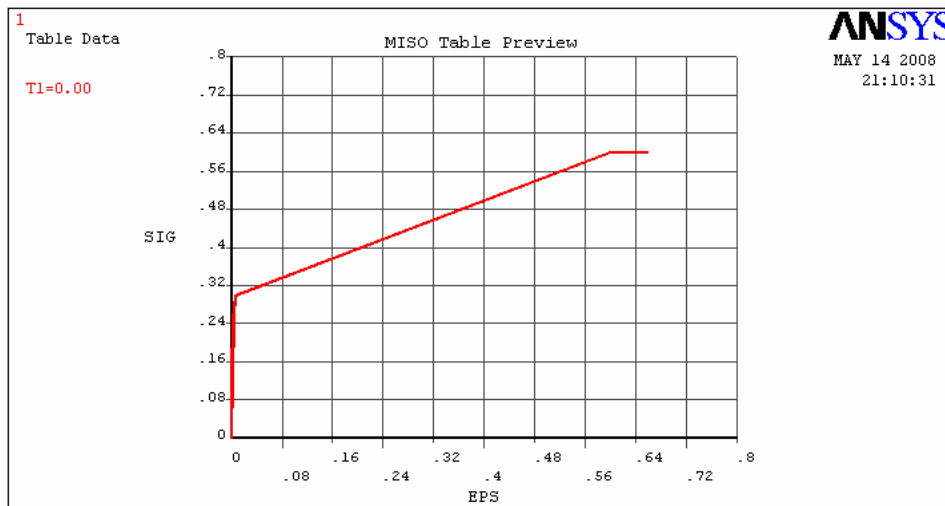


Figura 31: Comportamento físico do material tipo 1 (kN/mm^2)

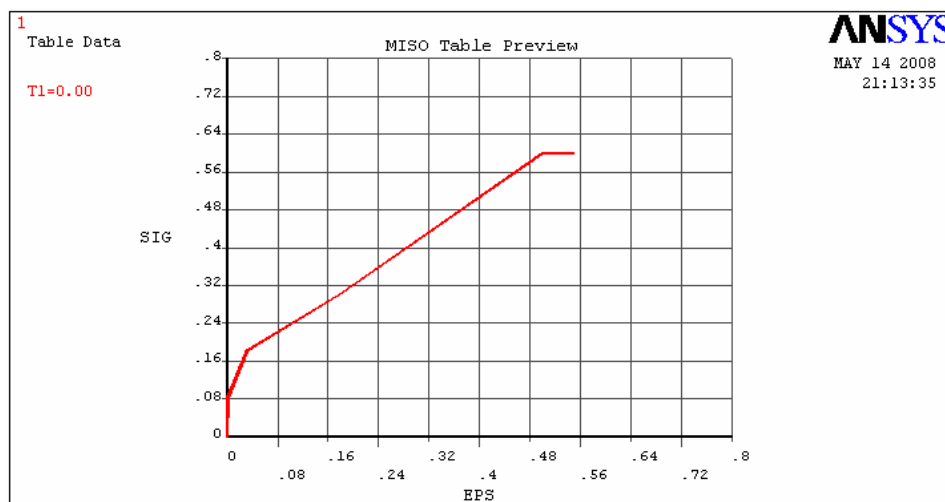
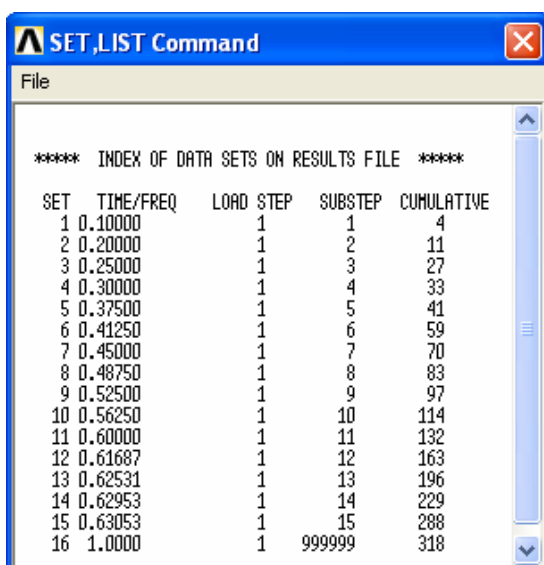


Figura 32: Comportamento físico do material tipo 2 (kN/mm^2)

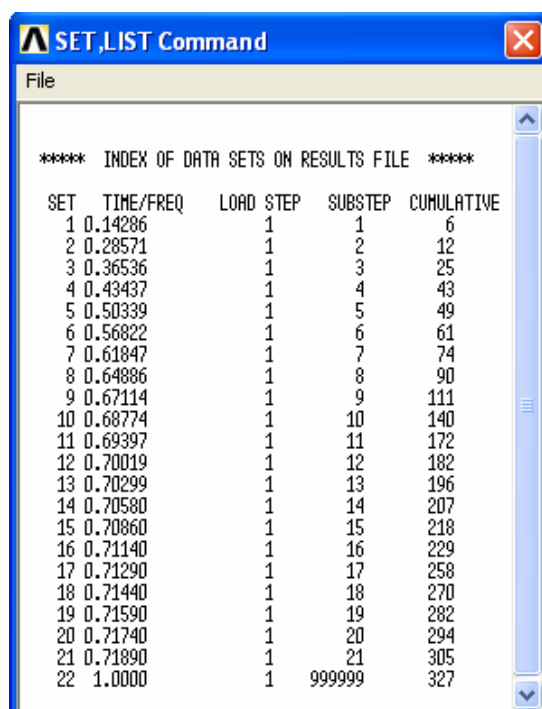
5.7 Resultados do estudo numérico

Os modelos numéricos foram processados com passos de carga, definidos automaticamente pelo programa, de acordo com quantidade de interações necessárias e possibilidade de convergência. Desta forma as Figuras 33 e 34 mostram o resumo das análises geradas pelo programa para os modelos LT e LTDC, respectivamente. Nesta figura tem-se: “SET” é a quantidade de passos de carga; “TIME/FREQ” é a fração da carga total; “CUMULATIVE” é o número de interações geradas em cada passo de carga, de forma acumulativa. É possível notar que o modelo LT convergiu até o 15º passo com 63,053% da carga aplicada (48kN), com 288 iterações totais. E o modelo LTDC convergiu até o 21º passo com 71,89% da carga aplicada (72kN), com 305 iterações totais. A estrutura com nó típico (LT) entrou em colapso devido ao colapso local da ligação, configurada pela Figura 35.



SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	0.10000	1	1	4
2	0.20000	1	2	11
3	0.25000	1	3	27
4	0.30000	1	4	33
5	0.37500	1	5	41
6	0.41250	1	6	59
7	0.45000	1	7	70
8	0.48750	1	8	83
9	0.52500	1	9	97
10	0.56250	1	10	114
11	0.60000	1	11	132
12	0.61687	1	12	163
13	0.62531	1	13	196
14	0.62953	1	14	229
15	0.63053	1	15	288
16	1.0000	1	999999	318

Figura 33: Resumo das análises processadas pelo programa ANSYS - LT



SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	0.14286	1	1	6
2	0.28571	1	2	12
3	0.36536	1	3	25
4	0.43437	1	4	43
5	0.50339	1	5	49
6	0.56822	1	6	61
7	0.61847	1	7	74
8	0.64886	1	8	90
9	0.67114	1	9	111
10	0.68774	1	10	140
11	0.69397	1	11	172
12	0.70019	1	12	182
13	0.70299	1	13	196
14	0.70580	1	14	207
15	0.70860	1	15	218
16	0.71140	1	16	229
17	0.71290	1	17	258
18	0.71440	1	18	270
19	0.71590	1	19	282
20	0.71740	1	20	294
21	0.71890	1	21	305
22	1.0000	1	999999	327

Figura 34: Resumo das análises processadas pelo programa ANSYS - LTDC

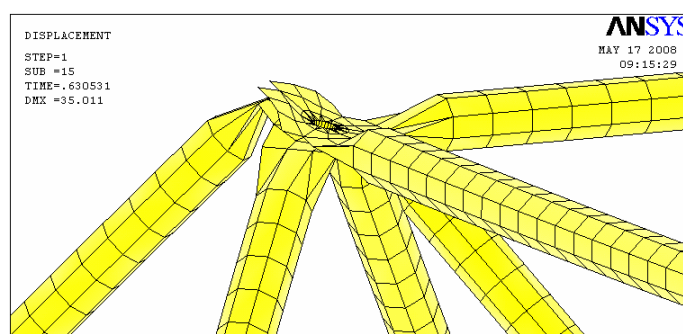


Figura 35: Deformada da ligação para o carregamento final - LT

A Figura 36 mostra graficamente um comparativo, das análises das estruturas com ligação típica (LT) e ligação típica com distanciador e cobrejunta (LTDC), considerando a evolução do deslocamento do nó central em relação ao carregamento

aplicado. É possível notar que a estrutura com ligação LTDC apresenta menores deslocamentos em relação à LT, além de apresentar maior carga de colapso, reforçando as evidências já constatadas no estudo experimental.

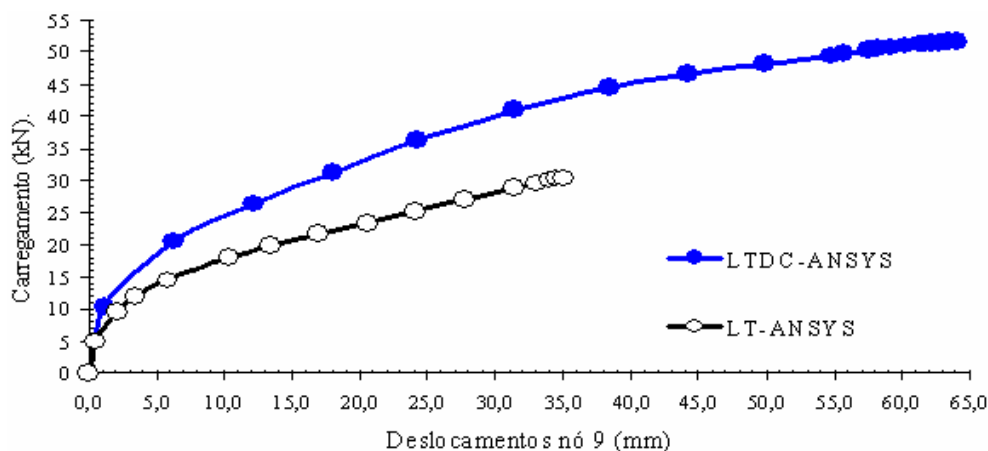


Figura 36: Carregamento versus deslocamento do nó central considerando os modelos LT e LTDC

6 DETERMINAÇÃO DA CARGA DE COLAPSO APLICANDO AS NORMAS

Neste item pode ser apreciada determinação da carga de colapso quando calculada pela aplicação das Normas NBR8800 (1986), AISC-LRFD (1999), e EUROCODE (1992). Estes estudos abrangem apenas os resultados dos protótipos 2x2 (Figura 9.1), ensaiadas nesta tese. Neste pode ser observada a carga de projeto “ N_d ” e a carga aplicada “ P ”. A carga “ P ” é a carga aplicada no nó central 9.

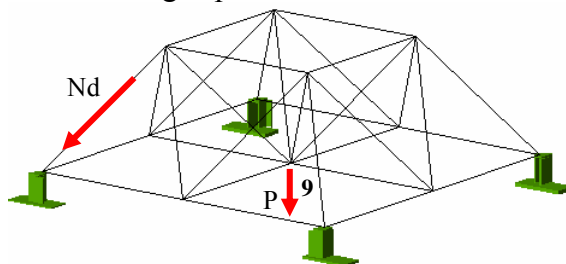


Figura 37: Localização das cargas no Protótipo 2x2m

6.1 Carga de colapso teórica aplicando a Norma NBR8800 (1986)

A tensão de escoamento do material “ f_y ” é igual a 30kN/cm^2 e o módulo de elasticidade “ E ” é igual a 20500kN/cm^2 . A relação entre o diâmetro externo do tubo ($D_e=25,4\text{mm}$) e sua espessura ($t=1,5\text{mm}$), é menor que o valor limite indicado na Tabela 1 da Norma. Portanto, é considerado o coeficiente de redução igual a um ($Q=1$). O raio de giração “ i ” igual a $0,8467\text{cm}$, o comprimento de flambagem “ L ” é igual a 100cm e o parâmetro de flambagem “ K ” igual a 1, segundo o Anexo 1 da Norma. Assim, aplicando a Equação 2, encontramos o parâmetro de esbeltez “ λ ” igual a 1,4382. Adotando este parâmetro de esbeltez e considerando a curva “ a ” de flambagem para o perfil tubular, segundo a classificação da Tabela 3 da Norma, podemos encontrar na Tabela 4 da Norma o valor de “ ρ ” igual a 0,408. Adotando este coeficiente, as recomendações da norma e desconsiderando o coeficiente de minoração do material obtemos, aplicando a Equação 3, uma resistência à compressão “ N_d ” de $13,79\text{kN}$.

$$\lambda = \frac{1}{\pi} \frac{KL}{i} \sqrt{\frac{Qf_y}{E}} = \frac{1}{3,1415} \times \frac{1 \times 100}{0,8467} \sqrt{\frac{1 \times 30}{20500}} \rightarrow \lambda = 1,4382 \quad (2)$$

$$N_d = A_g f_y \rho \quad (3)$$

O colapso do tubo é obtido pela flambagem devido à carga axial de compressão de 13,79kN. Para tanto, por decomposição vetorial segundo a Figura 37, para que um elemento da estrutura seja submetido a tal carregamento é necessária uma aplicação da carga “P” de 39,2kN no nó 9 (central).

6.2 Calculo da resistência à compressão segundo a AISC-LRFD (1999)

Considerando as características do tubo, já citadas anteriormente, e aplicando a Equação 4 do AISC (1999), tem-se o parâmetro de esbeltez “ λ_c ” igual a 1,4382. Como “ λ_c ” é menor que 1,5 foi aplicado a condição I da Equação 5, e obtido uma tensão crítica “ f_{cr} ” de 12,62kN/cm². Adotando esta tensão crítica “ f_{cr} ”, a área bruta “ A_g ” de 1,126cm² e desconsiderando o coeficiente de minoração do material obtemos, aplicando a Equação 6, uma resistência à compressão “ N_d ” de 14,21kN.

$$\lambda_c = \frac{1}{\pi} \frac{KL}{i} \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{1}{3,1415} \times \frac{1 \times 100}{0,8467} \sqrt{\frac{30}{20500}} \rightarrow \lambda_c = 1,4382 \quad (4)$$

$$I) \lambda_c \leq 1,5 \Rightarrow f_{cr} = (0,658^{\lambda_c^2}) f_y \quad (5)$$

$$II) \lambda_c > 1,5 \Rightarrow f_{cr} = \left(\frac{0,877}{\lambda_c^2} \right) f_y$$

$$N_d = A_g f_{cr} = 1,126 \times 12,62 \rightarrow N_d = 14,21kN \quad (6)$$

O colapso do tubo é obtido pela flambagem devido à carga axial de compressão “ N_d ” de 14,21kN. Para tanto, por decomposição vetorial segundo a Figura 37, para que um elemento da estrutura seja submetido a tal carregamento é necessária uma aplicação uma carga “P” de 40,41kN no nó 9 (central).

6.3 Calculo da resistência à compressão segundo o EUROCODE (1992)

Considerando as características do tubo, neste item foi calculada a resistência segundo o EUROCODE (1992). Considerando ainda o parâmetro de esbeltez “ λ_c ” igual a 1,4382, e a constante “ α ” igual a 0,281, foi calculado os coeficientes “ β ” e “ ρ ”, com as Equações 7 e 8, respectivamente. Adotando a tensão crítica “ f_{cr} ”, a área bruta “ A_g ” de 1,126cm² e desconsiderando o coeficiente de minoração do material, obtemos, aplicando a Equação 10, uma resistência à compressão “ N_d ” de 12,84kN.

$$\beta = \frac{1}{2\lambda_c^2} [1 + \alpha(\lambda_c - 0,2) + \lambda_c] \Rightarrow \beta = 0,8258 \quad (7)$$

$$\rho = \beta - \sqrt{\beta^2 - \frac{1}{\lambda_c^2}} \Rightarrow \rho = 0,38 \quad (8)$$

$$f_{cr} = \rho f_y \Rightarrow f_{cr} = 11,41 \text{ kN/cm}^2 \quad (9)$$

$$N_d = A_g f_{cr} = 1,126 \times 11,41 \rightarrow N_d = 12,84 \text{ kN} \quad (10)$$

O colapso do tubo é obtido pela flambagem devido à carga axial de compressão “ N_d ” de 12,84kN. Para tanto, por decomposição vetorial segundo a Figura 37, para que um elemento da estrutura seja submetido a tal carregamento é necessária uma aplicação uma carga “P” de 36,54kN no nó 9 (central).

7 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

7.1 Resultado experimental versus análise numérica (ANSYS)

Como complemento do estudo das estruturas com ligação típica “LT” e ligação típica com distanciador e chapa cobrejunta “LTDC”, neste item são comparados os resultados dos estudos experimentais e numéricos não linear. Nas Figuras 38 e 39 podem ser observados os resultados dos deslocamentos devido às cargas aplicadas para as estruturas LT e LTDC, respectivamente.

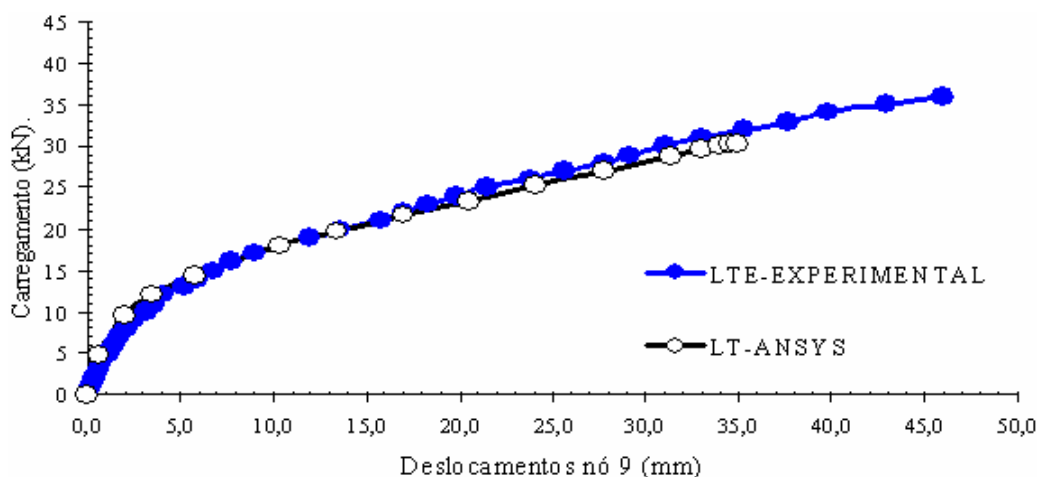


Figura 38: Deslocamento do nó central devido a carga aplicada - LT

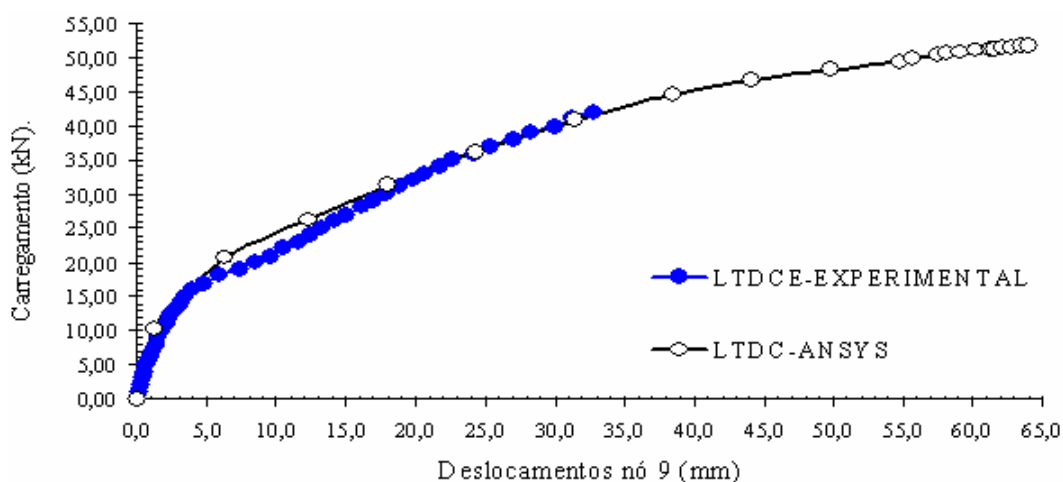


Figura 39: Deslocamento do nó central devido a carga aplicada – LTDC

É possível observar em ambos os modelos que os resultados numéricos no programa

ANSYS, convergiram satisfatoriamente, para os resultados obtidos nos ensaios experimentais. No entanto para o modelo com LT, Figura 38, a análise numérica não atingiu a carga máxima obtida experimentalmente. O contrário ocorreu com o modelo com LTDC onde a carga final da análise numérica superou a carga máxima obtida no ensaio experimental.

7.2 Resultado experimental versus aplicação das normas

O gráfico da Figura 40 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).

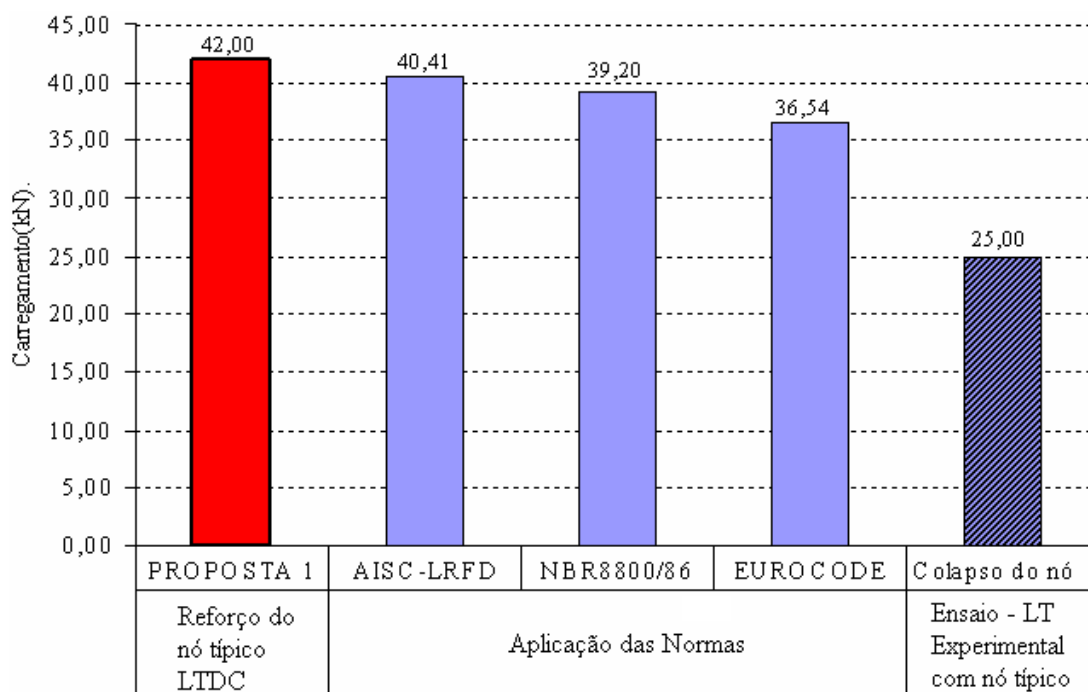


Figura 40: Comparação das cargas de colapso

Quanto às estruturas com nó típico “LT” foi considerado como colapso da estrutura o ponto do “colapso do nó” (25kN), pois a estrutura apresenta excessivas deformações plásticas e formação de charneira plástica.

Quanto à aplicação das normas “AISC-LRFD” (40,41kN), “NBR8800” (39,2kN) e “EUROCODE” (36,54kN), observou-se que são superiores 61,64%, 56,8% e 46,16%, respectivamente, ao valor do colapso da estrutura “LT” (25kN).

Logo as normas não estão a favor da segurança no que se refere a estruturas com nó típico “LT”. Pois as normas regem os seus conceitos com base no colapso do elemento comprimido por flambagem. E em estruturas com nó típico já é sabido que o colapso é regido pelo colapso da ligação.

Quanto à carga de colapso da estrutura com nó típico, distanciador e chapa sobreposta “LTDC” (42kN), foi observado um acréscimo de 68% em relação à carga de colapso do nó “LT” (25kN). Tal resultado evidencia um novo marco no estudo do reforço de ligações com nó típico.

8 CONCLUSÃO

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). Pois o colapso da estrutura é obtido pelo colapso por flambagem dos elementos comprimidos e a integridade da ligação foi garantida.

9 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;
- 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.
- 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;