

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL DA CONEXÃO**  
**ESTAMPADA DE TRELIÇA ESPACIAL DE AÇO SOB**  
**CARREGAMENTOS ESTÁTICO E CÍCLICO.**

**CLEIRTON ANDRÉ SILVA DE FREITAS**

**ORIENTADOR: LUCIANO MENDES BEZERRA**

**TESE DE DOUTORADO EM ESTRUTURAS E**  
**CONSTRUÇÃO CIVIL**

**PUBLICAÇÃO: E.TD-002A/08**

**BRASILIA / DF: JULHO / 2008**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL DA CONEXÃO ESTAMPADA  
DE TRELIÇA ESPACIAL DE AÇO SOB CARREGAMENTOS  
ESTÁTICO E CÍCLICO.**

**CLEIRTON ANDRÉ SILVA DE FREITAS**

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR.

APROVADA POR:

---

ORIENTADOR: LUCIANO MENDES BEZERRA, PhD (UnB)

---

EXAMINADOR INTERNO: ATHAIL RANGEL PULINO FILHO, DSc (UnB)

---

EXAMINADOR EXTERNO: JOSÉ ALEXANDER ARAÚJO, PhD (UnB)

---

EXAMINADOR EXTERNO: KHOSROW GHAVAMI, PhD (PUC-RJ)

---

EXAMINADOR EXTERNO: ALEX SANDER CLEMENTE DE SOUZA, DSc (USP-SC)

**BRASILIA / DF: JULHO / 2008**

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

FREITAS, CLEIRTON ANDRÉ SILVA DE

Análise teórico-experimental da conexão estampada de treliça espacial de aço sob carregamentos estático e cíclico. Tese de doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

## **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

FREITAS, C.A.S. (2008). Análise teórico-experimental da conexão estampada de treliça espacial de aço sob carregamentos estático e cíclico. Tese de doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

## **CESSÃO DE DIREITOS**

NOME DO AUTOR: Cleirton André Silva de Freitas

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Análise teórico-experimental da conexão estampada de treliça espacial de aço sob carregamentos estático e cíclico.

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta tese e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste trabalho pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Cleirton André Silva de Freitas

Amâncio Pereira, Nº 471, casa 03 – Condomínio Jardins do Sul - Passaré.

CEP 60.861.770 Fortaleza – CE – Brasil.

andrefreitas@unb.br - andre\_fortal@hotmail.com

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos verdadeiros doutores da minha vida: minha mãe “mãe Cleuza” e ao meu pai “mestre Lima”. Pois esta tese é pequena se comparada à grandeza dos ensinamentos passados aos cinco filhos.

“Algo só é impossível até que alguém duvide e acabe provando o contrário.”

Albert Einstein

“Se você pensar que pode ou sonhar que pode,  
Comece.

Ousadia tem genialidade, poder e magia.

Ouse fazer e o poder lhe será dado .”

Goethe

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo e por minha vida.

Aos meus pais, Clairton Lima e Maria Cleuza, os quais dedico este trabalho e o meu amor.

Ao meu orientador, Professor Luciano, pela sua amizade, apoio, compreensão e orientação.

Aos Professores: Nagato (UnB), Alex Sander (USP-SC), e Alexander Araújo (UnB) pelas inúmeras gentilezas e generosidades.

Aos professores do programa de Pós-Graduação em estruturas e Construção Civil, pelos ensinamentos e profissionalismo.

Aos professores de graduação da UFC (Ceará), pela minha formação profissional.

Aos professores da Escola Técnica Federal do Ceará, por me ensinar a gostar de estudar.

A CAPES, pelo indispensável incentivo financeiro.

Aos amigos da Universidade de Brasília, Engevix e Iesplan, um abraço a todos. Não citei nomes pois tenho medo de esquecer alguém.

Aos meus amigos de Fortaleza, que sempre torcem por mim.

Aos meus familiares, tios, tias, primos e primas, que são muitos, e amo a todos.

Aos meus amados: Andréa & Hans, Anderson, Andrielle & Sidney e Netinho que sempre incentivaram a minha jornada e fizeram essa conquista parecer maior.

Ao querido sobrinho Caio por ser a alegria de nossa família.

Agradecimento especial aos meus queridos avôs e avós: Vovô Chico (*In Memoriam*) & Vovó Neuza (*In Memoriam*) e Vovô Luiz (*In Memoriam*) que iluminaram os meus passos.

Agradecimento especial a minha querida Vovó Lourdes pelo carinho e amor.

# **ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL DA CONEXÃO ESTAMPADA DE TRELIÇA ESPACIAL DE AÇO SOB CARREGAMENTOS ESTÁTICO E CÍCLICO.**

**RESUMO:** As estruturas tridimensionais em barras de aço, largamente conhecidas como treliças espaciais, são muito aplicadas na construção de coberturas. Estas são compostas por barras conectadas, geralmente, por meio de parafusos em nós. Existem diversos tipos de ligações para estas treliças 3D, muitas destas patenteadas e outras não. No Brasil, a ligação mais aplicada em treliças 3D é a ligação de nó típico, produzida a partir do amassamento das extremidades das barras, gerando uma conexão de baixo custo de execução. Este nó típico é também conhecido como conexão estampada. Entretanto, vários acidentes em estruturas espaciais com este tipo de conexão já foram também notificados no Brasil. Este trabalho apresenta propostas para garantir maior segurança às estruturas treliçadas espaciais que usam o nó típico. Propõe-se, inicialmente, o uso de reforço e correção no sistema construtivo com o intuito de elevar a capacidade da conexão. As bases deste estudo são a diminuição da excentricidade e o aumento da rigidez da conexão com nó típico. Este trabalho também propõe uma nova metodologia para o cálculo e verificação dos elementos comprimidos de treliças espaciais baseada na teoria de limite superior do momento fletor existente na conexão em nó típico. Desta forma, o dimensionamento dos elementos comprimidos é feito por critérios de flexo-compressão. Sendo as grandes coberturas sujeitas às ações cíclicas do vento, este trabalho, também estuda de forma pioneira o comportamento do nó típico em relação à fadiga. Verifica-se, portanto, neste trabalho de forma experimental e numérica (via método dos elementos finitos) o ganho de resistência que se pode obter com as correções propostas, tanto no que diz respeito à resistência estática como à resistência à fadiga. Ao final deste trabalho conclui-se que as propostas apresentadas influenciam na melhoria da resistência e da segurança das treliças espaciais feitas em aço com conexões estampadas.

**Palavras chave:** Conexão, Treliça Espacial, Fadiga, Análise Teórico-Experimental.

# **THEORETICAL-EXPERIMENTAL ANALYSIS OF STEEL SPACE- TRUSS STAMPED CONNECTION UNDER STATIC AND CYCLIC LOADS.**

**ABSTRACT:** Three-dimensional structures made of steel bars, widely known as 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 basis for this are the reduction in the eccentricity and the increase in the rigidity of the typical node connection. This work also proposes a new methodology for the calculation and verification of the compressive elements of the space trusses based on upper bound limits of the bending moment existing in the typical node connection. Thus the design of the compressive elements is done by bending-compression criteria. 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.

**Keywords:** Connection, Space Truss, Fatigue, Experimental and Numerical Analyses.

# ÍNDICE

<b>CAPÍTULO</b>	<b>Página</b>
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. MOTIVAÇÃO DA PESQUISA.....	3
1.2. OBJETIVO.....	7
1.3. ORGANIZAÇÃO DA TESE.....	7
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
2.1. GEOMETRIA DA TRELIÇA ESPACIAL.....	10
2.1.1 Classificação das treliças espaciais quanto ao arranjo dos elementos em planta.....	10
2.1.1.1 Arranjo quadrado sobre quadrado sem diagonais esconsas.....	10
2.1.1.2 Arranjo quadrado sobre quadrado com diagonais esconsas.....	11
2.1.1.3 Arranjo quadrado sobre quadrado com aberturas internas.....	11
2.1.1.4 Arranjo quadrado sobre quadrado diagonal.....	12
2.1.1.5 Arranjo quadrado diagonal sobre quadrado diagonal.....	12
2.1.2 Classificação das treliças espaciais quanto ao arranjo dos elementos em elevação...	13
2.1.3 Formas construtivas das estruturas treliçadas tridimensionais.....	14
2.1.4 Elementos da treliça espacial.....	15
2.2. LIGAÇÃO DOS ELEMENTOS DA ESTRUTURA TRELIÇADA.....	16
2.2.1 Tipos de ligações aplicadas em outros países.....	17
2.2.2 Tipos de ligações mais aplicadas no Brasil.....	23
2.2.2.1 Nós patenteados.....	23
2.2.2.2 Nós não patenteados (domínio público).....	24
2.3. LIGAÇÃO DE ESTRUTURAS ESPACIAIS COM NÓ TÍPICO.....	25
2.3.1 Estudos em barras com extremidades amassadas.....	26
2.3.1.1 Estudos em barras apresentados por Gonçalves et al. (1996).....	26
2.3.1.2 Estudos em barras apresentados por Malite et al. (1997).....	27
2.3.1.3 Estudos em barras apresentados por Souza (1998).....	28
2.3.2 Estudos em estruturas com barras de extremidade amassada.....	30
2.3.2.1 Estudos em estruturas realizados por Batista & Batista (1997).....	30
2.3.2.2 Estudos em estruturas realizados por Souza (1998).....	31



<b>CAPÍTULO</b>	<b>Página</b>
2.3.2.3 Estudos em estruturas realizados por D’Este (1998).....	34
2.3.2.4 Estudos em estruturas apresentados por Maiola (1999).....	35
2.3.2.5 Estudos em estruturas realizados por Silva (1999).....	39
2.3.2.6 Estudos em estruturas apresentados por Souza (2003).....	42
2.3.3 Ligação de Cuenca.....	51
2.4. DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS DA ESTRUTURA ESPACIAL .....	53
2.4.1 Carga crítica de compressão segundo Euler .....	53
2.4.2 Verificação quanto à compressão segundo a Norma Brasileira .....	56
2.4.3 Recomendações quanto à compressão segundo alguns pesquisadores .....	57
2.4.4 Verificação quanto à tração segundo a Norma Brasileira .....	58
2.5. ESTUDO DE FADIGA EM ESTRUTURAS ESPACIAIS .....	59
2.5.1 Introdução ao estudo da fadiga .....	59
2.5.2 Carregamentos de fadiga .....	60
2.5.2.1 Amplitude constante .....	60
2.5.2.2 Amplitude variável .....	62
2.5.3 Análise de fadiga .....	63
2.5.3.1 Método S-N (Fadiga de alto ciclo) .....	63
2.5.3.2 Método $\epsilon$ -N (Fadiga de baixo ciclo).....	64
3. PROPOSTA DE REFORÇO DO NÓ TÍPICO E METODOLOGIA DA PESQUISA... 65	
3.1. PROPOSTA DE REFORÇO ESTRUTURAL DA LIGAÇÃO COM NÓ TÍPICO .... 65	
3.2. METODOLOGIA PARA PROPOSTA DO REFORÇO DO NÓ TÍPICO..... 68	
3.2.1 Geometria dos protótipos dos ensaios .....	68
3.2.2 Estudos numéricos e experimentais para investigação do reforço do nó típico .....	70
3.2.2.1 Estudo preliminar computacional (MEF – SAP2000).....	71
3.2.2.2 Estudo experimental estático .....	71
3.2.2.3 Estudo experimental dinâmico .....	72
3.2.2.4 Estudo computacional em regime elástico (MEF – SAP2000) .....	73
3.2.2.5 Estudo computacional em regime plástico (MEF – ANSYS) .....	74
3.2.3 Fluxograma do estudo de investigação do reforço do nó típico.....	74
4. ESTUDO PRELIMINAR DO REFORÇO DO NÓ TÍPICO .....	76

<b>CAPÍTULO</b>	<b>Página</b>
4.1. ELEMENTOS FINITOS UTILIZADOS .....	76
4.1.1. Elemento de barra (FRAME) .....	76
4.1.2. Elemento de placa (SHELL).....	77
4.2. DISCRETIZAÇÃO DOS MODELOS DO ESTUDO PRELIMINAR .....	77
4.2.1. Discretização do modelo com ligação ideal - LI .....	78
4.2.2. Discretização do modelo com ligação com nó típico – LT .....	78
4.2.3. Discretização do modelo com nó típico e distanciador – LTD .....	79
4.3. ESTUDO DO CARREGAMENTO APLICADO .....	79
4.3.1. Verificação quanto à tração segundo a Norma Brasileira .....	79
4.3.2. Verificação quanto à compressão segundo a Norma Brasileira .....	80
4.3.3. Determinação do carregamento a ser aplicado .....	80
4.4. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS .....	81
4.4.1. Esforços axiais nos elementos .....	81
4.4.2. Momento fletor nas estruturas .....	83
4.4.3. Deslocamentos verticais nos nós das estruturas .....	84
5. ESTUDO EXPERIMENTAL COM CARREGAMENTO ESTÁTICO .....	87
5.1. INSTRUMENTAÇÃO DOS PROTÓTIPOS DE ENSAIO .....	87
5.1.1. Fixação da estrutura em base de ensaio.....	87
5.1.2. Sistema de aplicação de força nos protótipos.....	89
5.1.3. Aquisição de dados com célula de carga.....	91
5.1.4. Disposição dos defletômetros analógicos.....	92
5.1.5. Disposição de sensores de deformação - extensometria.....	94
5.1.6. Sistema de aquisição e processamento de dados .....	95
5.1.7. Ajustes finais antes do ensaio .....	95
5.1.8. Procedimento durante o ensaio.....	96
5.2. PROTÓTIPOS DO ENSAIO ESTÁTICO .....	97
5.2.1. Discriminação dos elementos dos protótipos.....	97
5.2.2. Rótulos de identificação dos protótipos.....	98
5.2.3. Lista dos elementos construtivos dos protótipos .....	99
5.2.4. Dimensões e estoque dos elementos dos protótipos.....	100

<b>CAPÍTULO</b>	<b>Página</b>
5.3. RESULTADOS DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS. ....	101
5.3.1. Ensaio das estruturas com ligações típicas - LTE .....	101
5.3.1.1. Verificação do momento fletor na ligação .....	102
5.3.1.2. Deformada da ligação durante ensaio – colapso local.....	103
5.3.1.3. Deslocamentos da estrutura durante ensaio.....	104
5.3.1.4. Final do ensaio – Colapso global.....	106
5.3.2. Ensaio das estruturas com ligações típicas com distanciador - LTDE .....	107
5.3.2.1. Verificação do momento fletor na ligação .....	108
5.3.2.2. Deformada da ligação durante ensaio.....	110
5.3.2.3. Deslocamentos da estrutura durante ensaio.....	111
5.3.2.4. Final do ensaio – Colapso global.....	113
5.3.3. Ensaio das estruturas com ligações típicas com distanciador e cobrejunta.....	115
5.3.3.1. Verificação do momento fletor na ligação .....	115
5.3.3.2. Deformada da ligação durante ensaio.....	117
5.3.3.3. Deslocamentos da estrutura durante ensaio.....	118
5.3.3.4. Final do ensaio – Colapso global.....	120
5.4. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS.....	122
5.4.1. Verificação do momento fletor na ligação .....	122
5.4.2. Deslocamento vertical do nó 9 nas estruturas .....	123
5.4.3. Deformada e colapso das estruturas .....	124
6. ESTUDO EXPERIMENTAL COM CARREGAMENTO DINÂMICO.....	126
6.1. PROTÓTIPOS DO ENSAIO DINÂMICO .....	126
6.1.1. Discriminação dos elementos dos protótipos.....	126
6.1.2. Rótulos de identificação dos protótipos.....	127
6.1.3. Lista dos elementos construtivos dos protótipos .....	127
6.1.4. Dimensões dos elementos dos protótipos.....	128
6.2. INSTRUMENTAÇÃO DOS PROTÓTIPOS DE ENSAIO.....	128
6.2.1. Fixação da estrutura em base de ensaio.....	128
6.2.2. Sistema de aplicação de carga alternada nos protótipos.....	129
6.2.3. Monitoramento dos ciclos, alimentação de energia e controlador de frequência....	131

<b>CAPÍTULO</b>	<b>Página</b>
6.3. DADOS GERAIS DO ENSAIO DINÂMICO .....	133
6.3.1. Ajustes finais antes do ensaio.....	133
6.3.2. Deslocamentos aplicados nos protótipos.....	135
6.4. RESULTADOS DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS. ....	136
6.4.1. Ensaio das estruturas com ligações típicas - LTD.....	136
6.4.2. Ensaio das estruturas com ligações típicas, distanciador e cobrejunta - LTDCD ...	138
6.5. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DOS PROTÓTIPOS LTD E LTDCD .....	141
7. ESTUDO NUMÉRICO NO REGIME ELÁSTICO – MEF .....	142
7.1. DISCRETIZAÇÃO DOS MODELOS .....	142
7.1.1. Elemento de placa (SHELL).....	142
7.1.2. Discretização dos banzos e diagonais dos protótipos.....	143
7.1.3. Discretização da estrutura com nó típico (LT) .....	146
7.1.4. Discretização da estrutura com nó típico, distanciador e cobrejunta (LTDC) .....	148
7.1.5. Restrições e carregamentos no modelo .....	150
7.1.6. Parâmetros analisados .....	153
7.2. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	156
7.2.1. Resultados do modelo com ligação típica (LT).....	156
7.2.1.1. Tensões nos banzos e diagonais – LT .....	156
7.2.1.2. Evolução das tensões próxima ao nó em função das cargas aplicadas - LT .....	161
7.2.2. Resultados do modelo com ligação típica, distanciador e cobrejunta (LTDC).....	163
7.2.2.1. Tensões nos banzos e diagonais – LTDC.....	163
7.2.2.2. Evolução das tensões próxima ao nó em função das cargas aplicadas – LTDC ..	168
7.3. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DOS MODELOS LT E LTDC.....	170
7.3.1. Comparação das tensões do meio e extremidade de banzos e diagonais .....	170
7.3.2. Comparação das tensões do perímetro interno e externo dos banzos e diagonais ..	171
8. ESTUDO NUMÉRICO NO REGIME PLÁSTICO – MEF.....	175
8.1. DISCRETIZAÇÃO DOS MODELOS .....	175
8.1.1. Elemento de placa (SHELL43).....	175
8.1.2. Discretização dos banzos e diagonais dos protótipos.....	176
8.1.3. Discretização da estrutura com nó típico (LT) .....	177

<b>CAPÍTULO</b>	<b>Página</b>
8.1.4. Discretização da estrutura com nó típico, distanciador e cobrejunta (LTDC) .....	178
8.1.5. Restrições nos modelos – LT e LTDC .....	180
8.1.6. Carregamentos nos modelos – LT e LTDC.....	182
8.1.7. Materiais e calibração do modelo.....	182
8.2. RESULTADOS DO ESTUDO NUMÉRICO .....	184
8.2.1. Análise da estrutura com ligação típica - LT.....	184
8.2.2. Análise da estrutura com ligação típica, com distanciador e cobrejunta - LTDC ...	187
8.2.3. Comparação dos resultados .....	191
9. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS .....	193
9.1. VERIFICAÇÃO DA CARGA DE COLAPSO .....	193
9.1.1. Carga de colapso teórica p/ estruturas com ligações típicas – NBR8800 (1986)....	193
9.1.2. Carga de colapso experimental para estruturas com ligações típicas - LT.....	194
9.1.3. Carga de colapso experimental para estruturas com ligações típicas com distanciador e chapas cobrejunta - LTDC.....	195
9.1.4. Calculo da resistência à compressão segundo a AISC-LRFD (1991).....	196
9.1.5. Calculo da resistência à compressão segundo o EUROCODE (1992).....	196
9.1.6. Comparação dos resultados de carga de colapso do protótipo .....	197
9.2. VERIFICAÇÃO DO EFEITO CÍCLICO (FADIGA).....	199
9.3. RESULTADO EXPERIMENTAL VERSUS ANÁLISE NUMÉRICA NÃO LINEAR (ANSYS) .....	200
10. PROPOSTA PARA O CÁLCULO DE ESTRUTURAS COM NÓ TÍPICO E A METODOLOGIA APLICADA NESTE ESTUDO .....	202
10.1. PROPOSTA DE CÁLCULO PARA ESTRUTURA COM NÓ TÍPICO .....	202
10.1.1 Desenvolvimento matemático .....	202
10.1.2 Síntese da metodologia de cálculo apresentada em fluxograma .....	205
10.1.2.1 Obtenção dos esforços nos elementos da estrutura espacial.....	205
10.1.2.2 Dimensionamento dos elementos da estrutura submetidos a flexocompressão ..	207
10.2. METODOLOGIA DO ESTUDO DE VALIDAÇÃO DAS PROPOSTAS .....	209
10.2.1 Validação da proposta de cálculo do momento fletor teórico .....	209
10.2.1.1 Fluxograma do estudo para validação da proposta do modelo teórico.....	213

<b>CAPÍTULO</b>	<b>Página</b>
10.2.1.2 Cálculo da excentricidade da carga aplicando a formulação proposta.....	213
10.2.2 Validação da metodologia proposta para o dimensionamento de elementos de estruturas espaciais com ligações típicas sobre flexocompressão .....	214
<b>11. APLICAÇÃO DAS PROPOSTAS MATEMÁTICAS .....</b>	<b>215</b>
<b>11.1. VALIDAÇÃO DA FORMULAÇÃO DO CÁLCULO DO MOMENTO FLETOR TEÓRICO EM ESTRUTURAS COM NÓ TÍPICO .....</b>	<b>215</b>
11.1.1. Elementos finitos utilizados .....	215
11.1.2. Detalhe das ligações dos modelos .....	216
11.1.3. Discretização dos modelos do estudo de validação.....	216
11.1.4. Aplicação da formulação do momento teórico.....	223
11.1.4.1. Esforços axiais e momentos fletores nos elementos dos modelos .....	223
11.1.4.2. Calculo do momento fletor teórico e comparação com modelo não linear .....	228
<b>11.2. VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA PARA O DIMENSIONAMENTO DE ELEMENTOS DE ESTRUTURAS ESPACIAIS COM NÓS TÍPICOS SOB FLEXOCOMPRESSÃO.....</b>	<b>229</b>
11.2.1. Estrutura ensaiada no estudo experimental estático (Capítulo 5).....	230
11.2.2. Estruturas ensaiadas por Maiola (1999) .....	231
11.2.2.1. Estudo do protótipo 1: PROT1 .....	232
11.2.2.2. Estudo do protótipo 2: PROT2 .....	234
11.2.3. Estruturas ensaiadas por Souza (2002).....	235
11.2.3.1. Estudo do protótipo 1: TE1 .....	236
11.2.3.2. Estudo do protótipo 2: TE2 .....	237
<b>12. CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....</b>	<b>239</b>
<b>12.1. CONCLUSÕES DO REFORÇO DO NÓ TÍPICO – PROPOSTA 1 .....</b>	<b>239</b>
12.1.1. Conclusões do estudo preliminar computacional .....	239
12.1.2. Conclusões do estudo experimental estático .....	240
12.1.3. Conclusões do estudo experimental dinâmico.....	241
12.1.4. Conclusões do estudo computacional.....	242
<b>12.2. CONCLUSÃO DO ESTUDO DA METODOLOGIA PARA O CÁLCULO DE ESTRUTURAS COM NÓ TÍPICO SEM REFORÇO – PROPOSTA 2 .....</b>	<b>242</b>

<b>CAPÍTULO</b>	<b>Página</b>
12.2.1. Conclusões do estudo de validação da proposta do modelo teórico .....	242
12.2.2. Conclusões do estudo de aplicação da metodologia proposta no modelo ensaiado experimentalmente.....	243
12.2.3. Conclusões do estudo de aplicação da metodologia proposta no modelo ensaiado por outros autores .....	243
12.3. CONCLUSÃO FINAL DO TRABALHO .....	243
12.4. SUSGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....	244

## APÊDICE

APÊNDICE	Página
A. RESULTADOS NUMÉRICOS DO ESTUDO PRELIMINAR DO REFORÇO DO NÓ TÍPICO – PROPOSTA 1 .....	250
A.1. RESULTADO DO ESFORÇO NORMAL E MOMENTO FLETOR .....	250
A.2. RESULTADO DO DESLOCAMENTO VERTICAL NODAL .....	251
B. RESULTADOS NUMÉRICOS DO ESTUDO PARA VALIDAÇÃO DA FORMULAÇÃO DE CÁLCULO – PROPOSTA 2 .....	252
B.1. RESULTADO DO ESFORÇO NORMAL E MOMENTO FLETOR .....	252
C. ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	258
C.1. CARACTERIZAÇÃO DAS CHAPAS .....	258
D. RESULTADOS DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS ESTÁTICOS .....	259
D.1. RESULTADO DOS DESLOCAMENTOS VERTICAIS NODAIS.....	259
D.1.1. Ensaio das estruturas com ligações típicas – LTE.....	259
D.1.2. Ensaio das estruturas com ligações típicas com distanciador - LTDE .....	262
D.1.3. Ensaio com ligações típicas com distanciador e cobrejunta - LTDCE.....	265
D.2. RESULTADO DAS DEFORMAÇÕES NAS BARRAS.....	268
D.2.1. Ensaio das estruturas com ligações típicas - LTE .....	268
D.2.2. Ensaio das estruturas com ligações típicas com distanciador - LTDE .....	269
D.2.3. Ensaio com ligações típicas com distanciador e cobrejunta – LTDCE .....	270



## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA</b>	<b>Página</b>
Figura 1.1 – Cobertura do estádio “Mané Garrincha” (Souza, 2002) .....	2
Figura 1.2 – Sistemas de ligação não patenteados encontrados no Brasil (Souza, 2002) .....	3
Figura 1.3 – Acidente no centro de convenções de Manaus .....	4
Figura 1.4 – Detalhe das barras flambadas.....	4
Figura 1.5 – Detalhe da deformada do nó após colapso.....	5
Figura 1.6 – Acidente no aeroporto de Belém (Souza, 2003) .....	5
Figura 1.7 – Detalhe da ligação após ruína da estrutura.....	5
Figura 1.8 – Resultados teóricos e experimentais com o nó típico (Souza, 2003).....	6
Figura 2.1 – Vistas do arranjo quadrado sobre quadrado sem diagonais esconsas .....	10
Figura 2.2 – Vistas do arranjo quadrado sobre quadrado .....	11
Figura 2.3 – Vistas do arranjo quadrado sobre quadrado com aberturas internas.....	11
Figura 2.4 – Vistas do arranjo quadrado sobre quadrado diagonal .....	12
Figura 2.5 – Vistas do arranjo quadrado diagonal sobre quadrado diagonal .....	12
Figura 2.6 – Treliças espaciais com duas malhas de banzo.....	13
Figura 2.7 – Treliças espaciais com três malhas de banzo .....	13
Figura 2.8 – Estrutura espacial plana .....	14
Figura 2.9 – Estrutura espacial em arco .....	14
Figura 2.10 – Cúpula espacial .....	14
Figura 2.11 – Espacial em forma de onda .....	14
Figura 2.12 – Estrutura espacial em forma de casca .....	14
Figura 2.13 – Elementos da estrutura espacial quadrado sobre quadrado.....	15
Figura 2.14 – Sistema de nó OKTAPLATE – Alemanha (Makowski, 1968).....	17
Figura 2.15 – Sistema de ligação MERO – Alemanha (Sheikn, 1996).....	17
Figura 2.16 – Sistema de ligação VESTRUT – Itália (www.vestrut.com) .....	18
Figura 2.17 – Sistema de ligação CUBOTTO – Itália (www.vestrut.com).....	18
Figura 2.18 – Sistema de ligação ORONA SYSTEM – Espanha (Catálogo Orona, 1998)	19
Figura 2.19 – Sistema de ligação ORTZ SYSTEM – Inglaterra (www.lanik.com).....	19
Figura 2.20 – Sistema de ligação PALC – Espanha (Catálogo Orona, 1998).....	19

<b>FIGURA</b>	<b>Página</b>
Figura 2.21 – Sistema de ligação TRIODETIC – Canadá (Makowski, 1981) .....	20
Figura 2.22 – Sistema de ligação UNISTRUT – USA (Makowski, 1981) .....	20
Figura 2.23 – Sistema de ligação NODUS – Inglaterra (Makowski, 1981).....	20
Figura 2.24 – Sistema de ligação Australiano (Cood, 1984).....	21
Figura 2.25 – Sistema de ligação ECO – Itália (Souza, 2003).....	21
Figura 2.26 – Sistema de ligação OCTATUBE – Holanda (Gerrits, 1984).....	21
Figura 2.27 – Sistema de ligação CATRUS – Inglaterra (Maiola, 1999) .....	22
Figura 2.28 – Sistema de ligação RAIJOINT – Holanda (Gerrits, 1984) .....	22
Figura 2.29 – Sistema de ligação BEMO-VARITEC (www.bemo.com.br) .....	23
Figura 2.30 – Sistema de ligação AXIS (Souza, 2003).....	23
Figura 2.31 – Sistema de ligação ALUAÇO SPACE (www.aluaco.com.br).....	24
Figura 2.32 – Ligação dos elementos com nó típico (Souza, 2003).....	24
Figura 2.33 – Ligação com nó típico e chapa complementar (Souza, 2003) .....	24
Figura 2.34 – Ligação dos elementos com nó de aço (Vendrame, 1999).....	25
Figura 2.35 – Ligação com nó de aço com ponteira (Souza, 2003) .....	25
Figura 2.36 – Nó de aço com ponteira e aletas enrijecedoras (Souza, 2003).....	25
Figura 2.37 – Modelos dos protótipos das barras ensaiadas (Gonçalves, 1996) .....	26
Figura 2.38 – Modelos de estampagem utilizados no estudo, com respectivos cortes da seção estampada (Malite et al, 1997).....	27
Figura 2.39 – Comparação do coeficiente de flambagem das barras estampadas ensaiadas na Escola de Engenharia de São Carlos (Malite et al, 1997).....	28
Figura 2.40 – Modelos de estampagem estudados (Souza, 1998).....	28
Figura 2.41 – Protótipo da estrutura espacial estudada (Batista et al., 1997).....	30
Figura 2.42 – Ligação típica e nó de aplicação da carga (Batista et al., 1997) .....	30
Figura 2.43 – Protótipo da estrutura espacial estudada (Souza, 1998).....	31
Figura 2.44 – Ligação típica e nó de aplicação da carga (Souza, 1998) .....	31
Figura 2.45 – Visão geral do ensaio experimental (Souza, 1998).....	32
Figura 2.46 – Deformada dos nós após ruína (Souza, 1998).....	32
Figura 2.47 – Deslocamentos verticais teóricos e experimentais - NLG (Souza, 1998).....	33
Figura 2.48 – Deslocamentos verticais teóricos e experimentais - NLF (Souza, 1998).....	34

<b>FIGURA</b>	<b>Página</b>
Figura 2.49 – Protótipo da estrutura espacial estudada (Maiola, 1999) .....	35
Figura 2.50 – Visão geral do ensaio experimental (Maiola, 1999) .....	36
Figura 2.51 – Deformada dos nós após ruína (Maiola, 1999) .....	36
Figura 2.52 – Deformada dos nós após ruína (Maiola, 1999) .....	37
Figura 2.53 – Deslocamentos verticais teóricos e experimentais - NLG (Maiola, 1999) ...	38
Figura 2.54 – Deslocamentos verticais teóricos e experimentais - NLG (Souza, 1998).....	38
Figura 2.55 – Protótipo da estrutura espacial estudada (Silva, 1999) .....	39
Figura 2.56 – Ligação típica e nó de aplicação da carga (Silva, 1999) .....	39
Figura 2.57 – Visão geral do ensaio experimental (Silva, 1999) .....	40
Figura 2.58 – Nó de aplicação de carga e nó de apoio da estrutura (Silva, 1999) .....	40
Figura 2.59 – Deformada das barras após colapso por flambagem (Silva, 1999).....	41
Figura 2.60 – Proposta de reforço – arruela em forma de canal (Souza, 2003) .....	42
Figura 2.61 – Protótipo com dimensões em planta de 7,5x15,0m (Souza, 2003).....	43
Figura 2.62 – Protótipo com dimensões em planta de 7,5x7,5m (Souza, 2003).....	43
Figura 2.63 – Detalhe da ligação com nó típico (Souza, 2003).....	45
Figura 2.64 – Detalhe do nó típico com reforço proposto (Souza, 2003) .....	45
Figura 2.65 – Detalhe da ligação com nó de aço (Souza, 2003) .....	45
Figura 2.66 – Detalhe da ligação com chapa de ponteira (Souza, 2003) .....	45
Figura 2.67 – Visão geral do ensaio experimental (Souza, 2003).....	46
Figura 2.68 – Configuração final dos modelos após ensaio (Souza, 2003).....	47
Figura 2.69 – Aspecto da ligação nodal (Souza, 2003).....	48
Figura 2.70 – Comparação dos estudos teórico linear e experimental (Souza, 2003).....	49
Figura 2.71 – Comparação dos estudos teórico não linear e experimental (Souza, 2003)..	49
Figura 2.72 – Modelo discretizado do nó típico em elementos de casca (Souza, 2003).....	50
Figura 2.73 – Configuração do nó típico após colapso local (Souza, 2003) .....	50
Figura 2.74 – Planta e elevação do centro esportivo na Espanha (Cuenca, 2002).....	51
Figura 2.75 – Fotos do centro esportivo a Espanha (Cuenca, 2002).....	51
Figura 2.76 – Elementos da estrutura espacial de Cuenca (2002).....	52
Figura 2.77 – Detalhe construtivo da ligação de Cuenca (2002) .....	52
Figura 2.78 – Coluna ideal com carga perfeitamente centrada .....	54

<b>FIGURA</b>	<b>Página</b>
Figura 2.79 – Relação entre a variação de resistência e índice de esbeltez (Pfeil, 2000) ...	55
Figura 2.80 – Valores teóricos e recomendados para K pela norma NBR8800 (1986) .....	55
Figura 2.81 – Ábaco das curvas de flambagem da norma NBR8800 (1986).....	57
Figura 2.82 – Variação de K em função da rigidez da ligação (Souza, 2003) .....	58
Figura 2.83 – Carregamento constante - tensão x número de ciclos (Furtado, 2002) .....	61
Figura 2.84 – Carregamento: (a) Repetido, (b) Reverso, (c) Flutuante (Furtado, 2002).....	61
Figura 2.85 – Carregamento variável composto por constantes (Dowling, 1993) .....	62
Figura 2.86 – Exemplo de um carregamento irregular (Dowling, 1993) .....	62
Figura 2.87 – Diagrama S-N de materiais com limite de fadiga definido (Suresh, 1994) ..	64
Figura 2.88 – Diagrama S-N em materiais que não apresentam limite de fadiga definido (Suresh, 1994).....	64
Figura 2.89 – Diagrama $\epsilon$ -N (Suresh, 1994) .....	64
Figura 3.1 – Excentricidade no nó típico de estruturas treliçadas tridimensionais .....	65
Figura 3.2 – Detalhe da ligação com tubos amassados (típica).....	66
Figura 3.3 – Projeção vertical e horizontal do elemento diagonal .....	66
Figura 3.4 – Projeção da diagonal no sistema quadrado sobre quadrado.....	67
Figura 3.5 – Modelo da estrutura treliçada tridimensional adotada, cotas em milímetro ...	68
Figura 3.6 – Banzo - detalhe do amassamento e furação (mm) .....	69
Figura 3.7 – Diagonal - detalhe do amassamento e furação (mm).....	69
Figura 3.8 – Detalhe da diagonal após dobrar as extremidades (mm) .....	69
Figura 3.9 – Distanciador (mm) .....	70
Figura 3.10 – Chapa cobrejunta (mm).....	70
Figura 3.11 – Detalhes da ligação nos protótipos do estudo preliminar computacional .....	71
Figura 3.12 – Detalhes da ligação nos protótipos no estudo experimental estático .....	72
Figura 3.13 – Detalhes da ligação nos protótipos no estudo experimental dinâmico .....	73
Figura 3.14 – Detalhes da ligação nos protótipos do estudo computacional elástico .....	73
Figura 3.15 – Detalhes da ligação nos protótipos do estudo computacional elástico .....	74
Figura 3.16 – Fluxograma da organização das etapas no trabalho.....	75
Figura 4.1 – Elemento de Barra (FRAME) .....	76
Figura 4.2 – Elemento de Placa (SHELL).....	77

<b>FIGURA</b>	<b>Página</b>
Figura 4.3 – Modelo de treliça com ligação com nó ideal .....	78
Figura 4.4 – Modelo de treliça com ligação com nó típico .....	78
Figura 4.5 – Modelo de treliça com ligação com nó típico e distanciador.....	79
Figura 4.6 – Diagrama de esforços axiais da estrutura espacial com ligação ideal (LI) .....	81
Figura 4.7 – Diagrama de esforços axiais da estrutura espacial com ligação típica (LT) ...	82
Figura 4.8 – Diagrama de esforços axiais da estrutura espacial com ligação típica e distanciador (LTD).....	82
Figura 4.9 – Comparação dos esforços axiais nos modelos de ligação .....	82
Figura 4.10 – Diagrama do momento fletor da estrutura com ligação ideal (LI).....	83
Figura 4.11 – Diagrama do momento fletor da estrutura com ligação típica (LT).....	83
Figura 4.12 – Diagrama do momento da estrutura com ligação (LTD) .....	83
Figura 4.13 – Comparação dos momentos fletores nos modelos de ligação .....	84
Figura 4.14 – Diagrama da deformada da estrutura com ligação ideal (LI).....	85
Figura 4.15 – Diagrama da deformada da estrutura com ligação típica (LT) .....	85
Figura 4.16 – Diagrama da deformada da estrutura com ligação centro (LTD) .....	85
Figura 4.17 – Comparação dos deslocamentos verticais nos modelos de ligação .....	85
Figura 5.1 – Estrutura base para ensaio dos protótipos .....	88
Figura 5.2 – Fixação dos protótipos na base com apoio de ligação .....	88
Figura 5.3 – Detalhe do suporte de ligação .....	88
Figura 5.4 – Sistema de carregamento na laje de reação.....	89
Figura 5.5 – Fixação do cabo de protensão no protótipo (Nó número 9).....	90
Figura 5.6 – Macaco hidráulico de dupla ação.....	90
Figura 5.7 – Bomba hidráulica de acionamento manual .....	91
Figura 5.8 – Sistema de aquisição do carregamento com célula de carga.....	91
Figura 5.9 – Planta do protótipo com numeração dos nós e apoios .....	92
Figura 5.10 – Instrumentação dos nós 1, 2, 3 e 4 (base de leitura) .....	93
Figura 5.11 – Instrumentação dos nós 5, 6, 7 e 8 (pêndulo).....	93
Figura 5.12 – Instrumentação do nó 9 central .....	93
Figura 5.13 – Posição do EER em relação e extremidade do banzo superior .....	94
Figura 5.14 – EER colados no perímetro superior e inferior do banzo .....	94

<b>FIGURA</b>	<b>Página</b>
Figura 5.15 – Sistema de aquisição e processamento de dados.....	95
Figura 5.16 – Aperto dos parafusos com torquímetro .....	95
Figura 5.17 – Esquema geral do acompanhamento dos ensaios.....	96
Figura 5.18 – Elementos de composição dos protótipos .....	97
Figura 5.19 – Ligação típica – LTE.....	98
Figura 5.20 – Ligação típica com distanciador – LTDE .....	98
Figura 5.21 – Ligação típica com distanciador e cobrejunta - LTDCE.....	98
Figura 5.22 – Banzo - detalhe do amassamento e furação (mm) .....	100
Figura 5.23 – Diagonal - detalhe do amassamento e furação (mm).....	100
Figura 5.24 – Elementos dos protótipos dos ensaios estáticos .....	100
Figura 5.25 – Estruturas pré-montadas.....	101
Figura 5.26 – Protótipos ensaiados.....	101
Figura 5.27 – Diagrama carregamento versus deformação no banzo –LTE2 .....	102
Figura 5.28 – Diagrama carregamento versus deformação no banzo –LTE3 .....	102
Figura 5.29 – Diagrama carreg. versus diferença de deformação – (LTE2 e LTE3) .....	103
Figura 5.30 – Deformada da ligação com carga de 25kN – Protótipo LTE1 .....	103
Figura 5.31 – Deformada da ligação com carga de 25kN – Protótipo LTE2 .....	103
Figura 5.32 – Deformada da ligação com carga de 25kN – Protótipo LTE3 .....	104
Figura 5.33 – Diagrama carreg. versus deslocamento nodais – Protótipo LTE1 .....	104
Figura 5.34 – Diagrama carreg. versus deslocamento nodais – Protótipo LTE2 .....	105
Figura 5.35 – Diagrama carreg. versus deslocamento nodais – Protótipo LTE3 .....	105
Figura 5.36 – Diagrama carreg. versus deslocamento – (LTE1, LTE2 e LTE3) .....	106
Figura 5.37 – Colapso global da estrutura com carga de 35kN – Protótipo LTE1 .....	106
Figura 5.38 – Colapso global da estrutura com carga de 35,9kN – Protótipo LTE2 .....	107
Figura 5.39 – Colapso global da estrutura com carga de 35,9kN – Protótipo LTE3 .....	107
Figura 5.40 – Diagrama carreg. versus deformação no banzo – Protótipo LTDE1 .....	108
Figura 5.41 – Diagrama carreg. versus deformação no banzo – Protótipo LTDE2 .....	108
Figura 5.42 – Diagrama carreg. versus deformação no banzo – Protótipo LTDE3 .....	109
Figura 5.43 – Diagrama carreg. versus diferença de deformação – (LTDE) .....	109
Figura 5.44 – Deformada da ligação com carga de 25kN – Protótipo LTDE1 .....	110

<b>FIGURA</b>	<b>Página</b>
Figura 5.45 – Deformada da ligação com carga de 25kN – Protótipo LTDE2 .....	110
Figura 5.46 – Deformada da ligação com carga de 25kN – Protótipo LTDE3 .....	110
Figura 5.47 – Diagrama carreg. versus deslocamento nodais – Protótipo LTDE1 .....	111
Figura 5.48 – Diagrama carreg. versus deslocamento nodais – Protótipo LTDE2 .....	112
Figura 5.49 – Diagrama carreg. versus deslocamento nodais – Protótipo LTDE3 .....	112
Figura 5.50 – Diagrama carreg. versus deslocamento – (LTDE).....	113
Figura 5.51 – Colapso global da estrutura com carga de 38kN – Protótipo LTDE1.....	113
Figura 5.52 – Colapso global da estrutura com carga de 40kN – Protótipo LTDE2.....	114
Figura 5.53 – Colapso global da estrutura com carga de 36kN – Protótipo LTDE3.....	114
Figura 5.54 – Diagrama carreg. versus deformação no banzo – Protótipo LTDCE1.....	115
Figura 5.55 – Diagrama carreg. versus deformação no banzo – Protótipo LTDCE2.....	116
Figura 5.56 – Diagrama carreg. versus deformação no banzo – Protótipo LTDCE3.....	116
Figura 5.57 – Diagrama carreg. versus diferença de deformação – (LTDCE).....	117
Figura 5.58 – Deformada da ligação com carga de 25kN – Protótipo LTDCE1 .....	117
Figura 5.59 – Deformada da ligação com carga de 25kN – Protótipo LTDCE2 .....	117
Figura 5.60 – Deformada da ligação com carga de 25kN – Protótipo LTDCE3 .....	118
Figura 5.61 – Diagrama carreg. versus deslocamento nodais – Protótipo LTDCE1.....	118
Figura 5.62 – Diagrama carreg. versus deslocamento nodais – Protótipo LTDCE2.....	119
Figura 5.63 – Diagrama carreg. versus deslocamento nodais – Protótipo LTDCE3.....	119
Figura 5.64 – Diagrama carreg. versus deslocamento – (LTDCE1) .....	120
Figura 5.65 – Colapso global da estrutura com carga de 42,7kN – Protótipo LTDCE1 ...	120
Figura 5.66 – Colapso global da estrutura com carga de 42,8kN – Protótipo LTDCE2 ...	121
Figura 5.67 – Colapso global da estrutura com carga de 42,4kN – Protótipo LTDCE3 ...	121
Figura 5.68 – Diagrama carreg. x diferença de deformação (LTE, LTDE e LTDCE).....	122
Figura 5.69 – Diagrama carreg. versus desloc. vertical (LTE, LTDE e LTDCE).....	123
Figura 5.70 – Deformada - LTE (25kN).....	124
Figura 5.71 – Colapso da LTE .....	124
Figura 5.72 – Deformada – LTDE (25kN).....	124
Figura 5.73 – Colapso da LTDE.....	124
Figura 5.74 – Deformada - LTDCE (25kN).....	124

<b>FIGURA</b>	<b>Página</b>
Figura 5.75 – Colapso da LTDCE .....	124
Figura 6.1 – Ligação típica – LTD .....	126
Figura 6.2 – Ligação típica com distanciador e cobrejunta - LTDCD .....	126
Figura 6.3 – Estrutura base para ensaio dos protótipos do estudo dinâmico.....	128
Figura 6.4 – Elementos de composição dos protótipos do ensaio dinâmico .....	129
Figura 6.5 – Sistema mecânico de oscilação do ensaio dinâmico .....	130
Figura 6.6 – Detalhe da ligação do sistema de oscilação ao nó 9 .....	130
Figura 6.7 – Sistema de contagem dos ciclos do ensaio dinâmico.....	131
Figura 6.8 – Painel de leitura dos ciclos do ensaio dinâmico.....	132
Figura 6.9 – Alimentação de energia dos equipamentos do ensaio dinâmico.....	132
Figura 6.10 – Inversor de frequência do motor elétrico .....	133
Figura 6.11 – Ajuste do deslocamento do sistema de oscilação.....	133
Figura 6.12 – Aperto dos parafusos com torquímetro .....	134
Figura 6.13 – Colocação de contra-porcas de pressão nas ligações .....	135
Figura 6.14 – Carregamento versus deslocamento do nó 9 dos protótipos nos ensaios....	135
Figura 6.15 – Planta de localização das barras rompidas durante ensaio - LTD.....	136
Figura 6.16 – Detalhe da ruptura da diagonal no ensaio do protótipo LTD2.....	137
Figura 6.17 – Detalhe da ruptura da diagonal no ensaio do protótipo LTD3.....	137
Figura 6.18 – Detalhe da ruptura da diagonal no ensaio do protótipo LTD4.....	137
Figura 6.19 – Diagrama deslocamento no nó 9 versus número de ciclos - LTD .....	138
Figura 6.20 – Planta de localização das barras rompidas no ensaio - LTDCD .....	139
Figura 6.21 – Detalhe da ruptura da diagonal no ensaio do protótipo LTDCD2 .....	139
Figura 6.22 – Detalhe da ruptura da diagonal no ensaio do protótipo LTDCD3 .....	139
Figura 6.23 – Detalhe da ruptura da diagonal no ensaio do protótipo LTDCD4 .....	140
Figura 6.24 – Diagrama deslocamento no nó 9 versus número de ciclos - LTDCD.....	140
Figura 6.25 – Diagrama deslocamento versus número de ciclos – LTD e LTDCD.....	141
Figura 7.1– Elemento de Placa (SHELL).....	142
Figura 7.2– Planta típica dos protótipos para discretização .....	143
Figura 7.3– Detalhe: (a) apoio da estrutura (b) nó central.....	143
Figura 7.4– Discretização da diagonal em elementos de placa (cotas em milímetro).....	144



<b>FIGURA</b>	<b>Página</b>
Figura 7.5– Planta e elevação do banzo da estrutura (cotas em milímetro) .....	145
Figura 7.6– Detalhe da extremidade amassada do tubo (cotas em milímetro).....	145
Figura 7.7– Desenvolvimento da seção do tubo das diagonais e montantes.....	145
Figura 7.8 – Modelo de treliça com ligação com nó típico - LT .....	146
Figura 7.9 – Detalhe da ligação com nó típico .....	146
Figura 7.10 – Comprimento do parafuso para ligação com nó típico .....	147
Figura 7.11 – Elementos da ligação com nó típico.....	147
Figura 7.12 – Parafuso da ligação com nó típico .....	147
Figura 7.13 – Treliça com ligação com nó típico, distanciador e cobrejunta - LTDC .....	148
Figura 7.14 – Detalhe da ligação com nó típico, distanciador e cobrejunta.....	148
Figura 7.15 – Detalhe da localização dos elementos da ligação com distanciador .....	149
Figura 7.16 – Discretização da malha do parafuso e distanciador .....	150
Figura 7.17 – Discretização da malha da estrutura treliçada com numeração dos nós .....	150
Figura 7.18 – Vista inferior da malha estrutura treliçada.....	151
Figura 7.19 – Detalhe da malha do nó de apoio 1 (Similar a apoios 2,3 e 4).....	151
Figura 7.20 – Restrição dos nós perímetro do furo (Apoios 1, 2, 3 e 4) .....	151
Figura 7.21 – Detalhe da malha do nó 9 central de aplicação do carregamento .....	152
Figura 7.22 – Distribuição do carregamento nodal ao longo do perímetro do furo .....	152
Figura 7.23 – Representação das tensões nos elementos de placa .....	153
Figura 7.24 – Destaque dos elementos adotados para análise das tensões.....	154
Figura 7.25 – Detalhe da extremidade da diagonal .....	155
Figura 7.26 – Detalhe da extremidade do banzo superior .....	155
Figura 7.27 – Quadro das tensões no elemento de placa.....	155
Figura 7.28 – Diagrama de dist. de tensões (kN/cm <sup>2</sup> ) – Carga 1= 5,77kN - LT .....	157
Figura 7.29 – Diagrama de dist. de tensões (kN/cm <sup>2</sup> ) – Carga 2= 7,57kN - LT .....	158
Figura 7.30 – Diagrama de distr. de tensões (kN/cm <sup>2</sup> ) – Carga 3= 8,63kN - LT .....	159
Figura 7.31 – Diagrama de distr. de tensões (kN/cm <sup>2</sup> ) – Carga 4= 11,44kN - LT .....	160
Figura 7.32 – Distr. de tensões na extremidade da diagonal - LT (kN/cm <sup>2</sup> ) .....	161
Figura 7.33 – Dist. de tensões na extremidade do banzo – LT (kN/cm <sup>2</sup> ).....	162
Figura 7.34 – Diagrama de distr. de tensões (kN/cm <sup>2</sup> ) – Carga 1= 8,83kN - LTDC .....	164

<b>FIGURA</b>	<b>Página</b>
Figura 7.35 – Diagrama de distr. de tensões (kN/cm <sup>2</sup> ) – Carga 2= 11,21kN - LTDC .....	165
Figura 7.36 – Diagrama de distr. de tensões (kN/cm <sup>2</sup> ) – Carga 3= 12,93kN - LTDC .....	166
Figura 7.37 – Diagrama de distr. de tensões (kN/cm <sup>2</sup> ) – Carga 4= 15,58kN - LTDC .....	167
Figura 7.38 – Distr. de tensões na extremidade da diagonal – LTDC (kN/cm <sup>2</sup> ) .....	168
Figura 7.39 – Distr. de tensões na extremidade do banzo – LTDC (kN/cm <sup>2</sup> ) .....	169
Figura 7.40 – Tensão nos elementos da diagonal versus carregamento aplicado .....	170
Figura 7.41 – Tensão nos elementos do banzo versus carregamento aplicado .....	171
Figura 7.42 – Tensão nos elementos da diagonal x carregamento aplicado.....	172
Figura 7.43 – Tensão nos elementos do banzo x carregamento aplicado.....	173
Figura 8.1– Elemento de Placa (SHELL43).....	175
Figura 8.2– Direção e sentidos dos esforços no elemento de placa (SHELL43) .....	176
Figura 8.3 – Modelo de treliça com ligação com nó típico – LT (ANSYS) .....	177
Figura 8.4 – Detalhe da ligação com nó típico .....	178
Figura 8.5 – Treliça com ligação com nó típico, distanciador e cobrejunta - LTDC .....	179
Figura 8.6 – Detalhe da ligação com nó típico, distanciador e cobrejunta.....	179
Figura 8.7 – Vista inferior da malha estrutura treliçada.....	180
Figura 8.8 – Detalhe das restrições no apoio.....	181
Figura 8.9 – Detalhe dos nós acoplados nos modelos .....	181
Figura 8.10 – Comportamento físico do material tipo 1 (kN/mm <sup>2</sup> ).....	183
Figura 8.11 – Comportamento físico do material tipo 2 (kN/mm <sup>2</sup> ).....	183
Figura 8.12 – Resumo das análises processadas pelo programa ANSYS - LT .....	184
Figura 8.13 – Carregamento aplicado versus deslocamento do nó central - LT .....	185
Figura 8.14 – Deformada da ligação para o carregamento final - LT .....	186
Figura 8.15 – Evolução das tensões com a aplicação do carregamento - LT.....	186
Figura 8.16 – Distribuição das tensões nos elementos da estrutura - LT .....	187
Figura 8.17 – Resumo das análises processadas pelo programa ANSYS - LTDC .....	188
Figura 8.18 – Carregamento aplicado versus deslocamento do nó central - LTDC.....	188
Figura 8.19 – Deformada da ligação para o carregamento final - LTDC.....	189
Figura 8.20 – Evolução das tensões na estrutura com o carregamento - LTDC .....	190
Figura 8.21 – Distribuição das tensões nos elementos da estrutura - LT .....	190

<b>FIGURA</b>	<b>Página</b>
Figura 8.22 – Carregamento versus deslocamento do nó central modelos LT e LTDC ...	191
Figura 8.23 – Carregamento versus tensões na estrutura modelos LT e LTDC.....	192
Figura 9.1 – Localização das cargas no Protótipo 2x2m.....	193
Figura 9.2 – Colapso local (P=25kN).....	195
Figura 9.3 – Colapso global (P=36kN).....	195
Figura 9.4 – Colapso global (P=42kN).....	195
Figura 9.5 – Detalhe da ligação LTDC.....	195
Figura 9.6 – Comparação das cargas de colapso .....	198
Figura 9.7 – Curva S-N do protótipo com ligação típica .....	199
Figura 9.8 – Curva S-N do protótipo com ligação típica com distanciador e cobrejunta .	200
Figura 9.8 – Deslocamento do nó central devido a carga aplicada - LT .....	200
Figura 9.9 – Deslocamento do nó central devido a carga aplicada – LTDC .....	201
Figura 10.1 – Excentricidade no nó típico de estruturas treliçadas tridimensionais .....	202
Figura 10.2 – Detalhe da ligação do nó superior com tubos amassados (típica).....	203
Figura 10.3 – Modelo de interseção dos eixos de banzos e diagonais .....	204
Figura 10.4 – Metodologia do cálculo do momento de uma ligação com nó típico .....	206
Figura 10.5 – Metodologia considerando a flexocompressão na barra .....	208
Figura 10.6 – Modelo da estrutura treliçada tridimensional 4x4 metros, M1-4x4.....	209
Figura 10.7 – Modelo da estrutura treliçada tridimensional 6x4 metros, M2-6x4.....	210
Figura 10.8 – Modelo da estrutura treliçada tridimensional 8x4 metros, M3-8x4.....	210
Figura 10.9 – Modelo da estrutura treliçada tridimensional 6x6 metros, M4-6x6.....	211
Figura 10.10 – Modelo da estrutura treliçada tridimensional 8x6 metros, M5-8x6.....	211
Figura 10.11 – Modelo da estrutura treliçada tridimensional 8x8 metros, M6-8x8.....	212
Figura 10.12 – Detalhes da ligação nos protótipos do estudo de validação .....	212
Figura 10.13 – Fluxograma da organização do estudo de do momento teórico.....	213
Figura 10.13 – Fluxograma da organização do estudo de validação da proposta 2 .....	214
Figura 11.1 – Elemento de Barra (FRAME) .....	216
Figura 11.2 – Modelos de ligação estudados.....	216
Figura 11.3 – Discretização, condições de contorno e carga do modelo M1-4x4.....	217
Figura 11.4 – Discretização, condições de contorno e carga do modelo M2-6x4.....	218

<b>FIGURA</b>	<b>Página</b>
Figura 11.5 – Discretização, condições de contorno e carga do modelo M3-8x4.....	219
Figura 11.6 – Discretização, condições de contorno e carga do modelo M4-6x6.....	220
Figura 11.7 – Discretização, condições de contorno e carga do modelo M5-8x6.....	221
Figura 11.8 – Discretização, condições de contorno e carga do modelo M6-8x8.....	222
Figura 11.9 – Esforço axial nas barras da treliça do modelo M1-4x4.....	224
Figura 11.10 – Momento fletor nas barras da treliça do modelo M1-4x4.....	224
Figura 11.11 – Esforço axial nas barras da treliça do modelo M2-6x4.....	224
Figura 11.12 – Momento fletor nas barras da treliça do modelo M2-6x4.....	225
Figura 11.13 – Esforço axial nas barras da treliça do modelo M3-8x4.....	225
Figura 11.14 – Momento fletor nas barras da treliça do modelo M3-8x4.....	225
Figura 11.15 – Esforço axial nas barras da treliça do modelo M4-6x6.....	226
Figura 11.16 – Momento fletor nas barras da treliça do modelo M4-6x6.....	226
Figura 11.17 – Esforço axial nas barras da treliça do modelo M5-8x6.....	226
Figura 11.18 – Momento fletor nas barras da treliça do modelo M5-8x6.....	227
Figura 11.19 – Esforço axial nas barras da treliça do modelo M6-8x8.....	227
Figura 11.20 – Momento fletor nas barras da treliça do modelo M6-8x8.....	227
Figura 11.21 – Comparação do momento fletor máximo versus teórico nos modelos .....	228
Figura 11.22 – Comparação das cargas de colapso .....	231
Figura 11.23 – Protótipo 7,5x7,5m estudado por Maiola (1999) .....	232
Figura 11.24 – Comparação das cargas de colapso no protótipo 1 de Maiola (1999).....	233
Figura 11.25 – Comparação das cargas de colapso no protótipo 2 de Maiola (1999).....	235
Figura 11.26 – Protótipo 7,5x15m estudado por Souza (2002).....	235
Figura 11.27 – Comparação das cargas de colapso no protótipo 1 de Souza (2002).....	237
Figura 11.28 – Comparação das cargas de colapso no protótipo 2 de Souza (2002).....	238

## TABELAS

<b>TABELAS</b>	<b>Página</b>
Tabela 2.1 – Recomendações para a altura da treliça em relação ao vão.....	16
Tabela 2.2 – Comparação de resultados teóricos e experimentais (Gonçalves, 1996).....	26
Tabela 2.3 – Resultados teóricos e experimentais de barras comprimidas (Souza, 1998)..	29
Tabela 2.4 – Resultados teóricos e experimentais (D’Este, 1998).....	34
Tabela 2.5 – Descrição dos modelos dos protótipos de ensaio (Maiola, 1999) .....	35
Tabela 2.6 – Forças últimas teóricas e experimentais para os protótipos (Maiola, 1999)...	37
Tabela 2.7 – Forças últimas teóricas e experimentais para barras (Silva, 1999).....	41
Tabela 2.8 – Resumo dos ensaios realizados por Souza (2002).....	44
Tabela 5.1 – Lista de abreviatura dos protótipos dos ensaios experimentais estáticos .....	99
Tabela 5.2 – Quantitativo dos materiais utilizados nos ensaios .....	99
Tabela 6.1 – Lista de abreviatura dos protótipos dos ensaios experimentais dinâmicos...	127
Tabela 6.2 – Quantitativo dos materiais utilizados nos ensaios dinâmicos.....	127
Tabela 6.3 – Deslocamentos aplicados no nó 9 dos protótipos dos ensaios dinâmicos ....	136
Tabela 6.4 – Resultado dos ensaios dinâmicos LTD.....	138
Tabela 6.5 – Resultado dos ensaios dinâmicos LTDCD .....	140
Tabela 7.1 – Carregamentos aplicados no estudo da estrutura com ligação típica (LT)...	152
Tabela 7.2 – Carregamentos aplicados no estudo da estrutura com ligação típica, distanciador e chapa cobrejunta (LTDC) .....	153
Tabela 7.3 – Tensões de VON MISES nos banzos e diagonais - LT (kN/cm <sup>2</sup> ) .....	156
Tabela 7.4 – Tensões de VON MISES nos banzos e diagonais - LT (kN/cm <sup>2</sup> ) .....	162
Tabela 7.5 – Tensões de VON MISES nos banzos e diagonais - LTDC (kN/cm <sup>2</sup> ).....	163
Tabela 7.6 – Tensões de VON MISES nos banzos e diagonais - LTDC (kN/cm <sup>2</sup> ).....	169
Tabela 8.1 – Resumo das cargas, deslocamentos e tensões do estudo - LT.....	185
Tabela 8.2 – Resumo das cargas, deslocamentos e tensões do estudo - LTDC .....	189
Tabela 11.1 – Aplicação da formulação nos modelos estudados. ....	228
Tabela 11.2 – Elementos de barra do protótipo 1 – PROT1.....	232
Tabela 11.3 – Resistência nominal a compressão (kN) – PROT1.....	232
Tabela 11.4 – Cargas de colapso para os elementos da estrutura (kN) – PROT1 .....	233

<b>TABELAS</b>	<b>Página</b>
Tabela 11.5 – Elementos de barra do protótipo 2 – PROT2.....	234
Tabela 11.6 – Resistência nominal a compressão (kN) – PROT2.....	234
Tabela 11.7 – Cargas de colapso para os elementos da estrutura (kN) – PROT2.....	234
Tabela 11.8 – Elementos de barra do protótipo 1 – TE1.....	236
Tabela 11.9 – Resistência nominal a compressão (kN) – TE1.....	236
Tabela 11.10 – Cargas de colapso para os elementos da estrutura (kN) – TE1.....	237
Tabela 11.11 – Elementos de barra do protótipo 2 – TE2.....	237
Tabela 11.12 – Resistência nominal a compressão (kN) – TE2.....	238
Tabela 11.13 – Cargas de colapso para os elementos da estrutura (kN) – TE1.....	238

## LISTA DE ABREVIACÕES, NOMENCLATURAS E SIMBOLOGIAS

a	Distância do centro do furo a borda do perfil
a'	Distância corrigida do centro do furo a borda
A	Área líquida
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing Materials
A <sub>p</sub>	Área da seção transversal do parafuso
b	Distância do centro do furo a alma do perfil
b'	Distância corrigida do centro do furo a alma
d	Diâmetro do furo do perfil
E	Módulo de elasticidade
E <sub>p</sub>	Módulo de elasticidade do parafuso
f <sub>y</sub>	Limite de escoamento
f <sub>u</sub>	Limite último de resistência
I	Momento de inércia da seção
K	Constante da mola
L	Largura tributária
L <sub>p</sub>	Comprimento do parafuso
M	Momento fletor resultante
M <sub>f</sub>	Momento fletor de cálculo
M <sub>θ</sub>	Momento fletor resistente da conexão
Nd	Força normal de cálculo
P	Carga externa aplicada na conexão
Q	Força de alavanca
q	Carga distribuída
R	Reação no parafuso
t <sub>f</sub>	Espessura da chapa do flange do perfil
UnB	Universidade de Brasília
°C	Graus Celsius
α	Parâmetro em função da razão: Q / P

$\theta$	Rotação da ligação
$\theta_c$	Rotação no apoio da conexão real
$\theta_s$	Rotação no apoio de uma viga bi-apoiada
$\delta$	Parâmetro função área líquida e total flange
$\epsilon_{lg}$	Deformação específica normal
$\epsilon_{tr}$	Deformação específica transversal
$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ e $\epsilon_4$	Resistências na ponte de Wheatstone
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$\Omega$	Ohms
$\sigma$	Coefficiente de resistência
$\delta_1, \delta_2, \delta_3$ e $\delta_4$	Deslocamentos verticais
$N_{c(teor.)}$	Carga crítica teórica
$N_{c(teor.)}^*$	Carga crítica teórica considerando a variação da inércia da barra
$N_{u(exp.)}$	Carga última experimental



# 1. INTRODUÇÃO

A aplicação de estruturas de aço em edifícios residenciais, comerciais, industriais e em construções de modo geral, cresce a cada dia no Brasil. A crescente aplicação de estruturas metálicas na construção civil pode ser justificada pela facilidade de adaptação ao projeto, seqüência industrial de fabricação e rapidez na montagem. Pode-se considerar também a viabilidade econômica da matéria prima, com possibilidade de reutilização e quanto às considerações de carga há um alívio no peso próprio total da estrutura.

No entanto, para uma maior aplicação das estruturas metálicas, é necessário o domínio de técnicas de projeto, fabricação e montagem, bem como, um melhor conhecimento dos fenômenos ocorridos nos sistemas estruturais. De modo geral, as normas procuram regulamentar e padronizar as metodologias aplicadas nessas etapas. Entretanto, é fato que não constam nas normas todas as soluções dos problemas encontrados na elaboração dos projetos. O que na prática fica a cargo do engenheiro projetista solucionar, e em muitas vezes, até adaptar novas soluções, para situações não previstas nas normas.

Em particular, para estruturas treliçadas tridimensionais não existe uma norma específica. Para o projeto de estruturas metálicas no Brasil é aplicada genericamente a norma NBR8800 (1986), particularmente, para o dimensionamento e verificação dos elementos que compõem os sistemas treliçados 3D, que inclusive, são vastamente aplicadas em coberturas com grande vão.

A Figura 1.1 mostra um exemplo de aplicação da estrutura treliçada tridimensional. Trata-se da cobertura do estádio “Mané Garrincha” em Brasília. A concepção estrutural deste sistema é baseada na ligação de banzos e diagonais em um nó comum, formando pirâmides quadrangulares. Observa-se que em estruturas treliçadas os momentos nas ligações não são considerados como esforços críticos para o dimensionamento e, portanto, os elementos estruturais são dimensionados para resistir apenas aos esforços axiais de tração e compressão.

Quanto ao dimensionamento e verificação dos elementos submetidos a esforços axiais de tração, podem-se considerar as recomendações da norma como satisfatórias. O mesmo não ocorre para os elementos estruturais submetidos a esforços axiais de compressão. Nos

elementos comprimidos há divergências quanto às restrições nos nós das treliças, o que influencia diretamente no cálculo dos próprios elementos sob compressão. A restrição do nó é adotada de acordo com o detalhe da ligação a ser executado. Quanto maior a rigidez do nó menor o comprimento de flambagem, e conseqüentemente, menor o coeficiente de esbeltez. Quanto menor a rigidez do nó maior o comprimento de flambagem. A Norma NBR8800 (1986), no seu Anexo H, sugere para estruturas treliçadas um comprimento de flambagem igual à distância, nó a nó, da barra comprimida e desconsidera o momento na ligação.

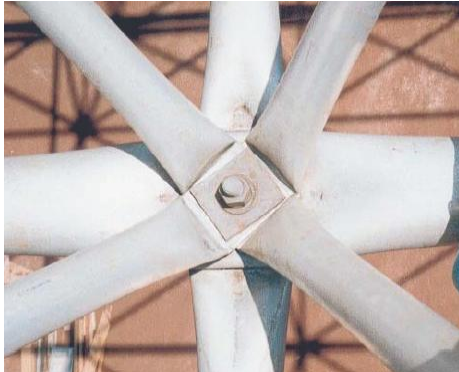


Figura 1.1 – Cobertura do estádio “Mané Garrincha” (Souza, 2002)

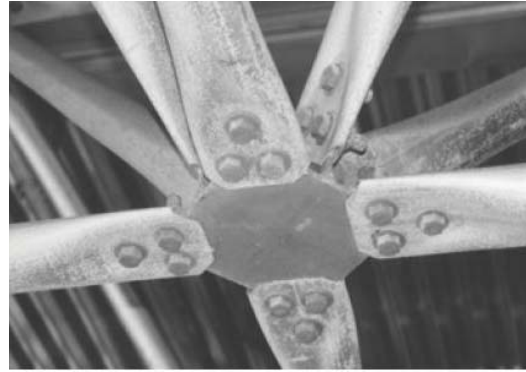
Existem diversos detalhes de ligação aplicados comercialmente e muitos desses foram desenvolvidos empiricamente sem a devida comprovação experimental. Quanto aos nós de ligações podem ser encontrados diferentes modos construtivos, patenteados ou não patenteados. Dentre estes os aplicados no Brasil e os desenvolvidos em outros países.

Neste trabalho é dada ênfase a um dos tipos de ligação ou nó não patenteadado. No Brasil existem três tipos de nós não patenteadados e que são muito utilizados nas construções em aço; os nós ditos “típicos”, são formados por barras com extremidades amassadas e unidas com um único parafuso (Figura 1.2a), os nós de aço (Figura 1.2b) e os nós de aço com ponteira (Figura 1.2c). Um maior detalhe destes sistemas pode ser apreciado no capítulo de

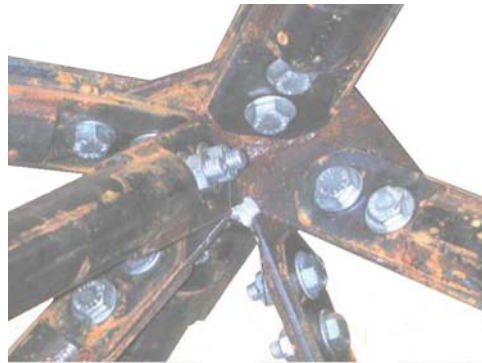
revisão bibliográfica. Os nós típicos são os mais empregados nas estruturas treliçadas tridimensionais. Este fato é devido à facilidade de fabricação e montagem, além do baixo custo com o material da treliça e menor número de parafusos.



(a) Nó típico



(b) Nó de aço



(c) Nó de aço  
com ponteira

Figura 1.2 – Sistemas de ligação não patenteados encontrados no Brasil (Souza, 2002)

### 1.1. MOTIVAÇÃO DA PESQUISA

No Brasil inúmeras obras de cobertura com treliças tridimensionais foram construídas com o nó típico. Dados estatísticos da quantidade exata das aplicações são inexistentes por parte dos órgãos competentes (CREA, CONFEA, Universidades, prefeituras, etc). Porém, é notório que na grande maioria das obras com treliças espaciais, aplica-se o nó típico (Figura 1.2a). Entre estas, as obras de grande porte, executadas por empresas idôneas adotando critérios de segurança, e ainda obras clandestinas, executadas por profissionais sem formação adequada, aumentando o risco de acidentes.

Mesmo as obras de grande porte, onde os nós típicos são executados com cautela, há riscos de acidentes, causados pelo mau comportamento estrutural das ligações. Foi o caso do

centro de convenções de Manaus, onde ocorreu em 1994 um colapso global da estrutura da cobertura - Figura 1.3. Nesta obra o sistema de ligação utilizado foi o de tubos circulares com extremidades amassadas e ligações com ponteira. A Figura 1.4 mostra o detalhe das barras flambadas da referida estrutura e a Figura 1.5 expõe a deformada do nó após colapso.



Figura 1.3 – Acidente no centro de convenções de Manaus



Figura 1.4 – Detalhe de barras com flambagem

Outro exemplo, é o colapso parcial da cobertura do aeroporto de Belém ocorrido em 1999, que ocorreu ainda em fase de montagem, ver Figura 1.6 (Souza, 2003). Neste caso o sistema adotado foi o nó típico. Em ambos os acidentes o fator preponderante foi o colapso local da ligação. Na Figura 1.7 pode ser observada a ligação após ruína da estrutura.



Figura 1.5 – Detalhe da deformada do nó após colapso



Figura 1.6 – Acidente no aeroporto de Belém (Souza, 2003)

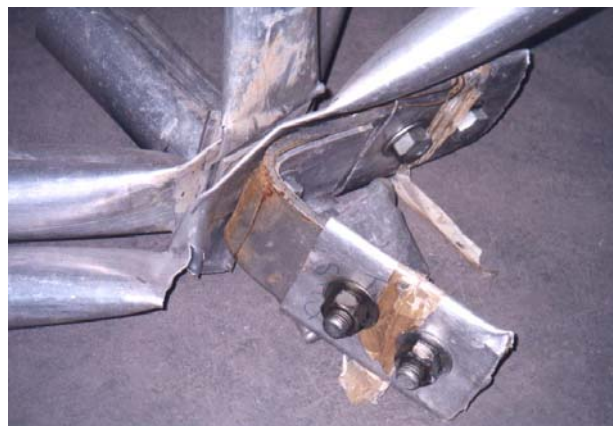


Figura 1.7 – Detalhe da ligação após ruína da estrutura

Tais fatos comprovam a falta de regulamentação que deveria ser minimamente fornecida pelas normas, e revela também a necessidade de mais estudos em estruturas com conexão típica. No Brasil várias pesquisas foram realizadas, abordando esse tipo de conexão, em universidades em parceria com empresas privadas, como os trabalhos desenvolvidos na Escola de Engenharia de São Carlos e na Universidade de Ouro Preto.

Na revisão bibliográfica são expostos os resultados do estudo de Souza (2003). Nestes estudos observou-se que os resultados experimentais divergem dos resultados calculados com modelos teóricos (regime elástico linear), quanto ao cálculo da carga de colapso da estrutura e quanto aos deslocamentos. Observe na Figura 1.8 os resultados comparativos de dois protótipos experimentais em relação a quatro modelos teóricos. Nos protótipos foram adotadas as ligações com nó típico. Nos modelos teóricos foram consideradas as não linearidades físicas. Pode-se notar que a força última teórica pode ser de até 50% superior a experimental e que os deslocamentos experimentais são maiores que aqueles teóricos. No estudo há resultados mais favoráveis em outros protótipos, os quais são expostos na revisão bibliográfica.

Sendo assim, a motivação deste trabalho é dada pela necessidade de mais estudos na área de treliças tridimensionais utilizando o nó típico. Esta necessidade é justificada por acidentes ocorridos nas estruturas, grande número de obras construídas com o nó típico com potencial para acidentes futuros e falta de compatibilidade entre resultados de ensaios experimentais e modelos numéricos.

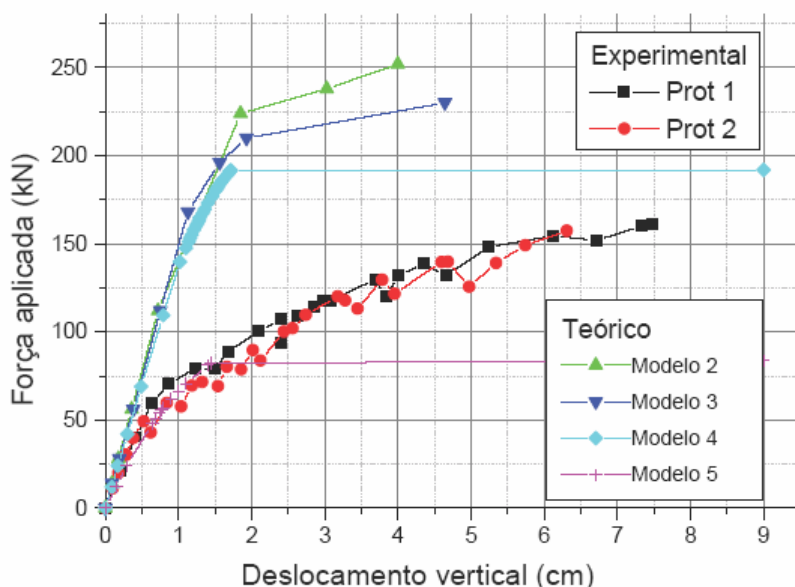


Figura 1.8 – Resultados teóricos e experimentais com o nó típico (Souza, 2003)

Outro ponto importante para a segurança da estrutura durante sua vida útil é a caracterização da fadiga dos elementos que a compõem. Cargas alternadas, como as cargas do vento provocam uma alternância nas tensões nos elementos podendo gerar ruptura por fadiga. Nesta área de fadiga, poucos foram os estudos realizados em estruturas espaciais.

## **1.2. OBJETIVO**

Sabe-se que a ligação com nó típico é o principal ponto de colapso nas estruturas espaciais. Isto se deve à excentricidade intrínseca existente neste sistema de ligação que propicia a formação de charneiras plásticas, devido à concentração de tensões, diminuição de inércia, devido ao amassamento da extremidade, e conseqüentemente perda de rigidez. Portanto, o propósito principal deste trabalho é analisar de forma teórico-experimental os fenômenos ocorridos nas ligações de estruturas treliçadas tridimensionais com nó típico, propondo soluções para o melhoramento deste tipo de ligação. Uma linha a seguir é a do reforço e correção no do nó típico. A base deste estudo será uma tentativa de corrigir a excentricidade, usando para isso um distanciador, aumentando a rigidez da ligação com nó típico, com chapas cobrejunta e estudar o comportamento desta ligação em relação à fadiga, o que permitirá conhecer seu comportamento sob carregamento variável.

Uma outra linha a seguir é estabelecer uma nova metodologia para o cálculo dos elementos comprimidos da estrutura espacial. Neste caso sugere-se a consideração do momento fletor da ligação, intrínseco do nó típico, e o dimensionamento do elemento por flexocompressão. Também será sugerida uma metodologia para que este momento fletor possa ser calculado a partir da análise de estruturas com ligação ideal em vez de ligação típica. Com o esforço axial máximo de compressão obtido nesta estrutura é obtido o momento fletor de cálculo a partir de uma formulação a ser proposta.

## **1.3. ORGANIZAÇÃO DA TESE**

Esta tese está organizada nos seguintes capítulos:

- **CAPÍTULO 1:** Introduce a problemática da ligação com nó típico em estruturas treliçadas tridimensionais, motivação e objetivo deste trabalho, bem como, a composição da tese;

- **CAPÍTULO 2:** Aborda a revisão bibliográfica sobre o tema em estudo dando ênfase na exposição dos elementos construtivos da treliça com nó típico, e abordando também método de cálculo sugerido pela norma NBR8800 (1986);
  
- **CAPÍTULO 3:** Apresenta a proposta de reforçar a ligação típica (PROPOSTA 1) e descreve a metodologia empregada nesta etapa. Os modelos de treliças a serem estudadas e os parâmetros de estudo também são vistos;
  
- **CAPÍTULO 4:** Estuda de forma preliminar a proposta de reforço da ligação típica. Foi aplicada uma modelagem numérica pelo método dos elementos finitos e utilizando elementos de barra, no programa SAP2000;
  
- **CAPÍTULO 5:** Este capítulo expõe, de forma ampla, o estudo experimental estático de estruturas espaciais com nó típico, estruturas com o nó típico com distanciador e estruturas com nó típico, distanciador e chapa cobrejunta;
  
- **CAPÍTULO 6:** Aborda o estudo experimental dinâmico de estruturas espaciais com nó típico e estruturas com nó típico, distanciador e chapa cobrejunta;
  
- **CAPÍTULO 7:** Expõe um estudo numérico, considerando a não linearidade geométrica e no regime elástico, da estrutura espacial com nó típico e da estrutura espacial com nó típico, distanciador e chapa cobrejunta. Foi aplicada uma modelagem tridimensional, com elemento de placa, pelo método dos elementos finitos, utilizando o programa SAP2000;
  
- **CAPÍTULO 8:** Apresenta um estudo numérico, considerando a não linearidade geométrica e a não linearidade física do material (regime plástico), da estrutura espacial com nó típico e da estrutura espacial com nó típico, distanciador e chapa cobrejunta. Foi aplicada uma modelagem tridimensional, com elemento de placa, pelo método dos elementos finitos, utilizando o programa ANSYS;
  
- **CAPÍTULO 9:** Neste capítulo podem ser observadas as comparações dos resultados dos estudos numéricos e experimentais, bem como, a aplicação dos métodos prescritos em Normas já consagradas, no cálculo da carga crítica das estruturas estudadas;



- **CAPÍTULO 10:** Apresenta a proposta de uma nova metodologia para o cálculo dos elementos comprimidos da estrutura espacial (PROPOSTA 2). Também descreve a metodologia empregada nesta etapa;
- **CAPÍTULO 11:** Apresenta um estudo para validação da proposta de cálculo considerando o momento na ligação. Foram aplicadas modelagens numéricas pelo método dos elementos finitos e utilizando elementos de barra no programa SAP2000. Verificada a aplicação da proposta de cálculo, aqui desenvolvida, aplicando-a aos modelos experimentais de outros autores e aos métodos prescritos em Normas já consagradas;
- **CAPÍTULO 12:** Apresenta as conclusões, bem como, sugestões para trabalhos futuros.

Finalmente são apresentadas as referências bibliográficas, utilizadas no decorrer deste trabalho, e os apêndices contendo tabelas e gráficos dos resultados numéricos das análises.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo estão expostos conceitos básicos e informações iniciais sobre estruturas treliçadas tridimensionais, com o intuito de garantir um suporte teórico para os demais capítulos. Assim poderão ser observadas as geometrias das treliças espaciais, o método de dimensionamento dos elementos segundo recomendações da norma brasileira, os principais tipos de ligações dos elementos das estruturas espaciais utilizados no Brasil.

### 2.1. GEOMETRIA DA TRELIÇA ESPACIAL

As estruturas treliçadas tridimensionais são caracterizadas por possuírem elementos de barras entre dois nós descritos em coordenadas tridimensionais. Estas estruturas podem ser classificadas quanto à sua geometria, considerando o arranjo dos elementos em planta ou em elevação. A classificação segue as recomendações encontradas nas referências Zignoli (1981), Iffland (1982), Makoswki (1981), Agerskov (1986), Lan & Qian (1986) e Walker (1986).

#### 2.1.1 Classificação das treliças espaciais quanto ao arranjo dos elementos em planta

##### 2.1.1.1 Arranjo quadrado sobre quadrado sem diagonais esconsas

A Figura 2.1 mostra três vistas de uma estrutura espacial com arranjo quadrado sobre quadrado sem diagonais esconsas: vista lateral, vista em planta e perspectiva. Note na vista em planta que a configuração dos banzos corresponde a quadrado sobre quadrado.

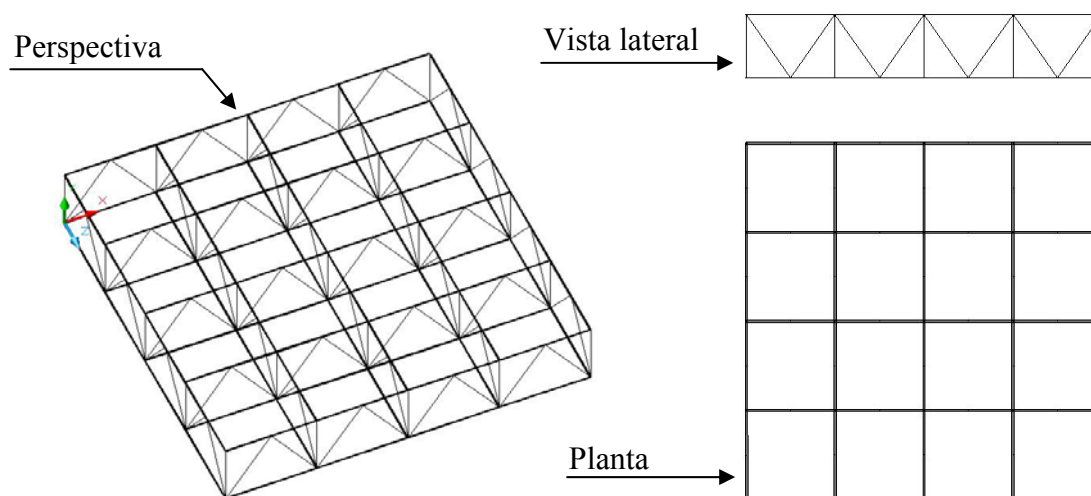


Figura 2.1 – Vistas do arranjo quadrado sobre quadrado sem diagonais esconsas

### 2.1.1.2 Arranjo quadrado sobre quadrado com diagonais esconsas

A Figura 2.2 mostra três vistas de uma estrutura espacial com arranjo quadrado sobre quadrado; vista lateral, vista em planta e vista em perspectiva. Note na vista em planta que a configuração dos banzos é quadrado sobre quadrado com uma defasagem. Este desalinhamento provoca a formação de diagonais esconsas, ver a perspectiva na Figura 2.2.

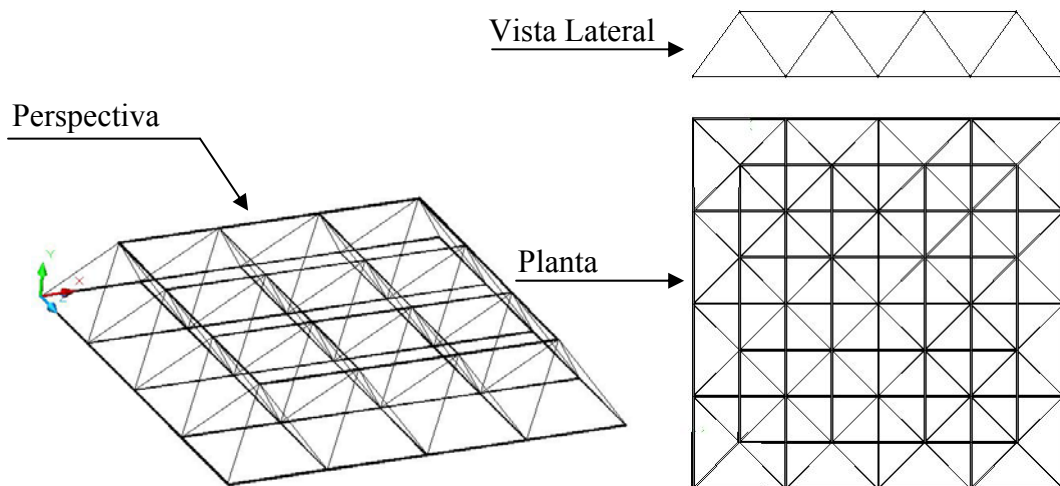


Figura 2.2 – Vistas do arranjo quadrado sobre quadrado

### 2.1.1.3 Arranjo quadrado sobre quadrado com aberturas internas

A Figura 2.3 mostra três vistas de uma estrutura espacial com arranjo quadrado sobre quadrado com aberturas internas; vista lateral, vista em planta e vista em perspectiva. Esta abertura facilita a passagem de instalações e equipamentos, além de permitir aberturas no teto.

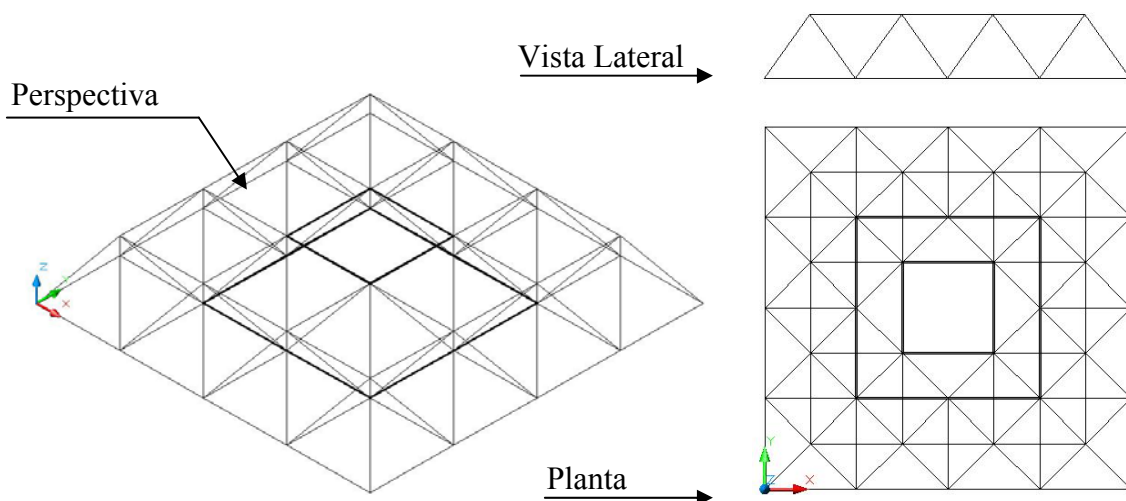


Figura 2.3 – Vistas do arranjo quadrado sobre quadrado com aberturas internas

#### 2.1.1.4 Arranjo quadrado sobre quadrado diagonal

A Figura 2.4 mostra três vistas de uma estrutura espacial com arranjo quadrado sobre quadrado diagonal; vista lateral, vista em planta e vista em perspectiva. Note na vista em planta que a configuração dos banzos é quadrado sobre quadrado a 45° de rotação.

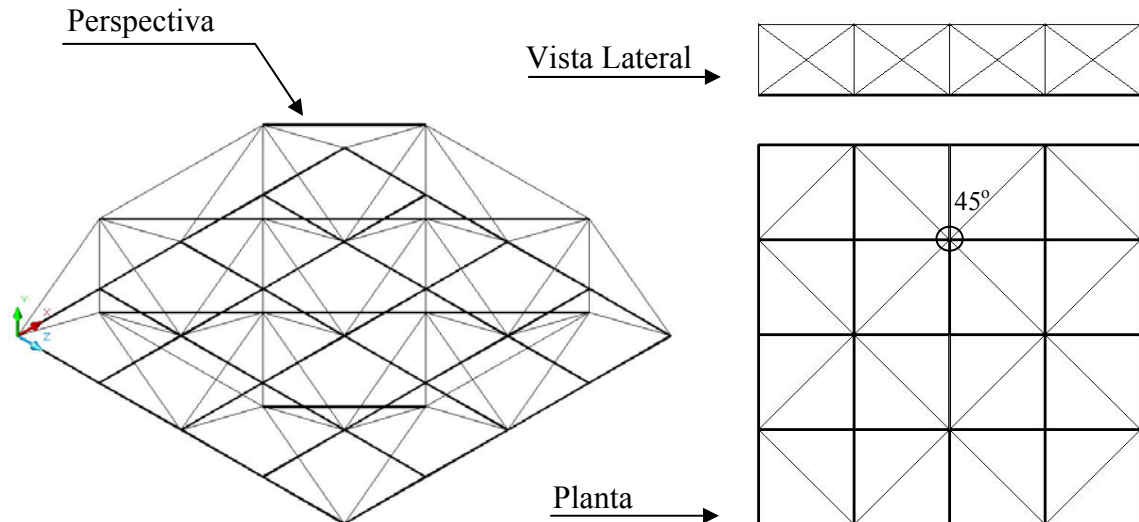


Figura 2.4 – Vistas do arranjo quadrado sobre quadrado diagonal

#### 2.1.1.5 Arranjo quadrado diagonal sobre quadrado diagonal

A Figura 2.5 mostra três vistas de uma estrutura espacial com arranjo quadrado diagonal sobre quadrado diagonal; vista lateral, vista em planta e vista em perspectiva. Note que na vista em planta que a configuração dos banzos é quadrado a 45° sobre quadrado a 45°.

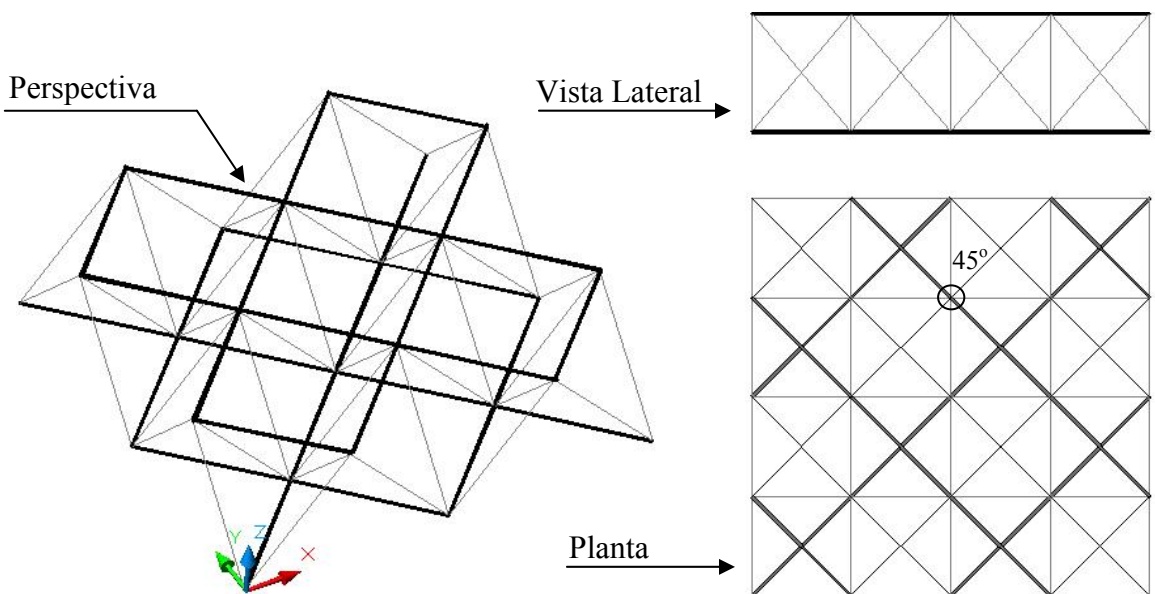


Figura 2.5 – Vistas do arranjo quadrado diagonal sobre quadrado diagonal

### 2.1.2 Classificação das treliças espaciais quanto ao arranjo dos elementos em elevação

Quanto ao arranjo dos elementos em elevação as estruturas espaciais são classificadas de acordo com o número de camadas dos banzos. Os sistemas mais comuns são as estruturas com duas camadas de banzos e três camadas de banzos, observe respectivamente as Figuras 2.6 e 2.7. Nestas figuras estão dispostas duas vistas, uma elevação e uma perspectiva da treliça.

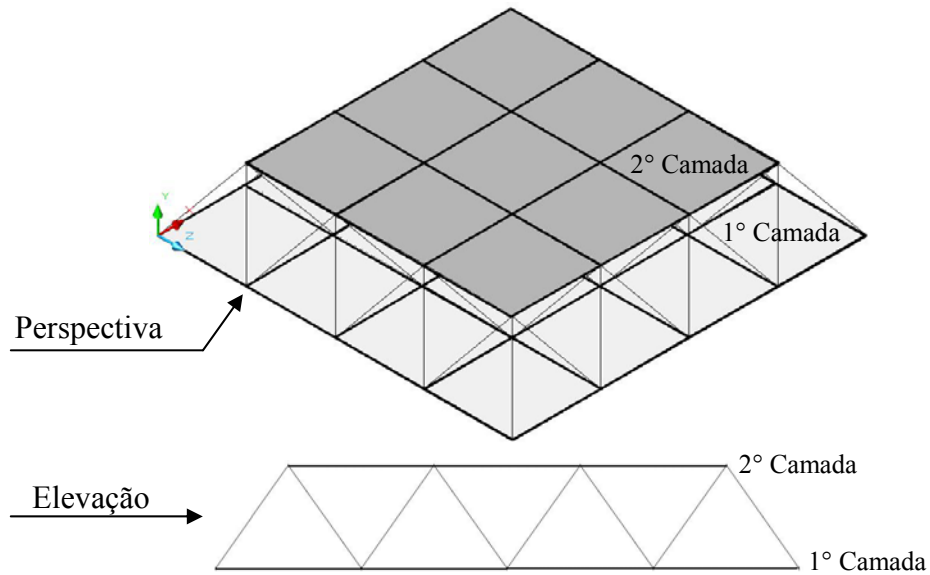


Figura 2.6 – Treliças espaciais com duas malhas de banzo

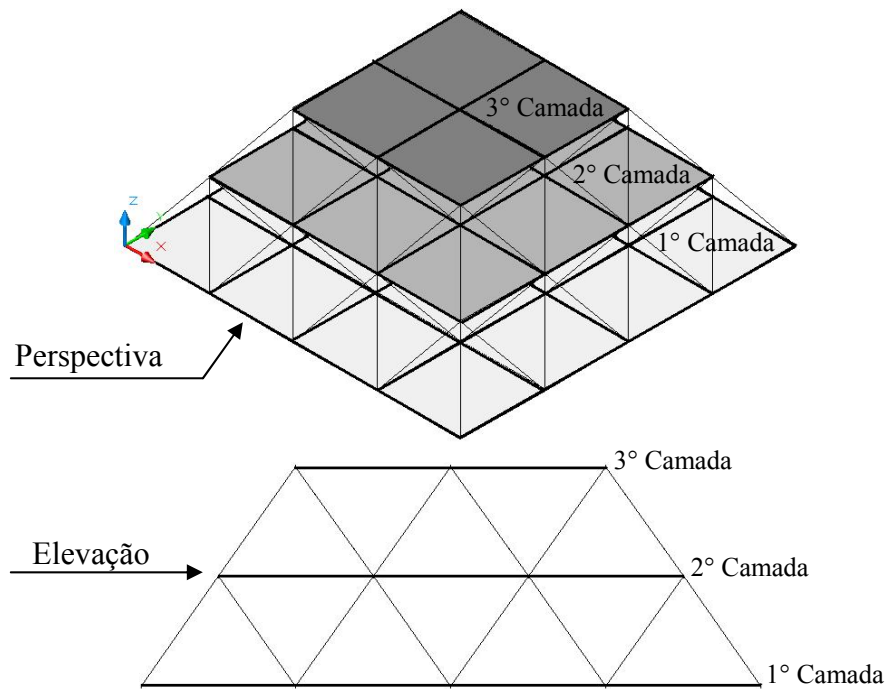


Figura 2.7 – Treliças espaciais com três malhas de banzo

### 2.1.3 Formas construtivas das estruturas treliçadas tridimensionais

Quanto às formas construtivas mais encontradas das estruturas espaciais podemos citar; a estrutura espacial plana (Figura 2.8), a estrutura espacial em arco (Figura 2.9), a cúpula espacial (Figura 2.10), a estrutura espacial em forma de onda (Figura 2.11 e Figura 2.12). As figuras dos exemplos foram retiradas da Internet e sem referência Estas estruturas podem ser executadas com banzos paralelos ou não.



Figura 2.8 – Estrutura espacial plana



Figura 2.9 – Estrutura espacial em arco



Figura 2.10 – Cúpula espacial



Figura 2.11 – Espacial em forma de onda



Figura 2.12 – Estrutura espacial em forma de onda

## 2.1.4 Elementos da treliça espacial

Dentre os diversos modelos de treliças espaciais descritos no item 2.1.1, o de maior uso no Brasil é a treliça com arranjo quadrado sobre quadrado com diagonal esconsa. Portanto, a estrutura treliçada a ser estudada neste trabalho é compreendida por elementos com formação em planta de quadrado sobre quadrado, composta por duas camadas de banzos paralelos, como mostra a Figura 2.13.

Observe nesta figura os elementos da estrutura: banzo superior, banzo inferior, diagonal esconsa e o nó da ligação. As relações dimensionais entre o vão da estrutura e a altura, bem como o ângulo da diagonal define o desempenho estrutural do modelo.

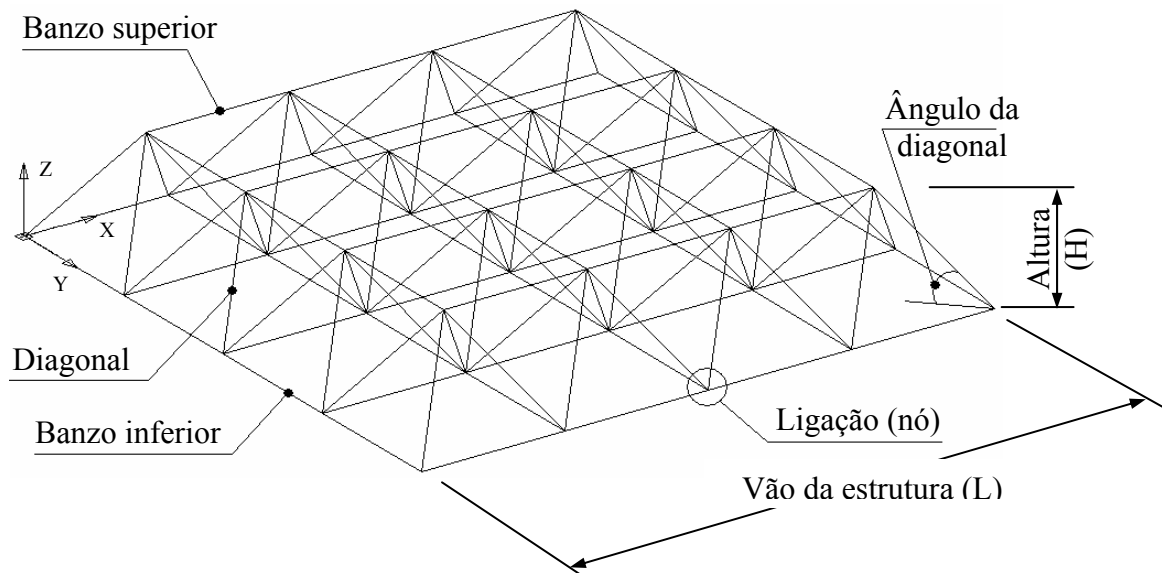


Figura 2.13 – Elementos da estrutura espacial quadrado sobre quadrado

A rigidez do sistema de ligação empregado, o tipo de arranjo dos elementos e as condições de apoio e carregamento na estrutura influenciam diretamente na relação altura / vão a ser adotada. Por este motivo os valores recomendados em literaturas são divergentes. A Tabela 2.1 expõe algumas recomendações para a altura da treliça em relação ao vão definida por diferentes autores. A altura das estruturas espaciais construídas no Brasil fica comumente dentro do intervalo de  $L/15$  a  $L/20$ .

Tabela 2.1 – Recomendações para a altura da treliça em relação ao vão

Altura da treliça (H)	Autor (ano)
$\frac{L}{30}$ a $\frac{L}{40}$	Daddi (1969) Moroni (1976)
$\frac{L}{20}$ a $\frac{L}{40}$	Makowski (1981)
$\frac{L}{20}$ a $\frac{L}{25}$	Zignoli (1981)
$\frac{L}{15}$ a $\frac{L}{20}$	Walker (1986) Agerskov (1986)
$\frac{L}{20}$ a $\frac{L}{60}$	Iffland (1982)
$\frac{L}{10}$ a $\frac{L}{20}$	Marsh (2000)

A quantidade de módulos constituintes no vão da estrutura está diretamente relacionado com o ângulo da diagonal adotado. Comumente o ângulo da diagonal está compreendido entre 30° e 60°. Obviamente, as estruturas executadas com ângulo menor do que 30° apresentam menor altura, conseqüentemente menor inércia estrutural entre banzos. Desta forma, nestas estruturas são notados maiores deslocamentos verticais, mas têm como vantagem a menor quantidade de material. Por outro lado, estruturas executadas com ângulos maiores que 60° apresentam maior altura e maior inércia estrutural. Nestas estruturas são notados menores deslocamentos verticais e têm como desvantagem a maior quantidade de material.

## 2.2. LIGAÇÃO DOS ELEMENTOS DA ESTRUTURA TRELIÇADA

O nó da estrutura é o ponto de intercessão das barras (banzos, montantes 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 além de onerosa. Desta forma, o que se procura conceber é uma ligação com cargas sem excentricidades.

Os sistemas de ligação podem ser classificados em dois grandes grupos. O primeiro formado por aqueles nós avaliados e caracterizados experimentalmente e que, portanto, possuem eficiência comprovada, em geral são sistemas de ligação patenteados. O segundo



grupo engloba os detalhes de ligação projetados por intuição e experiência do projetista, mas que não tem nenhuma comprovação científica. Dentre estes grupos são listados a seguir os tipos de ligações aplicados em outros países e no Brasil. Nestes itens foram apresentados os nós sem detalhes construtivos e de desempenho.

### 2.2.1 Tipos de ligações aplicadas em outros países

Ligações completamente soldadas são incomuns devido ao custo elevado e dificuldade construtiva, se comparando com ligações parafusadas. Entretanto, o nó OKTAPLATE (Figura 2.14) desenvolvido na Alemanha é freqüentemente utilizado na China em construções de estruturas espaciais (Liu, 1993).

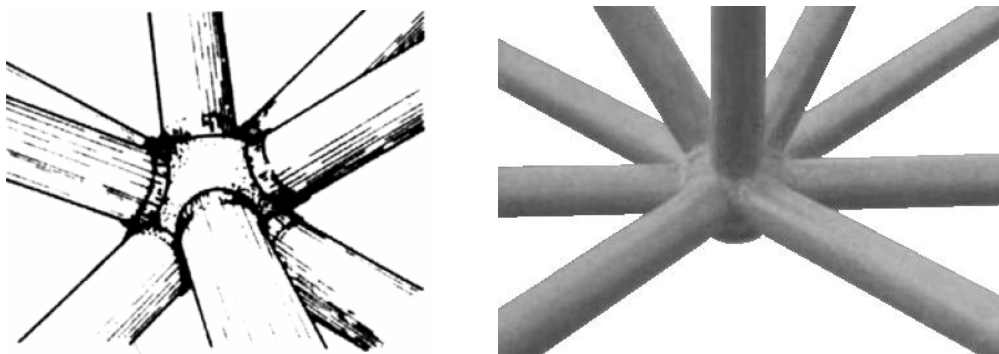


Figura 2.14 – Sistema de nó OKTAPLATE – Alemanha (Makowski, 1968)

Outro sistema de ligação desenvolvido na Alemanha foi o nó MERO (Figura 2.15). Este foi um dos primeiros sistemas de ligação patenteados para estruturas espaciais e é difundido em todo o mundo inclusive no Brasil. O nó MERO é constituído por uma esfera, padronizada a partir do diâmetro das barras, onde são conectadas, por meio de parafusos os elementos da estrutura.

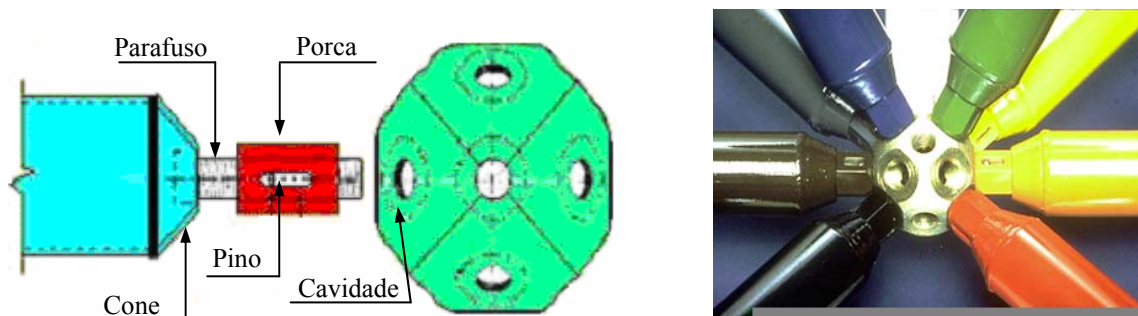


Figura 2.15 – Sistema de ligação MERO – Alemanha (Sheikn, 1996)

O sistema VESTRUT desenvolvido na Itália apresenta um conceito similar ao nó MERO. No sistema italiano o nó é composto por duas esferas achatadas, separadas por um disco central e conectadas por um parafuso. A Figura 2.16 apresenta o sistema VESTRUT. Outro sistema desenvolvido pela mesma empresa italiana, foi o sistema CUBOTTO (Figura 2.17), baseado na concepção do sistema VESTRUT.

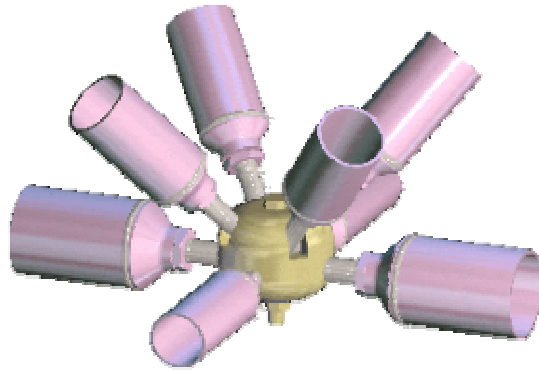


Figura 2.16 – Sistema de ligação VESTRUT – Itália ([www.vestrut.com](http://www.vestrut.com))

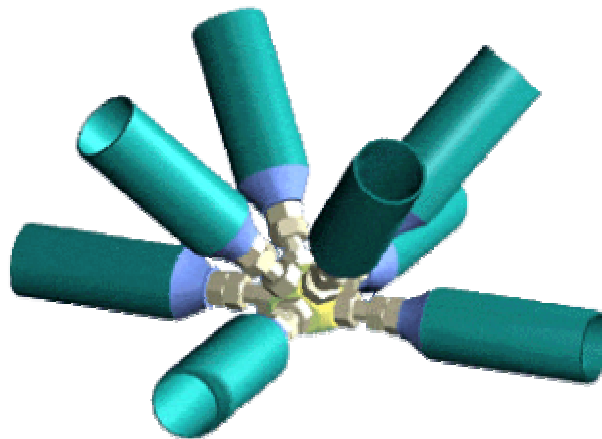


Figura 2.17 – Sistema de ligação CUBOTTO – Itália ([www.vestrut.com](http://www.vestrut.com))

Muitas ligações aplicadas atualmente em vários países se baseiam na filosofia originada pelo sistema MERO (nós esféricos). Entre estas ligações podem-se destacar os sistemas ORONA SYSTEM (Espanha), ORTZ SYSTEM (Inglaterra) e o sistema PALC (Espanha), respectivamente nas Figuras 2.18, 2.19 e 2.20.

Os sistemas de ligação com nós esféricos apresentam resultados satisfatórios em ensaios experimentais e em aplicações práticas. Em contrapartida esta tecnologia apresenta como desvantagem o alto custo de fabricação. Desta forma, pesquisadores e projetistas tem buscado desenvolver um sistema de ligação com menor custo e que garanta segurança.



Figura 2.18 – Sistema de ligação ORONA SYSTEM – Espanha (Catálogo Orona, 1998)



Figura 2.19 – Sistema de ligação ORTZ SYSTEM – Inglaterra (www.lanik.com)



Figura 2.20 – Sistema de ligação PALC – Espanha (Catálogo Orona, 1998)

Diferente dos sistemas de ligação baseados no nó MERO os sistemas TRIODETIC (Canadá), UNISTRUT (USA) e o sistema NODUS (Inglaterra), representados respectivamente nas Figuras 2.21, 2.22 e 2.23, não apresentam nó esférico. O que uma

alternativa, do ponto de vista econômico, para as ligações de estruturas espaciais. O sistema TRIODETIC foi desenvolvido para aplicações em estruturas tubulares em alumínio. O sistema UNISTRUT foi desenvolvido para estruturas tridimensionais utilizando barras com perfil U. O sistema NODUS foi desenvolvido por uma empresa inglesa em parceria com a universidade de Surrey. Ensaios experimentais mostraram que o sistema NODUS apresentou no nó uma resistência 15% maior que nas barras.

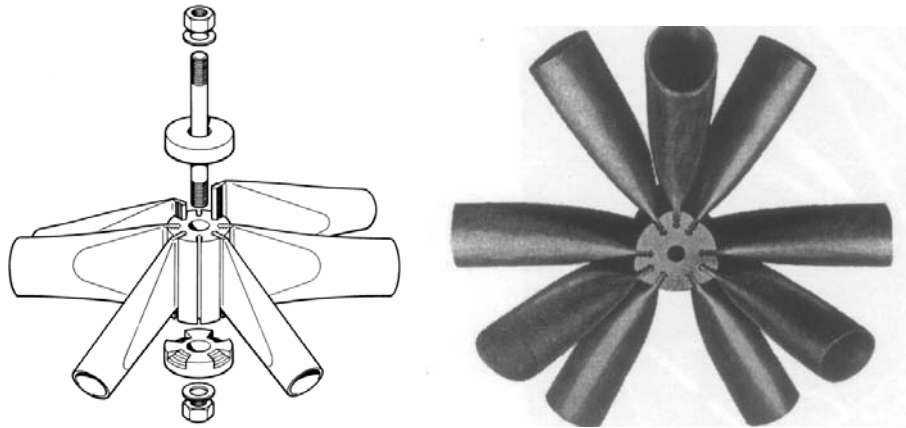


Figura 2.21 – Sistema de ligação TRIODETIC – Canadá (Makowski, 1981)

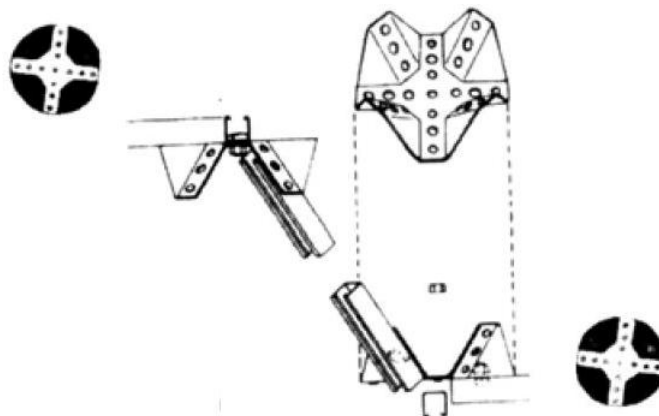


Figura 2.22 – Sistema de ligação UNISTRUT – USA (Makowski, 1981)

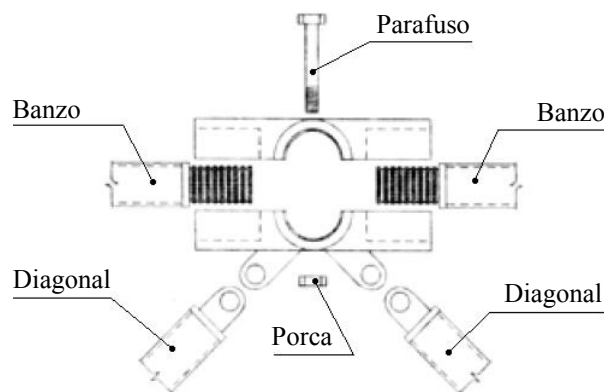


Figura 2.23 – Sistema de ligação NODUS – Inglaterra (Makowski, 1981)

O sistema Australiano, ECO (Itália) e o sistema OCTATUBE (Holanda), representados respectivamente nas Figuras 2.24, 2.25 e 2.26, são formados por associação das extremidades amassadas dos elementos tubulares e fixadas ao nó por meio de parafusos.

Na Figura 2.27 pode ser observado o sistema CATRUS desenvolvido na Inglaterra. Este sistema apresenta uma composição da ligação com banzo em perfil quadrado e diagonal em perfil tubular com extremidade amassada.

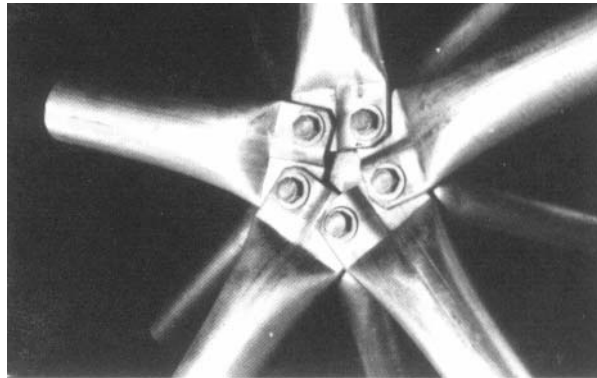


Figura 2.24 – Sistema de ligação Australiano (Cood, 1984)

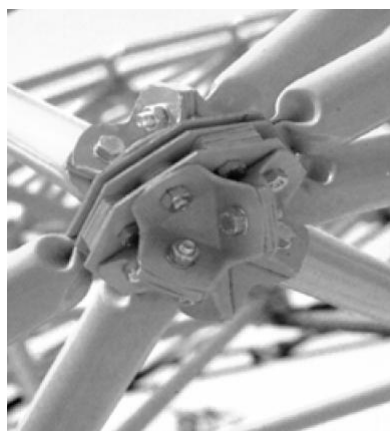


Figura 2.25 – Sistema de ligação ECO – Itália (Souza, 2003)

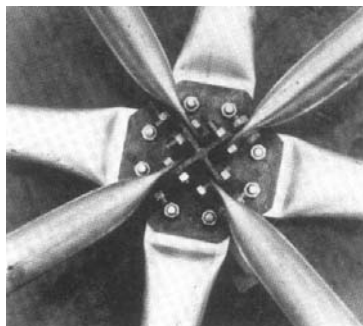


Figura 2.26 – Sistema de ligação OCTATUBE – Holanda (Gerrits, 1984)

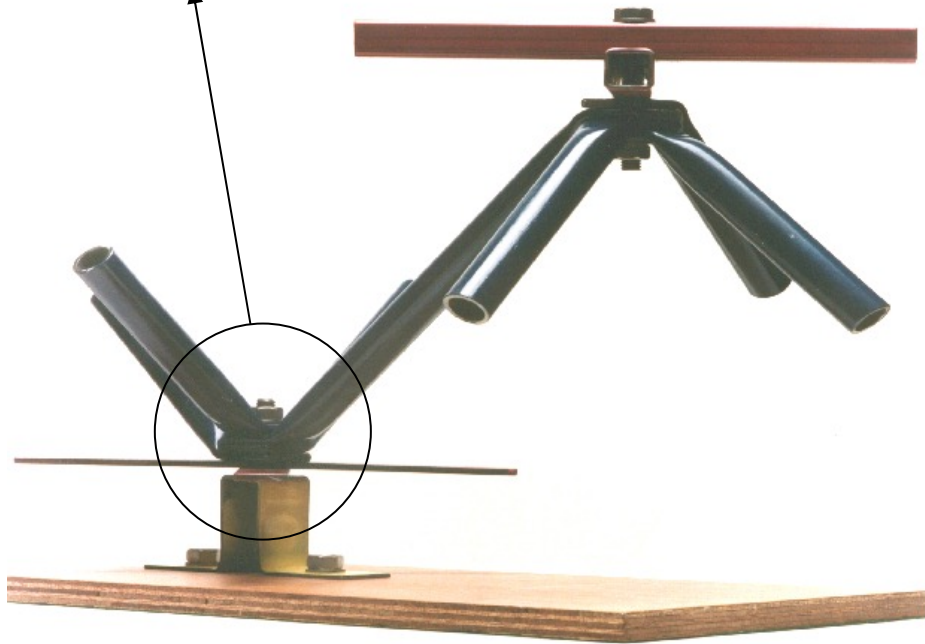


Figura 2.27 – Sistema de ligação CATRUS – Inglaterra (Maiola, 1999)

A Figura 2.28 mostra o sistema RAIJOINT desenvolvido na Inglaterra. Este sistema apresenta uma composição da ligação com barras com perfil tubular com chapas de extremidade. Este sistema assemelha-se ao sistema “nó com ponteira” utilizado em obras no Brasil.

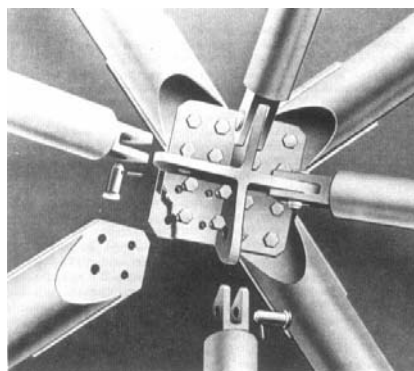


Figura 2.28 – Sistema de ligação RAIJOINT – Holanda (Gerrits, 1984)

## 2.2.2 Tipos de ligações mais aplicadas no Brasil

Tendo visto alguns detalhes das ligações mais aplicadas no exterior, mostram-se agora as ligações mais às aplicadas no Brasil. Como no exterior, no Brasil, também existe uma gama de ligações aplicadas a estruturas espaciais. Dentre estas estão os nós patenteados, desenvolvido em sua maioria por empresas privadas detentoras da patente, e os nós não patenteados, que são de domínio público. A seguir são apresentados os tipos de ligações comumente encontrados no Brasil.

### 2.2.2.1 Nós patenteados

A comercialização de ligações patenteadas no Brasil é recente, provavelmente pelo custo de sua aplicação. No entanto empresas preocupadas com a qualidade e segurança de suas obras estão cada vez mais aderindo a estes nós. Exemplos de nós patenteados aplicados no Brasil são os sistemas “BEMO-VARITEC”, “AXIS” e o “ALUAÇO SPACE”, respectivamente representados nas Figuras 2.29, 2.30 e 2.31.



Figura 2.29 – Sistema de ligação BEMO-VARITEC ([www.bemo.com.br](http://www.bemo.com.br))



Figura 2.30 – Sistema de ligação AXIS (Souza, 2003)



Figura 2.31 – Sistema de ligação ALUAÇO SPACE ([www.aluaco.com.br](http://www.aluaco.com.br))

#### 2.2.2.2 Nós não patenteados (domínio público)

As ligações mais comuns não patenteadas utilizadas no Brasil são as ligações com nó típico, ligação com nó típico e chapa complementar, ligação com nó de aço, ligação com nó de aço com ponteira e ligação com nó de aço com ponteira com aletas enrijecedoras (Souza, 2003). A ligação com nó típico é constituída por barras com extremidades amassadas unidas por apenas um parafuso, ver Figura 2.32. A ligação com nó típico e chapa complementar tem concepção construtiva do anterior, no entanto apresenta uma chapa para união dos elementos e um maior número de parafusos, ver Figura 2.33.

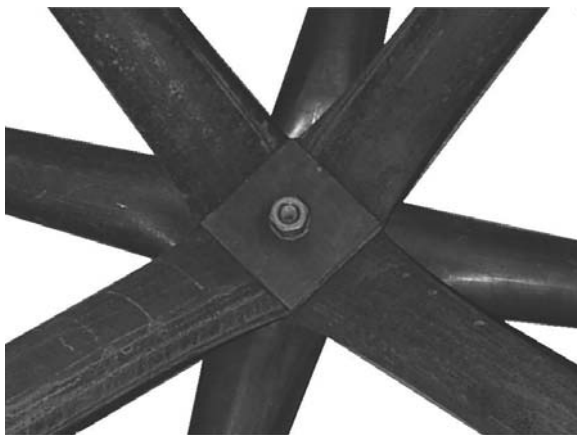


Figura 2.32 – Ligação dos elementos com nó típico (Souza, 2003)



Figura 2.33 – Ligação com nó típico e chapa complementar (Souza, 2003)

O sistema de ligação com nó de aço é constituído por uma peça fabricada com chapas de aço soldadas e com furação pronta para a união dos elementos, ver Figura 2.34. A ligação com nó de aço com ponteira e com ponteira com aletas enrijecedoras é similar ao anterior porém estes apresentam chapas soldadas na extremidade dos elementos, ver respectivamente as Figuras 2.35 e 2.36.





Figura 2.34 – Ligação dos elementos com nó de aço (Vendrame, 1999)



Figura 2.35 – Ligação com nó de aço com ponteira (Souza, 2003)

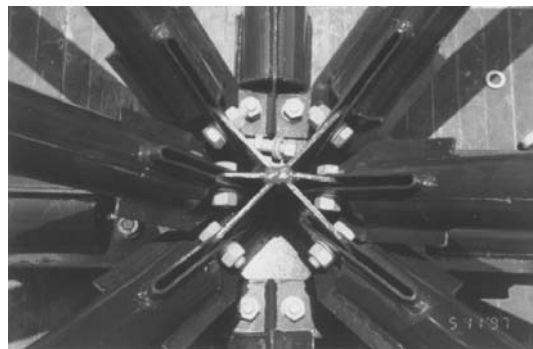


Figura 2.36 – Nó de aço com ponteira e aletas enrijecedoras (Souza, 2003)

O sistema de ligação formado com o nó típico (Figuras 2.32 e 2.33) é o mais aplicado no Brasil e é também o mais sujeito a apresentar problemas. Nota-se que este tipo de ligação apresenta excentricidade dos esforços normais que chegam ao nó, possibilitando a formação de charneira plástica, excesso de rotação e colapso dos elementos com carga inferior as previstas em cálculo. O nó de aço (Figuras 2.34 a 2.36) é mais rígido, os elementos têm os eixos concêntricos no nó, e o colapso da estrutura é regido pela resistência da barra.

### 2.3. LIGAÇÃO DE ESTRUTURAS ESPACIAIS COM NÓ TÍPICO

O nó típico é o sistema de ligação não patenteado mais aplicado no Brasil. O fator preponderante para sua unanimidade é o baixo custo de fabricação e montagem. No entanto é o sistema de ligação que mais apresenta problemas em obras. Tal fato é comprovado por resultados experimentais sobre cargas de colapso que se mostram divergentes dos resultados teóricos. Os estudos neste sistema de ligação são recentes, e foram motivados por acidentes em construção e o crescente número de obras. Os primeiros estudos foram direcionados para o ensaio de barras com extremidades amassadas isoladamente.

### 2.3.1 Estudos em barras com extremidades amassadas

#### 2.3.1.1 Estudos em barras apresentados por Gonçalves *et al.* (1996)

No Centro de Convenções de Manaus foi utilizada, em sua cobertura, uma estrutura formada por barras de extremidades amassadas e chapas de ponteira (Figura 2.37). Após o acidente desta estrutura (1994), com o colapso total da coberta, surgiram as pesquisas mais significativas no Brasil. Gonçalves *et al.* (1996), apresentou resultados experimentais de ensaios de compressão dos elementos tubulares da estrutura do Centro de Convenções. Este estudo foi realizado na Escola de Engenharia de São Carlos.

A Figura 2.37 mostra os tipos de ligações ensaiadas por Gonçalves, retiradas da estrutura do centro de convenções. A ligação tipo A apresenta extremidade amassada e as ligações tipo B e C são com chapa de ponteira. O ensaio consistiu em aplicação de carga centrada nas barras isoladamente. Após a realização de quatro ensaios para cada modelo foram obtidas médias das cargas últimas de ensaio.

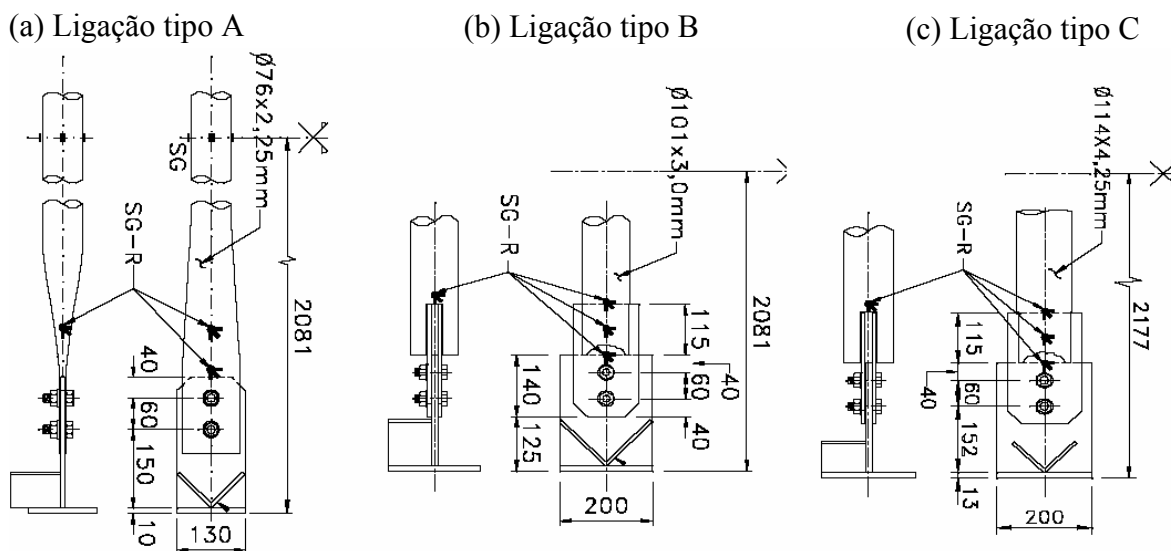


Figura 2.37 – Modelos dos protótipos das barras ensaiadas (Gonçalves, 1996)

Tabela 2.2 – Comparação de resultados teóricos e experimentais (Gonçalves, 1996)

Modelo	$\lambda$	$N_{c(teor.)}$	$N_{c(teor.)}^*$	$N_{u(exp.)}$	$N_c / N_c^*$	$N_u / N_c^*$	$N_u / N_c$
Tipo A – Ø76,0x2,26	111,3	60,75	29,23	20,80	2,08	0,95	0,34
Tipo B – Ø101,0x3,00	83,3	148,94	113,90	160,0	1,31	1,41	1,07
Tipo C – Ø114,0x4,25	78,4	246,90	192,95	276,50	1,28	1,43	1,12

A Tabela 2.2 expõe um comparativo entre os resultados dos ensaios e os valores teóricos calculados. Onde: “ $\lambda$ ” é a esbeltez da barra; “ $N_{c(teor.)}$ ” é a carga crítica teórica considerando as recomendações prescritas na norma NBR8800 (1986); “ $N_{c(teor.)}^*$ ” é a carga crítica teórica considerando a variação de inércia ao longo da barra; e “ $N_{u(exp.)}$ ” é a carga última obtida no ensaio experimental. Foi observado que as barras com extremidade amassada (tipo A) apresentam valores de resistência teóricos menores que os experimentais. Tal fato pode ser justificado pela influência da variação da inércia devido ao amassamento.

### 2.3.1.2 Estudos em barras apresentados por Malite *et al.* (1997)

Outro trabalho realizado sobre barras, com extremidade amassada, ensaiadas a compressão isoladamente foi apresentado por Malite *et al.* (1997) na Escola de Engenharia de São Carlos. Esta pesquisa foi solicitada pela empresa ALUSUD e tinha como objetivo analisar o comportamento estrutural de elementos tubulares com diferentes formas de estampagem das extremidades (Figura 2.38). Os modelos estudados se aplicam em estruturas com barras de extremidades amassadas e chapas de ponteira.

A Figura 2.39 mostra um gráfico comparativo dos ensaios realizados por Malite *et al.* (1997). É possível observar que a estampagem “reta”, “tradicional” e a “nova” apresentam menores resistência à compressão em comparação com barras de seção constante. No entanto, as configurações tradicional e nova, apresentam um significativo ganho de resistência em relação à estampagem reta.

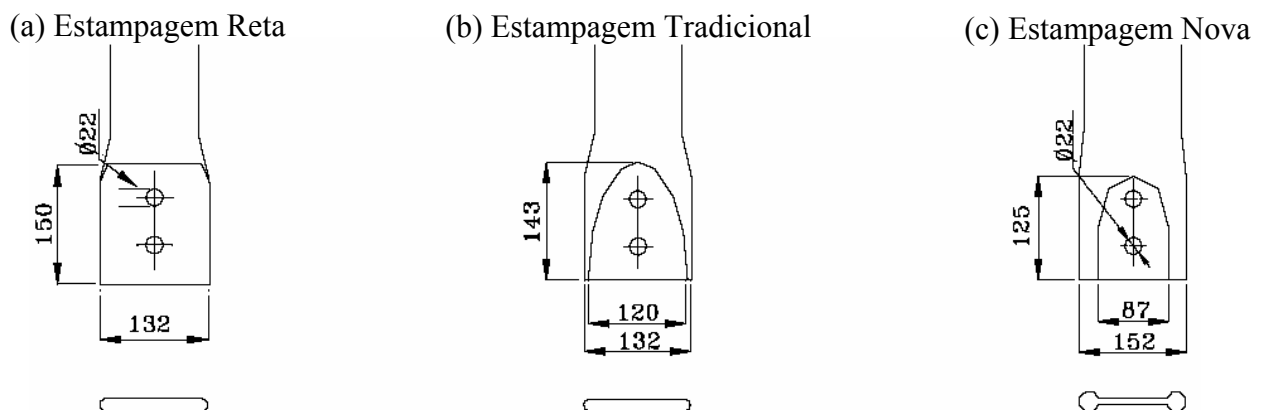


Figura 2.38 – Modelos de estampagem utilizados no estudo, com respectivos cortes da seção estampada (Malite *et al.*, 1997)

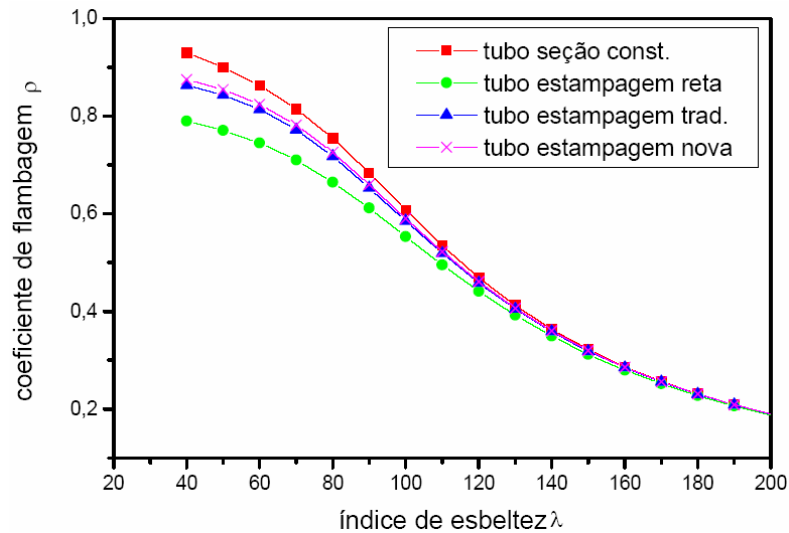


Figura 2.39 – Comparação do coeficiente de flambagem das barras estampadas ensaiadas na Escola de Engenharia de São Carlos (Malite *et al*, 1997)

### 2.3.1.3 Estudos em barras apresentados por Souza (1998)

A Figura 2.40 mostra os modelos de estampagem, aplicados nas extremidades dos elementos tubulares, estudados na Escola de Engenharia de São Carlos. As Barras de seção tubular foram ensaiadas a compressão. Todos os resultados experimentais disponíveis foram reunidos e comparados com os resultados teóricos. Estes resultados foram analisados e divulgados por Souza (1998). A Tabela 2.3 apresenta um resumo dos resultados teóricos e experimentais.

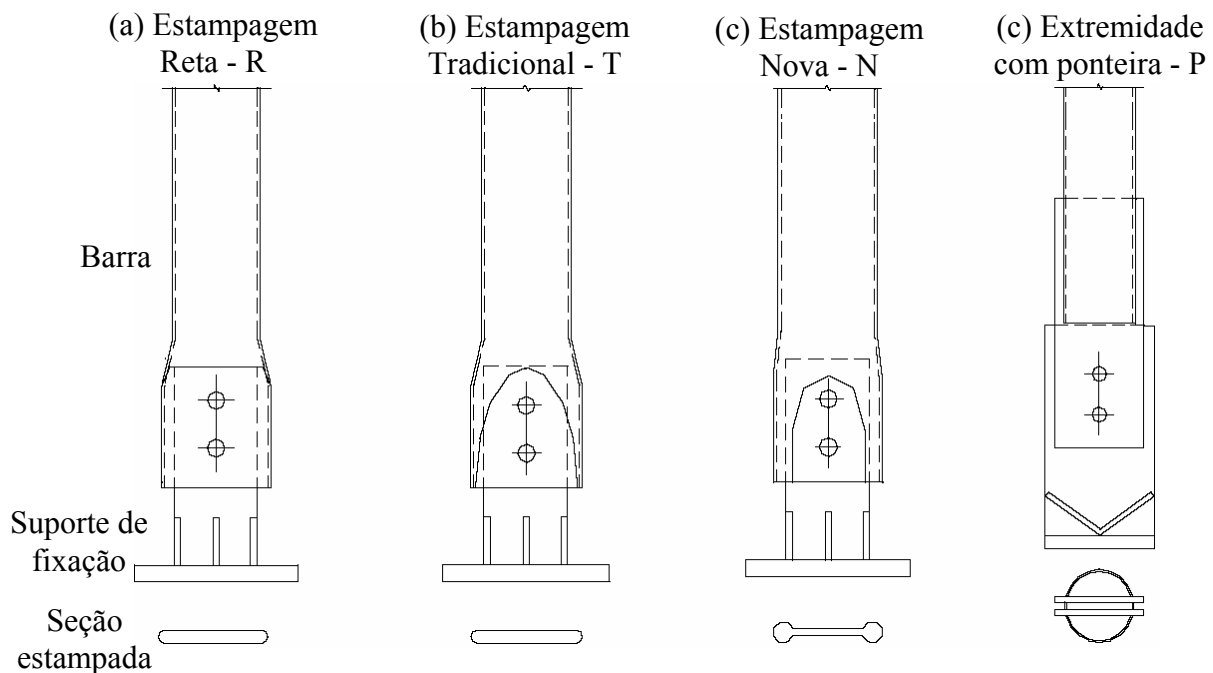


Figura 2.40 – Modelos de estampagem estudados (Souza, 1998)

Tabela 2.3 – Resultados teóricos e experimentais de barras comprimidas (Souza, 1998)

<i>Tubo</i>	$\lambda$	<i>Extremidade</i>	<i>Material</i>	<i>N<sub>exp</sub></i> (kN)	<i>N<sub>teorico</sub></i> (kN)	<i>N<sub>teorico*</sub></i> (kN)	<i>N<sub>exp</sub>/</i> <i>N<sub>teorico</sub></i>	<i>N<sub>exp</sub>/</i> <i>N<sub>teorico*</sub></i>
φ76x2,26	159	R	Aço	20,8	33,4	19,7	0,62	1,06
φ101x3,0	125	P	Aço	160	96,7	88,8	1,65	1,80
φ114x4,25	112	P	Aço	276,5	168,2	163,5	1,64	1,69
φ110x2,5	86	R	Alumínio	87,4	82	72	1,07	1,21
φ110x2,5	86	N	Alumínio	90,7	82	73,8	1,11	1,23
φ110x2,5	71	R	Alumínio	65	118	111	0,55	0,59
φ110x2,5	71	T	Alumínio	92,6	118	113,3	0,78	0,82
φ110x2,5	71	N	Alumínio	75,3	118	114	0,64	0,66
φ110x2,5	46	R	Alumínio	75,6	177	161	0,43	0,47
φ110x2,5	46	T	Alumínio	73,3	177	163,2	0,41	0,45
φ110x2,5	46	N	Alumínio	105,7	177	167	0,60	0,63
φ88x2,65	60	R	Aço	109,6	134,64	92,37	0,81	1,18
φ88x2,65	60	T	Aço	151,7	134,64	117,4	1,13	1,29
φ88x2,65	60	N	Aço	146,3	134,64	128,38	1,09	1,14
φ88x2,65	100	R	Aço	108	95,5	86,1	1,13	1,25
φ88x2,65	100	T	Aço	121	95,5	92,4	1,27	1,31
φ88x2,65	100	N	Aço	130,6	95,5	92,4	1,37	1,41
φ88x2,65	140	R	Aço	74,33	56,4	54,8	1,32	1,36
φ88x2,65	140	T	Aço	74,33	56,4	56,4	1,32	1,32
φ88x2,65	140	N	Aço	69,67	56,4	56,4	1,24	1,24

O estudo realizado confirma a influência da variação de inércia ao longo da barra, devido ao amassamento, na resistência do elemento submetido à compressão. Observou-se uma grande variabilidade nos resultados, com resultados experimentais divergindo de resultados teóricos.

Os estudos desenvolvidos com barras ensaiadas isoladamente foram relevantes para a comprovação da influência do amassamento da extremidade da barra na resistência do elemento. No entanto estes ensaios de elementos isolados não representam o comportamento das barras inseridas nas estruturas. Principalmente devido às excentricidades oriundas do tipo de ligação e montagem da estrutura.

### 2.3.2 Estudos em estruturas com barras de extremidade amassada

Ensaio em barras isoladas não representam as condições de vinculação das barras quando inseridas na estrutura. Desta forma, não possibilita qualquer avaliação do efeito da variação de seção nestes elementos sob o comportamento global da estrutura. Assim sendo, foram implementados ensaios com trechos de estruturas.

#### 2.3.2.1 Estudos em estruturas realizados por Batista & Batista (1997)

Batista & Batista (1997) realizaram ensaios experimentais para determinação dos mecanismos de colapso de nós com chapa de ponteira. A Figura 2.41 apresenta o esquema de ensaio para o trecho de estrutura. O protótipo foi montado em placa de reação. O carregamento foi aplicado por um sistema com atuador hidráulico. A Figura 2.42 mostra o detalhe do nó utilizado no protótipo de ensaio.

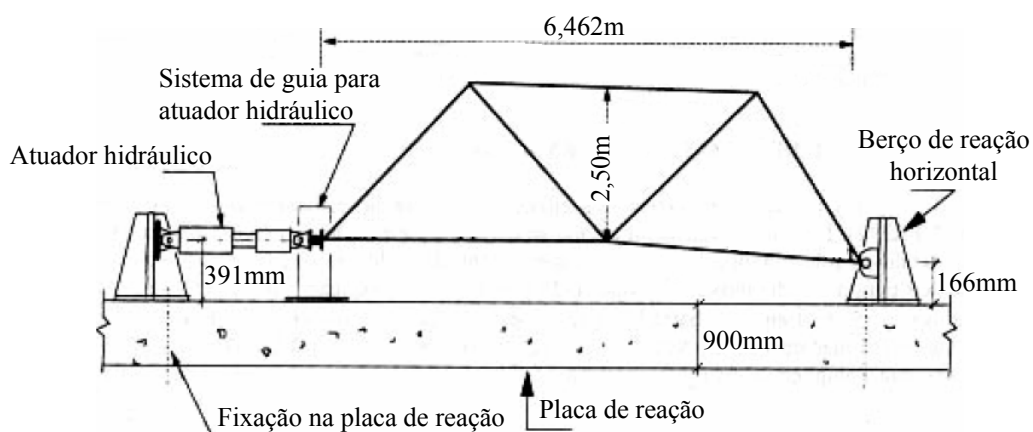


Figura 2.41 – Protótipo da estrutura espacial estudada (Batista *et al.*, 1997)

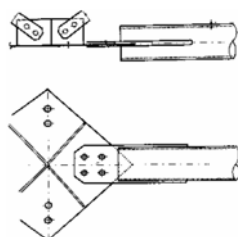


Figura 2.42 – Ligação típica e nó de aplicação da carga (Batista *et al.*, 1997)

Foi observado o colapso local da ligação com a formação de charneiras plásticas nas chapas de ligação e nas chapas que compõem o nó. Em ensaios de trechos de estruturas existe a dificuldade de reproduzir as condições de vizinhança imposta pelo restante da estrutura.

### 2.3.2.2 Estudos em estruturas realizados por Souza (1998)

Souza (1998) apresenta em sua dissertação de mestrado um estudo comparativo, numérico (elementos finitos) e experimental, de um modelo de treliça espacial. A Figura 2.43 apresenta as dimensões da estrutura espacial, com 7,5x7,5m de vão e 1,5m de altura da treliça. Foram ensaiados quatro protótipos com ligações típicas. As Figuras 2.44.a e 2.44.b mostram os detalhes do nó típico utilizado na estrutura e do nó de aplicação do carregamento, respectivamente.

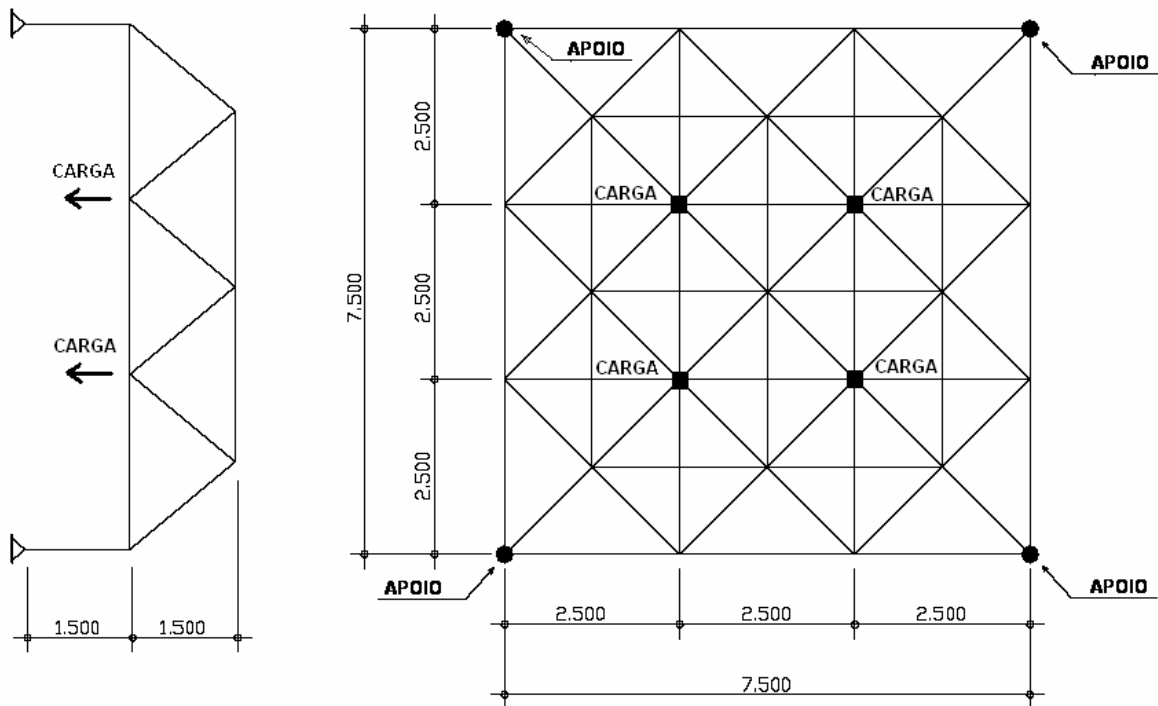


Figura 2.43 – Protótipo da estrutura espacial estudada (Souza, 1998)

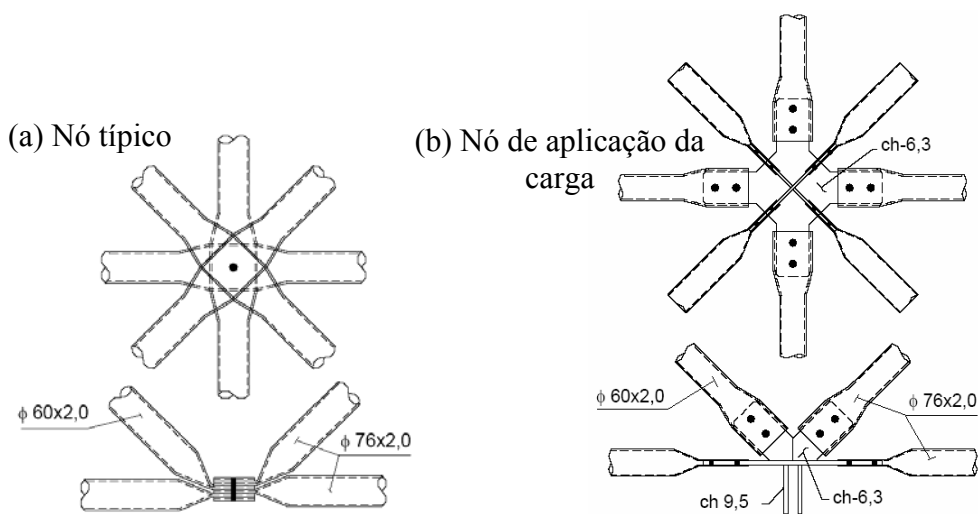


Figura 2.44 – Ligação típica e nó de aplicação da carga (Souza, 1998)

A Figura 2.45 mostra uma visão geral do ensaio experimental. As barras foram instrumentadas com extensômetros elétricos para medição das deformações. Transdutores de deslocamento foram utilizados para o monitoramento dos deslocamentos verticais e horizontais. As cargas externas foram aplicadas nos nós da estrutura por meio de atuadores hidráulicos. Segundo Souza (1998) havia sido prevista uma aplicação de carga de 60,0kN por nó, para este nível de carregamento ocorreria falha dos banzos comprimidos por flambagem. No entanto, o ensaio foi interrompido a uma carga de 40kN/nó, devido ao colapso da ligação. O colapso local das ligações, provocado por momentos fletores devido a excentricidades intrínsecas do nó, foi evidenciado por excessiva rotação do nó, o que caracterizou o colapso da estrutura e final do ensaio (Figura 2.46).



Figura 2.45 – Visão geral do ensaio experimental (Souza, 1998)



Figura 2.46 – Deformada dos nós após ruína (Souza, 1998)



A segunda parte do estudo de Souza foi à análise numérica em elementos finitos. Foi utilizado para análise o programa “LUSAS”. O estudo numérico foi dividido em duas análises; a primeira considerando as não linearidades geométricas “NLG” e a segunda considerando as não linearidades físicas “NLF”.

O gráfico da Figura 2.47 mostra um comparativo do deslocamento vertical do nó entre o ensaio experimental e o estudo numérico, considerando as não linearidades geométricas. Neste gráfico “I=100%” representa a inércia do trecho nodal correspondente à inércia da sobreposição de todas as extremidades concorrentes no nó. Desta forma “I=10%” representa 10% da inércia de desta sobreposição, “I=5%” representa 5% desta inércia e “I=tubo” representa a inércia do tubo com extremidade amassada.

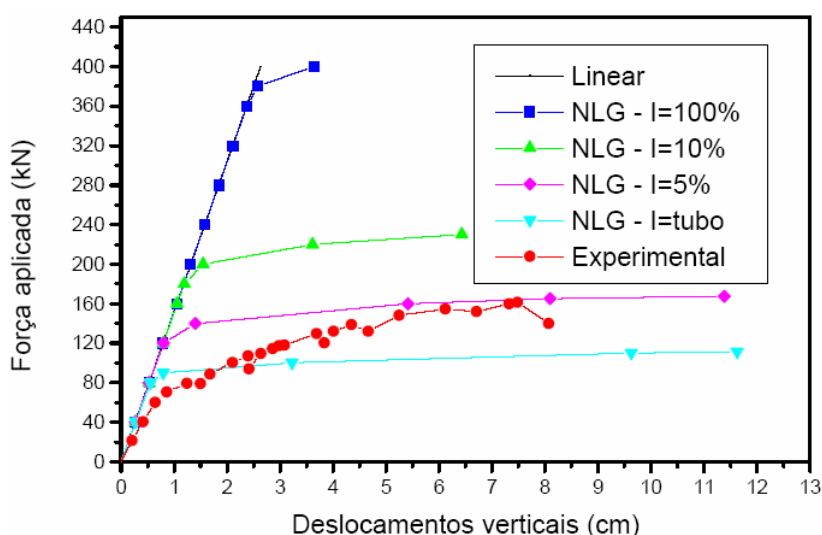


Figura 2.47 – Deslocamentos verticais teóricos e experimentais - NLG (Souza, 1998)

O gráfico da Figura 2.48 mostra um comparativo do deslocamento vertical do nó entre o ensaio experimental e o estudo numérico, considerando as não linearidades físicas. Neste gráfico são apresentados os resultados de análises, linear e não linear, ambos considerando a inércia constante da barra.

As principais conclusões deste trabalho foram: a confirmação do esforço resistente da estrutura experimental é menor que a teórica; a verificação do colapso local da ligação típica, que compromete a estabilidade da estrutura. Neste trabalho Souza (1998) enfatiza a importância de novos estudos na área, devido à carência de pesquisas e principalmente não solução dos problemas na ligação típica.

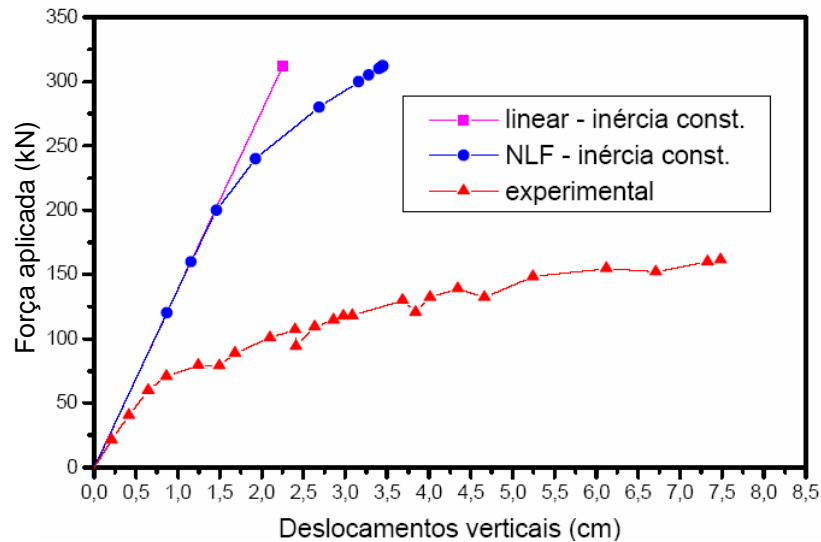


Figura 2.48 – Deslocamentos verticais teóricos e experimentais - NLF (Souza, 1998)

### 2.3.2.3 Estudos em estruturas realizados por D’Este (1998)

D’Este (1998), apresenta resultados experimentais de estudos em estruturas espaciais formadas por elementos tubulares com extremidades amassadas. Foram ensaiadas estruturas com nó típico, nó de aço e uma mescla de nó típico e nó de aço. Desta forma, foram ensaiadas quatro estruturas de 12x12 metros e 1,5 metro de altura. A geometria da estrutura era quadrado sobre quadrado. A Tabela 2.4 expõe os resultados teóricos e experimentais dos ensaios de D’Este (1998). Os resultados experimentais apresentaram resistências inferiores que o resultado teórico.

Tabela 2.4 – Resultados teóricos e experimentais (D’Este, 1998)

Ensaio	Ligação	$F_{exp}$ (kN)	$F_{teo}$ (kN)	$F_{exp}/F_{teo}$
1	Nós típicos (em toda estrutura)	99,5	139,21	0,72
2	Nós típicos e nós de aço nos apoios (chapa dupla – dois planos de corte nos parafusos)	129,23		0,93
3	Nós típicos e nós de aço nos apoios (chapa simples – um plano de corte nos parafusos)	72,32		0,52
4	Nós típicos e nós de aço na região próxima aos apoios	99,18		0,71

### 2.3.2.4 Estudos em estruturas apresentados por Maiola (1999)

Maiola (1999) apresenta um trabalho similar à pesquisa realizada por Souza (1998). Maiola (1999) desenvolve no mestrado, um estudo comparativo, numérico (elementos finitos) e experimental, de um modelo de treliça espacial. A Figura 2.49 apresenta as dimensões da estrutura espacial, com 7,5x7,5m de vão e 1,5m de altura da treliça. Foram ensaiados quatro protótipos com ligações típicas. A Tabela 2.5 mostra a descrição dos modelos dos protótipos usados nos ensaios.

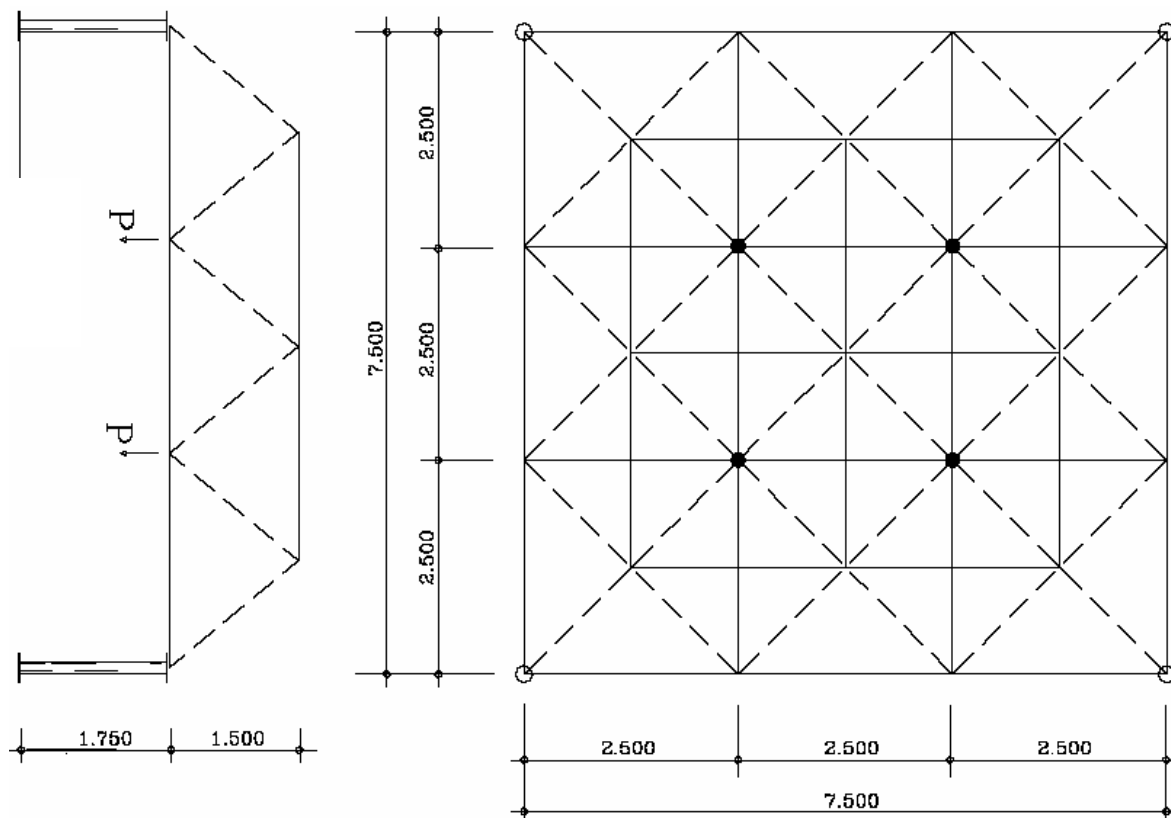


Figura 2.49 – Protótipo da estrutura espacial estudada (Maiola, 1999)

Tabela 2.5 – Descrição dos modelos dos protótipos de ensaio (Maiola, 1999)

Protótipo	Detalhe do nós	Diagonal de apoio
PROT1	Nós típicos	Ø88,0x2,65mm
PROT2	Nós típicos	Ø76,0x2,00mm
PROT3	Nós de aço	Ø88,0x2,65mm
PROT4	Sistema misto	Ø88,0x2,65mm

A Figura 2.50 mostra uma visão geral do ensaio experimental. As barras foram instrumentadas com extensômetros elétricos para medição das deformações. Transdutores de deslocamento foram utilizados para o monitoramento dos deslocamentos verticais e horizontais. As cargas externas foram aplicados nos nós da estrutura por meio de atuadores hidráulicos.



Figura 2.50 – Visão geral do ensaio experimental (Maiola, 1999)

O colapso local das ligações, provocado por momentos fletores devido a excentricidades intrínsecas do nó, foi evidenciado por excessiva rotação do nó. A Figura 2.51 mostra a deformada do nó que caracterizou o colapso da estrutura e final do ensaio no caso das estruturas com nó típico PROT1 e PROT2). O protótipo com nó de aço (PROT3) apresentou colapso pela flambagem dos elementos comprimidos, conforme mostra a Figura 2.52.



Figura 2.51 – Deformada dos nós após ruína (Maiola, 1999)



Figura 2.52 – Deformada dos nós após ruína (Maiola, 1999)

A Tabela 2.6 apresenta os valores numéricos das forças últimas teóricas e experimentais para os protótipos. Os valores numéricos foram obtidos com a aplicação das normas EUROCODE (1992), AISC-LRFD (1991) e NBR8800 (1986). Observa-se que os protótipos com nó típico (PROT1, PROT2 e PROT4) resistem, no ensaio experimental, a esforços inferiores aos obtidos teoricamente com a aplicação das normas. Quanto ao protótipo com nó de aço (PROT3), pode-se afirmar que as normas representam de forma satisfatória o esforço obtido experimentalmente.

Tabela 2.6 – Forças últimas teóricas e experimentais para os protótipos (Maiola, 1999)

Protótipo	EUROCODE (1992) “curva c” $F_{uEURO}$ (kN)	AISC/LRFD (1991) $F_{uLRFD}$ (kN)	NBR8800 (1986) “curva a” $F_{uNBR}$ (kN)	ENSAIO $F_{uEXP}$ (kN)	$\frac{F_{uEXP}}{F_{uEURO}}$	$\frac{F_{uEXP}}{F_{uLRFD}}$	$\frac{F_{uEXP}}{F_{uNBR}}$
PROT1	210,2	310,8	259,7	161,3	0,77	0,52	0,62
PROT2	197,0	289,5	245,7	160,2	0,81	0,55	0,65
PROT3	210,2	310,8	259,7	259,9	1,24	0,84	1,0
PROT4	210,2	310,8	259,7	179,0	0,85	0,58	0,69

A segunda parte do estudo de Maiola (1999) foi à análise numérica em elementos finitos. Foi utilizado para análise o programa “ANSYS”. A Figura 2.53 apresenta o modelo da barra e do nó discretizados. As Figuras 2.54a, b, c e d mostram os comparativos entre os ensaios experimentais e numéricos (linear e não linear em elementos finitos), para os protótipos PROT1, PROT2, PROT3 e PROT4, respectivamente. Observa-se que os ensaios numéricos não representam de forma fidedigna os ensaios experimentais. Este fato deve-se a dificuldade de representar todos os fenômenos intrínsecos destes tipos de estruturas.

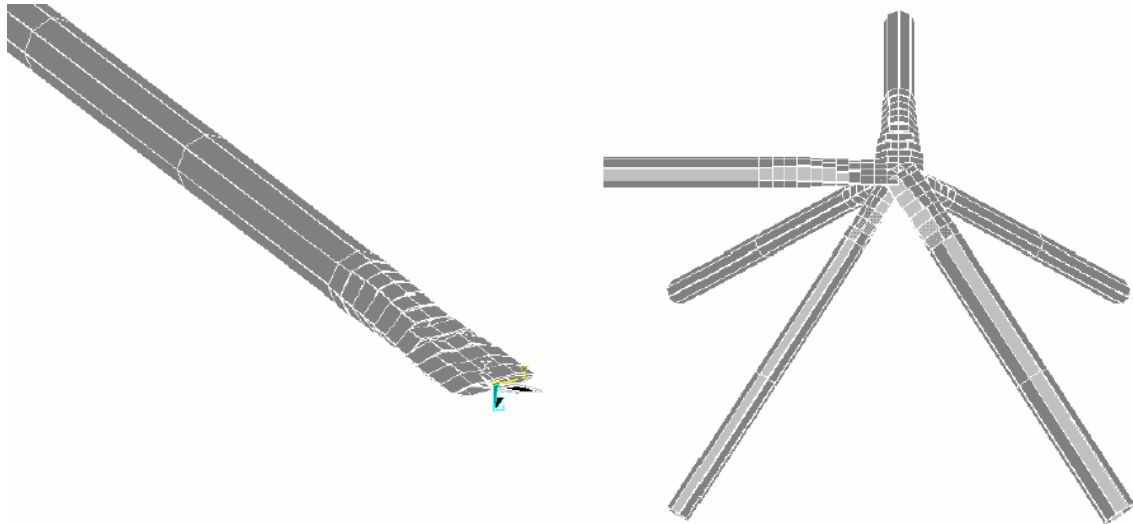


Figura 2.53 – Deslocamentos verticais teóricos e experimentais - NLG (Maiola, 1999)

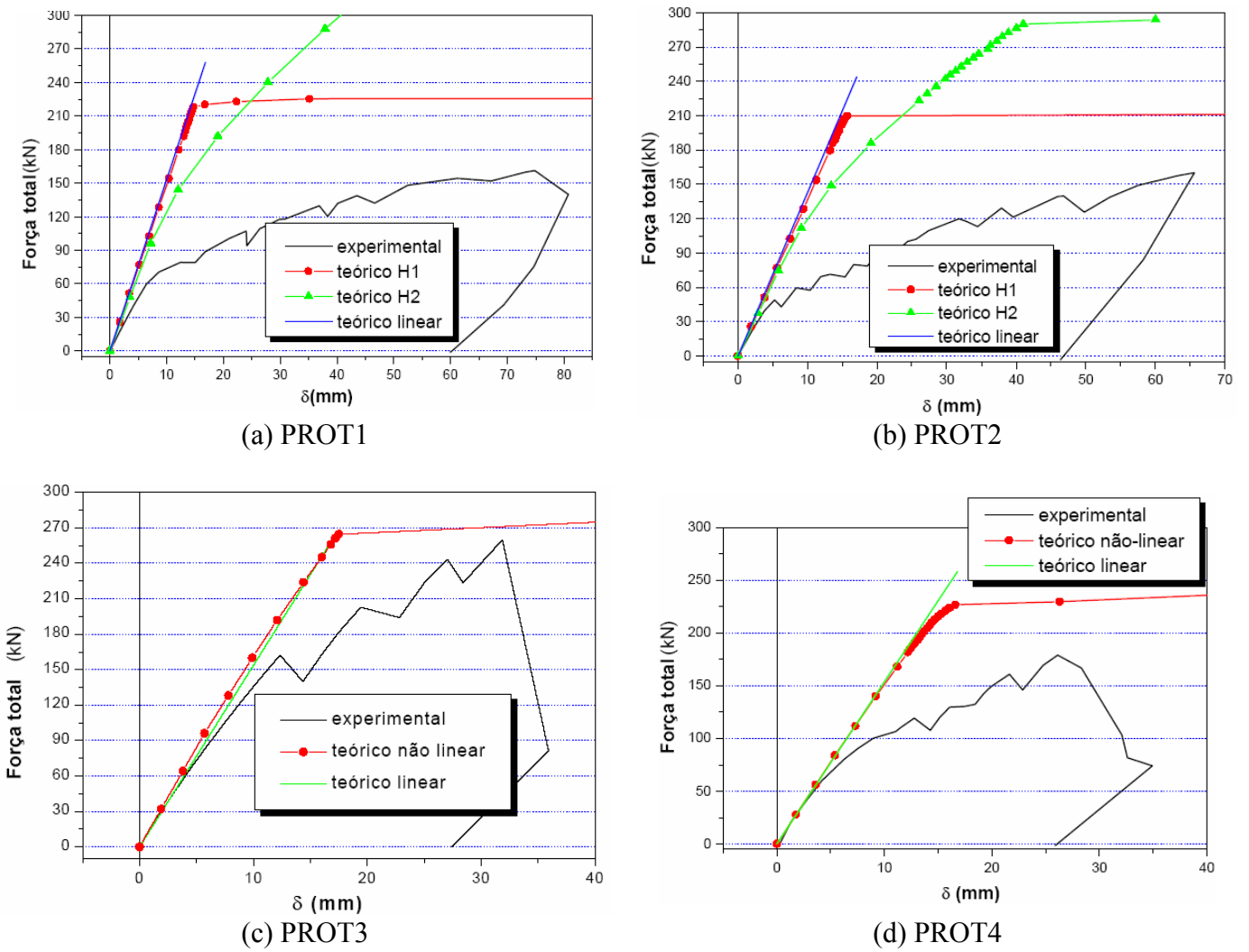


Figura 2.54 – Deslocamentos verticais teóricos e experimentais - NLG (Souza, 1998)

### 2.3.2.5 Estudos em estruturas realizados por Silva (1999)

Assim como Batista & Batista (1997), Silva (1999) apresenta um estudo em um trecho de uma estrutura espacial. Silva apresenta em sua dissertação de mestrado um estudo comparativo, teórico (aplicando as normas vigentes) e experimental, de um modelo de treliça espacial com “nó de aço”. A Figura 2.55 apresenta as dimensões da estrutura espacial, com 2,0x2,0m de vão e 0,707m de altura da treliça. Foram ensaiados nove protótipos com nós de aço, alterando as dimensões de uma das barras comprimidas, a fim de provocar o colapso por flambagem. As Figuras 2.56a e 2.56b mostram os detalhes do nó utilizado no apoio da estrutura e entre as barras, respectivamente.

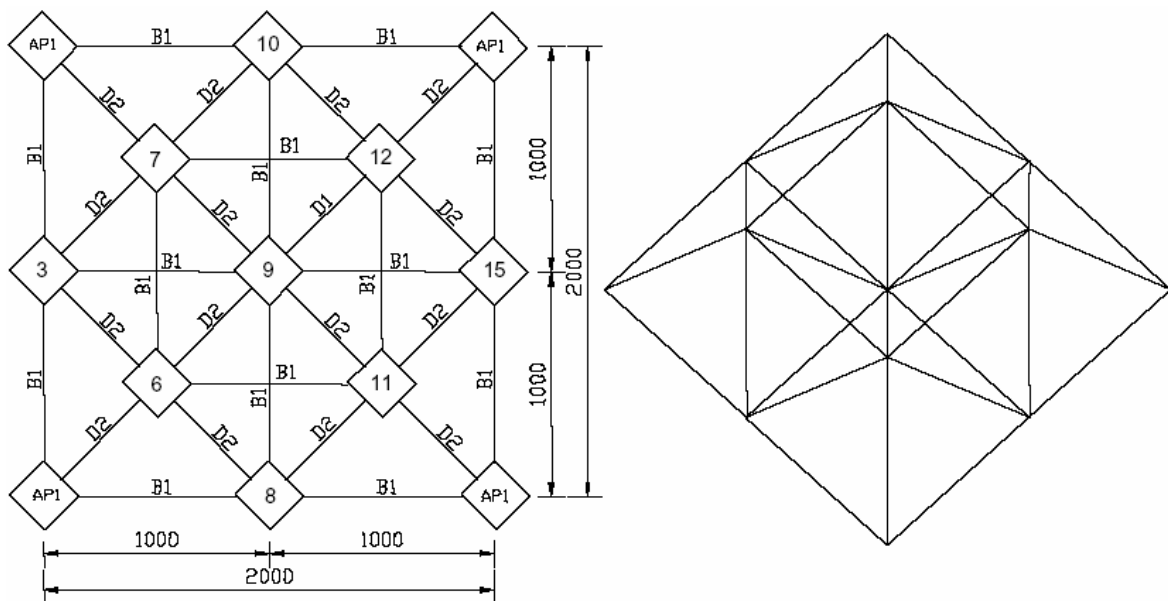
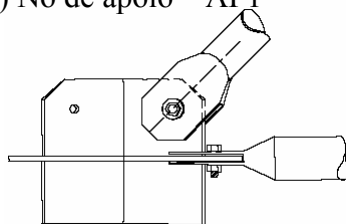


Figura 2.55 – Protótipo da estrutura espacial estudada (Silva, 1999)

(a) Nó de apoio – AP1



(b) Nó entre barras

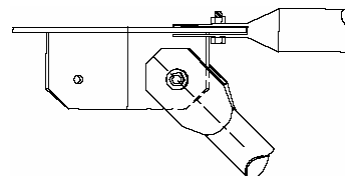


Figura 2.56 – Ligação típica e nó de aplicação da carga (Silva, 1999)

A Figura 2.57 mostra uma visão geral do ensaio experimental. As barras foram instrumentadas com extensômetros elétricos para medição das deformações. Transdutores de deslocamento foram utilizados para o monitoramento dos deslocamentos verticais e horizontais. As cargas externas foram aplicadas nos nós da estrutura por meio de atuador

hidráulico, posicionado no nó central (nó 9) da estrutura. A Figura 2.58 apresenta detalhes do ponto de aplicação do carregamento e do apoio da estrutura.



Figura 2.57 – Visão geral do ensaio experimental (Silva, 1999)



Figura 2.58 – Nó de aplicação de carga e nó de apoio da estrutura (Silva, 1999)

A Figura 2.59 apresenta a configuração final da barra comprimida da estrutura após colapso por flambagem. A Tabela 2.7 expõe as forças últimas teóricas e experimentais para barras estudadas. O objetivo deste estudo foi avaliar o comportamento de barras amassadas submetidas à compressão, considerando as condições de vinculação na estrutura, sendo estes ensaios mais representativos que os ensaios em barras isoladas.





Figura 2.59 – Deformada das barras após colapso por flambagem (Silva, 1999)

Tabela 2.7 – Forças últimas teóricas e experimentais para barras (Silva, 1999)

MODELO	P <sub>U</sub> (kN) Experimental da Estrutura	P <sub>U</sub> (kN) Experimental da Barra	L(cm)	P <sub>U</sub> (kN) Teórico da Barra			
				AISC	NBR	AISI	EUROCODE
				K=1	K=1	K=1	K=1
<b>912</b>	129,50	-	<b>73</b>	56,28	58,77	62,55	61,16
		-	<b>85</b>	50,39	51,76	51,47	53,72
		-	<b>100</b>	49,54	42,53	50,04	43,78
<b>912A</b>	48,06	-	<b>73</b>	16,69	17,17	19,00	17,83
		-	<b>85</b>	14,41	14,36	16,79	14,80
		-	<b>100</b>	11,62	11,27	13,54	11,52
<b>912B</b>	56,66	20,13	<b>73</b>	16,69	17,17	19,00	17,83
		14,21	<b>85</b>	14,41	14,36	16,79	14,80
		9,68	<b>100</b>	11,62	11,27	13,54	11,52
<b>912C</b>	60,98	20,38	<b>73</b>	16,69	17,17	19,00	17,83
		14,42	<b>85</b>	14,41	14,36	16,79	14,80
		9,86	<b>100</b>	11,62	11,27	13,54	11,52
<b>912D</b>	64,34	13,11	<b>73</b>	23,53	22,82	27,25	23,28
		9,51	<b>85</b>	17,64	17,59	20,11	17,83
		6,73	<b>100</b>	12,74	13,10	14,53	13,23
<b>912E</b>	66,74	37,27	<b>73</b>	30,62	30,54	35,67	31,48
		27,17	<b>85</b>	25,11	24,39	29,32	24,93
		19,35	<b>100</b>	18,75	18,56	21,38	18,54
<b>912F</b>	35,53	12,92	<b>73</b>	12,44	12,06	14,40	12,30
		9,35	<b>85</b>	9,32	9,29	10,63	9,42
		6,59	<b>100</b>	6,73	6,93	7,68	6,99
<b>912G</b>	71,06	13,19	<b>73</b>	23,53	22,82	27,25	23,28
		9,58	<b>85</b>	17,64	17,59	20,11	17,83
		6,78	<b>100</b>	12,74	13,10	14,53	13,23
<b>912H</b>	77,78	36,54	<b>73</b>	30,62	30,54	35,67	31,48
		26,55	<b>85</b>	25,11	24,39	29,32	24,93
		18,82	<b>100</b>	18,75	18,56	21,38	18,54

### 2.3.2.6 Estudos em estruturas apresentados por Souza (2003)

Souza (2003) apresenta em sua tese de doutorado um vasto trabalho sobre estruturas espaciais. Ele mostra um levantamento dos diversos tipos de ligações, apresentando um histórico das aplicações e pesquisas na área, apresenta também recomendações construtivas e definições. O principal objetivo de sua tese foi o estudo das ligações (típicas, nós de aço e ponteira) em estruturas espaciais de forma numérica e experimental, propôs ainda um reforço para recuperação de estruturas.

Quanto à etapa experimental, Souza (2003) ensaiou protótipos de treliças com as ligações mais usadas em estruturas espaciais no Brasil (Nós típicos, nós de aço e nós com chapa de ponteira). Foram ensaiados também protótipos com o reforço proposto (arruela em forma de canal). A Figura 2.60 mostra o reforço a ser colocada na posição similar a chapa cobre-juntas. A chapa cobre-junta é comumente adicionada às estruturas com nós típicos.

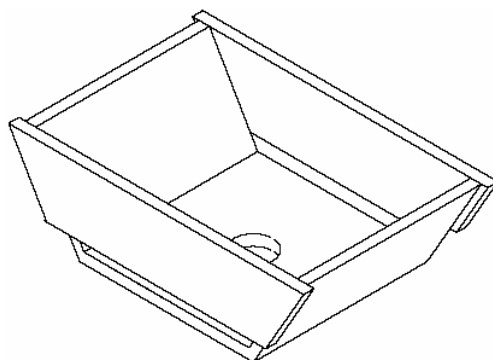


Figura 2.60 – Proposta de reforço – arruela em forma de canal (Souza, 2003)

Foram ensaiados dez protótipos de treliças espaciais do tipo quadrado sobre quadrado com módulos piramidais de 2,5x2,5m de base e 1,5m de altura. Dessas dez estruturas ensaiadas, nove estruturas com 7,5x15,0m de vão e uma com 7,5x7,5m de vão. As estruturas também se diferem quanto ao tipo de nó utilizado nas ligações, seção das diagonais de apoio e quanto à existência ou não do reforço no nó típico.

A Figura 2.61 apresenta as dimensões da estrutura espacial, com 7,5x15,0m (dimensões em planta) e 1,5m de altura da treliça. A Figura 2.62 apresenta as dimensões da estrutura espacial, com 7,5x7,5m (dimensões em planta) e 1,5m de altura da treliça. Nestas figuras é possível observar os locais de apoio das estruturas, bem como, os pontos de aplicação de carregamento.

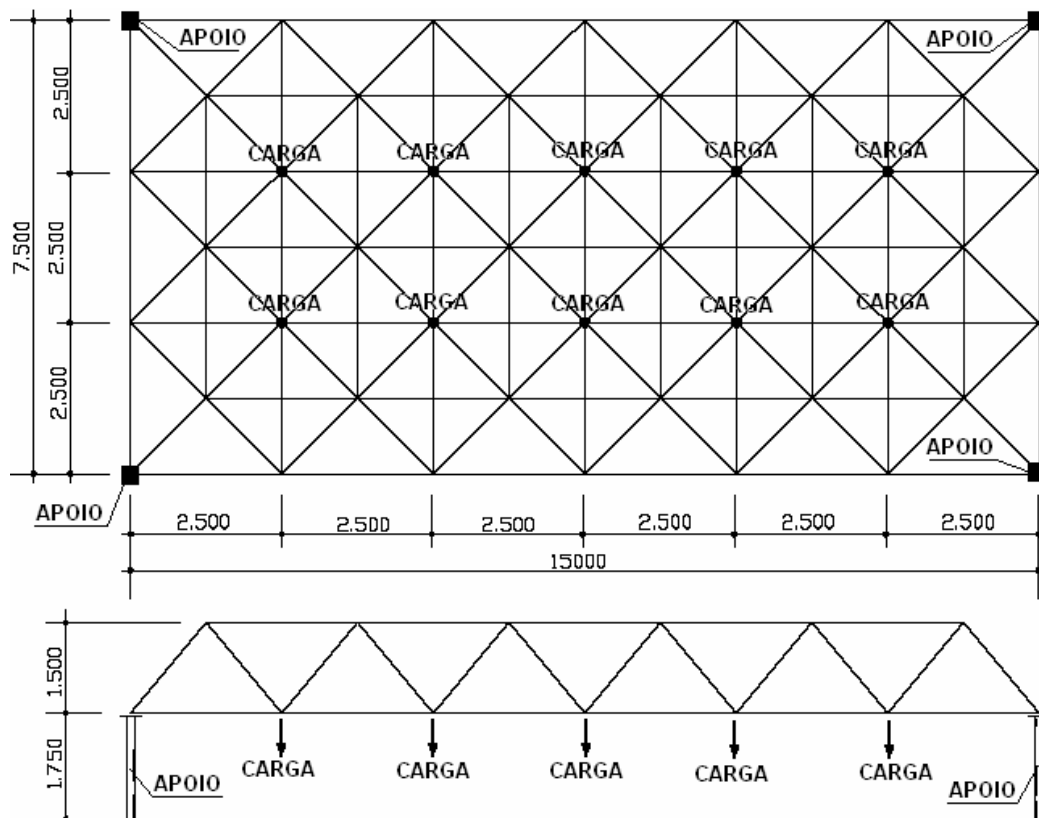


Figura 2.61 – Protótipo com dimensões em planta de 7,5x15,0m (Souza, 2003)

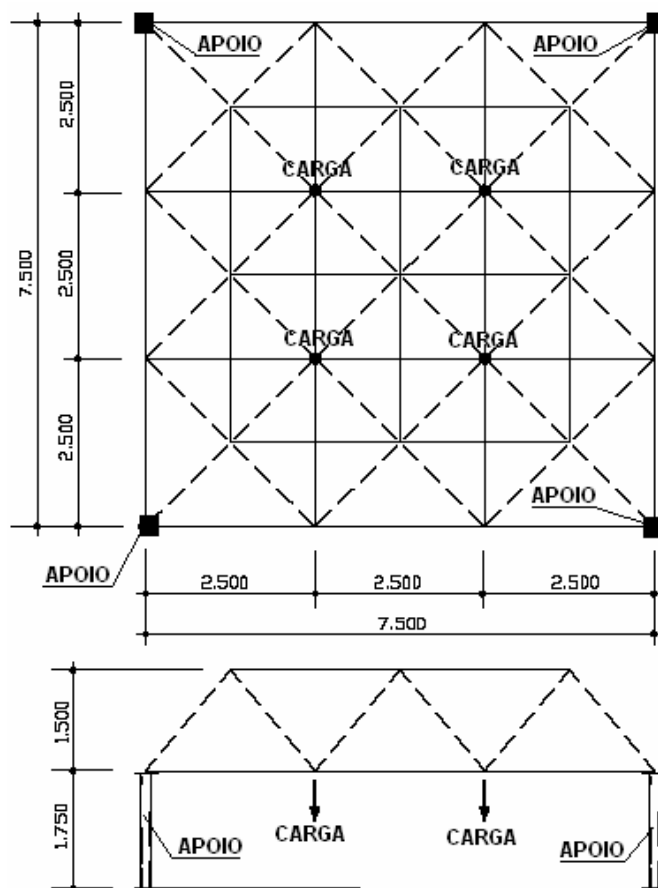


Figura 2.62 – Protótipo com dimensões em planta de 7,5x7,5m (Souza, 2003)

Todos os protótipos foram constituídos por elementos tubulares de seção Ø76,0x2,00mm nos banzos. Nas diagonais foram utilizados elementos tubulares de seção Ø60,0x2,00mm ou Ø88,0x2,65mm. A Tabela 2.8 apresenta um resumo dos ensaios realizados por Souza. O protótipo do modelo “TE1” foi montado com ligação das barras com nó típico, sendo as diagonais Ø60,0x2,00mm. O protótipo do modelo “TE1-R” é similar ao “TE1”, porém contendo o reforço proposto. O modelo “TE2” é composto com nó típico, sendo as diagonais de apoio os tubos de Ø88,0x2,65mm. O protótipo do modelo “TE2-R” é similar ao “TE2”, porém contendo o reforço proposto. O modelo “TE3” é composto com nó típico, sendo as diagonais de apoio os tubos de Ø88,0x2,65mm, e ainda contendo nós de aço nas diagonais de apoio. O protótipo do modelo “TE3-1” é similar ao “TE3”. O modelo “TE4” foi montado com nó de aço, sendo as diagonais de apoio os tubos de Ø88,0x2,65mm. O protótipo do modelo “TE4-1” é similar ao “TE4”. O modelo “TE5” foi montado com nó de aço e chapas de ponteiros, sendo as diagonais de apoio os tubos de Ø88,0x2,65mm. Todos esses protótipos apresentam dimensões em planta de 7,5x15,0m. O protótipo do modelo “TE4-2” foi montado com nó de aço, sendo as diagonais de apoio os tubos de Ø88,0x2,65mm e dimensões em planta de 7,5x7,5m.

Tabela 2.8 – Resumo dos ensaios realizados por Souza (2003)

Modelo	Ligação	Figura	Diagonal de apoio	Observação
TE1	Nó típico	Fig.2.63	Ø60,0x2,00mm	
TE1-R	Nó típico reforçado	Fig.2.64	Ø60,0x2,00mm	Reforço: U80x50x6,3
TE2	Nó típico	Fig.2.63	Ø88,0x2,65mm	
TE2-R	Nó típico reforçado	Fig.2.64	Ø88,0x2,65mm	Reforço: U80x50x6,3
TE3	Nó típico	Fig.2.63	Ø88,0x2,65mm	Nós de aço nas diagonais de apoio
TE3-1	Nó típico	Fig.2.63	Ø88,0x2,65mm	Nós de aço nas diagonais de apoio
TE4	Nó de aço	Fig.2.65	Ø88,0x2,65mm	
TE4-1	Nó de aço	Fig.2.65	Ø88,0x2,65mm	
TE4-2	Nó de aço	Fig.2.65	Ø88,0x2,65mm	Vão 7,5m x 7,5m
TE5	Nó de aço chapa de ponteira	Fig.2.66	Ø88,0x2,65mm	



Figura 2.63 – Detalhe da ligação com nó típico (Souza, 2003)



Figura 2.64 – Detalhe do nó típico com reforço proposto (Souza, 2003)



Figura 2.65 – Detalhe da ligação com nó de aço (Souza, 2003)



Figura 2.66 – Detalhe da ligação com chapa de ponteira (Souza, 2003)

A Figura 2.67 mostra uma visão geral do ensaio experimental. Este é um esquema de montagem típico para todos os ensaios. As barras foram instrumentadas com extensômetros elétricos para medição das deformações. Transdutores de deslocamento foram utilizados para o monitoramento dos deslocamentos verticais e horizontais. As cargas externas foram aplicadas nos nós da estrutura por meio de atuadores hidráulicos.



Figura 2.67 – Visão geral do ensaio experimental (Souza, 2003)

As Figuras 2.68 de a até j apresentam as configurações finais, dos locais de colapso, dos modelos, que determinaram o termino dos ensaios. O modelo “TE1”, formado com nó típico, apresentou grandes deslocamentos para pequenos acréscimos de carregamento, e a ruína da estrutura foi caracterizada pelo colapso local da ligação (Fig.2.68a). No modelo “TE1-R”, que contém o nó típico reforçado, não foi observada alteração no modo de colapso da estrutura, tendo assim comportamento similar ao nó sem reforço, onde a falha ligação caracterizou o final do ensaio (Fig.2.68b). O modelo “TE2”, formado com nó típico e diagonal de apoio Ø88,0x2,65mm, apresentou comportamento similar ao modelo “TE1” (diagonal de apoio Ø60,0x2,00mm), com o agravante da aceleração do processo de colapso da ligação (Fig.2.68c). No modelo “TE2-R”, que contém o nó típico reforçado e diagonal de apoio Ø88,0x2,65mm, não foi observada alteração no modo de colapso da estrutura em comparação ao modelo sem reforço, onde a ligação apresentou excessivos deslocamentos (Fig.2.68d). O modelo “TE3”, formado com nó típico e nós de aço nas diagonais de apoio que contém tubo de Ø88,0x2,65mm, apresentaram colapso dos nós de aço, comportamento contrário do esperado, este provavelmente relacionado com imperfeições do nó ou montagem da estrutura (Fig.2.68e). O modelo “TE3-1”, que foi uma repetição do ensaio “TE3”, foi caracterizado pelo excesso de deslocamento vertical da estrutura, e não apresentou falha dos nós (Fig.2.68f).



(a) Modelo TE1



(b) Modelo TE1-R



(c) Modelo TE2



(d) Modelo TE2-R



(e) Modelo TE3



(f) Modelo TE3-1



(g) Modelo TE4



(h) Modelo TE4-1



(i) Modelo TE4-2



(j) Modelo TE5

Figura 2.68 – Configuração final dos modelos após ensaio (Souza, 2003)

Para o modelo “TE4”, formado com nó de aço e diagonal de apoio Ø88,0x2,65mm, esperava-se o colapso global da estrutura decorrente da flambagem de um banzo superior, no entanto o que caracterizou o final do ensaio foi o colapso local da ligação (Fig.2.68g). O modelo “TE4-1”, que foi uma repetição do ensaio “TE4”, foi realizado em função do colapso da estrutura não ter sido de modo esperado, no entanto, mais uma vez o colapso da estrutura se deu pela falha da ligação (Fig.2.68h). O modelo “TE4-2”, formado com nó de aço, diagonal de apoio Ø88,0x2,65mm e dimensões em planta de 7,5x7,5m, esperava-se o colapso global da estrutura decorrente da flambagem de um banzo superior, no entanto o que caracterizou o final do ensaio foi o colapso local da ligação (Fig.2.68i). O modelo “TE5”, formado com nó de aço e barras com chapa de ponteira, apresentou o colapso da estrutura após a flambagem do banzo superior, como previsto teoricamente (Fig.2.68j).

Na segunda parte de seu trabalho, Souza (2003) desenvolveu estudos teóricos em elementos finitos das estruturas, utilizando o programa comercial ANSYS. Este estudo foi dividido em duas partes. A primeira foi um estudo das estruturas no regime elástico linear, na segunda parte ele considerou as não linearidades físicas do material, ambos os estudos utilizando elementos de barra, Figura 2.69.

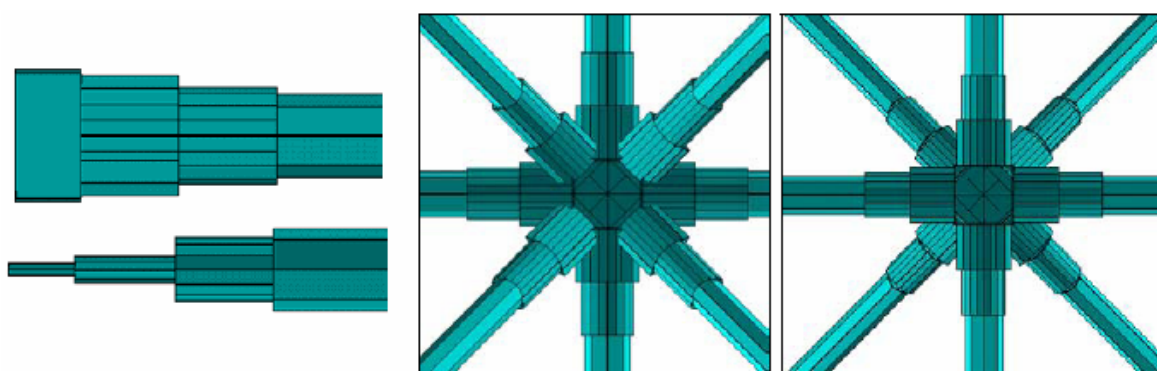
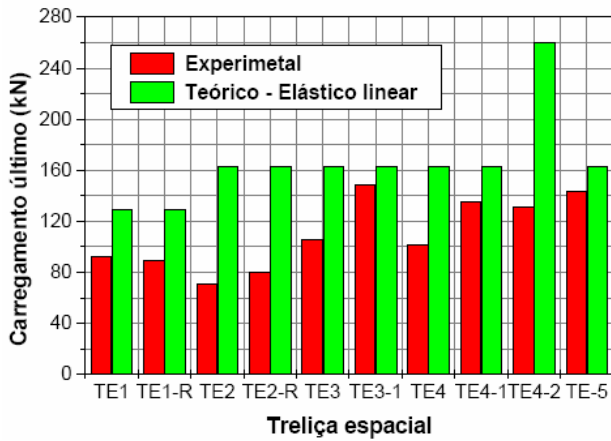


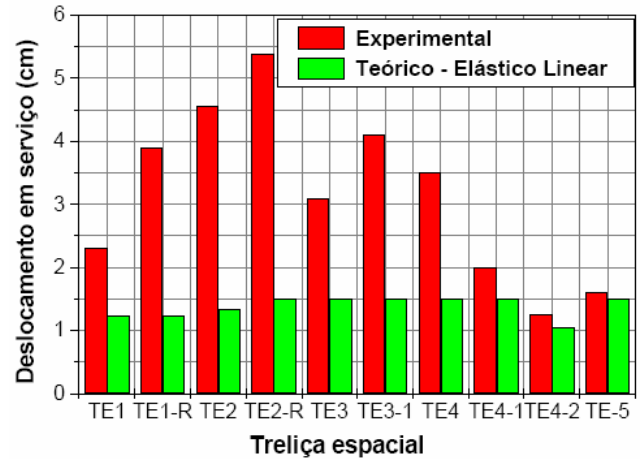
Figura 2.69 – Aspecto da ligação nodal (Souza, 2003)

As Figuras 2.70 e 2.71, mostram respectivamente a comparação dos estudos teórico linear e experimental e a comparação dos estudos teórico não linear e experimental. Nos gráficos estão destacados os carregamentos últimos e o deslocamento em serviço para os modelos. No estudo teórico linear elástico, de um modo geral, os resultados divergem dos experimentais, tanto para os valores de carregamento último como para os valores de deslocamento em serviço. Na análise não linear, houve uma maior representatividade em relação ao estudo experimental.



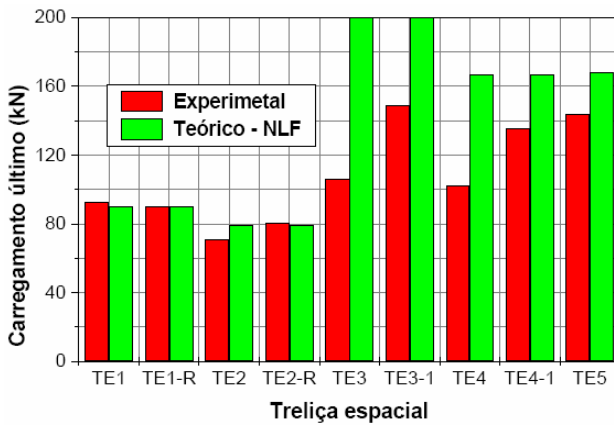


(a) Carregamento último

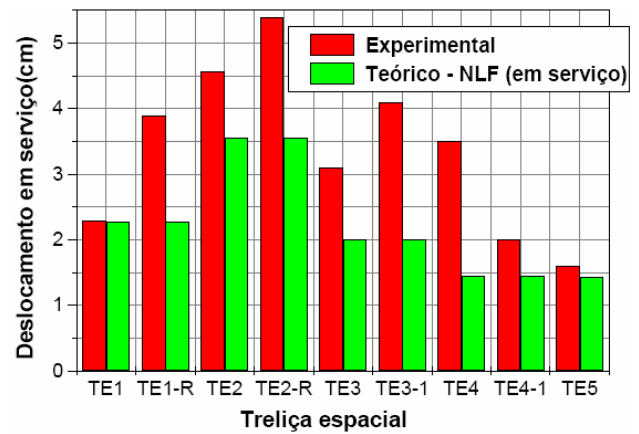


(b) Deslocamento em serviço

Figura 2.70 – Comparação dos estudos teórico linear e experimental (Souza, 2003)



(a) Carregamento último



(b) Deslocamento em serviço

Figura 2.71 – Comparação dos estudos teórico não linear e experimental (Souza, 2003)

A segunda parte do estudo teórico de Souza (2003), foi à análise do comportamento local da ligação com nó típico, discretizando em um modelo com elementos de casca. Foram discretizados os modelos “TE1” e “TE2”, similar à malha representada na Figura 2.72. Esta discretização foi aplicada apenas nas extremidades dos membros da treliça, sendo no corpo dos tubos aplicados elementos de barra linear.

Foi constatada no estudo teórico a formação de charneiras plásticas na região da ligação. A deformada final da ligação, observada no estudo teórico foi similar à deformada da ligação no ensaio experimental, conforme pode ser observado na Figura 2.73.

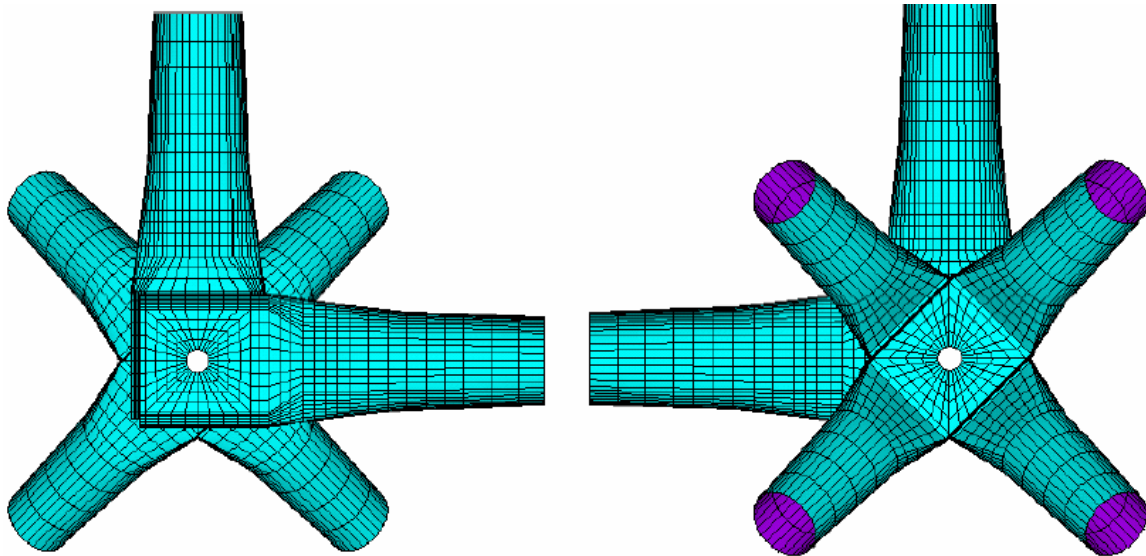
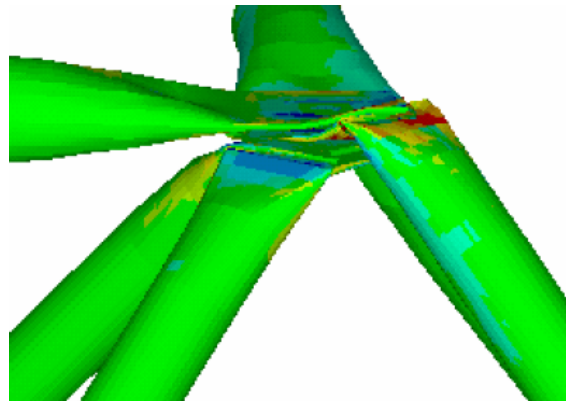


Figura 2.72 – Modelo discretizado do nó típico em elementos de casca (Souza, 2003)



(a) Deformada no ensaio experimental



(b) Deformada no estudo teórico

Figura 2.73 – Configuração do nó típico após colapso local (Souza, 2003)

Das muitas conclusões obtidas ao final do estudo de Souza (2003), algumas nortearam o rumo da pesquisa objeto de estudo deste trabalho de tese aqui desenvolvido. A primeira conclusão é quanto ao colapso das estruturas típicas, que ocorrem devido ao colapso local da ligação e com intensidade de carregamento inferior ao previsto teoricamente. A segunda conclusão é quanto ao reforço proposto e a chapa cobre-junta, que utilizados nos protótipos não alteraram o modo de colapso da ligação. A terceira conclusão é quanto ao aumento do diâmetro da barra da diagonal de apoio que provoca uma diminuição da capacidade de carga da estrutura com aumento de deslocamentos verticais.

### 2.3.3 Ligação de Cuenca

Um sistema de ligação semelhante ao nó típico utilizado no Brasil é o nó de Cuenca (2002). Este sistema de ligação foi desenvolvido e utilizado por Cuenca (2002), em uma obra na Espanha de um ginásio de esportes. A cobertura do ginásio era composta por uma estrutura treliçada tridimensional geodésica com 2800 m<sup>2</sup> de área. Observe a planta e elevação na Figura 2.74, e fotos do centro esportivo na Figura 2.75. Note que os elementos da estrutura estão dispostos na parte externa com telhado interno.

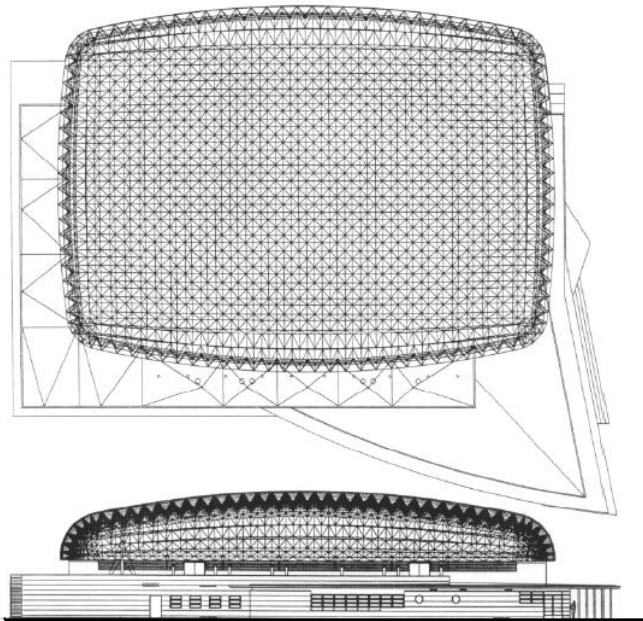
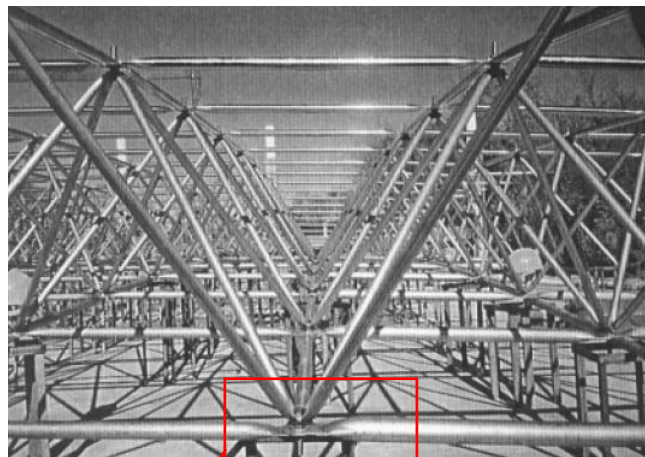


Figura 2.74 – Planta e elevação do centro esportivo na Espanha (Cuenca, 2002)



Figura 2.75 – Fotos do centro esportivo a Espanha (Cuenca, 2002)

A Figura 2.76, mostra os elementos da estrutura da cobertura, formada por banzos dispostos quadrado sobre quadrado e diagonais esconsas. A Figura 2.77, mostra um detalhe da ligação dos elementos. Note que os elementos do banzo apresentam dimensões menores que os elementos das diagonais, a união das barras é feita por apenas um parafuso e foi colocada uma porca sextavada entre os banzos e as diagonais. Segundo Cuenca (2002) este sistema reduz a excentricidade deste modelo. Porém não foram encontrados estudos que comprovem e divulguem a eficiência deste sistema.



Ligação de Cuenca

Figura 2.76 – Elementos da estrutura espacial de Cuenca (2002)

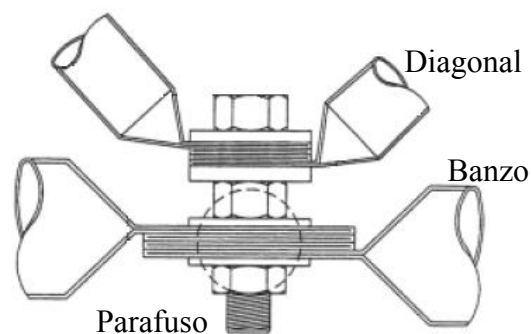


Figura 2.77 – Detalhe construtivo da ligação de Cuenca (2002)

## **2.4. DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS DA ESTRUTURA ESPACIAL**

As estruturas metálicas treliçadas tridimensionais tem seus elementos dimensionados apenas quanto aos esforços axiais (Aguiar, 2002). A norma brasileira recomenda, quando na análise estrutural, a adoção de um modelo com rótulas perfeitas, desprezando assim os momentos gerados. Os momentos nas ligações nessas estruturas podem ser desprezados quando os eixos dos elementos que convergem para os nós se cruzem no centro do nó (Bellei, 1998). Após a análise estrutural, os elementos são dimensionados para suportar apenas as cargas de tração ou compressão.

Nos itens a seguir descreve-se a teoria para o dimensionamento dos elementos submetidos aos esses esforços de compressão e tração. O dimensionamento dos elementos submetidos à tração é regido pelos estados limites, escoamento da seção bruta e ruptura da seção líquida. O dimensionamento dos elementos sujeitos a compressão é regido pela instabilidade gerada pela esbeltez da barra, tipo de apoio e excentricidades.

### **2.4.1 Carga crítica de compressão segundo Euler**

Este item apresenta o critério de dimensionamento de peças em compressão simples, considerando os efeitos de flambagem por flexão. Os primeiros estudos sobre instabilidade de barras sob compressão foram realizados pelo matemático suíço Leonhard Euler (°1707-•1783), tendo sido ele o primeiro a perceber que a resistência de uma coluna poderia ser determinada pela instabilidade e não pela resistência do material à simples tensão de compressão. Ao contrário do esforço de tração, que tende a retificar as peças reduzindo o efeito de curvaturas iniciais existentes, o esforço de compressão tende a aumentar este efeito. Os deslocamentos laterais produzidos compõem o processo conhecido por flambagem por flexão que, em geral e dependendo da esbeltez da peça, reduz a capacidade de carga da peça em relação ao caso da peça tracionada (Galambos, 1996).

Considerando o caso de uma haste ideal, isenta de imperfeições e tensões iniciais, e com material elástico, birrotulada, de comprimento  $l$  e sob carga perfeita centrada, ver Figura 2.78, Euler demonstrou que para uma carga maior ou igual a  $N_{cr}$ , Equação 2.1, não é mais possível o equilíbrio na configuração retilínea. Aparecem então deslocamentos laterais e a

coluna fica sujeita a flexo-compressão. A carga  $N_{cr}$  chama-se carga crítica ou ainda carga de Euler. Dividindo-se a carga crítica pela área  $A$  da seção reta da haste, obtém-se a tensão crítica, Equação 2.2. Onde  $\lambda = l/i$  é índice de esbeltez da haste,  $i = \sqrt{I/A}$  é raio de giração da seção, em relação ao eixo de flambagem. A tensão nominal última “ $f_c$ ” é obtida dividindo-se a carga última “ $N_c$ ” pela área da seção transversal “ $A$ ”, conforme Eq. 2.3.

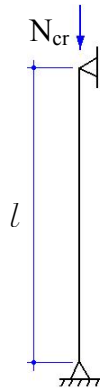


Figura 2.78 – Coluna ideal com carga perfeitamente centrada

$$N_{cr} = \frac{\pi EI}{\ell^2} \quad (2.1)$$

$$f_{cr} = \frac{N_{cr}}{A} = \frac{\pi^2 EI}{A\ell^2} = \frac{\pi^2 E}{(\ell/i)^2} \quad (2.2)$$

$$f_c = \frac{N_c}{A} \quad (2.3)$$

$$\lambda = \frac{K\ell}{i} \sqrt{\frac{f_y}{\pi^2 E}} \quad (2.4)$$

A Figura 2.79 apresenta a variação da tensão de compressão “ $f_c$ ” dividida pela tensão de escoamento “ $f_y$ ” do material, em função do índice de esbeltez. A curva tracejada representa o comportamento de resistência para colunas geometricamente perfeitas com material elástico-perfeitamente plástico. Observe neste gráfico que os valores resultantes de ensaios experimentais são menores, isso devido ao efeito de imperfeições geométricas, tensões residuais, entre outras imperfeições. No mesmo gráfico, a linha cheia, representa a resistência de uma coluna considerando os efeitos de imperfeições e tensões residuais, esta linha é denominada curva de flambagem. No sentido de permitir a comparação entre as resistências de perfis com diferentes aços, a curva em linha cheia da Figura 2.79 deve ser

apresentada com as coordenadas “ $f_c / f_y$ ” e o parâmetro de esbeltez “ $\lambda$ ”, ver Equação 2.4. Onde “K” é o coeficiente que define o comprimento de flambagem.

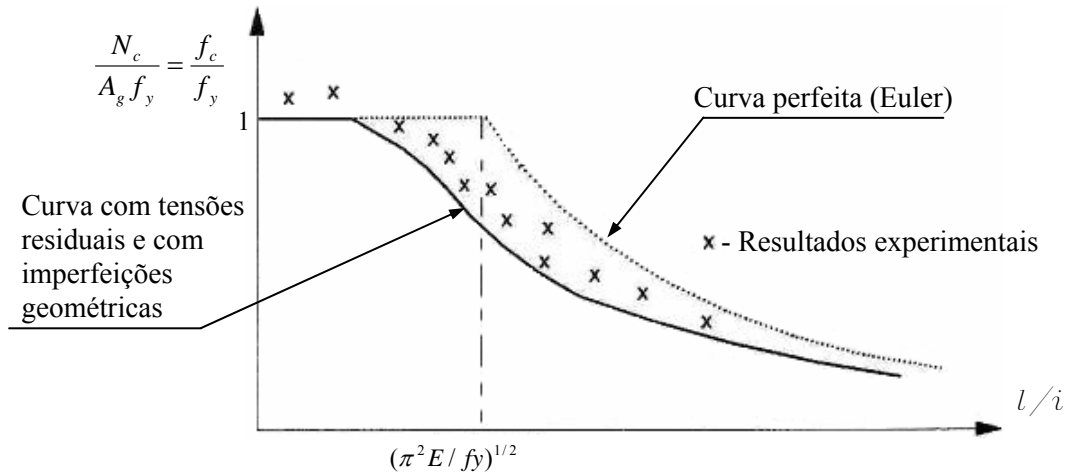


Figura 2.79 – Relação entre a variação de resistência e índice de esbeltez (Pfeil, 2000)

Comprimento de flambagem de uma haste é à distância entre os pontos de momento nulo da haste comprimida, deformada lateralmente. Para uma haste birrotulada o comprimento da flambagem é o próprio comprimento da haste. Para demais configurações de restrições de apoio devem ser aplicadas ponderações no comprimento da peça com uma constante denominada de parâmetro de flambagem “K”, Equação 2.5, para se calcular o comprimento de flambagem.

O Anexo H da norma NBR8800 (1986) trata do comprimento teórico e do efetivo (prático) de flambagem de barras comprimidas, ver Figura 2.80. Neste mesmo anexo podemos observar que a norma brasileira recomenda a aplicação do “K=1”, no caso de estruturas treliçadas.

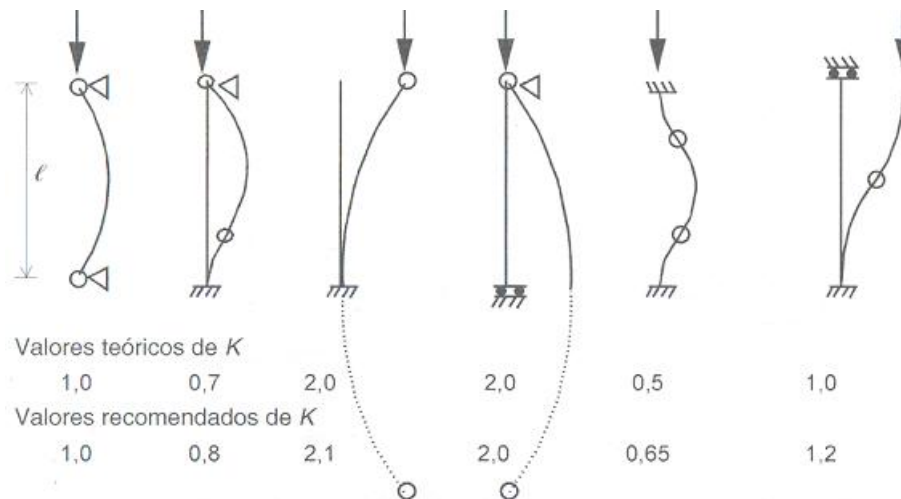


Figura 2.80 – Valores teóricos e recomendados para K pela norma NBR8800 (1986)

Portanto, a fórmula de Euler pode ser escrita de acordo com a Equação 2.6, considerando uma carga crítica de uma haste com qualquer tipo de apoio e em regime elástico.

$$\ell_{fl} = \ell K \quad (2.5)$$

$$N_{cr} = N_E = \frac{\pi^2 EI}{\ell_{fl}^2} \quad (2.6)$$

#### 2.4.2 Verificação quanto à compressão segundo a Norma Brasileira

Estudos experimentais mostraram que a formulação de Euler não é a favor da segurança (Vazquez, 2002). A norma brasileira adota uma metodologia de cálculo a partir de um ábaco, Figura 2.81. O ábaco das curvas de flambagem foi calibrado por método experimental, ensaiando diversas seções de perfis, representados pelas curvas “a”, “b”, “c” e “d”. Para a construção do gráfico adotou-se no eixo das abscissas o índice de esbeltez normalizado e no eixo das ordenadas a relação “ $\rho$ ” entre a tensão crítica e a tensão de escoamento. Os valores do ábaco também podem ser obtidos diretamente na Tabela 4 da norma.

Segundo a norma inicialmente verifica-se o valor limite da relação entre a largura “b” (para seções tubulares quadradas, perfis, cantoneiras e barras) ou o diâmetro (para tubos circulares) pela espessura “t” da peça, para se estabelecer à possibilidade de flambagem local. Na Norma NBR8800 (1986) a Tabela 1 indica as relações máximas (b/t) para que não haja flambagem local. Caso o valor desta relação (b/t) seja menor ou igual ao da tabela a carga de flambagem por flexão é dada pela Equação 2.7.

$$N_n = \rho A_g f_y \quad (2.7)$$

Não se cumprindo esta condição adotam-se o coeficiente de redução  $Q \leq 1$ , de acordo com o Anexo E da norma NBR8800 (1986). Consideramos também a tensão de escoamento do material “ $f_y$ ”, o módulo de elasticidade “E”, o raio de giração “ $i$ ”, o comprimento de flambagem “ $\ell_{fl}$ ” e o parâmetro de flambagem “K”, segundo o Anexo H da Norma. Para o cálculo do parâmetro de esbeltez “ $\lambda$ ” de barras comprimidas, aplica-se a Equação 2.8.



As normas fixam limites superiores do coeficiente de esbeltez “ $\lambda$ ” com a finalidade de evitar a grande flexibilidade de peças excessivamente esbeltas. Os limites geralmente adotados em edifícios são de 200 (AISC93, NB14) e para pontes é de 120 (AASHTO).

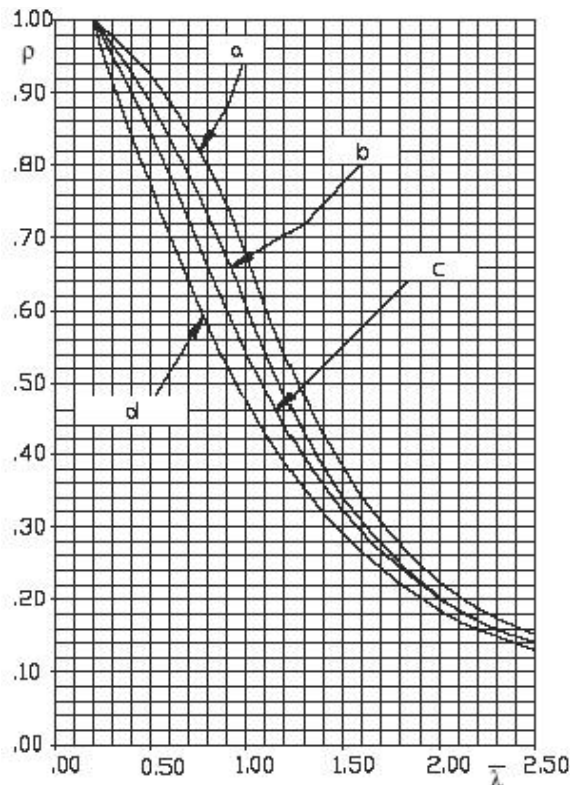


Figura 2.81 – Ábaco das curvas de flambagem da norma NBR8800 (1986)

A carga resistente de cálculo, para hastes metálicas, sem efeito de flambagem local, sujeitas à compressão axial, é dada pela Equação 2.9. onde “ $\phi_c$ ” é 0,90, “ $A_g$ ” é área da seção transversal bruta da haste e “ $f_c$ ” é tensão resistente (ou tensão última) à compressão simples com flambagem por flexão. A tensão “ $f_c$ ” considera o efeito de imperfeições geométricas e excentricidade de aplicação das cargas dentro das tolerâncias de norma, além das tensões residuais existentes nos diferentes tipos de perfis.

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\pi} \frac{Kl}{i} \sqrt{\frac{Qf_y}{E}} \quad (2.8)$$

$$N_{dres} = \phi_c N_c = \phi_c A_g f_c \quad (2.9)$$

### 2.4.3 Recomendações quanto à compressão segundo alguns pesquisadores

Estudos comprovam que o cálculo dos elementos das estruturas espaciais submetidos a compressão se comparados a resultados experimentais não são eficazes. Um dos pontos

que influenciam tal distorção é o parâmetro de flambagem “K”. Estudos realizados por Cuoco (1997) e Madi e Al-Tayem (1991), recomendam valores menores que 1 (um) para o parâmetro de flambagem “K”.

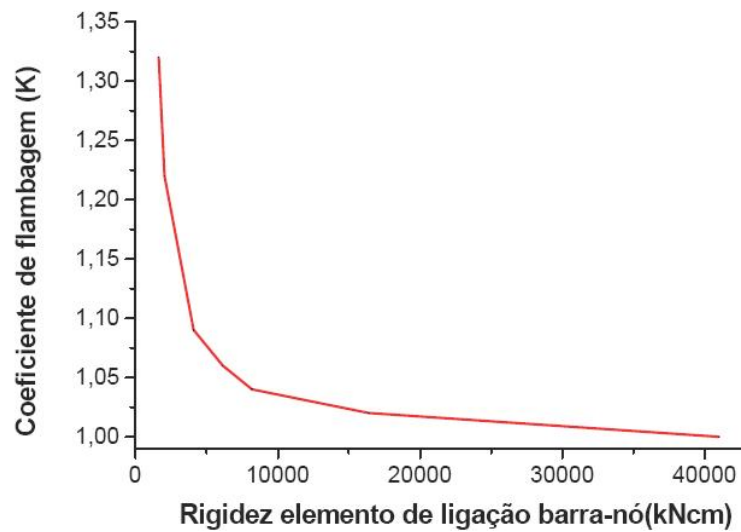


Figura 2.82 – Variação de K em função da rigidez da ligação (Souza, 2003)

Tais recomendações não devem ser consideradas pois vão contra a segurança da estrutura. Ao contrário desses estudos o gráfico da Figura 2.82, mostra que quanto maior a rigidez da ligação menor o coeficiente de flambagem “K”, trabalhos como o de Magalhães (1996), Malite *et al.* (1997) e Souza (1998) evidenciam tal fato em estudos experimentais Souza (2003). Tal consideração admite uma maior segurança no dimensionamento dos elementos de barra da estrutura espacial. É importante salientar a diferença do estudo dos elementos de barras isoladamente e inseridas na estrutura.

#### 2.4.4 Verificação quanto à tração segundo a Norma Brasileira

A resistência de barras quanto à tração é calculada segundo recomendações da norma brasileira NR8800 (1986) item 5.2. A resistência à tração “ $N_t$ ” é calculada para o estado limite de escoamento da seção bruta e para o estado limite de ruptura da seção líquida efetiva. No entanto nos elementos de barras de uma estrutura treliçada tridimensional é verificado apenas o estado limite de escoamento da seção bruta pela Equação 2.10 a seguir. Sendo assim, considera-se a área bruta do tubo “ $A_g$ ”, a tensão de escoamento do material “ $f_y$ ” e o coeficiente de minoração “ $\phi_t$ ”.

$$N_t = \phi_t N_n = \phi_t A_g f_y \quad (2.10)$$

## **2.5. ESTUDO DE FADIGA EM ESTRUTURAS ESPACIAIS**

Após uma investigação bibliográfica sobre o tema de fadiga em estruturas treliçadas tridimensionais, foi possível constatar o pouco estudo já realizado a cerca do tema. Nada foi encontrado sobre estudos experimentais dinâmicos em estruturas espaciais, apenas algum estudo teórico. Dos estudos teóricos encontrados pode-se destacar o estudo computacional sobre o comportamento dinâmico de estruturas (El-Sheikh, 1998), e discussões sobre o estado da arte e o efeito dinâmico de estruturas (Malla e Serrette, 1996). Desta forma, considerando a importância do tema e a falta de estudos na área de estruturas metálicas espaciais, verificou-se a necessidade de alguns esclarecimentos teóricos iniciais.

### **2.5.1 Introdução ao estudo da fadiga**

De acordo com a ASTM, American Society Testing Materials, fadiga é o processo de degradação localizada, progressiva e permanente, que ocorre no material sujeito a variações nas tensões e deformações, e que produzem a formação de uma trinca ou a completa fratura depois de um número suficiente de ciclos (ASME, 1998).

Todo elemento submetido a determinadas amplitudes de carga e um suficiente número de variações no seu carregamento ou ciclos de carga pode estar sujeito à fadiga que muitas vezes ocorre abaixo do limite de resistência elástica. Portanto, a fadiga é um importante critério a ser analisado a fim de não comprometer a integridade estrutural (Furtado, 2002).

A falha por fadiga é resultante da aplicação e remoção contínua de um carregamento e pode ocorrer sob elevado ou reduzido número de ciclos. Quando o número de carregamento necessário para causar dano por fadiga é menor que  $10^3$  ou  $10^4$  ciclos, a fadiga é denominada de “baixo ciclo”. Quando o número de ciclos supera esta faixa, a fadiga é denominada de “alto ciclo”. No estudo da fadiga de alto ciclo, usa-se a curva S-N do material, que correlaciona a amplitude de tensão com número de ciclos associado à falha. Na fadiga de baixo ciclo correlaciona-se a amplitude da deformação com número de ciclos, através da curva  $\epsilon$ -N (Furtado, 2002).

Alguns fatores afetam diretamente a resistência à fadiga do material durante os ensaios para obtenção das curvas S-N e  $\epsilon$ -N. Tensões residuais, concentrações de tensão, temperatura, ambiente, além do tratamento da superfície e geometria dos corpos de prova do material podem alterar o resultado dos testes. Portanto, é necessário enfatizar que não há meio teórico confiável de se prever o tempo de iniciação e propagação de uma trinca por fadiga, sendo que em alguns casos são usados corpos de prova em tamanho real para apresentar resultados mais compatíveis com a realidade (Willems *et al.*, 1983).

O número de ciclos que define a vida total de um componente submetido à cargas cíclicas é a combinação entre o número de ciclos necessário à iniciação da trinca e o que corresponde à sua propagação até a falha final. Em alguns casos, onde há concentrações de tensão ou defeitos de superfície, o tempo de iniciação é muito curto e a trinca é formada logo no começo da vida total, enquanto que em materiais cuidadosamente acabados e livres de defeitos, o tempo de iniciação pode chegar a 80% da vida útil (Suresh, 1994).

### **2.5.2 Carregamentos de fadiga**

Qualquer carregamento que varie com o tempo pode causar fadiga se for suficientemente severo. Os carregamentos de fadiga são de “amplitude constante” ou “amplitude variável”. A fadiga sob amplitude de carga constante geralmente ocorre em peças de máquinas rotativas, tais como eixos e engrenagens. Por outro lado, as ondas nos navios, a vibração nas asas de aeronaves, o tráfego em pontes e transientes térmicos são exemplos de carregamentos variáveis em magnitude e frequência (Willems *et al.*, 1983).

#### **2.5.2.1 Amplitude constante**

Neste tipo de carregamento a amplitude de tensão é constante durante toda a vida útil da estrutura (Furtado, 2002). Na Figura 2.83 pode-se observar a variação da tensão com o número de ciclos, considerando a amplitude de tensão constante. Nesta figura as variáveis utilizadas são definidas como: tensão máxima “ $\sigma_{m\acute{a}x}$ ” e tensão mínima “ $\sigma_{m\grave{i}n}$ ”, o que possibilita o cálculo da tensão média “ $\sigma_m$ ”, da amplitude de tensão “ $\sigma_a$ ” e da razão entre tensões mínima e máxima “R”, aplicando as Equações 2.11, 2.12 e 2.13, respectivamente.

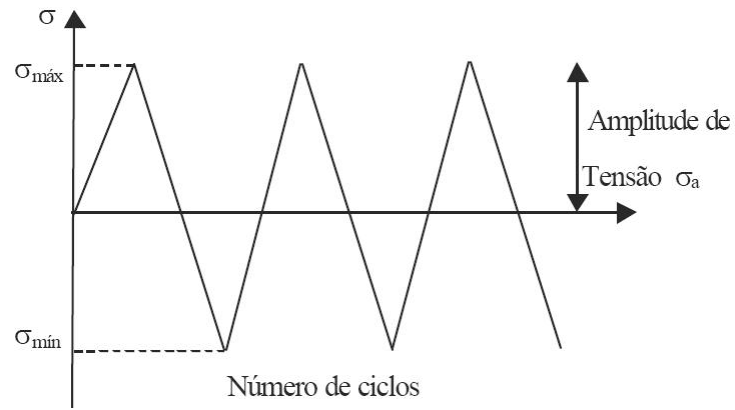


Figura 2.83 – Carregamento constante - tensão x número de ciclos (Furtado, 2002)

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (2.11)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (2.12)$$

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (2.13)$$

O parâmetro R indica o tipo de carregamento ao qual o elemento está sujeito. Se o ciclo varia de carga nula para carga de tração (ou de compressão), a sollicitação é repetida e  $R = 0$ . Caso ocorra a completa inversão de tração para compressão, a tensão média é nula,  $R = -1$  e o carregamento é denominado totalmente reverso. Se houver somente carga de tração, a sollicitação é flutuante e  $R > 0$ . A Figura 2.84 apresenta as três situações.

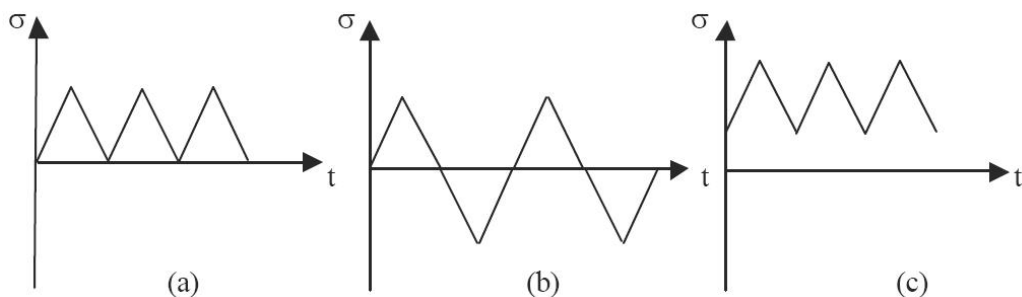


Figura 2.84 – Carregamento: (a) Repetido, (b) Reverso, (c) Flutuante (Furtado, 2002)

### 2.5.2.2 Amplitude variável

Na maior parte dos casos práticos, a probabilidade de ocorrer uma mesma amplitude de tensão durante a vida útil do elemento é bastante pequena. A análise de fadiga em materiais submetidos a carregamentos variáveis torna-se um pouco mais complexa e os estudos, nestes casos, são feitos simplificando a solitação real, que passa a ser representada por várias combinações de carregamentos constantes, conforme Figura 2.85.

A contribuição de cada um destes carregamentos constantes para a falha do material pode ser calculada por uma teoria de danos cumulativos como por exemplo à teoria desenvolvida por Miner e denominada regra do dano linear (Willems *et al.*, 1983). Se o carregamento, além de variável, é irregular, como mostrado na Figura 2.86, a contagem do número de ciclos para cada nível de tensão pode ser feita pelo método Rainflow (Dowling, 1993).

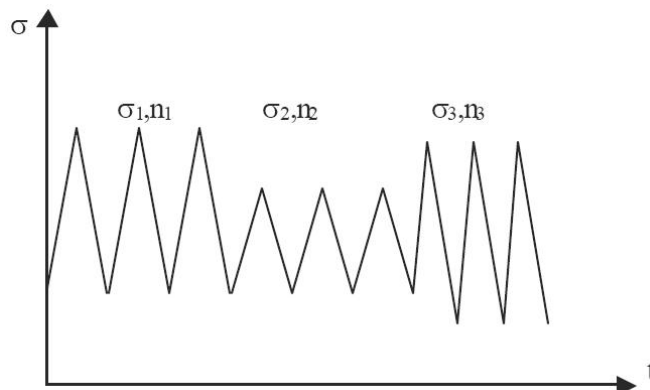


Figura 2.85 – Carregamento variável composto por constantes (Dowling, 1993)

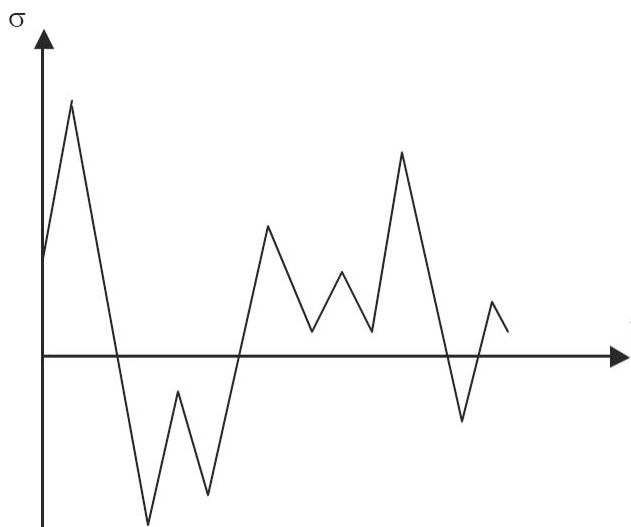


Figura 2.86 – Exemplo de um carregamento irregular (Dowling, 1993)

### 2.5.3 Análise de fadiga

A análise de fadiga é necessária para estimar a vida dos elementos submetidos a carregamentos cíclicos. O modo mais confiável para determinar os limites de fadiga de um material é através de testes realizados na própria estrutura, com protótipos de tamanho real que são ensaiados simulando condições próximas da realidade. Porém, estes testes são de difícil execução e demandam tempo e dinheiro, sendo aceitável utilizar corpos de prova confeccionados com o material usado. Se ainda assim não for possível, a solução será obter dados sobre o material na literatura especializada.

A fadiga pode ser estudada por análise de tensão ou deformação. Apesar do estudo através das tensões estar muito difundido, este não prevê resultados confiáveis quando ocorrem consideráveis deformações plásticas durante o ciclo da carga, sendo mais apropriado à análise por deformação (Suresh, 1994).

#### 2.5.3.1 Método S-N (Fadiga de alto ciclo)

O método S-N, apropriado para fadiga de alto ciclo, ou ainda, fadiga por tensão controlada, é o estudo de fadiga através do diagrama S-N, plotado com a variação da tensão por número de ciclos. O método é adequado quando a deformação elástica controla a falha e é denominado de alto ciclo pois é necessária uma grande quantidade de ciclos para que ocorra a falha por fadiga. Este será o método aplicado no estudo de fadiga neste trabalho de pesquisa, pois em estruturas em aço é necessária uma grande quantidade de ciclos até que ocorra o colapso.

Os ensaios para determinação do diagrama S-N podem ser feitos em corpos de prova ou mesmo em componentes da própria estrutura, com carregamento totalmente reverso, ou seja, com tensão média nula. Os resultados obtidos são plotados a partir da amplitude de tensão " $\sigma_a$ ", por número de ciclos "N" necessários para a falha aparecer. Alguns materiais sob condições constantes de carregamento exibem, em seus diagramas S-N, uma amplitude de tensão abaixo da qual o mesmo não está mais sujeito à falha por fadiga, independente do número de ciclos. Esta amplitude é denominada limite de fadiga " $\sigma_e$ ", e varia entre 35% e 50% do limite de tração do material (Suresh, 1994). As Figuras 2.87 e 2.88 exemplificam os dois tipos de diagramas S-N.

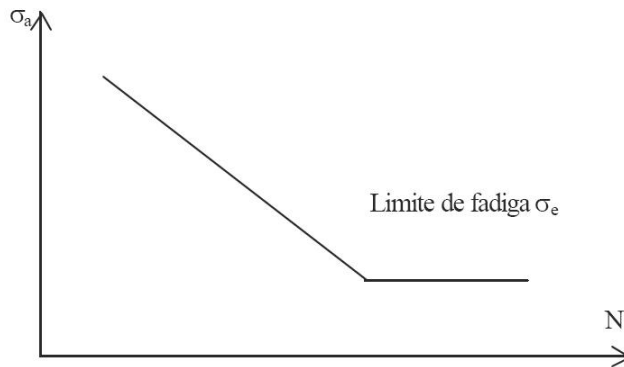


Figura 2.87 – Diagrama S-N de materiais com limite de fadiga definido (Suresh, 1994)

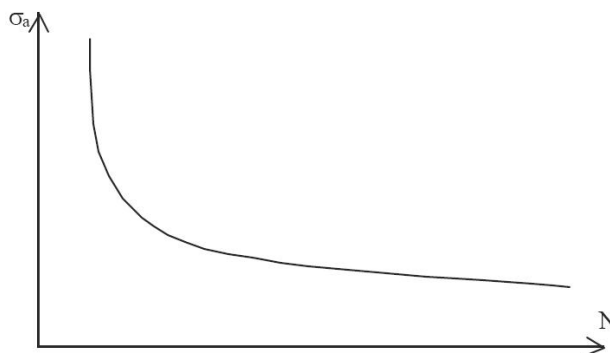


Figura 2.88 – Diagrama S-N em materiais que não apresentam limite de fadiga definido (Suresh, 1994)

### 2.5.3.2 Método $\epsilon$ -N (Fadiga de baixo ciclo)

O método  $\epsilon$ -N, apropriado para fadiga de baixo ciclo, ou ainda, fadiga por deformação controlada é o método mais indicado para avaliar fadiga quando as tensões são suficientemente altas para causar deformações plásticas no material. Ao contrário do método S-N, os gráficos são plotados em função da deformação específica e número de ciclos, um exemplo pode ser observado na Figura 2.89. Os resultados são obtidos por testes realizados de acordo com a norma ASTM E-606, Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing (ASME, 1998).

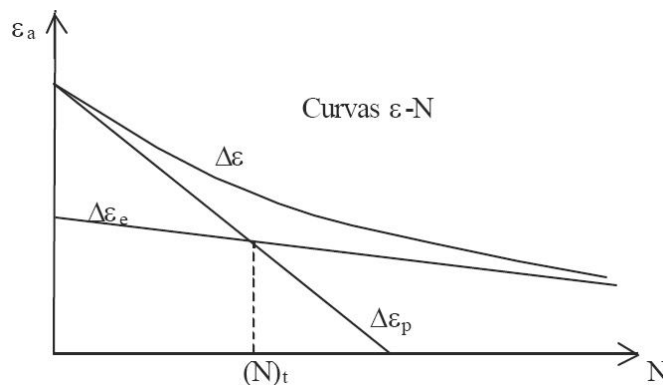


Figura 2.89 – Diagrama  $\epsilon$ -N (Suresh, 1994)



### 3. PROPOSTA DE REFORÇO DO NÓ TÍPICO E METODOLOGIA DA PESQUISA

#### 3.1. PROPOSTA DE CORREÇÃO ESTRUTURAL DO NÓ TÍPICO

Este trabalho tem como primeiro propósito estudar uma alternativa para aumentar a resistência última de estruturas treliçadas tridimensionais 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.

Para a proposta da pesquisa, inicialmente é considerado o detalhe da ligação formada com nó típico, Figura 3.1a. Estes são tubos com extremidades amassadas e conectadas por um único parafuso. É possível observar que neste sistema existem duas excentricidades “ $E_1$ ”, horizontal (Região amassada), e “ $E_2$ ”, vertical (distância entre os pontos A e B). A primeira proposta desta pesquisa é uma correção na excentricidade da ligação, utilizando um distanciador, Figura 3.1b. Neste caso 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.

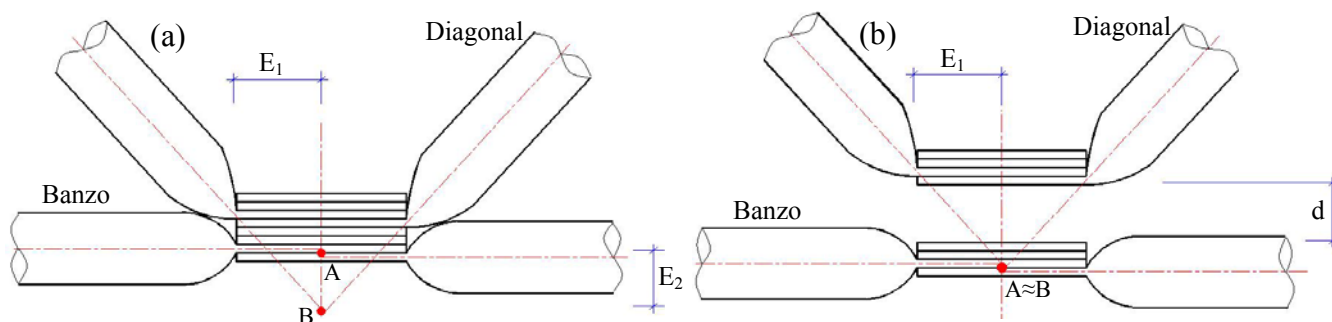


Figura 3.1 – Excentricidade no nó típico de estruturas treliçadas tridimensionais

Sabe-se que a excentricidade “ $E_1$ ”, horizontal, é devido ao amassamento do tubo, e é equivalente a distância do centro do furo ao início da região amassada, ver Figura 3.2. A excentricidade “ $E_2$ ”, vertical, é proporcional ao ângulo “ $\theta$ ”, e é equivalente a distância de correção “ $d$ ”. Ainda na Figura 3.2, note que a medida de “ $d_2$ ” é igual a 5 vezes a espessura da parede do tubo do banzo “ $t_1$ ”, mais 3 vezes a espessura da parede do tubo da diagonal “ $t_2$ ”. Considerando as espessuras das paredes dos tubos das diagonais e banzos diferentes. Adotando a relação trigonométrica na Figura 3.2, deduz-se a Equação 3.1.

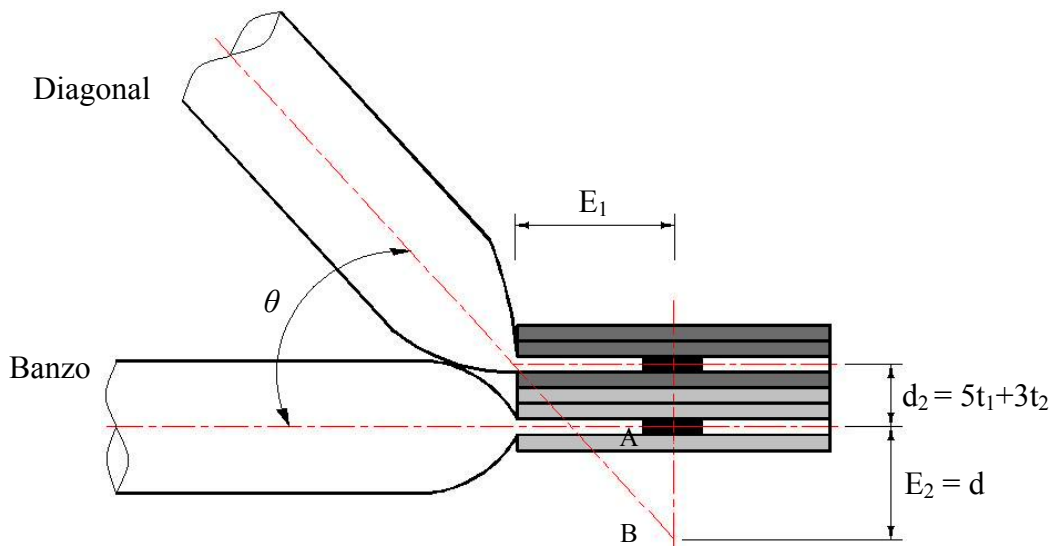


Figura 3.2 – Detalhe da ligação com tubos amassados (típica)

$$\tan(\theta) = \frac{(d_2 + E_2)}{E_1} = \frac{[(5t_1 + 3t_2) + d]}{E_1} \quad (3.1)$$

Na Figura 3.3, pode-se observar a altura da projeção vertical da diagonal “H” e a distância da projeção horizontal da diagonal “D”. Sendo assim, considerando o ângulo de inclinação da diagonal “θ” e aplicando trigonometria pode-se deduzir a Equação 3.2. Finalmente, se compararmos as Equações 3.1 e 3.2, podemos encontrar a distância “d”, na Equação 3.3.

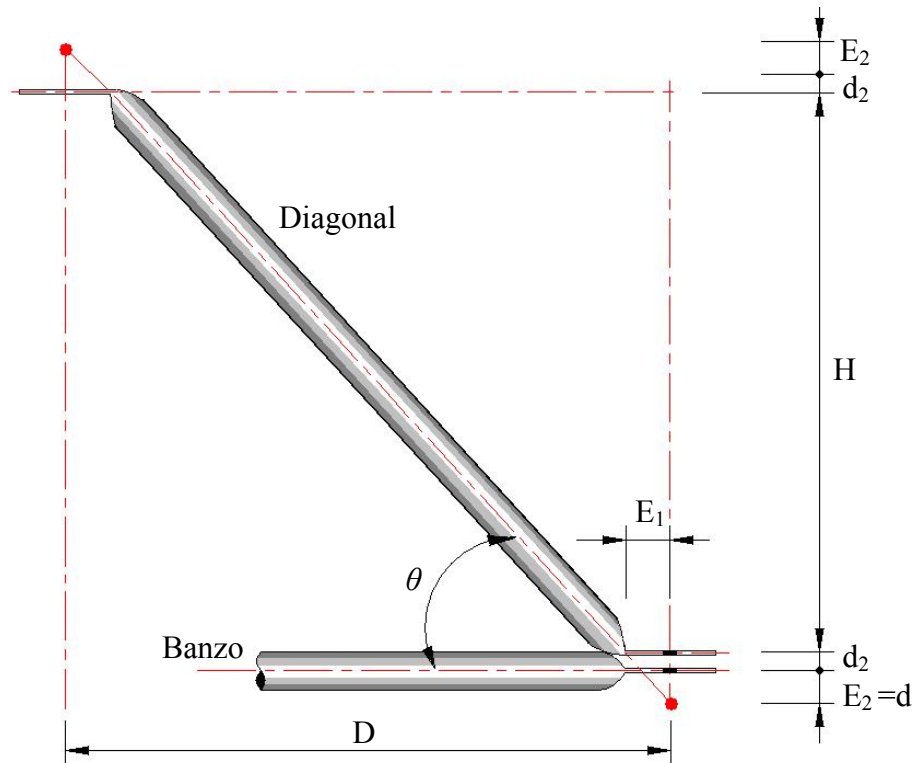


Figura 3.3 – Projeção vertical e horizontal do elemento diagonal

$$\tan(\theta) = \frac{H + 2(d_2 + E_2)}{D} = \frac{H + 2[(5t_1 + 3t_2) + d]}{D} \quad (3.2)$$

$$d = \frac{HE_1}{D - 2E_1} - (5t_1 + 3t_2) \quad (3.3)$$

A Equação 3.3 expõe uma formulação genérica para o cálculo da distância “d” de correção da excentricidade vertical “E<sub>2</sub>”. Porém, para o caso em estudo, estrutura treliçada tridimensional quadrado sobre quadrado, a diagonal é esconsa, ver Figura 3.4. Logo há necessidade do cálculo da projeção horizontal da diagonal pela Equação 3.4, sendo “ℓ” a distância entre os centros dos nós consecutivos na treliça. Quanto à projeção da diagonal na vertical permanece o mesmo valor “H”.

Ainda para o caso estudado nesta tese, as espessuras dos tubos das diagonais e banzos são equivalentes. Desta forma a distância “d<sub>2</sub>” é igual a 8 vezes a espessura da parede do tubo “t”. Assim a Equação 3.5 expressa a formulação para o cálculo da excentricidade “d” para o sistema de treliça espacial quadrado sobre quadrado com diagonais e banzos com mesma espessura de parede. Quanto à excentricidade horizontal “E<sub>1</sub>” não há como corrigi-la, pois esta é intrínseca do amassamento das barras da ligação com o nó típico. Porém espera-se que a colocação de chapas de reforço aumente a inércia e consequentemente à rigidez da ligação, este assunto será abordado adiante.

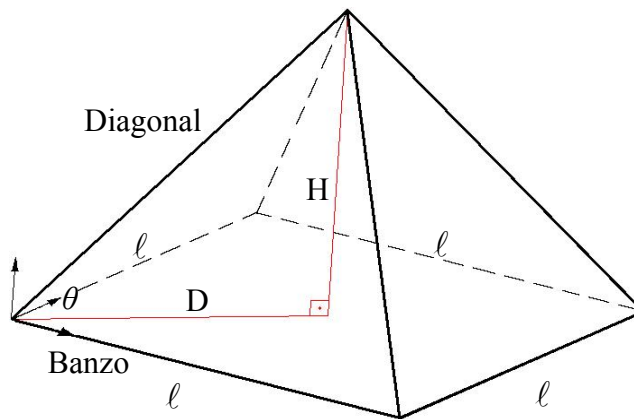


Figura 3.4 – Projeção da diagonal no sistema quadrado sobre quadrado

$$D = \frac{\ell\sqrt{2}}{2} \quad (3.4)$$

$$d = \frac{2HE_1}{\ell\sqrt{2} - 4E_1} - 8t \quad (3.5)$$

## 3.2. METODOLOGIA PARA PROPOSTA DO REFORÇO DO NÓ TÍPICO

Após a elaboração da proposta de trabalho foi necessário o desenvolvimento de um plano de pesquisa para estudo e validação dos mesmos. Para tanto, a metodologia aplicada contempla estudos experimentais e numéricos em um protótipo com geometria padrão pré-definida. Detalhes da metodologia aplicada podem ser apreciados a seguir.

### 3.2.1 Geometria dos protótipos dos ensaios

Foi adotado um modelo de treliça tridimensional padrão de acordo com a Figura 3.5. Note um sistema modular com pirâmides com base de 1000mm e altura de 707mm. O ângulo de inclinação das diagonais adotado como sendo de 45°. Os banzos e diagonais são compostos com tubos de diâmetro de 25,4 mm e parede de 1,5 mm, e são mostrados nas Figuras 3.6 e 3.7, respectivamente. A Figura 3.8 mostra o detalhe da diagonal em sua configuração final, após dobrar as extremidades.

Os dados da caracterização do material da treliça podem ser observados no Anexo B. A especificação comercial do tubo é equivalente ao aço ASTM A36 ou MR250, tensão de escoamento aproximadamente 250MPa. As extremidades são amassadas e em seguida furadas com furos de 10mm. Para fixação foram utilizados parafusos sextavados de 10mm de diâmetro.

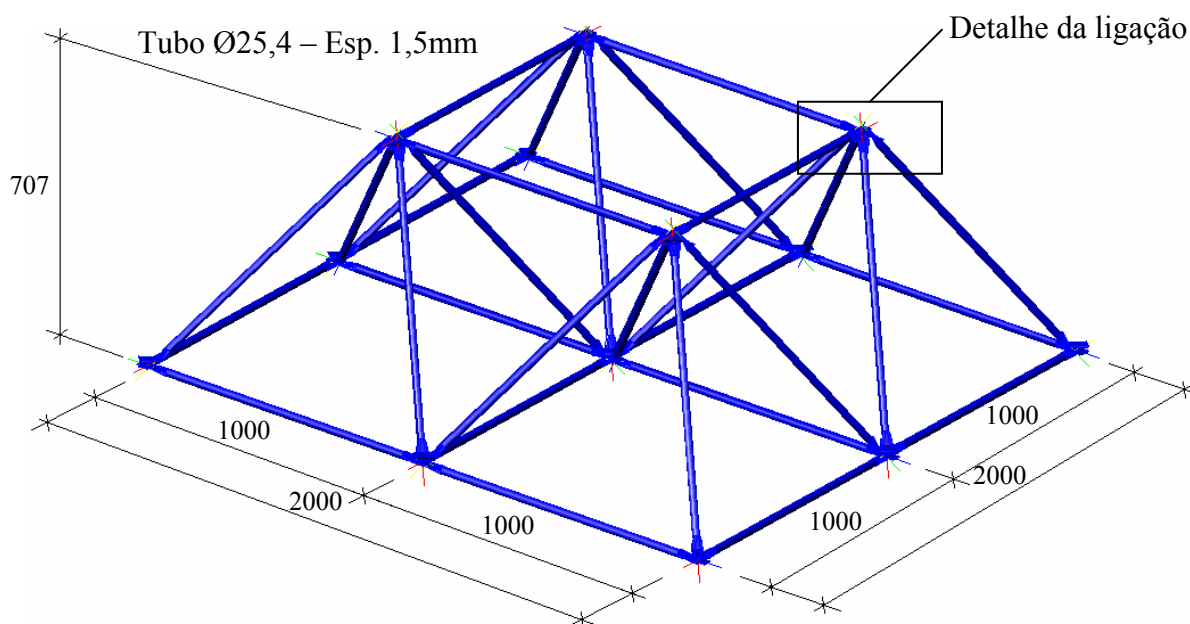


Figura 3.5 – Modelo da estrutura treliçada tridimensional adotada, cotas em milímetro

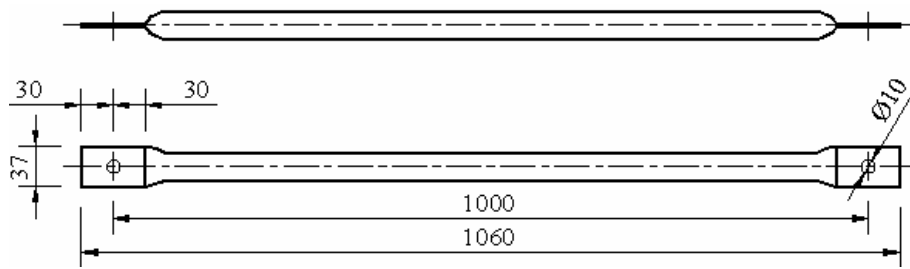


Figura 3.6 – Banzo - detalhe do amassamento e furação (mm)

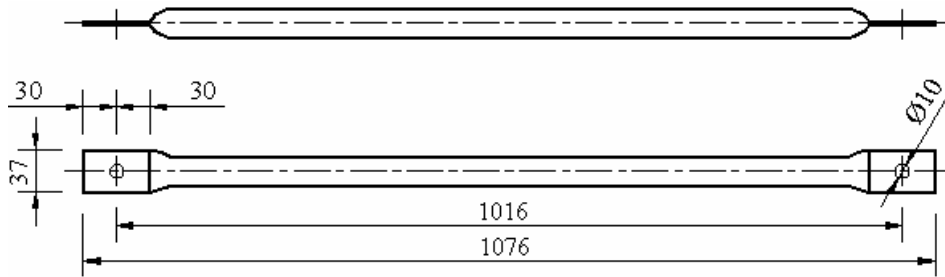


Figura 3.7 – Diagonal - detalhe do amassamento e furação (mm)

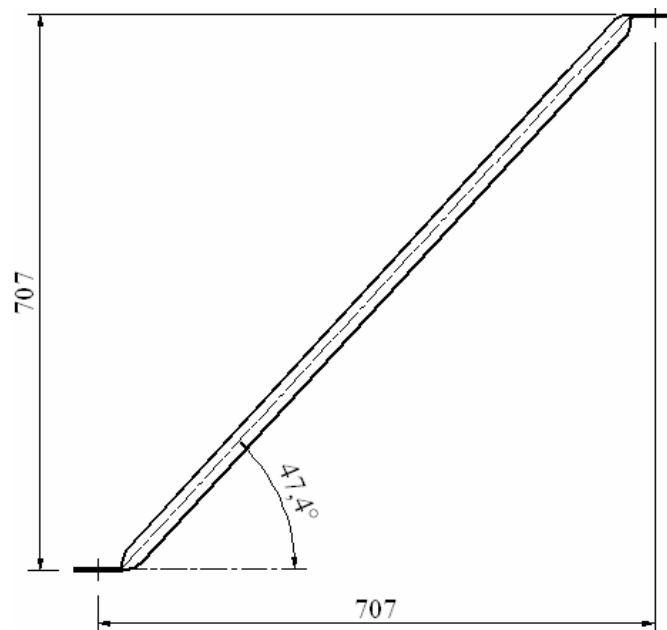


Figura 3.8 – Detalhe da diagonal após dobrar as extremidades (mm)

Para os protótipos das estruturas típicas com distanciador “LTD” e das estruturas típicas com distanciador com chapas de reforço “LTDC”, foram adotados um distanciador usinado em aço e com altura calculada a seguir.

Considerando a geometria do protótipo da Figura 3.5, onde a altura “H” é igual a 707mm, a distância entre ligações é de 1000mm, a espessura do tubo é de 1,5mm e o amassamento do tubo é de 60mm resultando a uma excentricidade “E<sub>1</sub>” de 30mm. Se aplicarmos a Equação 3.5, encontramos uma distância de aproximadamente 20mm a ser corrigida (Equação 3.6), logo esta será a espessura do distanciador. Na Figura 3.9 e 3.10 podem ser observados o distanciador e a chapa cobrejunta, respectivamente. Foi adotada uma espessura típica para a chapa cobrejunta.

$$d = \frac{2HE_1}{\ell\sqrt{2} - 4E_1} - 8t = \frac{2 \times 707 \times 30}{1000 \times \sqrt{2} - 4 \times 30} - 8 \times 1,5 \Rightarrow d \cong 20mm \quad (3.6)$$

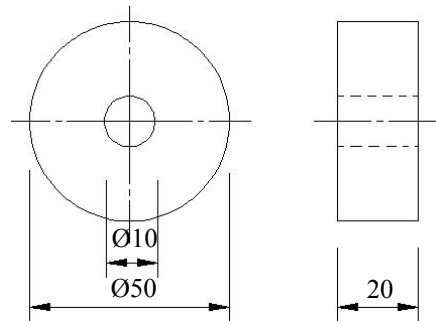


Figura 3.9 – Distanciador (mm)

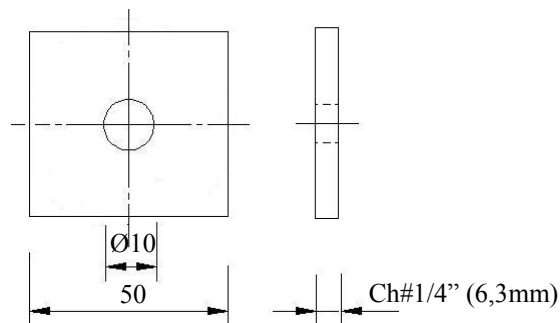


Figura 3.10 – Chapa cobrejunta (mm)

### 3.2.2 Estudos numéricos e experimentais para investigação do reforço do nó típico

Inicialmente é realizado um estudo preliminar numérico computacional para avaliar a coerência e viabilidade da proposta. Em seguida são desenvolvidos estudos experimentais estáticos e dinâmicos, a fim de verificar o comportamento das ligações propostas. Para implementar as investigações foi desenvolvido um estudo computacional pelo método dos elementos finitos (MEF).

### 3.2.2.1 Estudo preliminar computacional (MEF – SAP2000)

O estudo preliminar foi realizado a partir da comparação de três configurações de ligações dos elementos das estruturas. Os modelos foram discretizados com elementos de barra. Foi utilizado o programa comercial SAP2000 fundamentado no MEF.

O primeiro modelo é a “LI”, ligação ideal, sendo este um sistema de estrutura treliçada tridimensional constituída por ligações com barras perfeitamente centradas no nó, ver Figura 3.11a. O segundo modelo é a “LT” ligação típica, sendo este sistema constituído por elementos de extremidades amassadas com uniões excêntricas no nó, ver Figura 3.11b. O terceiro modelo é a “LTD”, ligação típica com distanciador, é um sistema de estrutura constituída por elementos barras com extremidades amassadas e distanciador, modelo proposto para correção de excentricidade, ver Figura 3.11c.

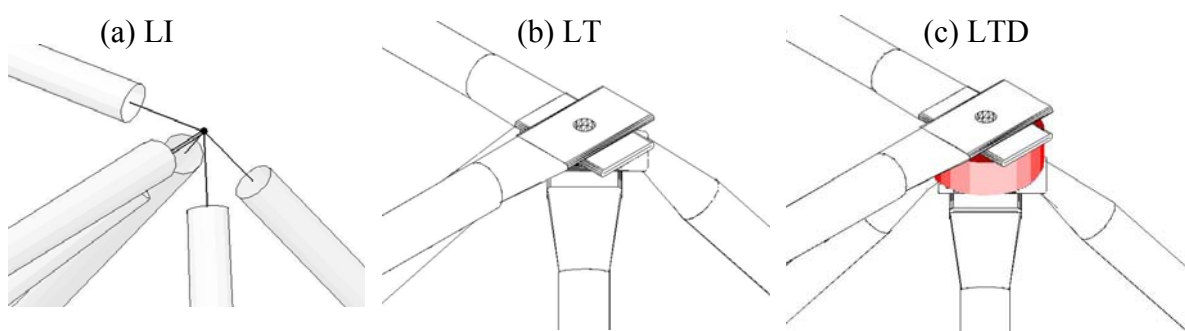


Figura 3.11 – Detalhes da ligação nos protótipos do estudo preliminar computacional

Os principais parâmetros coletados e comparados nas análises do estudo preliminar são:

- O esforço axial nos elementos;
- O momento fletor;
- Deslocamento nodal do conjunto;

### 3.2.2.2 Estudo experimental estático

O estudo experimental estático foi realizado a partir da comparação de três configurações de ligações. O primeiro modelo é constituído por “LT”, ligação típica, sendo este sistema composto por elementos de extremidades amassadas com uniões excêntricas no nó, ver Figura 3.12a. O segundo modelo é a “LTD”, ligação típica com distanciador, é um sistema de estrutura constituída por elementos barras com extremidades amassadas e distanciador, modelo proposto para correção de excentricidade, ver Figura 3.12b.

O terceiro modelo é a “LTDC” é um sistema de estrutura constituída por elementos de barra com extremidades amassadas, distanciador e chapas de reforço, ver Figura 3.12c. As chapas de reforço foram adicionadas nas extremidades amassadas dos elementos com intuito de aumentar a rigidez e evitar colapso no nó. Esta necessidade foi evidenciada durante os ensaios estáticos e portanto agregada à pesquisa.

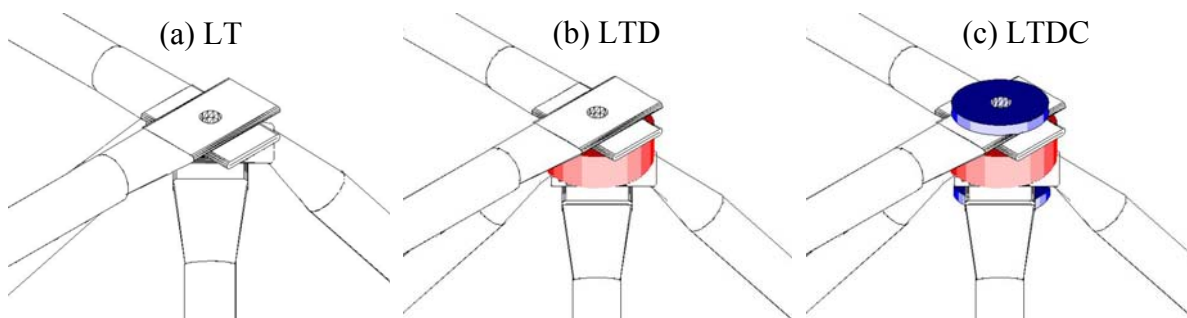


Figura 3.12 – Detalhes da ligação nos protótipos no estudo experimental estático

Foram realizados três ensaios com cada um dos três modelos de ligação, totalizando nove ensaios estáticos. Detalhes da montagem dos ensaios, materiais utilizados, bem como, instrumentação e procedimentos de ensaios podem ser apreciados no Capítulo 5.

Os principais parâmetros coletados e comparados nas análises do estudo experimental estático, foram:

- Controle da carga aplicada;
- Monitoramento da deformação próxima ao nó;
- Medição do deslocamento nodal do conjunto;

### 3.2.2.3 Estudo experimental dinâmico

Após o estudo experimental estático, ficou comprovada a necessidade da utilização da chapa cobre-junta na ligação típica com distanciador. Desta forma, o estudo experimental dinâmico foi voltado para a comparação entre o modelo com ligação típica “LT” (Figura 3.13a) e o modelo com ligação típica com distanciador e chapas de reforço “LTDC” (Figura 3.13b).

Foram realizados quatro ensaios com cada um dos dois modelos de ligação, totalizando oito ensaios dinâmicos. Detalhes da montagem dos ensaios, materiais utilizados, instrumentação e procedimentos de ensaios podem ser apreciados no Capítulo 6.



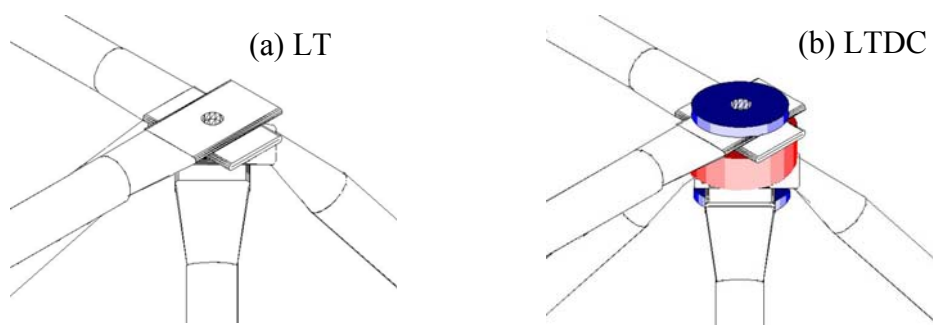


Figura 3.13 – Detalhes da ligação nos protótipos no estudo experimental dinâmico

Os principais parâmetros coletados e comparados nas análises do estudo experimental dinâmico, foram:

- Controle da amplitude do deslocamento;
- Monitoramento do número de ciclos;

#### 3.2.2.4 Estudo computacional em regime elástico (MEF – SAP2000)

O estudo computacional em elementos finitos foi voltado para a comparação entre o modelo com ligação típica “LT” (Figura 3.14a) e o modelo com ligação típica com distanciador e chapas de reforço “LTDC” (Figura 3.14b). Os modelos foram discretizados com elementos de placa. O estudo foi realizado considerando as não linearidades geométricas e no regime elástico do material. Foi utilizado o programa SAP2000 fundamentado no MEF.

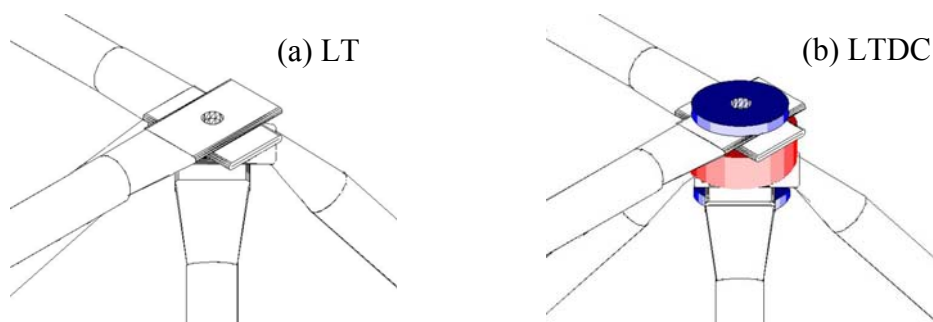


Figura 3.14 – Detalhes da ligação nos protótipos do estudo computacional elástico

Os principais parâmetros coletados e comparados nas análises do estudo computacional, foram:

- Carga aplicada;
- Análise das tensões no regime elástico;

### 3.2.2.5 Estudo computacional em regime plástico (MEF – ANSYS)

O estudo computacional em elementos finitos foi voltado para a comparação entre o modelo com ligação típica “LT” (Figura 3.15a) e o modelo com ligação típica com distanciador e chapas de reforço “LTDC” (Figura 3.15b). O estudo foi realizado considerando as não linearidades geométricas e as não linearidades físicas (regime elasto-plástico do material). Os modelos foram discretizados com elementos de placa. Foi utilizado o programa ANSYS fundamentado no MEF.

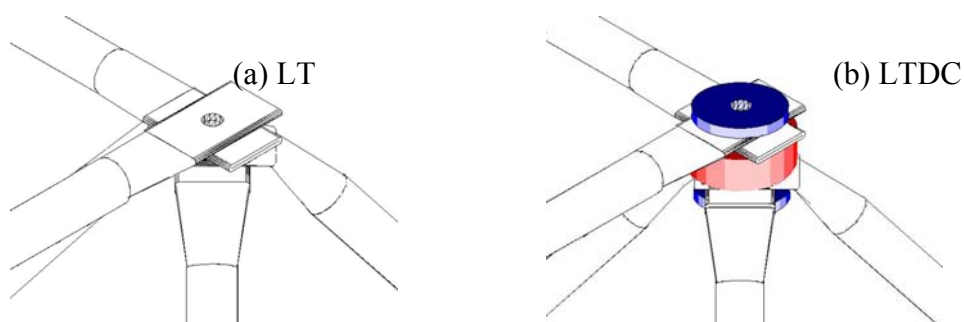


Figura 3.15 – Detalhes da ligação nos protótipos do estudo computacional elástico

Os principais parâmetros coletados e comparados nas análises do estudo computacional, foram:

- Carga aplicada;
- Análise das tensões no regime plástico;
- Deslocamento nodal do conjunto;

### 3.2.3 Fluxograma do estudo de investigação do reforço do nó típico.

A Figura 3.16 expõe o fluxograma da organização do trabalho. Desta forma é possível visualizar as etapas desenvolvidas na pesquisa. Note as abreviações de ligação típica “LT”, ligação típica com distanciador “LTD”, ligação típica com distanciador e chapas de reforço “LTDC” e Ligação ideal “LI”.

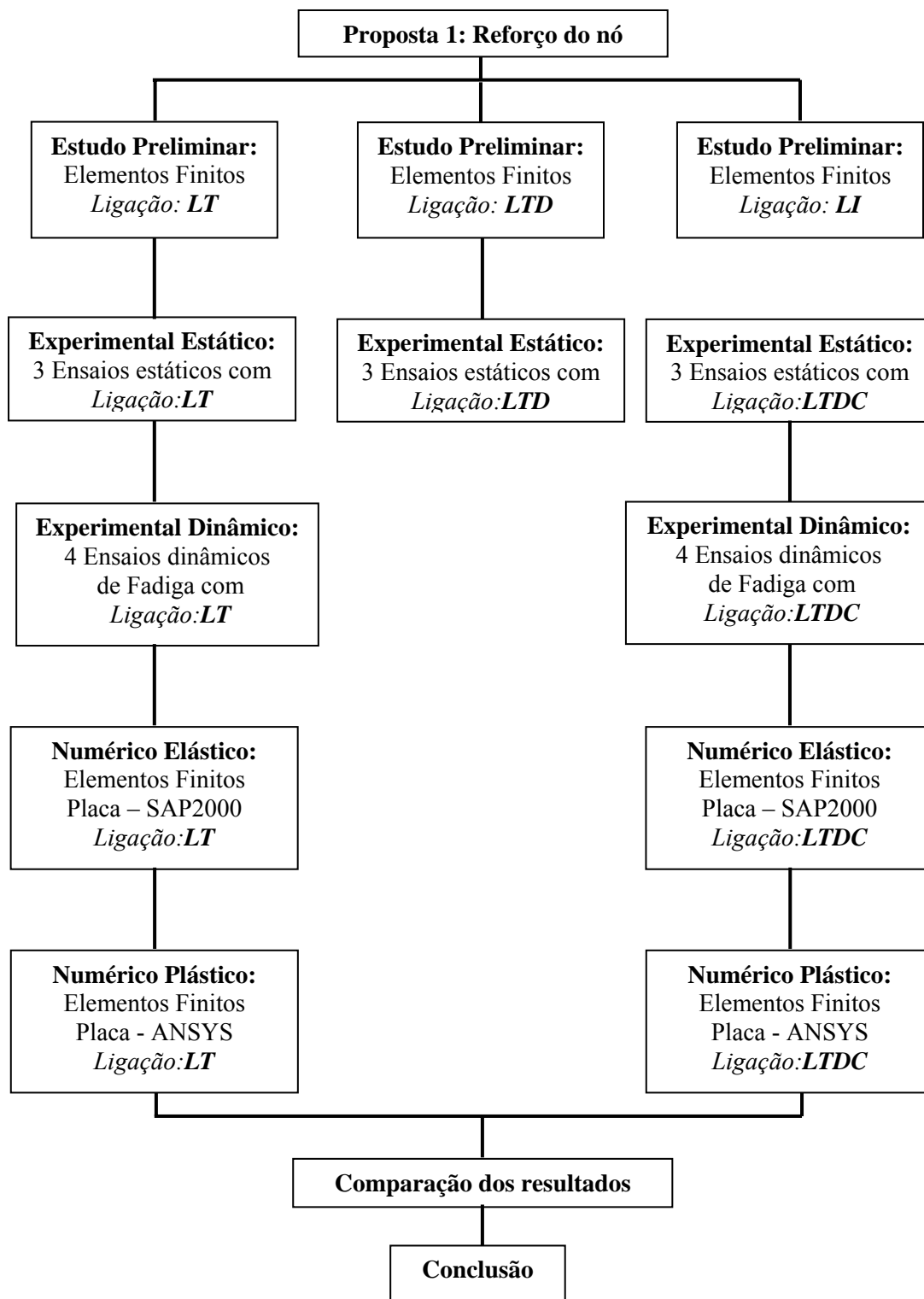


Figura 3.16 – Fluxograma da organização das etapas deste trabalho

## 4. ESTUDO PRELIMINAR DO REFORÇO DO NÓ TÍPICO

Este capítulo aborda o estudo preliminar para verificação do efeito da correção do nó típico, em comparação com estruturas com nó típico sem distanciador e estruturas com o nó ideal. Este estudo foi realizado numericamente aplicando o programa comercial SAP2000, que é fundamentado no método dos elementos finitos. Os modelos foram discretizados com elementos de barra, considerando as não linearidades geométricas, caracterizadas pelo amassamento das extremidades das barras. As análises foram feitas considerando apenas o comportamento elástico do material.

### 4.1. ELEMENTOS FINITOS UTILIZADOS

São aplicados elementos de barra nas treliças e elementos de placa nos distanciadores, quando necessário. Admite-se módulo de elasticidade de  $205\text{kN/mm}^2$ , peso específico do material de  $7,7 \times 10^{-7} \text{ kN/mm}^2$  e coeficiente de Poisson de 0,3.

#### 4.1.1. Elemento de barra (FRAME)

Para a discretização das barras é utilizado o elemento “FRAME”. O elemento “FRAME” é um elemento de barra do programa de elementos finitos SAP2000. Esse elemento é definido com dois 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 vistas na Figura 4.1.

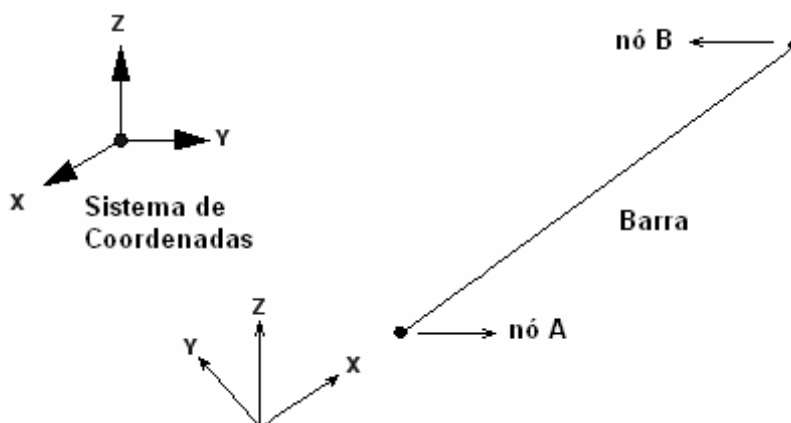


Figura 4.1 – Elemento de Barra (FRAME)

#### 4.1.2. Elemento de placa (SHELL)

Para a discretização do distanciador (Figura 4.5) foi utilizado o elemento “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. A geometria e sistemas de coordenadas podem ser vistas na Figura 4.2.

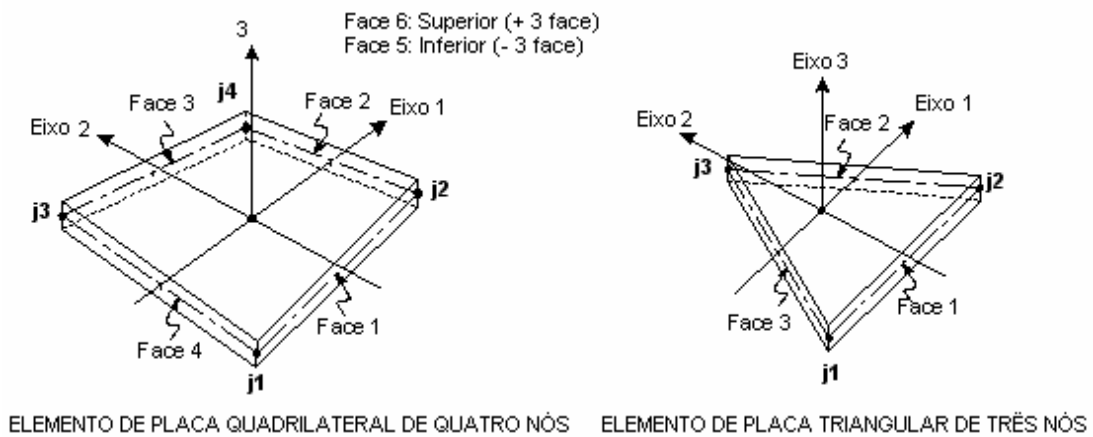


Figura 4.2– Elemento de Placa (SHELL)

#### 4.2. DISCRETIZAÇÃO DOS MODELOS DO ESTUDO PRELIMINAR

Foram estudadas três estruturas com dimensões externas de acordo com a Figura 3.5. A primeira estrutura é constituída por nó ideal (LI), onde as barras encontram-se em um ponto comum, Figura 3.11a. A segunda é constituída por nó típico (LT), com excentricidade no encontro das barras, Figura 3.11b. E a terceira estrutura apresenta nó típico com distanciador (LTD), na tentativa de corrigir as excentricidades, Figura 3.11c.

Neste item também pode ser observada a verificação da resistência última do elemento mais solicitado segundo as recomendações da norma NBR8800 (1986). A partir desta, será aplicado na estrutura, na análise computacional, uma carga última. Com a determinação da carga última também foi possível estabelecer uma previsão do ensaio experimental.

#### 4.2.1. Discretização do modelo com ligação ideal - LI

Na discretização da estrutura treliçada tridimensional constituída com nó ideal foram utilizados 32 elementos de barra (FRAME), com um total de 13 nós. Restrições de terceiro gênero foram aplicadas nos nós 10, 11, 12 e 13. Um carregamento vertical foi aplicado no nó 9. Observe na Figura 4.3, a discretização e o detalhe da concentricidade das barras.

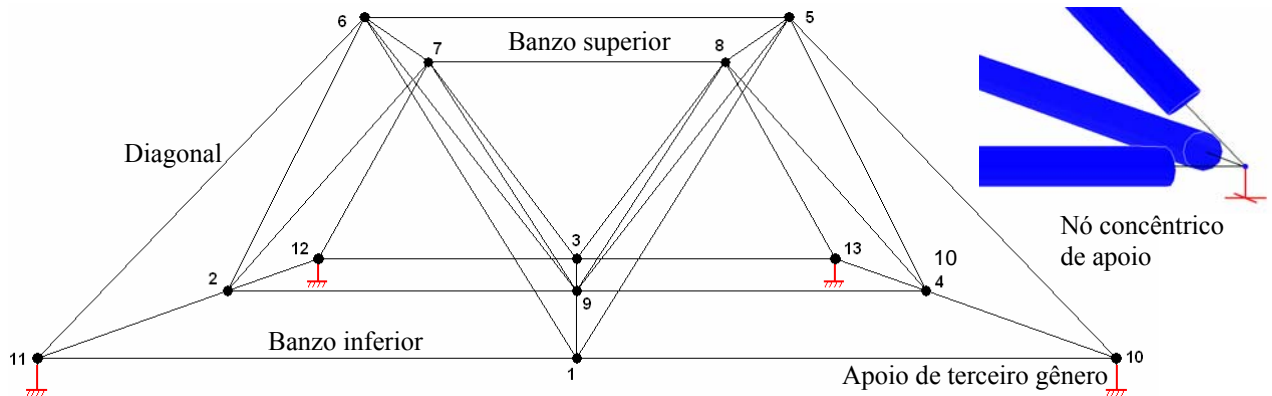


Figura 4.3 – Modelo de treliça com ligação com nó ideal

#### 4.2.2. Discretização do modelo com ligação com nó típico – LT

Na discretização da estrutura treliçada tridimensional constituída com nó típico foram utilizados 32 elementos de barra (FRAME) com seção tubular. Na discretização das ligações foram utilizados 64 elementos de barra (FRAME) com seção retangular, para simular as extremidades amassadas. Para tanto, foram utilizados 77 nós. Restrições de terceiro gênero foram aplicadas nos nós 10, 11, 12 e 13. Um carregamento vertical foi aplicado no nó 9. Observe na Figura 4.4, a discretização da estrutura e o detalhe da excentricidade dos eixos das barras.

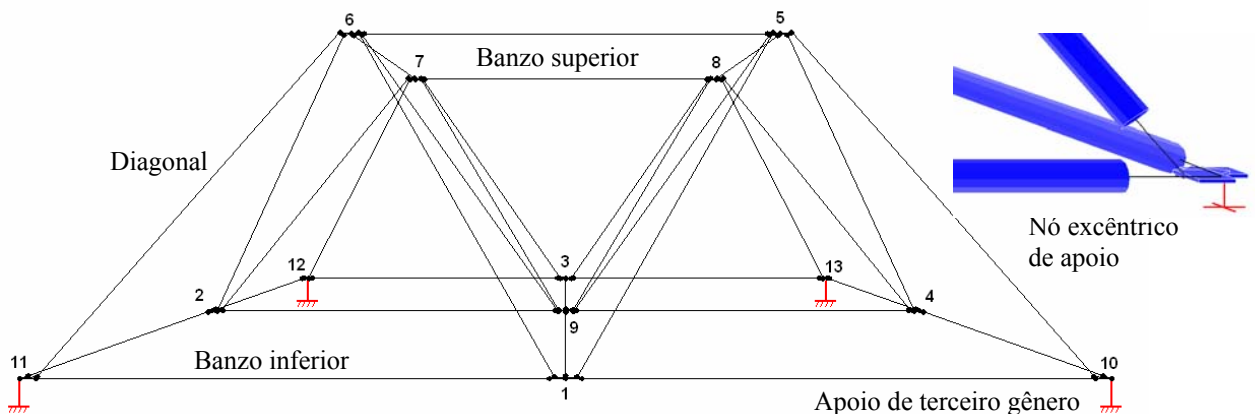


Figura 4.4 – Modelo de treliça com ligação com nó típico

### 4.2.3. Discretização do modelo com nó típico e distanciador – LTD

Na discretização da estrutura treliçada tridimensional constituída com nó típico e distanciador foram utilizados 32 elementos de barra (FRAME) com seção tubular. Na discretização das ligações foram utilizados 64 elementos de barra (FRAME) com seção retangular, para simular as extremidades amassadas. Os distanciadores foram discretizados com 104 elementos de placa (SHELL). Para tanto, foram utilizados 298 nós. Restrições de terceiro gênero foram aplicadas nos nós 10, 11, 12 e 13. Um carregamento vertical foi aplicado no nó 9. Observe na Figura 4.5, a discretização da estrutura e o detalhe da correção excentricidade dos eixos das barras.

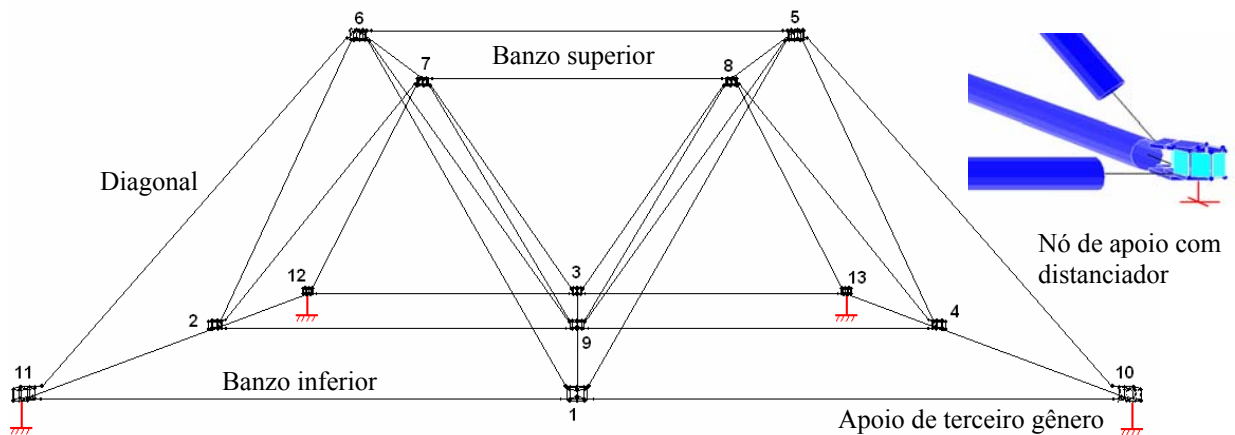


Figura 4.5 – Modelo de treliça com ligação com nó típico e distanciador

## 4.3. ESTUDO DO CARREGAMENTO APLICADO

### 4.3.1. Verificação quanto à tração segundo a Norma Brasileira

A resistência do tubo quanto à tração, será calculada segundo recomendações da norma NBR8800 (1986) item 4.2, porém será desconsiderado o coeficiente de minoração, Equação 4.1. Tal fato é justificado pela necessidade da aplicação desta carga em análise experimental. Sendo assim, considerando a área bruta do tubo “ $A_g$ ” igual a  $1,12\text{cm}^2$ , a tensão de escoamento do material “ $f_y$ ” igual a  $25\text{kN/cm}^2$ , obtém-se uma resistência a tração “ $N_t$ ” de 28kN.

$$N_t = A_g f_y \quad (4.1)$$

### 4.3.2. Verificação quanto à compressão segundo a Norma Brasileira

Inicialmente verificamos que 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, podemos considerar o coeficiente de redução que considera a flambagem local igual a um ( $Q=1,0$ ).

Consideramos também a tensão de escoamento do material “ $f_y$ ” igual a  $25\text{kN/cm}^2$ , o módulo de elasticidade “ $E$ ” igual a  $20500\text{kN/cm}^2$ , o raio de giração “ $i$ ” igual a  $0,8467\text{cm}$ , o comprimento de flambagem “ $L$ ” é igual a  $100\text{cm}$  e o parâmetro de flambagem “ $K$ ” igual a 1, segundo o Anexo 1 da Norma. Assim, aplicando a Equação 4.2, encontramos o parâmetro de esbeltez “ $\bar{\lambda}$ ” de barras comprimidas igual a 1,313.

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\pi} \frac{KL}{i} \sqrt{\frac{Qf_y}{E}} \quad (4.2)$$

Adotando o parâmetro acima e considerando a curva “a” de flambagem (Figura 2.81) para o perfil tubular, segundo a classificação da Tabela 3 da Norma NBR8800 (1986), podemos encontrar na Tabela 4 desta Norma o valor de “ $\rho$ ” igual a 0,474. Adotando este coeficiente, as recomendações da norma e desconsiderando o coeficiente de minoração do material obtemos, aplicando a Equação 4.3, uma resistência à compressão “ $N_c$ ” de  $13\text{kN}$ .

$$N_c = A_g f_y \rho \quad (4.3)$$

### 4.3.3. Determinação do carregamento a ser aplicado

Como observado, o colapso do tubo é obtido pela flambagem devido à carga axial de compressão de  $13\text{kN}$  ou  $1300\text{kgf}$ . Para tanto, por decomposição vetorial, para que um elemento da estrutura seja submetido a tal carregamento é necessária uma aplicação de uma carga de  $36,92\text{kN}$  ou  $3692\text{kgf}$ , no nó 9 (central). A direção da carga é aplicada verticalmente com sentido de cima para baixo. Sendo assim, será aplicado na estrutura um carregamento de  $37\text{kN}$  ou  $3700\text{kgf}$ , no estudo computacional.



#### 4.4. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Os parâmetros a serem analisados neste item são, os esforços axiais, momentos fletores e deslocamento vertical nodal da estrutura. Para uniformizar e simplificar a nomenclatura nos gráficos considere “LI”, ligação ideal, as estruturas treliçadas tridimensionais constituídas com ligações das barras perfeitamente centradas no nó; “LT”, ligação típica, as estruturas constituídas com ligação das barras excêntricas ao nó e extremidades amassadas; e “LTD” ligação centro, as estruturas constituídas por elementos barras com extremidades amassadas e distanciador, para correção de excentricidade.

##### 4.4.1. Esforços axiais nos elementos

Os resultados numéricos dos esforços axiais nos elementos das estruturas treliçadas tridimensionais podem ser apreciados na Tabela A.1 do Anexo A, bem como a numeração das barras. Os valores mais representativos dos esforços foram destacados nos gráficos das Figuras 4.6, 4.7 e 4.8, respectivamente representam os modelos com ligação ideal, ligação típica e ligação típica com distanciador. Os valores com sinal negativo indicam o efeito de compressão e os positivos de tração. Portanto, note que os elementos do banzo superior e diagonal de apoio estão sob compressão. Para o três modelos analisados observamos pequena variação na intensidade dos esforços, o que pode ser comprovado no gráfico da Figura 4.9. Neste, estão dispostos os resultados dos esforços axiais, em kN, dos três modelos e para as 32 barras.

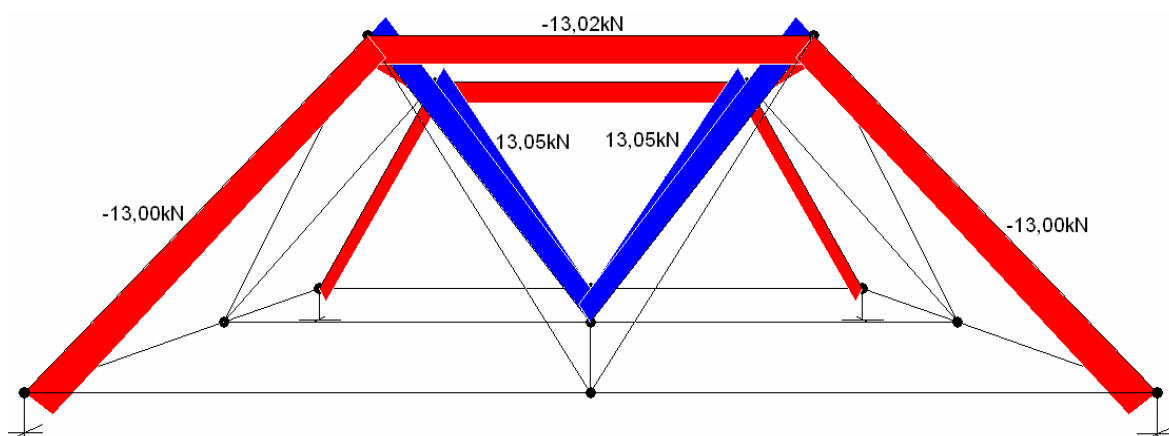


Figura 4.6 – Diagrama de esforços axiais da estrutura espacial com ligação ideal (LI)

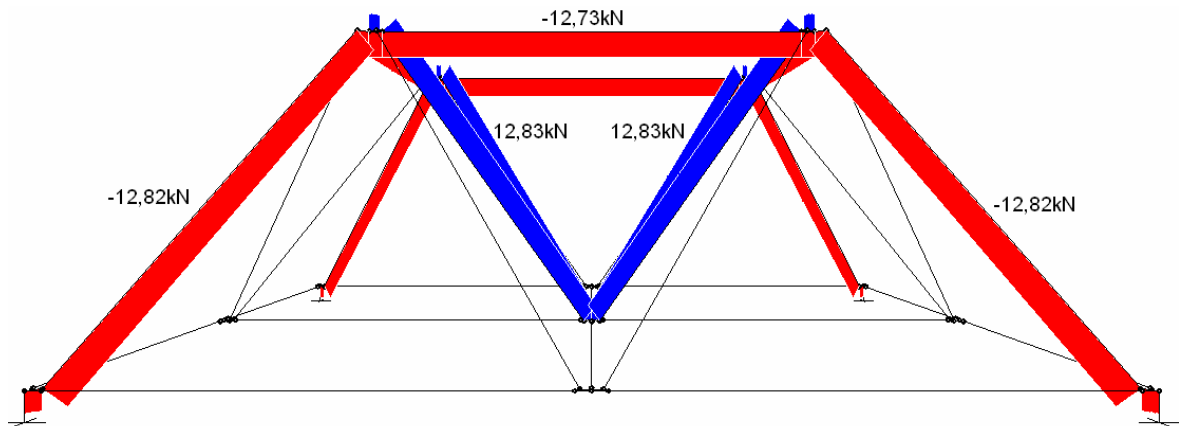


Figura 4.7 – Diagrama de esforços axiais da estrutura espacial com ligação típica (LT)

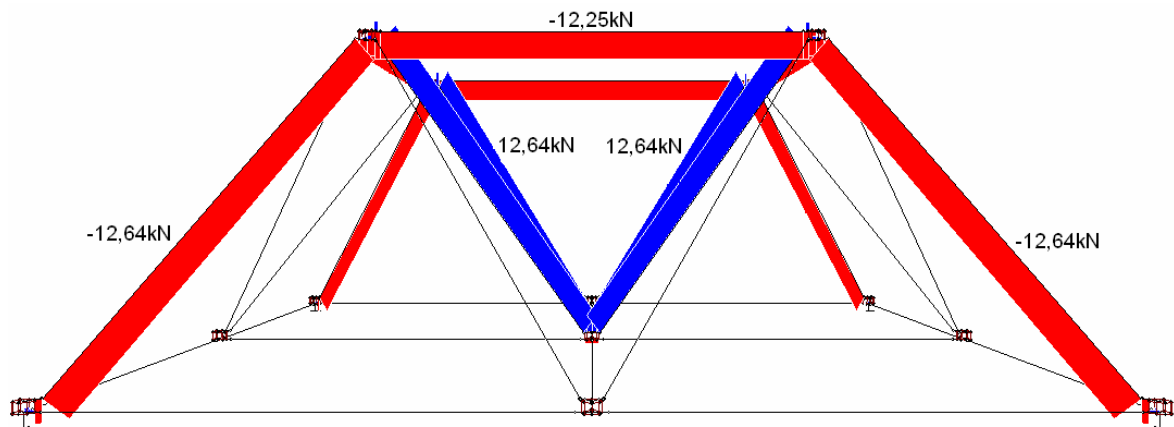


Figura 4.8 – Diagrama de esforços axiais da estrutura espacial com ligação típica e distanciador (LTD)

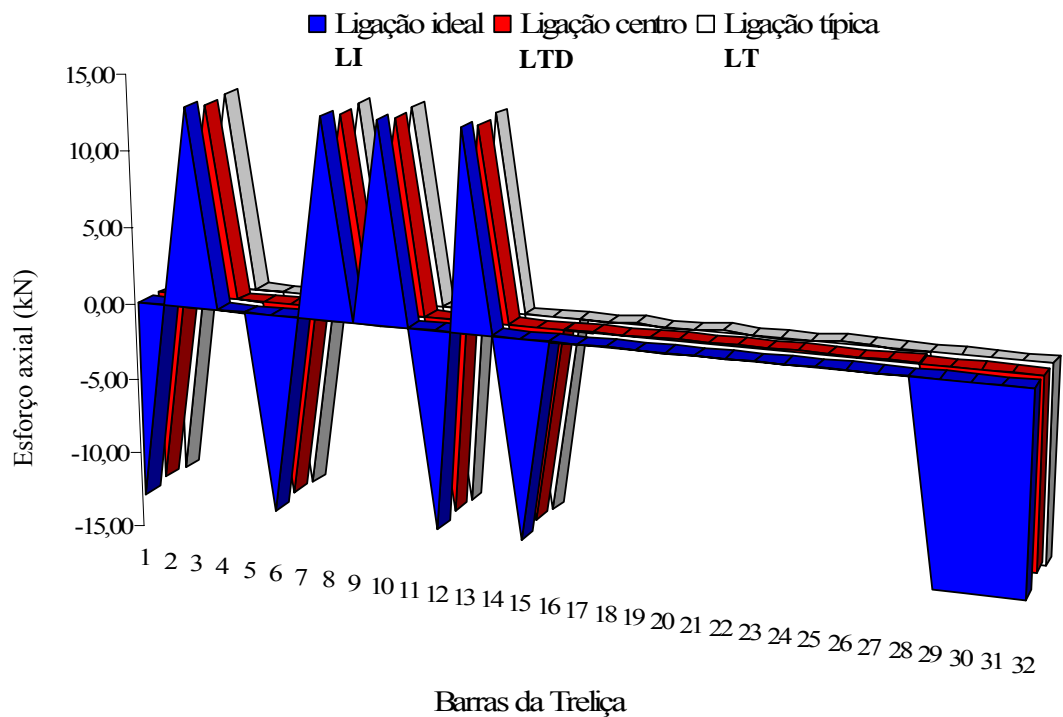


Figura 4.9 – Comparação dos esforços axiais nos modelos de ligação

#### 4.4.2. Momento fletor nas estruturas

Os resultados numéricos dos momentos fletores nos elementos das estruturas treliçadas tridimensionais podem ser apreciados na Tabela A.1 do Anexo A. Os valores mais representativos dos momentos foram destacados nos gráficos das Figuras 4.10, 4.11 e 4.12, respectivamente e representam os modelos com ligação ideal (LI), ligação típica (LT) e ligação centro (LTD). No gráfico da Figura 4.13 estão dispostos os resultados momentos fletores, em kN.cm, dos três modelos para as 32 barras das treliças.

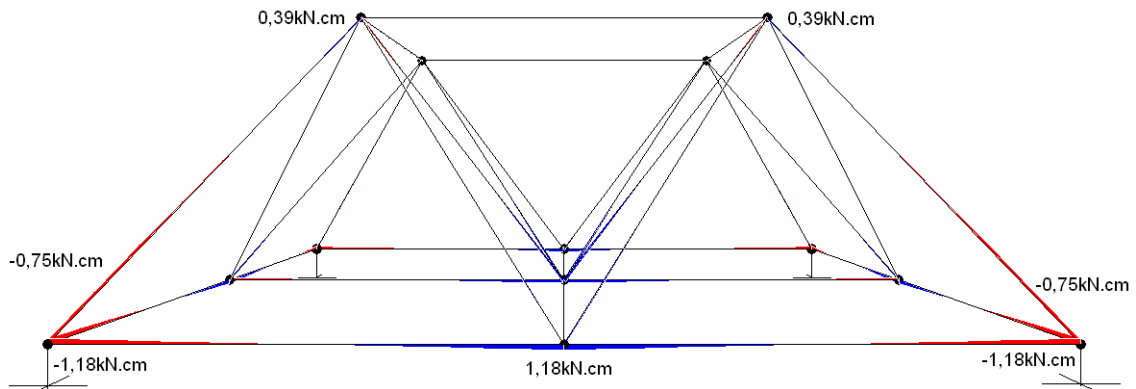


Figura 4.10 – Diagrama do momento fletor da estrutura com ligação ideal (LI)

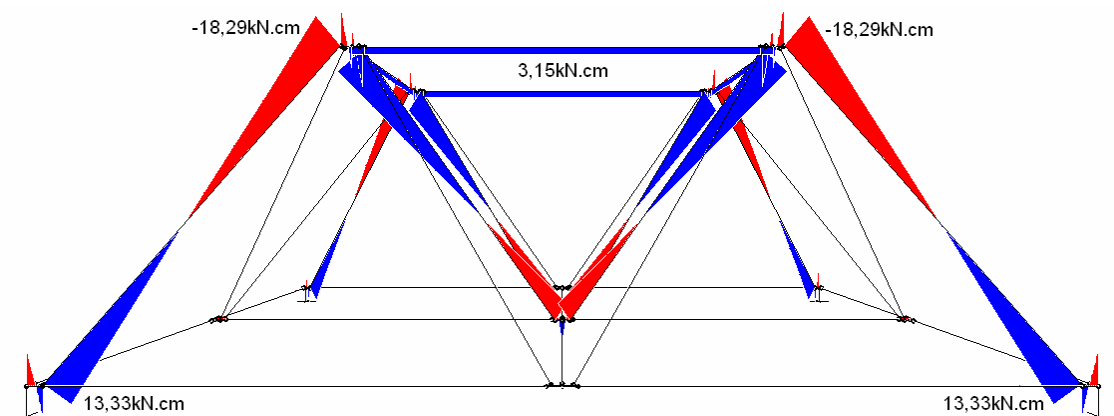


Figura 4.11 – Diagrama do momento fletor da estrutura com ligação típica (LT)

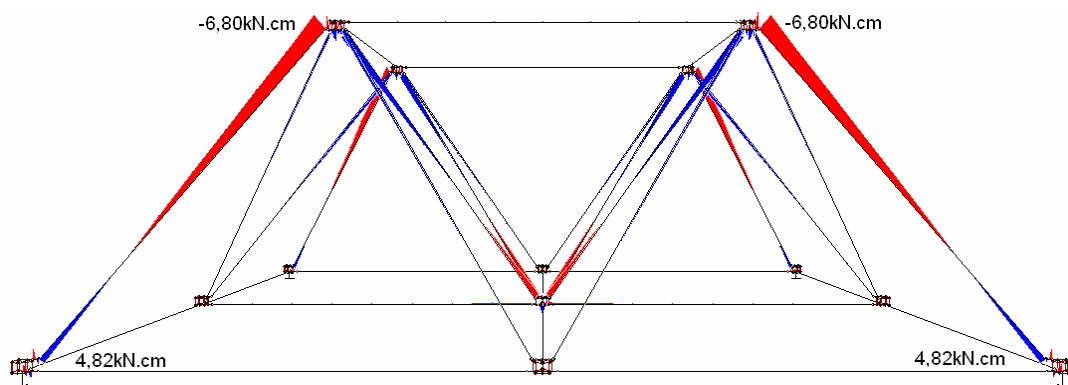


Figura 4.12 – Diagrama do momento da estrutura com ligação típica e distanciador (LTD)

É notório que os momentos na estrutura com ligação ideal são desprezíveis, confirmando o que é adotado na literatura, quando as linhas de centro das barras se unem no centro do nó. Entretanto, a ligação típica apresenta elevados valores de momento fletor nos nós, provavelmente devido à excentricidade intrínseca deste sistema. Quanto ao modelo proposto neste trabalho, ligação com correção da excentricidade com distanciador, nota-se uma sensível redução no momento fletor nos nós. Esta redução no momento fletor diminui a solicitação nodal e pode aumentar a resistência última da estrutura.

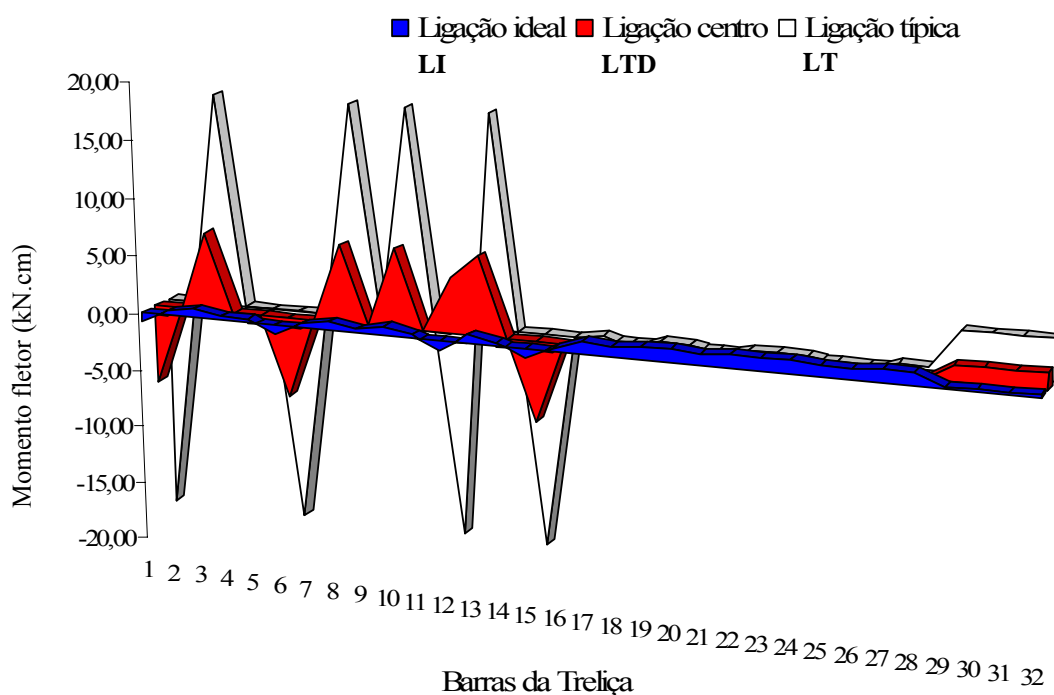


Figura 4.13 – Comparação dos momentos fletores nos modelos de ligação

#### 4.4.3. Deslocamentos verticais nos nós das estruturas

Os resultados numéricos dos deslocamentos verticais nodais das estruturas treliçadas tridimensionais podem ser apreciados na Tabela A.2 do Anexo A. Os valores mais representativos dos deslocamentos foram destacados nos diagramas de deformadas das Figuras 4.14, 4.15 e 4.16, respectivamente representam os modelos com ligação ideal (LI), ligação típica (LT) e ligação centro (LTD). A escala de visualização está amplificada em 15 vezes. No gráfico da Figura 4.17 estão dispostos os resultados dos deslocamentos, em mm, dos três modelos para os nós 2, 9 e 4.

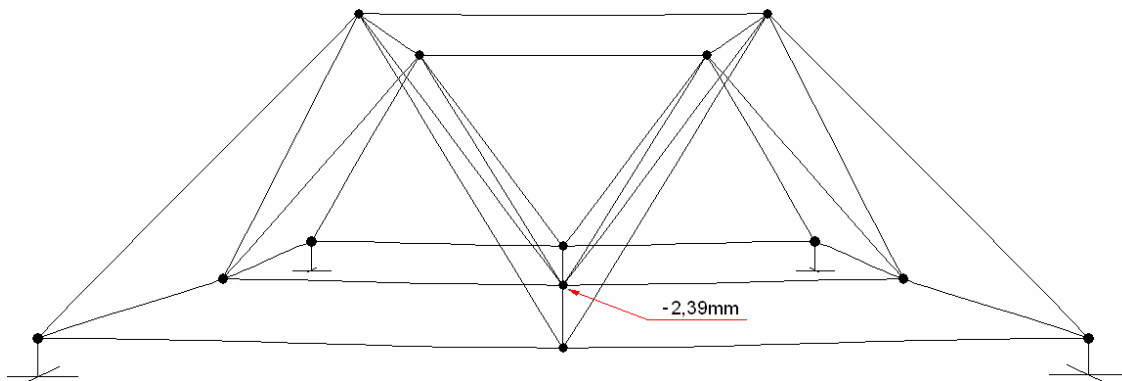


Figura 4.14 – Diagrama da deformada da estrutura com ligação ideal (LI)

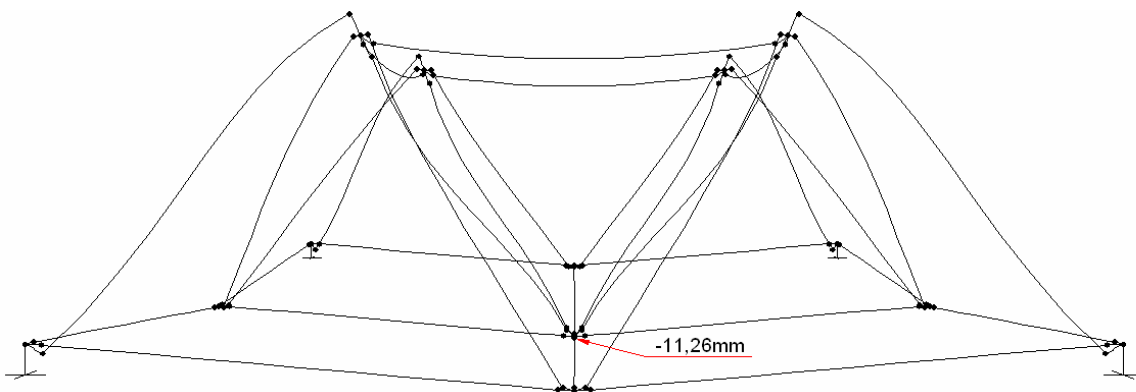


Figura 4.15 – Diagrama da deformada da estrutura com ligação típica (LT)

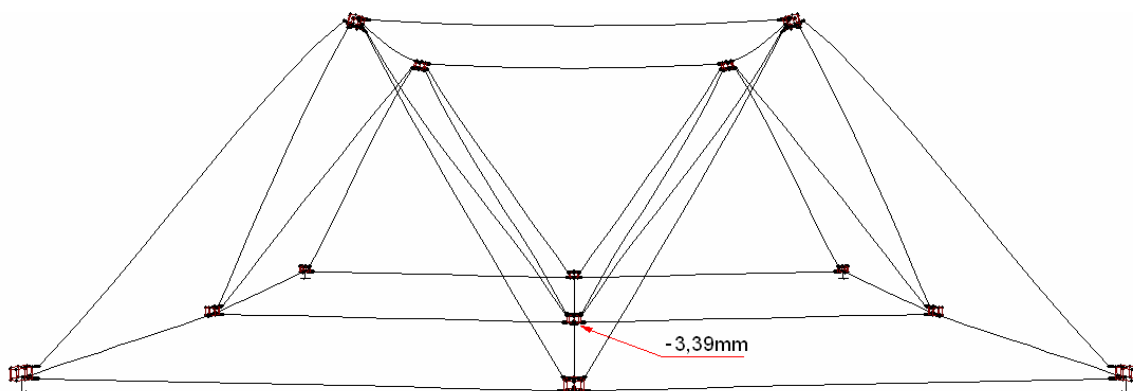


Figura 4.16 – Diagrama da deformada da estrutura com ligação centro (LTD)

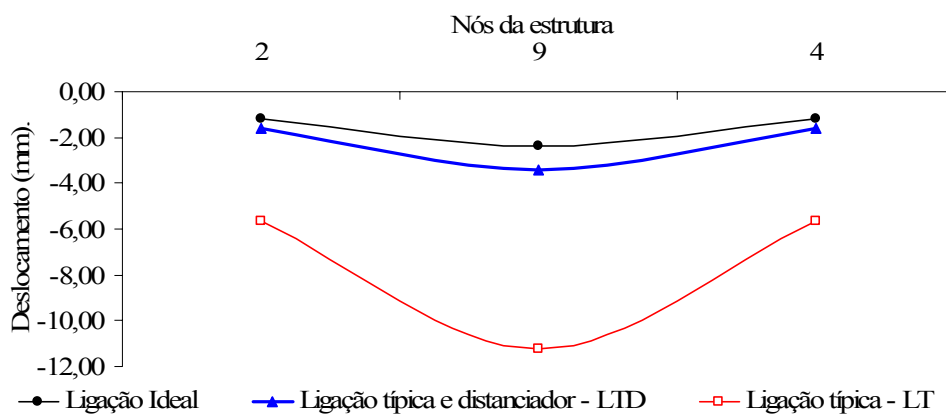


Figura 4.17 – Comparação dos deslocamentos verticais nos modelos de ligação

Após o estudo comparativo entre estruturas com nó típico, nó ideal e nó típico com distanciador (proposta 1), foi observado que há uma melhoria significativa na resistência das estruturas com distanciador em relação à estrutura com nó típico. Tal estudo respalda a necessidade de estudos experimentais para maiores conclusões. Os Capítulos 5, 6, 7, 8 e 9, tratam de estudos mais aprofundados sobre a eficiência do reforço do nó típico.

## **5. ESTUDO EXPERIMENTAL COM CARREGAMENTO ESTÁTICO**

Procedimentos preliminares foram realizados antes do início da análise experimental. O primeiro passo foi o planejamento e à adaptação das estruturas em uma base para ensaio. Foi projetada uma base rígida, também em estrutura metálica, tal que esta não deforme durante o ensaio. A base rígida foi fixada sobre uma laje de reação de concreto, e abaixo desta foi localizada o sistema de aplicação de carga. Foi planejado também um sistema de medição do deslocamento nodal do conjunto, controle da carga aplicada e monitoramento de deformações. Após estas etapas foram finalmente realizados os ensaios dos protótipos propriamente ditos. As Figuras 5.1 a 5.4 ilustram melhor o sistema.

### **5.1. INSTRUMENTAÇÃO DOS PROTÓTIPOS DE ENSAIO**

Neste item seguem os detalhes da fixação da estrutura na base de ensaio, o sistema de aplicação de força no protótipo, o método de leitura da carga, a disposição dos defletômetros analógicos, a disposição dos extensômetros elétricos de resistência, a discriminação do sistema de aquisição e processamento de dados, bem como os ajustes finais antes do ensaio.

#### **5.1.1. Fixação da estrutura em base de ensaio**

A Figura 5.1 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 macado hidráulico.

A fixação da estrutura deve obedecer a critérios que uniformizem as restrições e carregamentos para os diferentes protótipos. As restrições de apoio dos protótipos, no estudo experimental e modelo computacional, devem ser iguais ou o mais próximo possível. Nos estudos computacional e experimental foram adotados sistemas de engaste, apoio de 3º gênero. Observe o detalhe de fixação nas Figuras 5.2 e 5.3. Observe na Figura 5.3 o detalhe do suporte utilizado para ligação do protótipo na base de ensaio. Note que

nesta há rasgos para facilitar o ajuste do protótipo sobre a base durante a montagem. A base de ensaio deve ser indeformável para não comprometer o resultado do estudo.

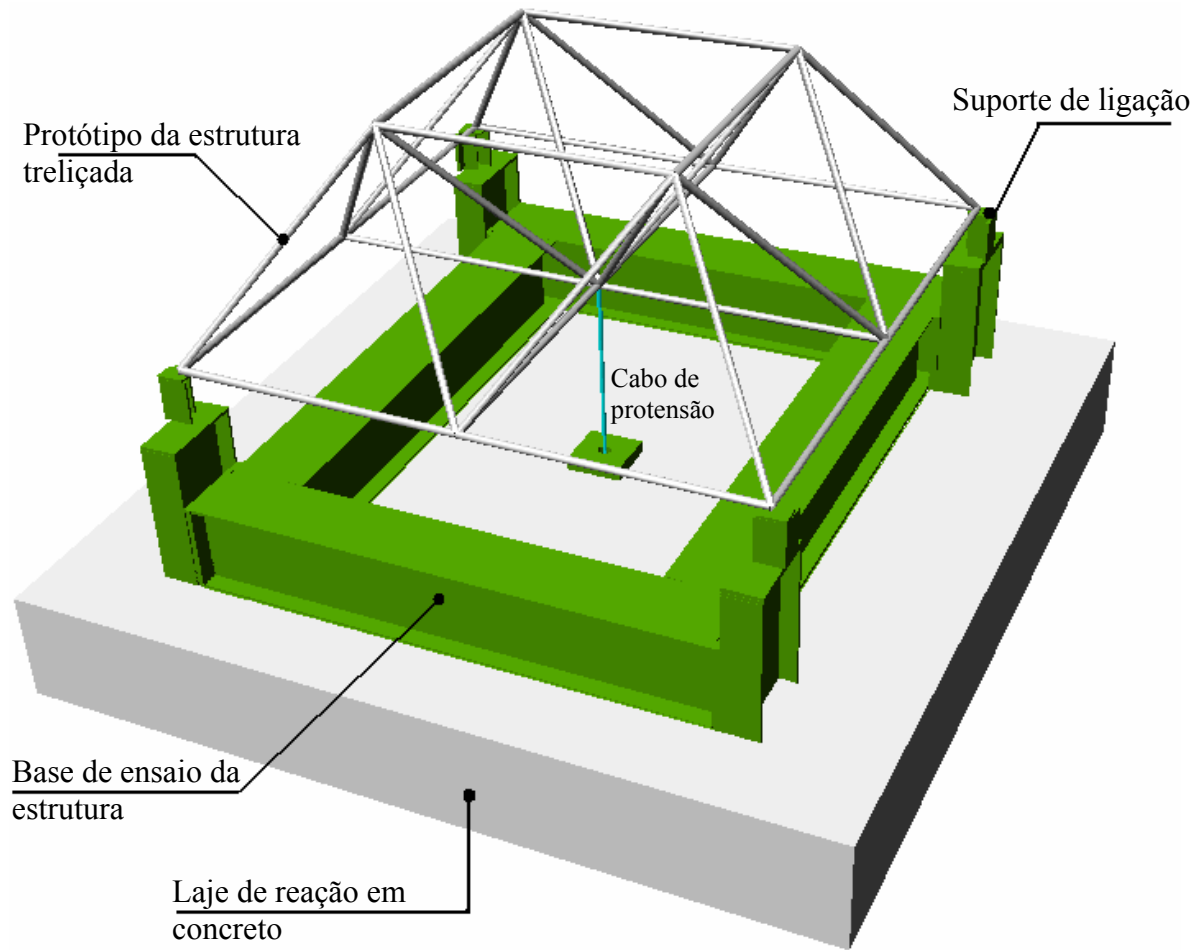


Figura 5.1 – Estrutura base para ensaio dos protótipos



Figura 5.2 – Fixação dos protótipos na base com apoio de ligação

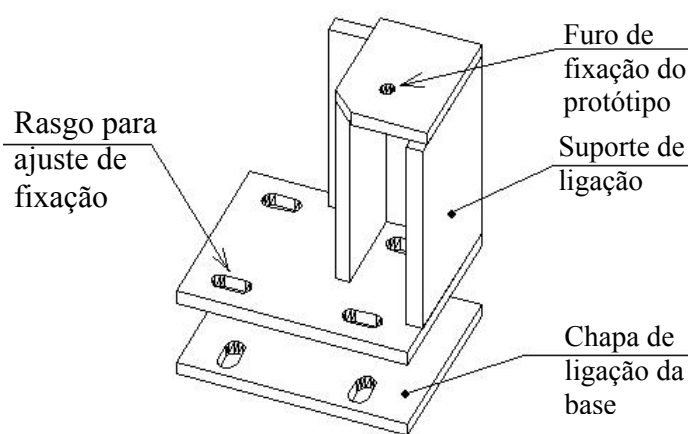


Figura 5.3 – Detalhe do suporte de ligação



### 5.1.2. 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 5.4. O cabo de protensão é fixado na estrutura no nó 9. Na Figura 5.5 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.

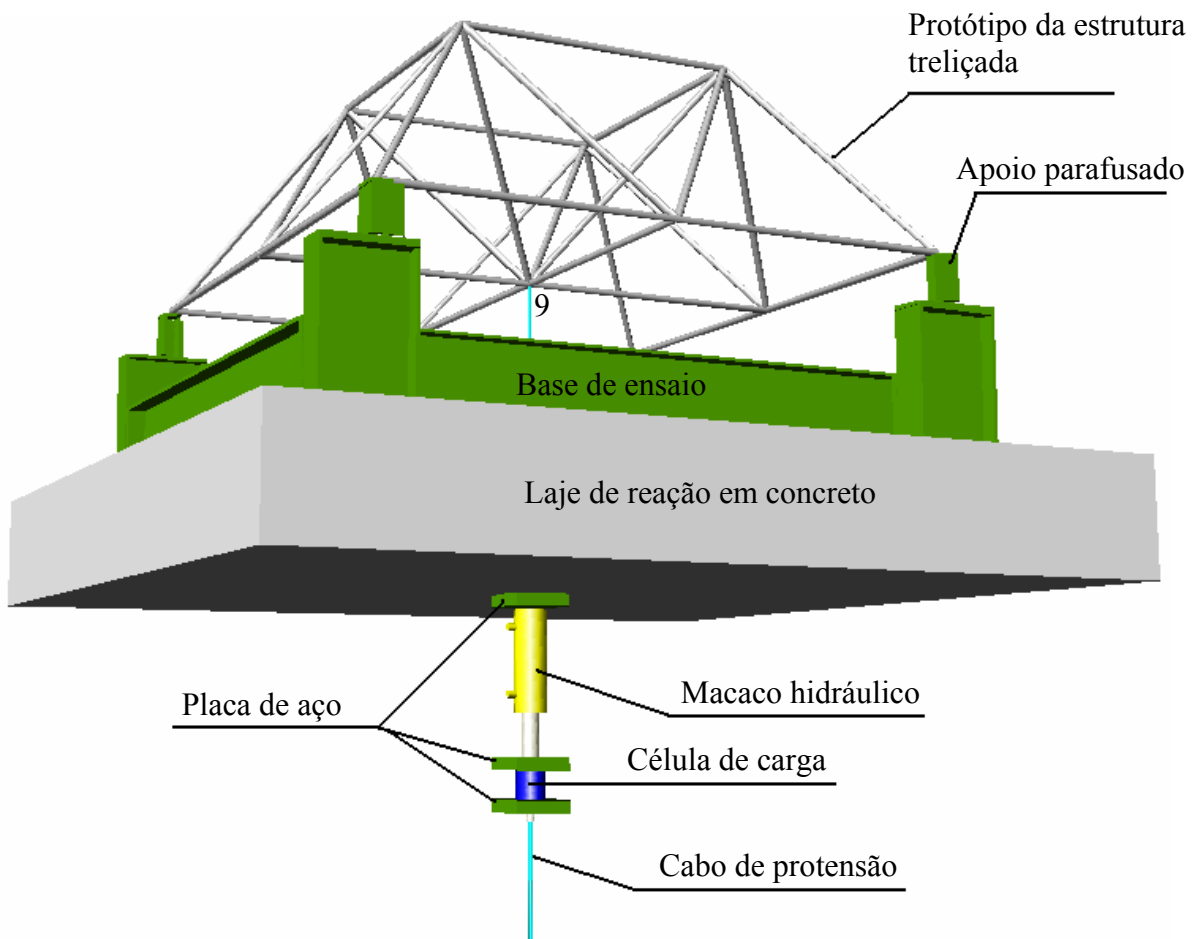


Figura 5.4 – Sistema de carregamento na laje de reação

O cabo de protensão puxa a estrutura de cima para baixo, pelo nó 9, devido à ação de um macaco hidráulico. Observe na Figura 5.6 que o macaco hidráulico tem dois canais, alívio e ação, que possibilitam o alongamento e o retorno da haste do macaco.

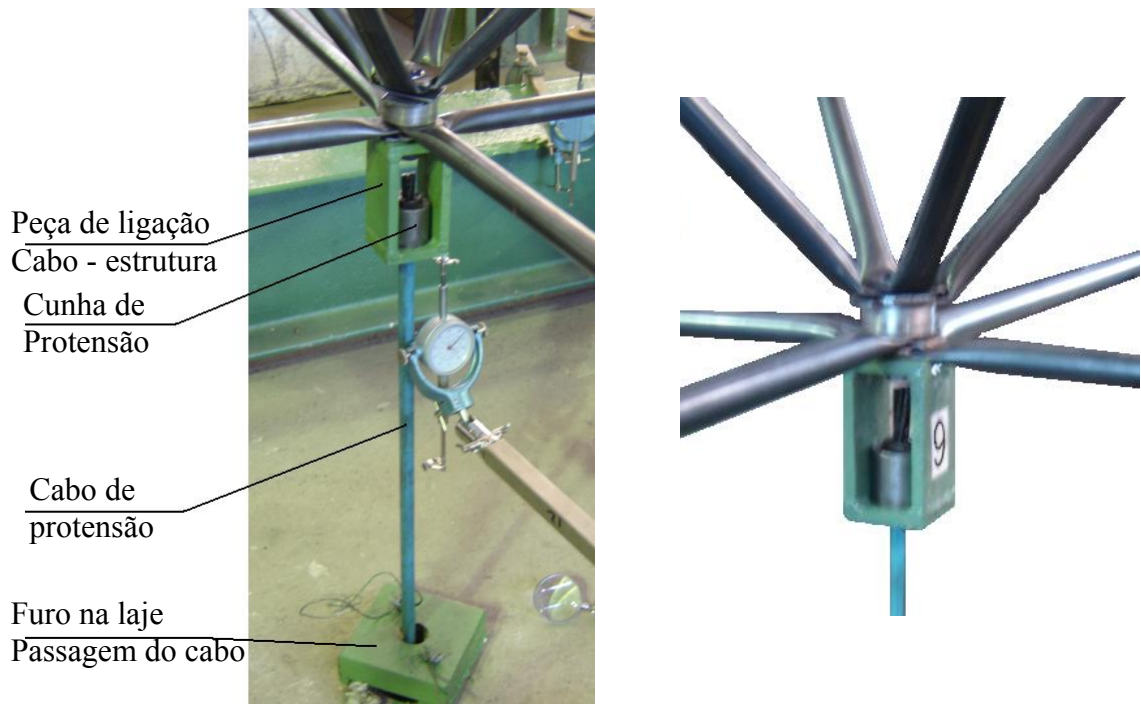


Figura 5.5 – Fixação do cabo de protensão no protótipo (Nó número 9)

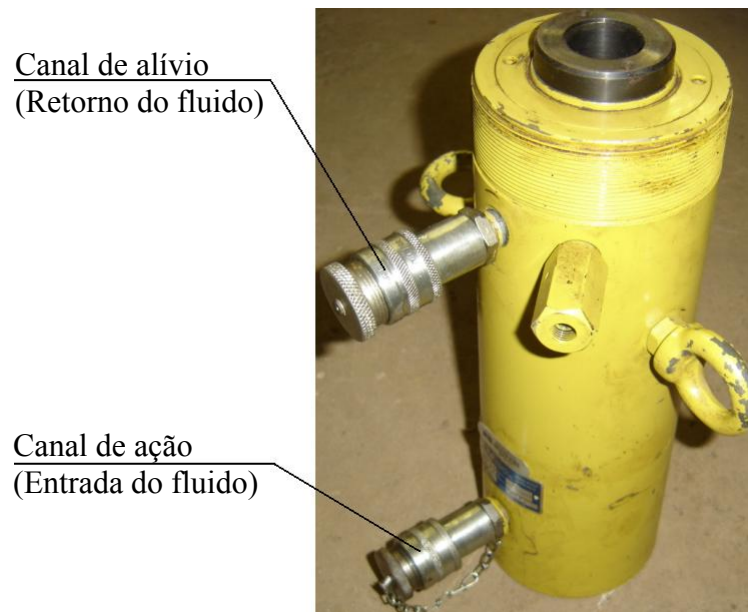


Figura 5.6 – Macaco hidráulico de dupla ação

Para o acionamento do macaco foi utilizada uma bomba hidráulica manual. A Figura 5.7 mostra os componentes de operação da bomba, sendo composto pelo braço de acionamento, uma válvula de controle de direção do fluxo do fluido e dois canais de fluxo (ação e alívio).

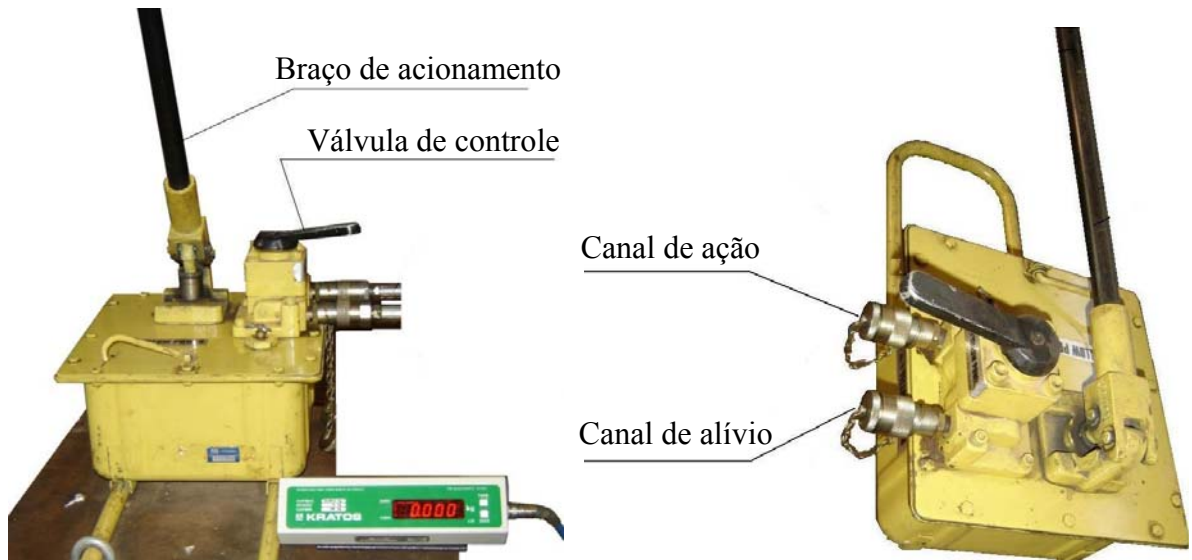


Figura 5.7 – Bomba hidráulica de acionamento manual

### 5.1.3. Aquisição de dados com célula de carga

O controle do carregamento aplicado foi possível a partir da leitura direta de sua intensidade em painel digital, Figura 5.8. A unidade de leitura deste painel é kgf, com tara máxima de 50000kgf (500kN), capacidade mínima de 250kgf (2,5kN) e precisão de 10kgf (0,1kN). Uma célula de carga é conectada a este e localizada em posição de ação direta da carga, ver Figura 5.4. A capacidade de medição desta célula é de 500kN, para tanto são utilizados oito extensômetros elétricos de resistência em ponte completa.



Figura 5.8 – Sistema de aquisição do carregamento com célula de carga

#### 5.1.4. 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 5.9 mostra a planta do protótipo com numeração dos nós instrumentados e apoios. Os deslocamentos dos nós 1, 2, 3 e 4 foram obtidos com defletômetro em base magnética como mostra a Figura 5.10. 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). Uma extremidade do fio de aço é fixada no nó e a outra no peso (Figura 5.11).

A instrumentação do deslocamento do nó 9, central, é feita de modo direto com defletômetro como mostra a Figura 5.12. Para uma melhor leitura do instrumento, neste nó, foi utilizada uma lupa com haste de prolongamento. 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.

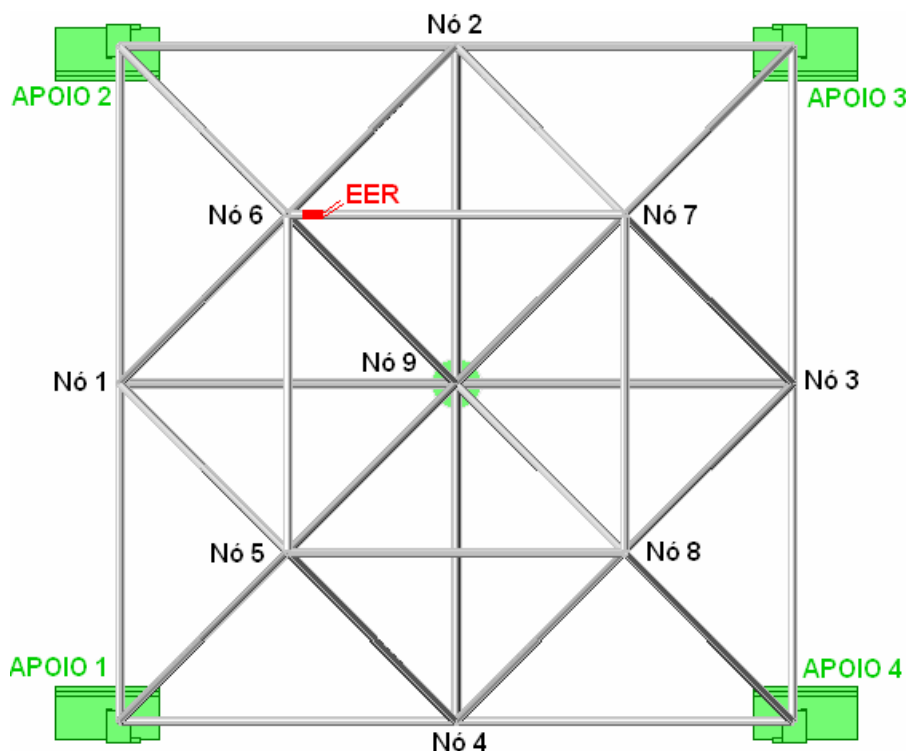


Figura 5.9 – Planta do protótipo com numeração dos nós e apoios



Figura 5.10 – Instrumentação dos nós 1, 2, 3 e 4 (base de leitura)



Figura 5.11 – Instrumentação dos nós 5, 6, 7 e 8 (pêndulo)



Figura 5.12 – Instrumentação do nó 9 central

### 5.1.5. Disposição de sensores de deformação - extensometria

Os extensômetros elétricos de resistência (EER) foram dispostos nos protótipos conforme mostra a Figura 5.9. Note que o EER está localizado apenas no banzo superior próximo ao nó 6. A Figura 5.13 mostra que o extensômetro está a 150mm da extremidade do banzo superior. Foram utilizados dois EER nesta posição, sendo um sensor no perímetro superior do tubo e outro no perímetro inferior (Figura 5.14). Tal procedimento foi tomado para medir a diferença de deformação das faces, o que constata a existência de momento fletor no nó. Os sensores utilizados no estudo experimental foram do tipo extensômetros elétricos de resistência (EER), *STRAIN GAGE*. Referência KFG-5-120-C1-11 da KYOWA e características tais como, comprimento da base do EER 5mm, resistência de 120 $\Omega$ , e fator de correção 2,12. Estes sensores são de resistência elétrica e devem ser colados na superfície onde se deseja obter as deformações.

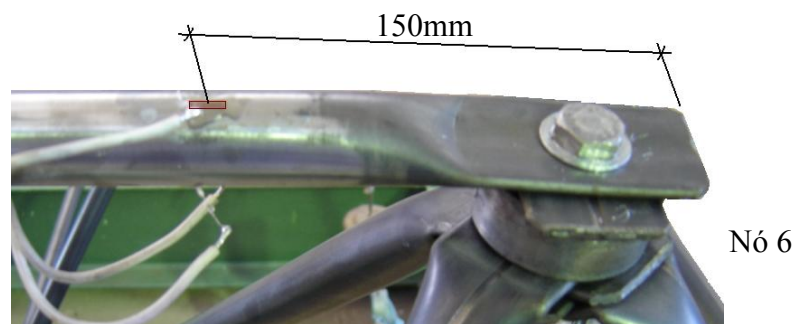


Figura 5.13 – Posição do EER em relação à extremidade do banzo superior

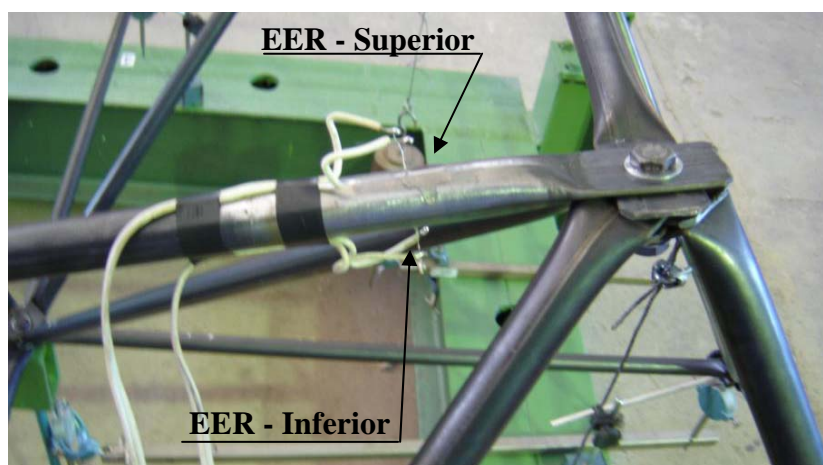


Figura 5.14 – EER colados no perímetro superior e inferior do banzo

### 5.1.6. Sistema de aquisição e processamento de dados

Para leitura do sinal dos sensores (EER) foi utilizado um equipamento de aquisição de dados “SPIDER 8”. Este equipamento recebe sinais do EER em voltagem e alimenta um micro computador com dados codificados. Para processamentos dos dados recebidos é utilizado no computador o programa “CATMAN” do fabricante do sistema de aquisição, a empresa alemã HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH).

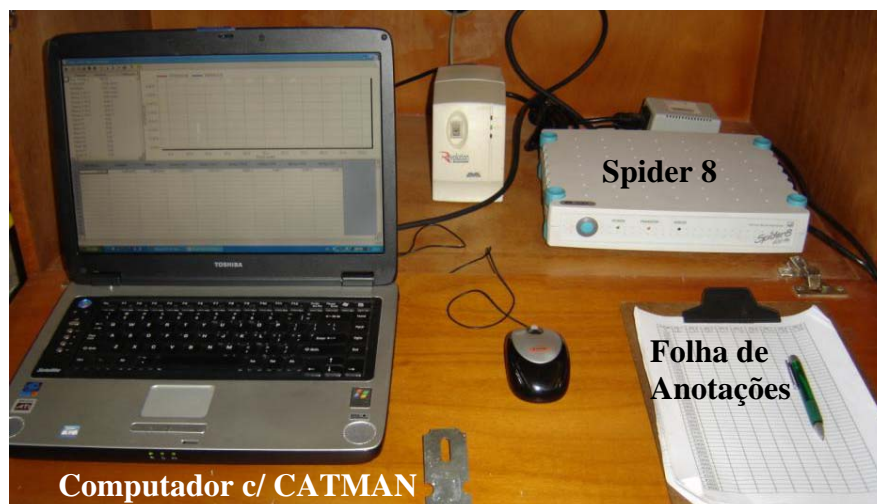


Figura 5.15 – Sistema de aquisição e processamento de dados

### 5.1.7. Ajustes finais antes do ensaio

Os apertos dos parafusos das ligações das estruturas treliçadas foram controladas por torquímetro analógico (vareta), Figura 5.16. A norma brasileira NBR8800 (1986) não estabelece o valor para o aperto mínimo para parafusos comuns ou parafusos com diâmetro menor que 1/2”. Logo foi adotado um valor padrão de aperto de 40kN por parafuso.



Figura 5.16 – Aperto dos parafusos com torquímetro

### 5.1.8. Procedimento durante o ensaio

Foi aplicado um passo de carga de 1kN (100kgf no painel de leitura). 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. As leituras das deformações obtidas nos EER foram realizadas por um terceiro apontador, logo após cada passo de carregamento aplicado.

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 5.17 mostra uma visão geral do acompanhamento dos ensaios por monitores no laboratório de estruturas da Universidade de Brasília (UnB). Nos itens a seguir foram detalhados os elementos estruturais dos protótipos dos ensaios, bem como listados os quantitativos dos materiais aplicados nestes.



Figura 5.17 – Esquema geral do acompanhamento dos ensaios



## 5.2. PROTÓTIPOS DO ENSAIO ESTÁTICO

### 5.2.1. Discriminação dos elementos dos protótipos

No Capítulo 3, item 3.2, foram expostas as geometrias e dimensões gerais dos protótipos a serem ensaiados, bem como, características físicas dos materiais que os compõem. Desta forma a Figura 5.18 apresenta os elementos estruturais que compõem os protótipos. Note um sistema modular com pirâmides com base de 1000mm e altura de 707mm. O ângulo de inclinação das diagonais é de 45°. Observe que as estruturas são compostas por diagonais, banzos e ligações. As estruturas estão fixadas em uma base de ensaio, a qual está devidamente retratada no item 5.1.1, deste capítulo.

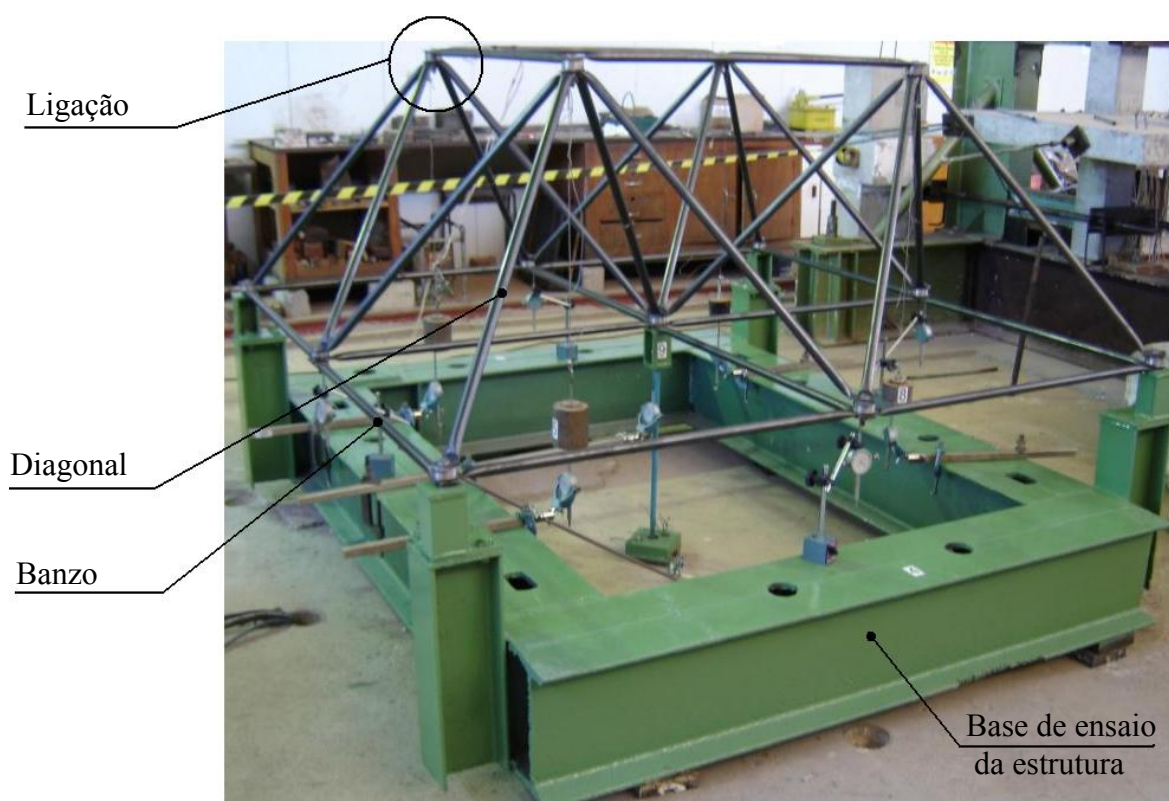


Figura 5.18 – Elementos de composição dos protótipos

Foram ensaiados três modelos de estruturas, diferenciadas pelo detalhe da ligação. As Figuras 5.19 , 5.20 e 5.21 mostram os modelos de ligações adotados nos ensaios estáticos, respectivamente a ligação típica, ligação típica com distanciador e a ligação típica com distanciador e cobrejunta. Nos três modelos foram mantidas as dimensões dos banzos e diagonais.



Figura 5.19 – Ligação típica – LTE



Figura 5.20 – Ligação típica com distanciador – LTDE



Figura 5.21 – Ligação típica com distanciador e cobrejunta - LTDCE

### 5.2.2. Rótulos de identificação dos protótipos

Foram realizados três ensaios com cada um dos três modelos de ligação, totalizando nove ensaios estáticos. A Tabela 5.1 mostra a lista dos rótulos adotados nos protótipos, a fim de organizar a realização dos ensaios e processamento dos resultados.

Tabela 5.1 – Lista de abreviatura dos protótipos dos ensaios experimentais estáticos

Abreviatura utilizada	Significado
LTE1	Ligação típica - ensaio estático 1
LTE2	Ligação típica - ensaio estático 2
LTE3	Ligação típica - ensaio estático 3
LTDE1	Ligação típica com distanciador - ensaio estático 1
LTDE2	Ligação típica com distanciador - ensaio estático 2
LTDE3	Ligação típica com distanciador - 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

### 5.2.3. Lista dos elementos construtivos dos protótipos

A Tabela 5.2 expõe o quantitativo dos materiais utilizados nos nove ensaios estáticos. Nesta podem ser observadas as quantidades de materiais por modelo unitário de protótipo (1 unid.), por modelo de protótipo (3 unid.) e o total de material em todos os modelos. Como o distanciador foi fabricado em eixo maciço, não houve desgaste deste durante os ensaios, logo este foi reaproveitado nos ensaios necessários (\*).

Tabela 5.2 – Quantitativo dos materiais utilizados nos ensaios

RELAÇÃO DO MATERIAL	LTE		LTDE		LTDCE		Total
	1 unid.	3 unid.	1 unid.	3 unid.	1 unid.	3 unid.	
Banzo - Tubo Ø25,4x1060mm	16	48	16	48	16	48	144
Diagonal - Tubo Ø25,4x1076mm	16	48	16	48	16	48	144
Distanciador - Eixo Ø50x20mm	-	-	13	13	13	13	13(*)
Cobrejunta - Chapa #3/4"	-	-	-	-	26	78	78
Parafuso de aço – ASTM – Ø10mm	1	3	1	3	1	3	9
Parafuso sextavado - Ø10mm	12	36	-	-	-	-	36
Parafuso sextavado - Ø10mm	-	-	12	36	-	-	36
Parafuso sextavado - Ø10mm	-	-	-	-	12	36	36
Porca para parafuso Ø10mm	13	39	13	39	13	39	117
Arruela para parafuso Ø10mm	26	78	26	78	26	78	234

#### 5.2.4. Dimensões e estoque dos elementos dos protótipos

As Figuras 5.22 e 5.23 mostram os desenhos dos banzos e diagonais, respectivamente. Note o detalhe do amassamento das extremidades e furação. A Figura 5.24 mostra parte dos elementos utilizados nos ensaios. Não foi reutilizado nenhum elemento estrutural ou de fixação. Nas Figuras 5.25 e 5.26 podem ser observados protótipos pré-montados e ensaiados respectivamente. Os elementos dos protótipos ensaiados foram descartados.

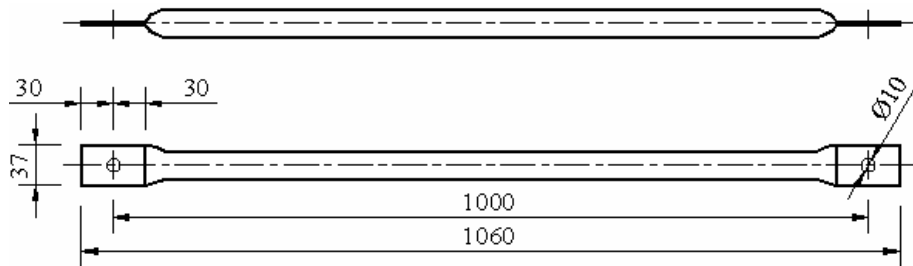


Figura 5.22 – Banzo - detalhe do amassamento e furação (mm)

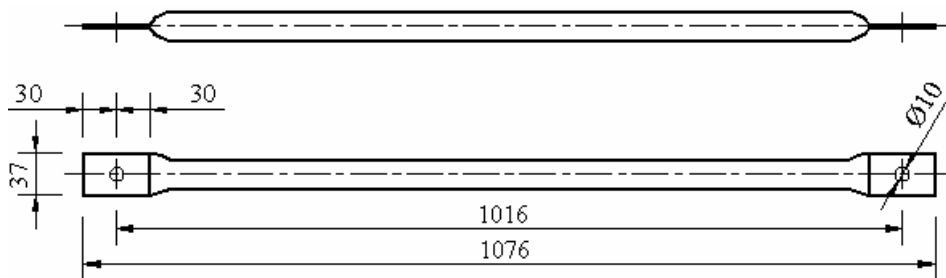


Figura 5.23 – Diagonal - detalhe do amassamento e furação (mm)



Figura 5.24 – Elementos dos protótipos dos ensaios estáticos



Figura 5.25 – Estruturas pré-montadas



Figura 5.26 – Protótipos ensaiados

### 5.3. RESULTADOS DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS.

Neste item podem ser observados os resultados dos ensaios estáticos das estruturas espaciais com três modelos de ligação. Sendo ensaiados três protótipos com ligações típicas (LTE1, LTE2 e LTE3), três com ligações típicas com distanciador (LTDE1, LTDE2 e LTDE3) e três protótipos com ligações típicas com distanciador e chapa cobrejunta (LTDCE1, LTDCE2 e LTDCE3).

Para análise dos deslocamentos nodais foram traçados diagramas de carregamento versus deslocamento nodal. Para possibilitar a comparação entre os três 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. Para verificação dos momentos nos nós foram traçados diagramas de carregamento versus deformação. No eixo do carregamento (abscissa) foi considerado um valor máximo de 42kN. No eixo das deformações (ordenada) foi considerado um valor máximo de 1000 $\mu$ m/m.

#### 5.3.1. Ensaio das estruturas com ligações típicas - LTE

Nas Tabelas de D.1, D.2 e D.3, do Apêndice D, podem ser observados os resultados dos ensaios das estruturas com ligações típicas, respectivamente para os protótipos LTE1, LTE2 e LTE3. Vale salientar que não existem diferenças construtivas, bem como dimensões, apertos, montagem e execução de ensaio entre estes três protótipos. Os três ensaios foram realizados da mesma forma para possibilitar um tratamento estatístico.

### 5.3.1.1. Verificação do momento fletor na ligação

Como foi discriminado no item 5.1.5 (disposição de sensores de deformação) foram colados dois extensômetros em um banzo superior da estrutura. Sendo um sensor no perímetro superior e outro no perímetro inferior do tubo. Desta forma uma diferença entre as deformações lidas nos extensômetros caracteriza um esforço de flexão na barra e conseqüentemente momento fletor na ligação da estrutura. Os resultados dos extensômetros EER do protótipo LTE1 foram perdidos devido a uma falha técnica durante o ensaio. As Figuras 5.27 e 5.28 mostram os diagramas carregamento versus deformação dos protótipos LTE2 e LTE3, respectivamente. Note que as leituras obtidas nos extensômetros EER-Superior e EER-Inferior são diferentes, caracterizando diferentes estados de deformação. Desta forma pode-se concluir que existe um momento na ligação que ocasiona sua rotação.

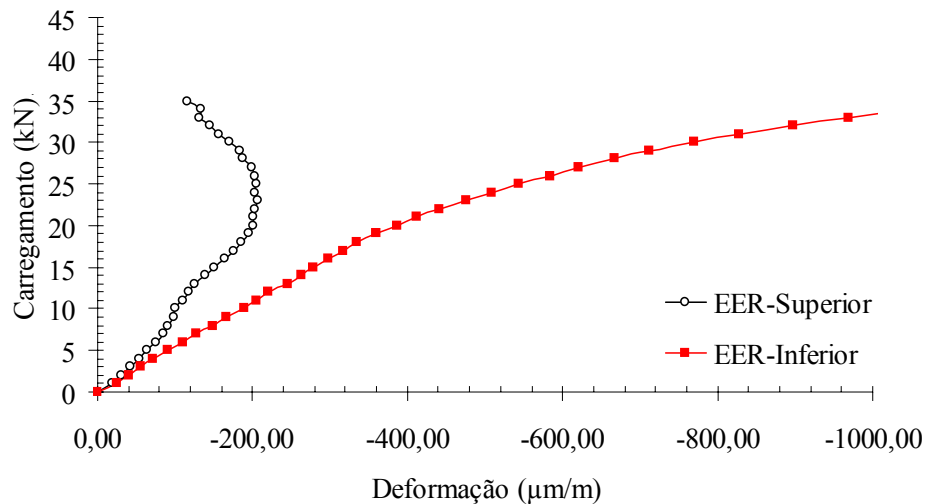


Figura 5.27 – Diagrama carregamento versus deformação no banzo – Protótipo LTE2

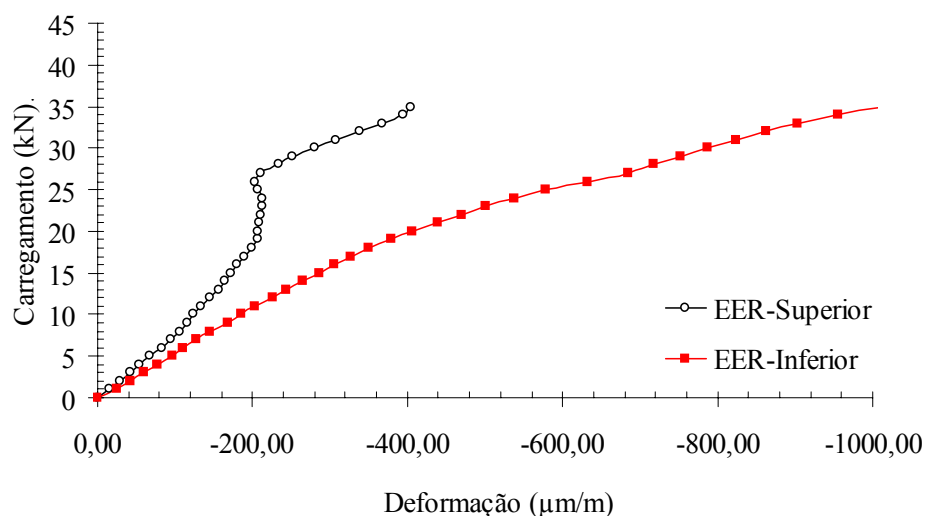


Figura 5.28 – Diagrama carregamento versus deformação no banzo – Protótipo LTE3

Quanto maior a diferença entre a deformação lida no extensômetro superior em relação ao extensômetro inferior maior a flexão na barra. Desta forma para melhor caracterizar este fenômeno foram calculadas as diferenças entre os EER superior e inferior dos protótipos 2 e 3, respectivamente LTE2 e LTE3. Estas diferenças de deformação foram plotadas no gráfico da Figura 5.29. Note nesta figura que a linha “Polinômio (MÉDIA)” representa a linha de tendência polinomial da média aritmética entre LTE2 e LTE3.

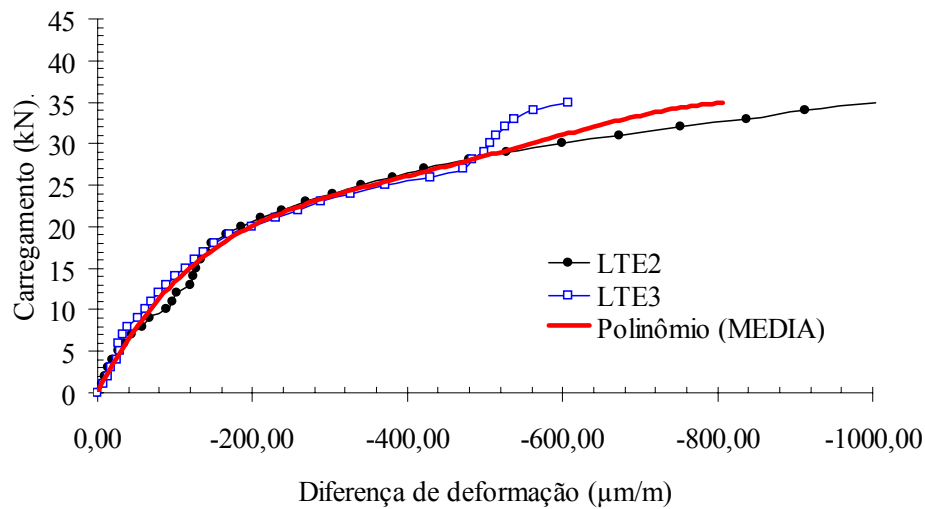


Figura 5.29 – Diagrama carregamento versus diferença de deformação – (LTE2 e LTE3)

### 5.3.1.2. Deformada da ligação durante ensaio – colapso local

As Figuras 5.30, 5.31 e 5.32 mostram a deformada da ligação, respectivamente dos protótipos LTE1, LTE2 e LTE3, quando a estrutura esta submetida a uma carga de 25kN. Visualmente está caracterizado o colapso local da estrutura, porém o ensaio prosseguiu devido à estrutura ainda resistir ao acréscimo de carregamento.



Figura 5.30 – Deformada da ligação com carga de 25kN – Protótipo LTE1



Figura 5.31 – Deformada da ligação com carga de 25kN – Protótipo LTE2



Figura 5.32 – Deformada da ligação com carga de 25kN – Protótipo LTE3

### 5.3.1.3. Deslocamentos da estrutura durante ensaio

As Figuras 5.33, 5.34 e 5.35 mostram os gráficos de carregamento versus deslocamento nodais, respectivamente para os protótipos LTE1, LTE2 e LTE3. Desta forma observe na Figura 5.33 o comportamento do protótipo LTE1, onde foi observado um colapso global com uma carga de 35kN e deslocamento do nó 9 central de 38,20mm. Na Figura 5.34 observe o colapso global do protótipo LTE2 com uma carga de 35,9kN e deslocamento do nó 9 central de 47,21mm. A Figura 5.36 mostra o comportamento da estrutura durante o ensaio, obteve o colapso global com uma carga de 35,9kN e deslocamento do nó 9 central de 47,20mm. O ponto que caracterizou o final destes três ensaios foi à perda de carga devido ao colapso de barras comprimidas de forma abrupta.

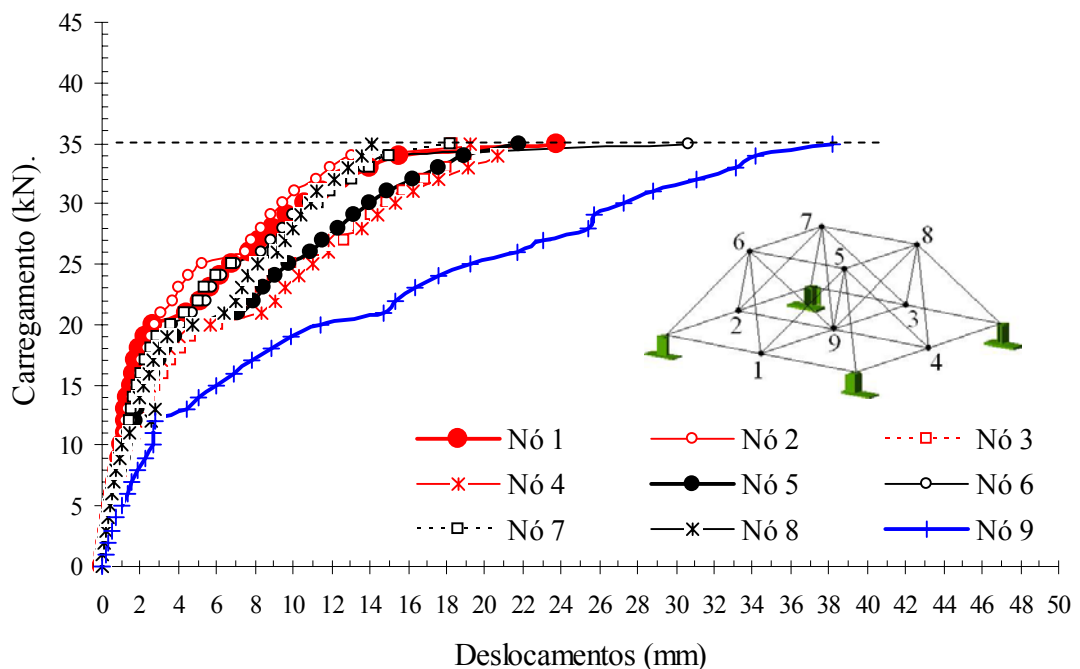


Figura 5.33 – Diagrama carregamento versus deslocamento nodais – Protótipo LTE1



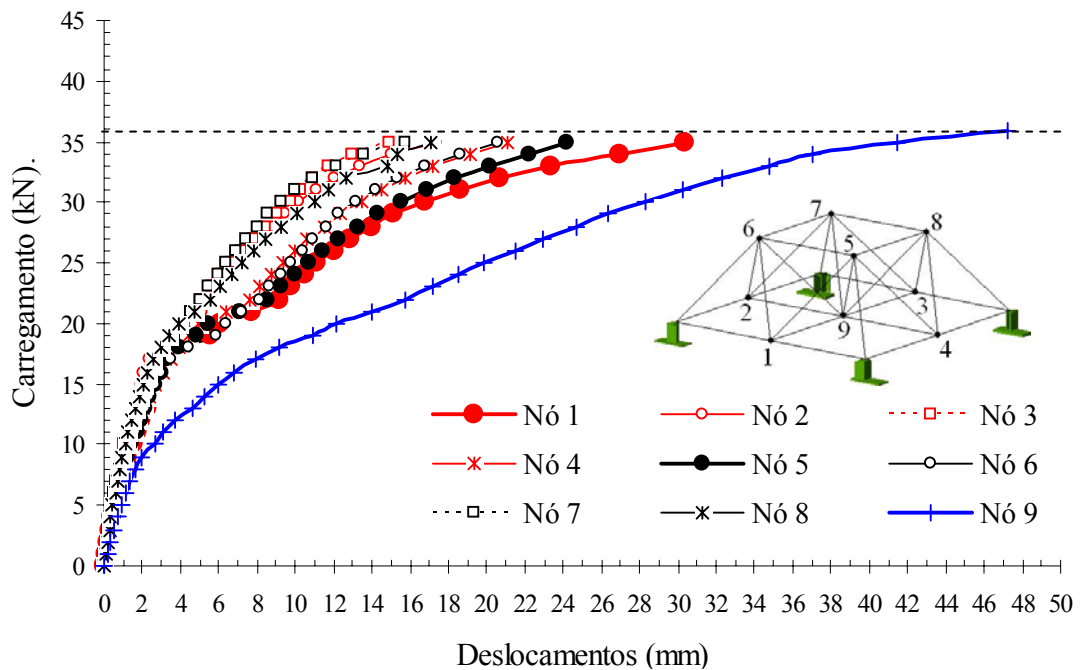


Figura 5.34 – Diagrama carregamento versus deslocamento nodais – Protótipo LTE2

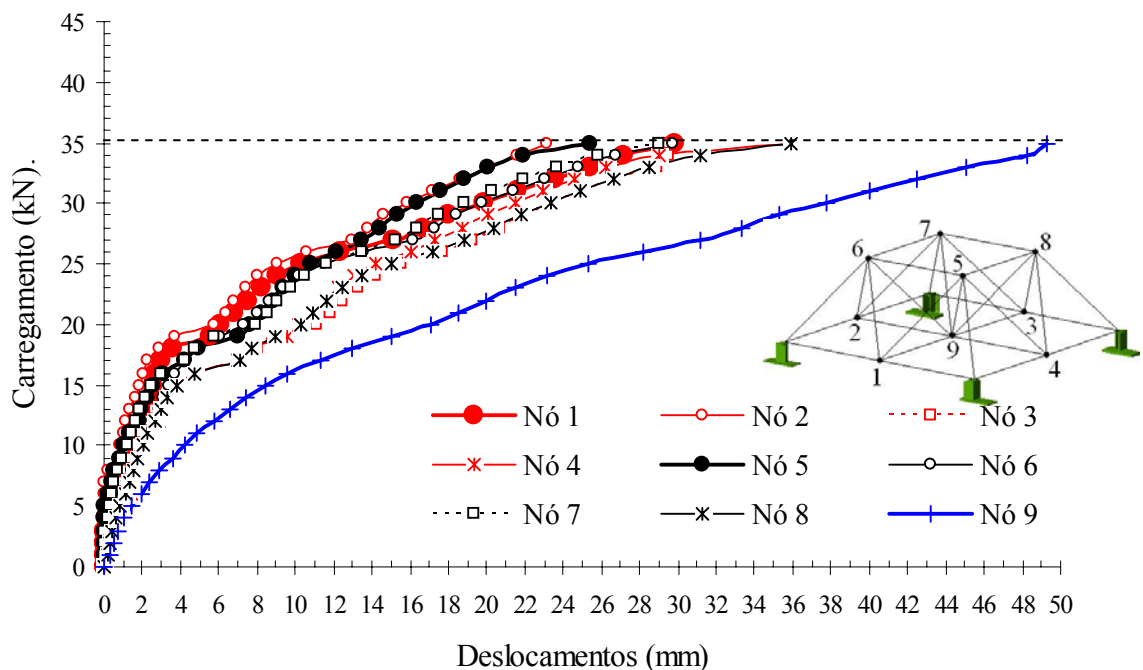


Figura 5.35 – Diagrama carregamento versus deslocamento nodais – Protótipo LTE3

Como foi observado, no nó 9 se encontra a ligação que apresenta o maior deslocamento vertical do protótipo, logo esta ligação é a determinante para a comparação dos modelos. A Figura 5.36 mostra o diagrama carregamento versus deslocamento do nó 9 para os três ensaios realizados LTE1, LTE2 e LTE3. Note nesta figura que a linha “Polinômio (MÉDIA)” representa a linha de tendência polinomial da média aritmética entre os ensaios LTE1, LTE2 e LTE3.

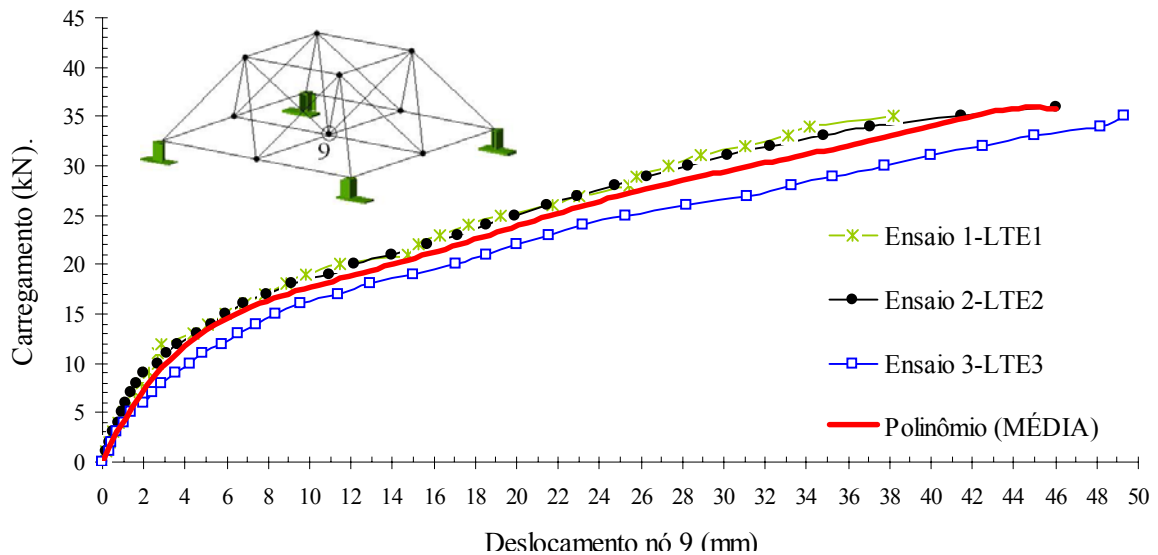


Figura 5.36 – Diagrama carregamento versus deslocamento – (LTE1, LTE2 e LTE3)

#### 5.3.1.4. Final do ensaio – Colapso global

As Figuras 5.37, 5.38 e 5.39 mostram as conformações finais das barras, respectivamente das estruturas LTE1, LTE2 e LTE3, em consequência das cargas de colapso. No protótipo LTE1 o colapso global ocorreu de forma abrupta na diagonal comprimida da estrutura a uma carga de 35kN. No protótipo LTE2 o colapso global ocorreu de forma abrupta no banzo superior comprimido a uma carga de 35,9kN. No protótipo LTE3 o colapso global ocorreu de forma abrupta no banzo superior comprimido a uma carga de 35,9kN.

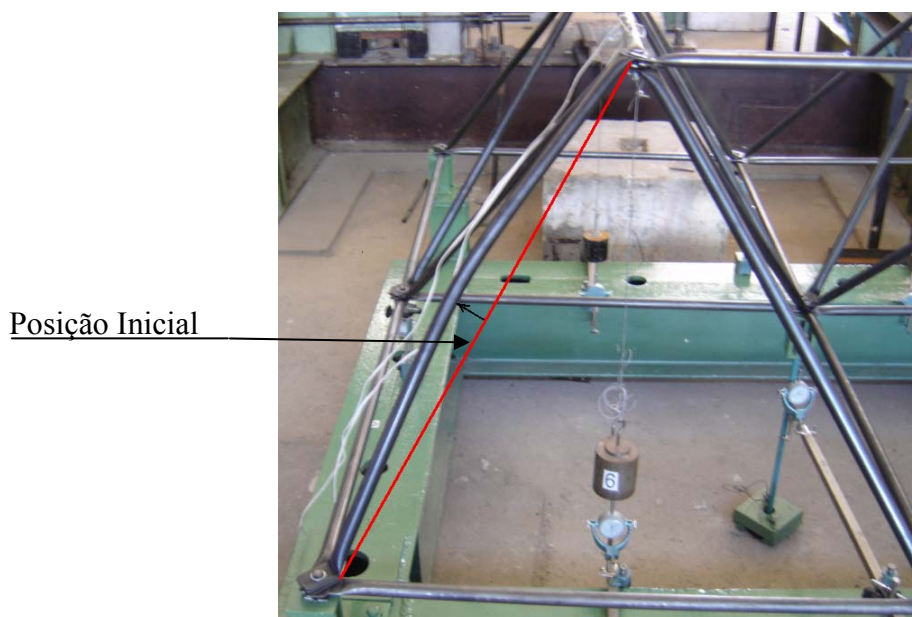


Figura 5.37 – Colapso global da estrutura com carga de 35kN – Protótipo LTE1



Figura 5.38 – Colapso global da estrutura com carga de 35,9kN – Protótipo LTE2

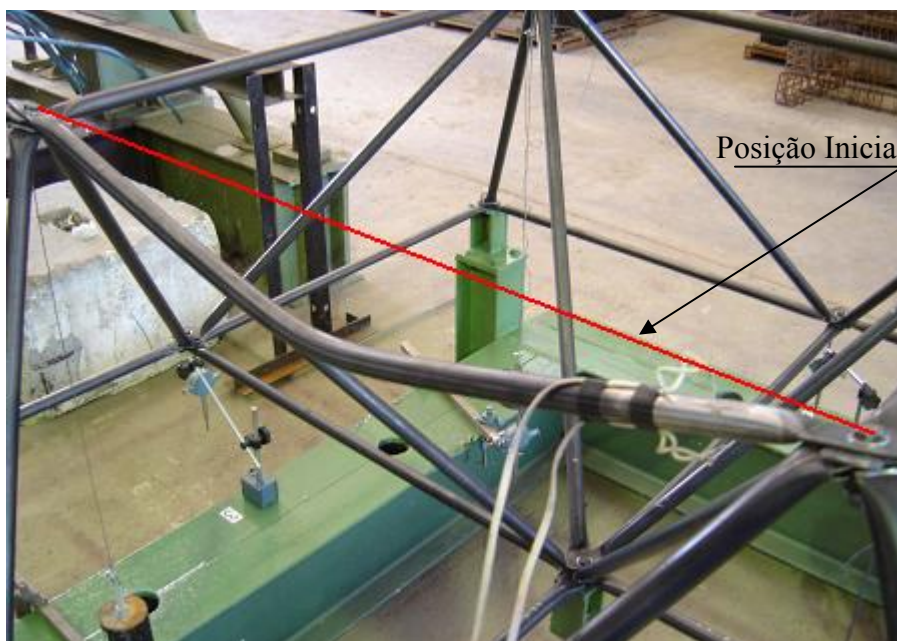


Figura 5.39 – Colapso global da estrutura com carga de 35,9kN – Protótipo LTE3

### 5.3.2. Ensaio das estruturas com ligações típicas com distanciador - LTDE

Nas Tabelas de D.4, D.5 e D.6, do Apêndice D, podem ser observados os resultados dos ensaios das estruturas com ligações típicas com distanciador, respectivamente para os protótipos LTDE1, LTDE2 e LTDE3 . Vale salientar que não existem diferenças construtivas, bem como dimensões de peças, apertos, montagem e execução de ensaio entre estes três protótipos. Os três ensaios foram realizados de forma igual para possibilitar um tratamento estatístico.

### 5.3.2.1. Verificação do momento fletor na ligação

Como foi discriminado no item 5.1.5 (disposição de sensores de deformação) foram colados dois extensômetros em um banzo superior da estrutura. Sendo um sensor no perímetro superior e outro no perímetro inferior do tubo. Desta forma uma diferença entre as deformações lidas nos extensômetros caracteriza um esforço de flexão na barra e consequentemente momento fletor na ligação da estrutura. As Figuras 5.40, 5.41 e 5.42 mostram os diagramas carregamento versus deformação dos protótipos LTDE1, LTDE2 e LTDE3, respectivamente. Note que as leituras obtidas nos extensômetros EER-Superior e EER-Inferior são diferentes, caracterizando diferentes estados de deformação. Desta forma pode-se concluir que existe um momento na ligação que ocasiona sua rotação.

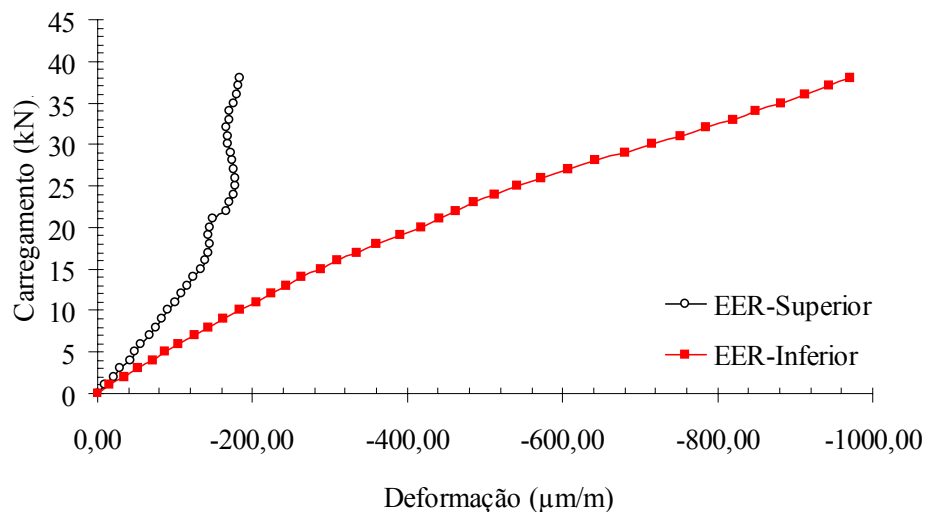


Figura 5.40 – Diagrama carregamento versus deformação no banzo – Protótipo LTDE1

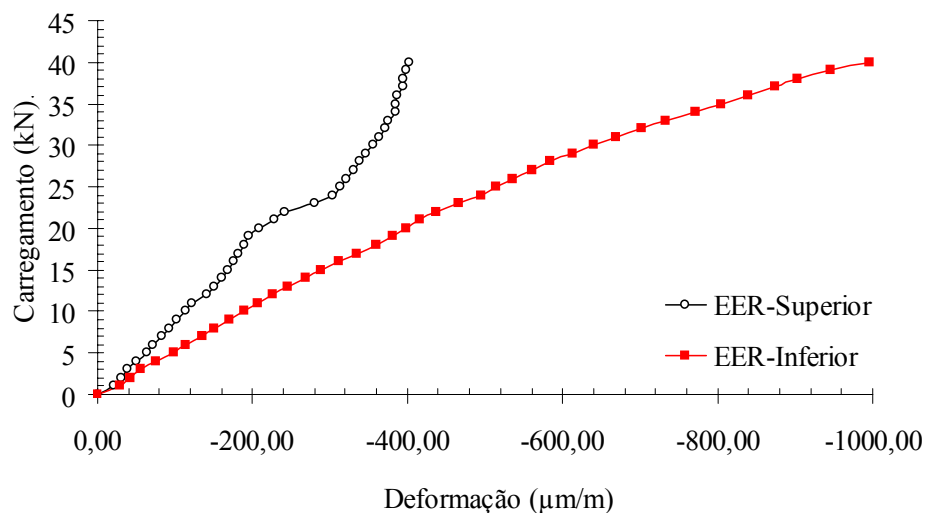


Figura 5.41 – Diagrama carregamento versus deformação no banzo – Protótipo LTDE2

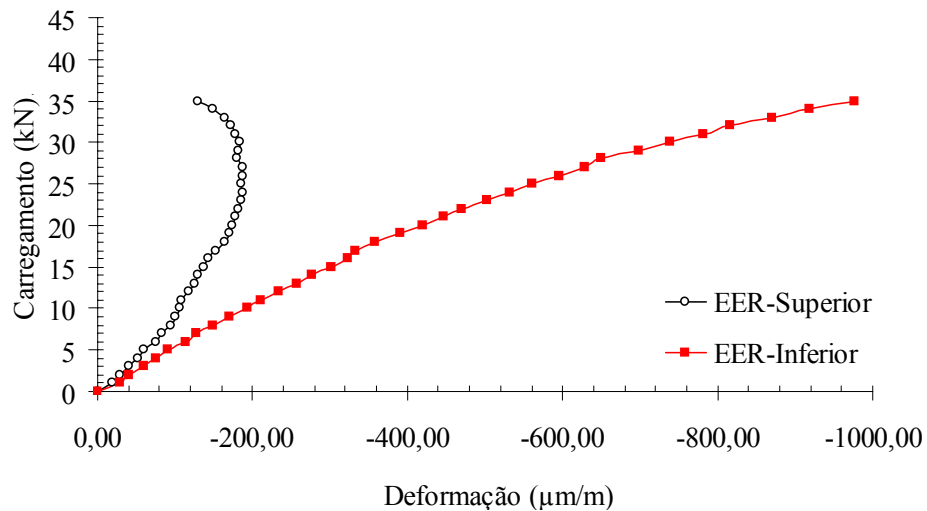


Figura 5.42 – Diagrama carregamento versus deformação no banzo – Protótipo LTDE3

Quanto maior a diferença entre a deformação lida no extensômetro superior em relação ao extensômetro inferior maior a flexão na barra. Desta forma para melhor caracterizar este fenômeno foram calculadas as diferenças entre os EER superior e inferior dos protótipos 1, 2 e 3, respectivamente LTDE1, LTDE2 e LTDE3. Estas diferenças de deformação foram plotadas no gráfico da Figura 5.43. Note nesta figura que a linha “Polinômio (MÉDIA)” representa a linha de tendência polinomial da média aritmética entre LTDE1, LTDE2 e LTDE3.

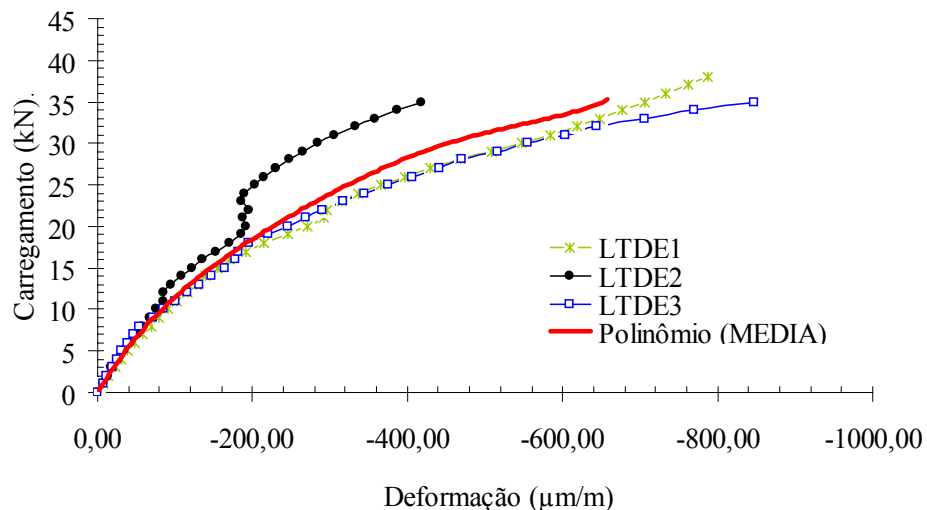


Figura 5.43 – Diagrama carregamento versus diferença de deformação – (LTDE1, LTDE2 e LTDE3)

### 5.3.2.2. Deformada da ligação durante ensaio

Neste item foi analisada a deformada da ligação quando a carga de ensaio atinge 25kN. Esta intensidade de carga foi determinada para possibilitar a comparação com os protótipos com ligação típica (LTE1, LTE2 e LTE3), que apresentaram colapso local neste ponto. As Figuras 5.44, 5.45 e 5.46 mostram a deformada da ligação, respectivamente dos protótipos LTDE1, LTDE2 e LTDE3, quando a estrutura esta submetida a uma carga de 25kN. Note que a ligação com distanciador não apresenta rotação que caracteriza o colapso local. Pode ser observada uma deformação na região do amassamento das diagonais. Tal deformação pode ser amenizada com o encurtamento desta região. Porém o modelo de ligação com distanciador (LTDE) teve melhor desempenho que o modelo de ligação típica (LTE).



Figura 5.44 – Deformada da ligação com carga de 25kN – Protótipo LTDE1



Figura 5.45 – Deformada da ligação com carga de 25kN – Protótipo LTDE2



Figura 5.46 – Deformada da ligação com carga de 25kN – Protótipo LTDE3

### 5.3.2.3. Deslocamentos da estrutura durante ensaio

As Figuras 5.47, 5.48 e 5.49 mostram os gráficos carregamentos versus deslocamentos nodais, respectivamente para os protótipos LTDE1, LTDE2 e LTDE3. Desta forma observe na Figura 5.47 o comportamento do protótipo LTDE1, onde foi observado um colapso global com uma carga de 38kN e deslocamento do nó 9 central de 34,18mm. Na Figura 5.48 observe o colapso global do protótipo LTDE2 com uma carga de 39kN e deslocamento do nó 9 central de 33,43mm. A Figura 5.49 mostra o comportamento da estrutura durante o ensaio, obteve o colapso global com uma carga de 36kN e deslocamento do nó 9 central de 40,02mm. O ponto que caracterizou o final destes três ensaios foi à perda de carga devido ao colapso de barras comprimidas de forma abrupta.

Como foi observado no nó 9 está a ligação que apresenta o maior deslocamento vertical do protótipo, logo é a ligação determinante para a comparação dos modelos. A Figura 5.50 mostra o diagrama carregamento versus deslocamento do nó 9 para os três ensaios realizados LTDE1, LTDE2 e LTDE3. Note nesta figura que a linha “Polinômio (MÉDIA)” representa a linha de tendência polinomial da média aritmética entre os ensaios LTDE1, LTDE2 e LTDE3.

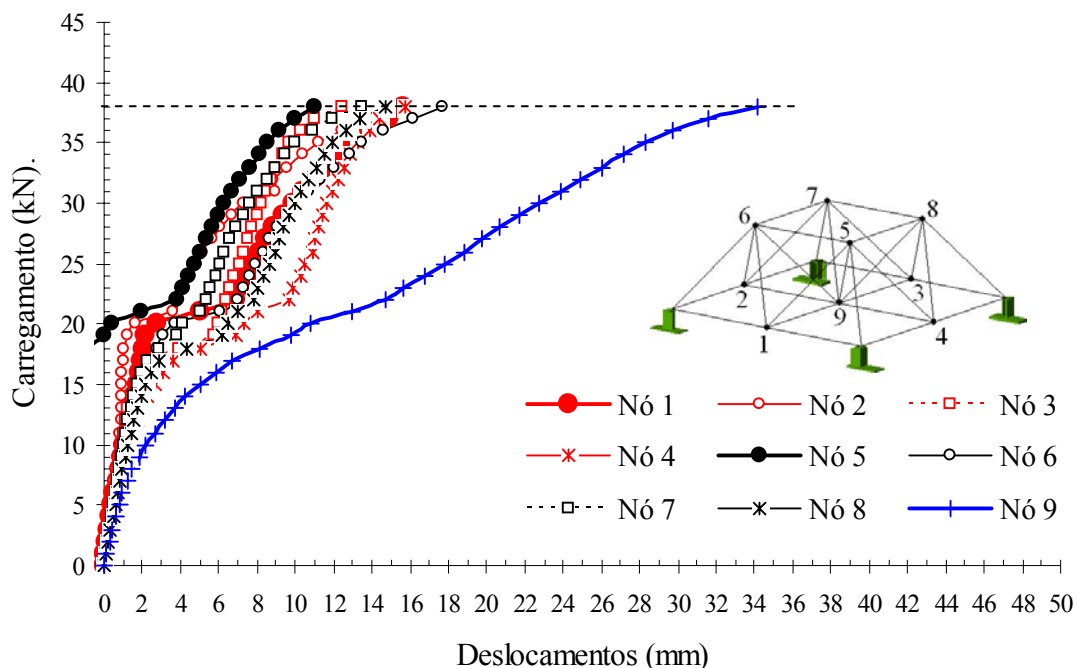


Figura 5.47 – Diagrama carregamento versus deslocamento nodais – Protótipo LTDE1

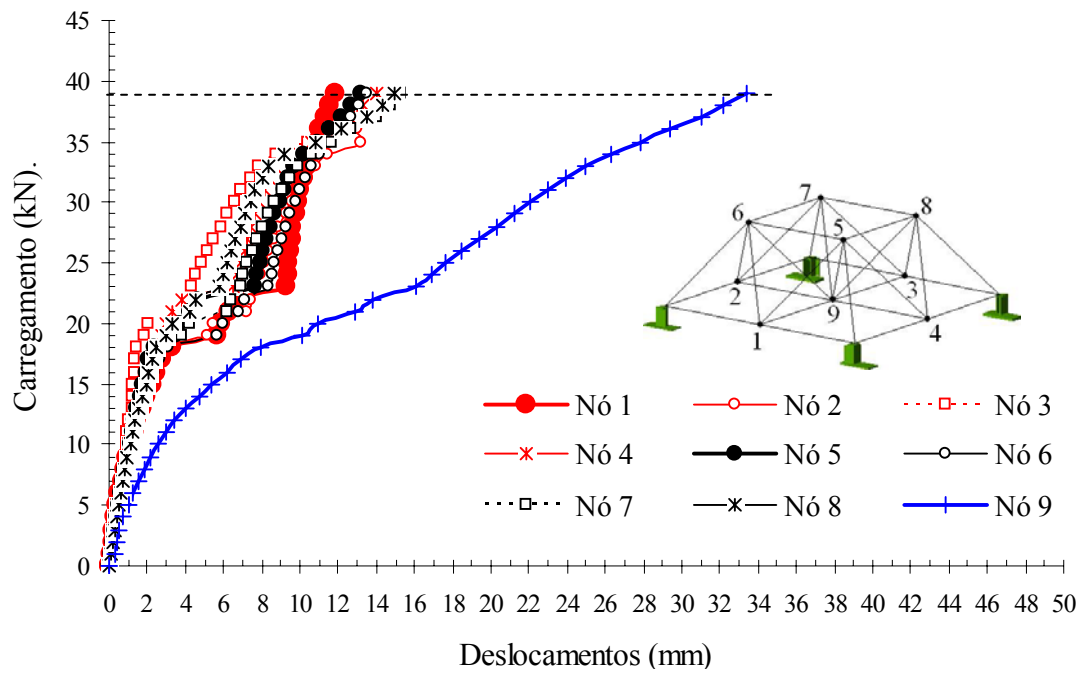


Figura 5.48 – Diagrama carregamento versus deslocamento nodais – Protótipo LTDE2

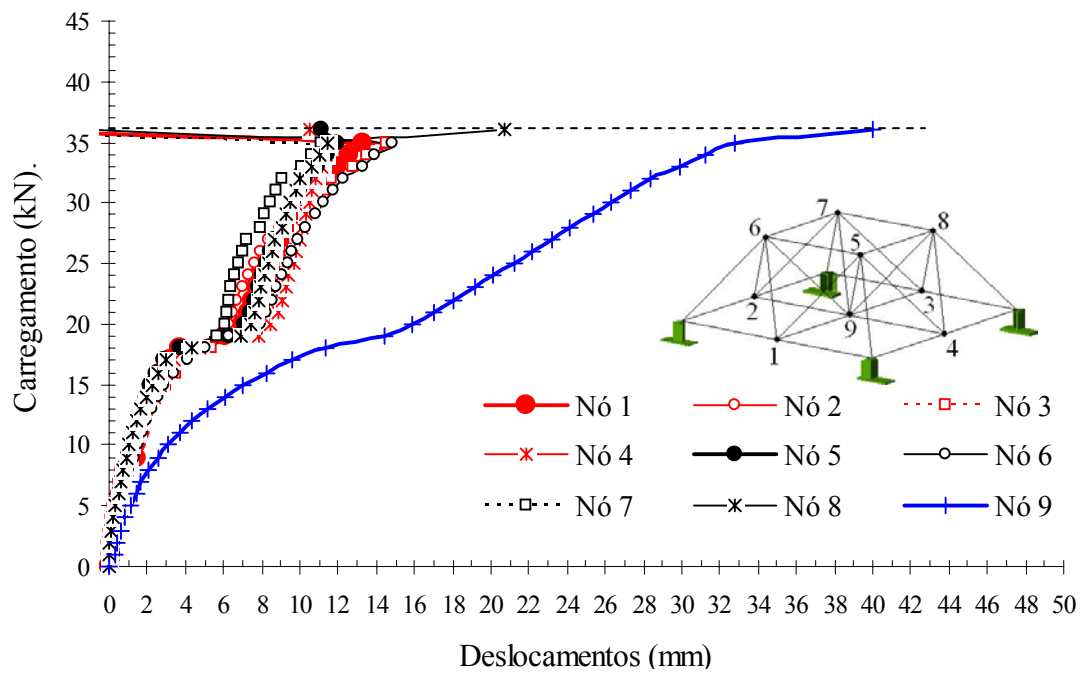


Figura 5.49 – Diagrama carregamento versus deslocamento nodais – Protótipo LTDE3



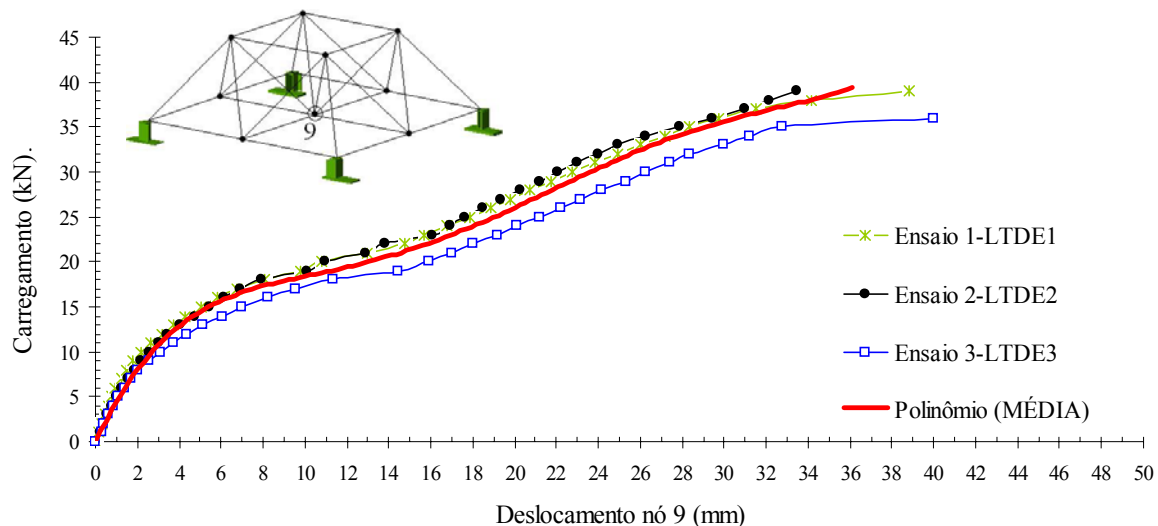


Figura 5.50 – Diagrama carregamento versus deslocamento – (LTDE1, LTDE2 e LTDE3)

#### 5.3.2.4. Final do ensaio – Colapso global

As Figuras 5.51, 5.52 e 5.53 mostram as conformações finais das barras, respectivamente das estruturas LTDE1, LTDE2 e LTDE3, em consequência das cargas de colapso. O colapso global ocorreu de forma abrupta caracterizado pela perda de resistência ao carregamento aplicado. O colapso global foi proveniente do colapso local da extremidade dos banzos. Tal fato caracterizou os três protótipos ensaiados LTDE1, LTDE2 e LTDE3, respectivamente com cargas de colapso de 38kN, 40kN e 36kN.



Figura 5.51 – Colapso global da estrutura com carga de 38kN – Protótipo LTDE1



Figura 5.52 – Colapso global da estrutura com carga de 40kN – Protótipo LTDE2



Figura 5.53 – Colapso global da estrutura com carga de 36kN – Protótipo LTDE3

### 5.3.3. Ensaio das estruturas com ligações típicas com distanciador e cobrejunta

Nas Tabelas de D.7, D.8 e D.9, do Apêndice D, podem ser observados os resultados dos ensaios das estruturas com ligações típicas com distanciador e chapa cobrejunta, respectivamente para os protótipos LTDCE1, LTDCE2 e LTDCE3. Vale salientar que não existem diferenças construtivas, bem como dimensões de peças, apertos, montagem e execução de ensaio entre estes três protótipos. Os três ensaios foram realizados de forma igual para possibilitar um tratamento estatístico.

#### 5.3.3.1. Verificação do momento fletor na ligação

Como foi discriminado no item 5.1.5 (disposição de sensores de deformação) foram colados dois extensômetros em um banzo superior da estrutura. Sendo um sensor no perímetro superior e outro no perímetro inferior do tubo. Desta forma uma diferença entre as deformações lidas nos extensômetros caracteriza um esforço de flexão na barra e consequentemente momento fletor na ligação da estrutura.

As Figuras 5.54, 5.55 e 5.56 mostram os diagramas carregamento versus deformação dos protótipos LTDCE1 LTDCE2 e LTE3, respectivamente. Note que as leituras obtidas nos extensômetros EER-Superior e EER-Inferior são diferentes, caracterizando diferentes estados de deformação. Desta forma pode-se concluir que existe um momento na ligação que ocasiona sua rotação.

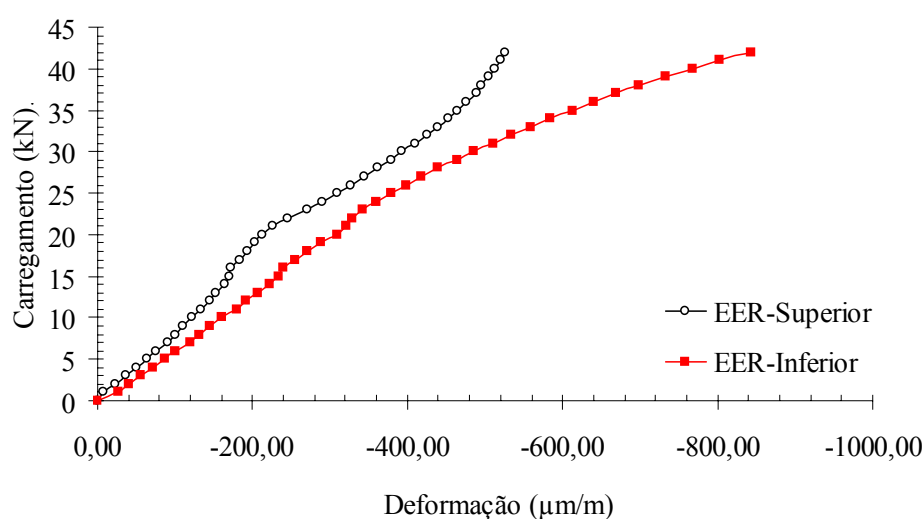


Figura 5.54 – Diagrama carregamento versus deformação no banzo – Protótipo LTDCE1

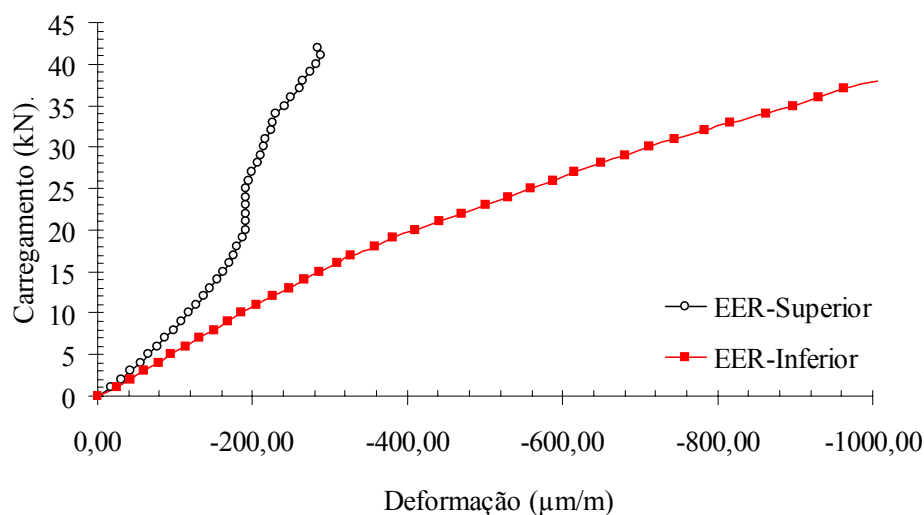


Figura 5.55 – Diagrama carregamento versus deformação no banço – Protótipo LTDCE2

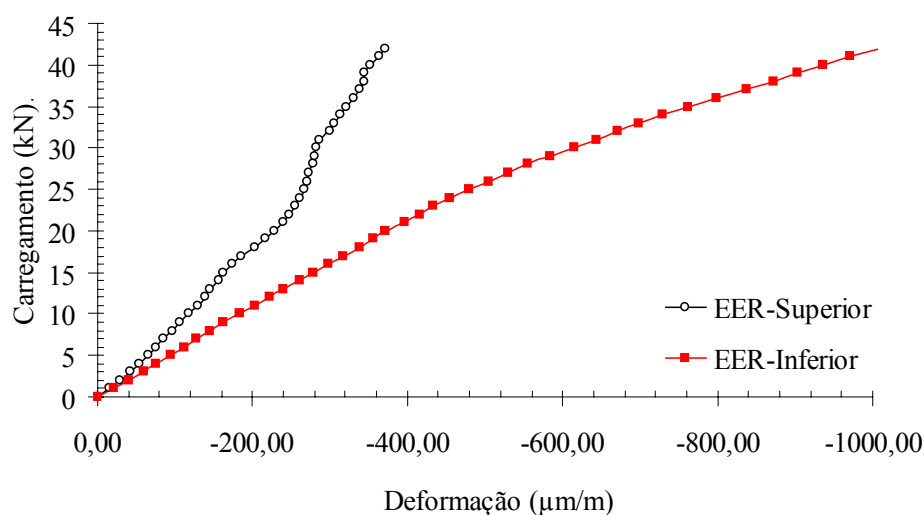


Figura 5.56 – Diagrama carregamento versus deformação no banço – Protótipo LTDCE3

Quanto maior a diferença entre a deformação lida no extensômetro superior em relação ao extensômetro inferior maior a flexão na barra. Desta forma para melhor caracterizar este fenômeno foram calculadas as diferenças entre os EER superior e inferior dos protótipos 2 e 3, respectivamente LTDCE1, LTDCE2 e LTDCE3. Estas diferenças de deformação foram plotadas no gráfico da Figura 5.57. Note nesta figura que a linha “Polinômio (MÉDIA)” representa a linha de tendência polinomial da média aritmética entre LTDCE1, LTDCE2 e LTDCE3.

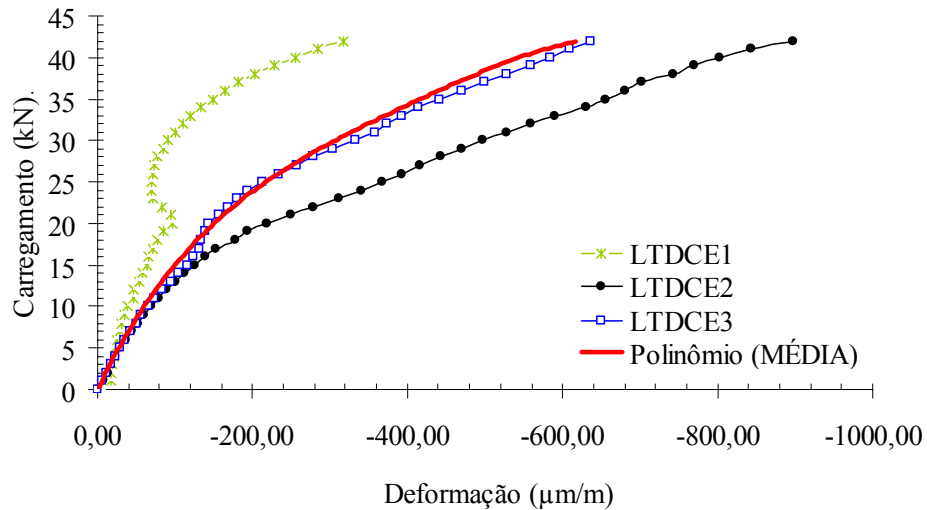


Figura 5.57 – Diagrama carregamento versus diferença de deformação – (LTDCE1, LTDCE2 e LTDCE3)

### 5.3.3.2. Deformada da ligação durante ensaio

Neste item foi analisada a deformada da ligação quando a carga de ensaio atinge 25kN. Esta intensidade de carga foi determinada para possibilitar a comparação com os protótipos com ligação típica (LTE1, LTE2 e LTE3), que apresentaram colapso local neste ponto. As Figuras 5.58, 5.59 e 5.60 mostram a deformada da ligação, respectivamente dos protótipos LTDCE1, LTDCE2 e LTDCE3, quando a estrutura esta submetida a uma carga de 25kN. Note que a ligação com distanciador não apresenta rotação que caracteriza o colapso local. Pode ser observada uma deformação na região do amassamento das diagonais. Tal deformação pode ser amenizada com o encurtamento desta região. Porém o modelo de ligação LTDCE teve melhor desempenho que o modelo de ligação típica (LTE).



Figura 5.58 – Deformada da ligação com carga de 25kN – Protótipo LTDCE1



Figura 5.59 – Deformada da ligação com carga de 25kN – Protótipo LTDCE2



Figura 5.60 – Deformada da ligação com carga de 25kN – Protótipo LTDCE3

### 5.3.3.3. Deslocamentos da estrutura durante ensaio

As Figuras 5.61, 5.62 e 5.63 mostram os gráficos carregamentos versus deslocamentos nodais, respectivamente para os protótipos LTDCE1, LTDCE2 e LTDCE3. Desta forma obteve na Figura 5.61 o comportamento do protótipo LTDCE1, onde foi observado um colapso global com uma carga de 42,7kN e deslocamento do nó 9 central de 31,76mm. Na Figura 5.62 obteve o colapso global do protótipo LTDCE2 com uma carga de 42,8kN e deslocamento do nó 9 central de 31,75mm. A Figura 5.63 mostra o comportamento da estrutura LTDCE3 durante o ensaio, obteve o colapso global com uma carga de 42,4kN e deslocamento do nó 9 central de 34,88mm. O ponto que caracterizou o final destes três ensaios foi à perda de carga devido ao colapso de barras comprimidas de forma abrupta.

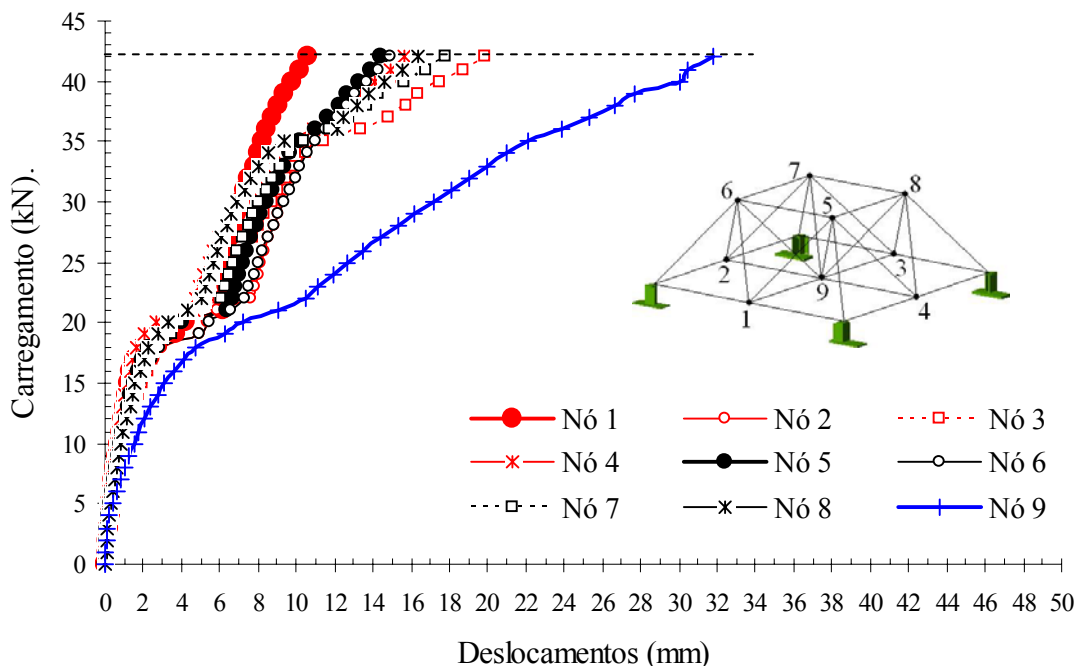


Figura 5.61 – Diagrama carregamento versus deslocamento nodais – Protótipo LTDCE1

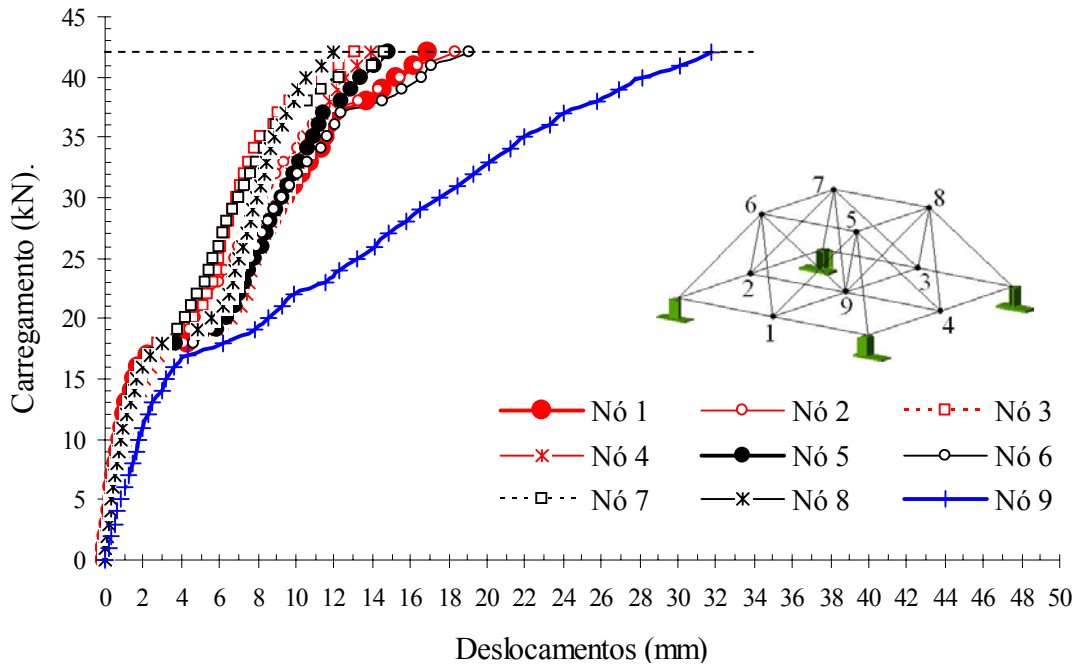


Figura 5.62 – Diagrama carregamento versus deslocamento nodais – Protótipo LTDCE2

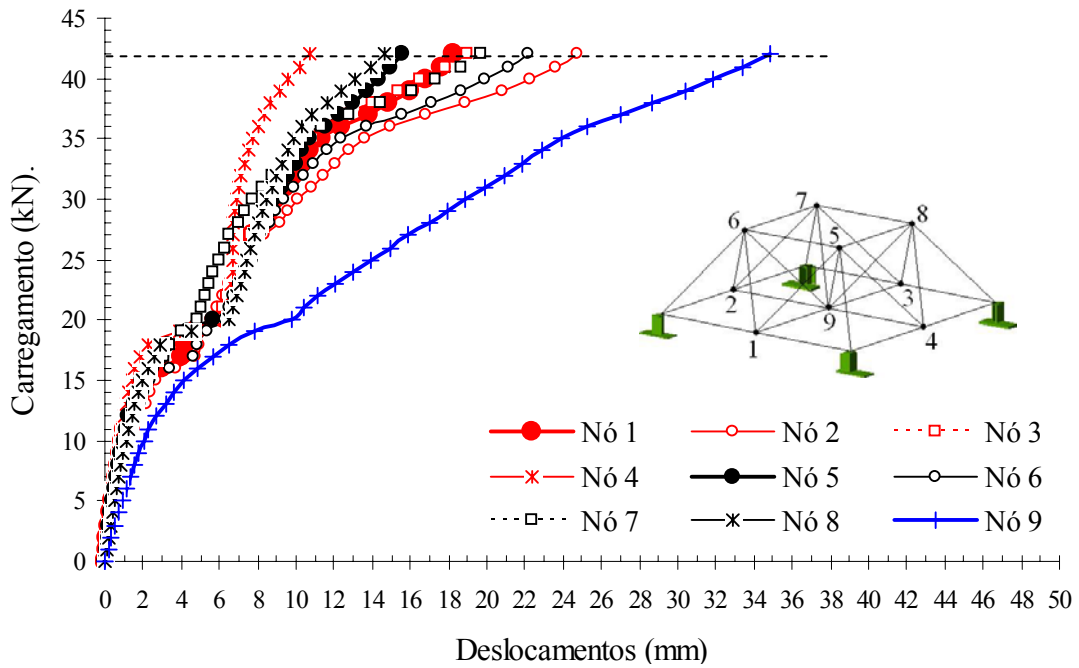


Figura 5.63 – Diagrama carregamento versus deslocamento nodais – Protótipo LTDCE3

Como foi observado no nó 9 está a ligação que apresenta o maior deslocamento vertical do protótipo, logo é a ligação determinante para a comparação dos modelos. A Figura 5.64 mostra o diagrama carregamento versus deslocamento do nó 9 para os três ensaios realizados LTDCE1, LTDCE2 e LTDCE3. Note nesta figura que a linha “Polinômio (MÉDIA)” representa a linha de tendência polinomial da média aritmética entre os ensaios LTDCE1, LTDCE2 e LTDCE3.

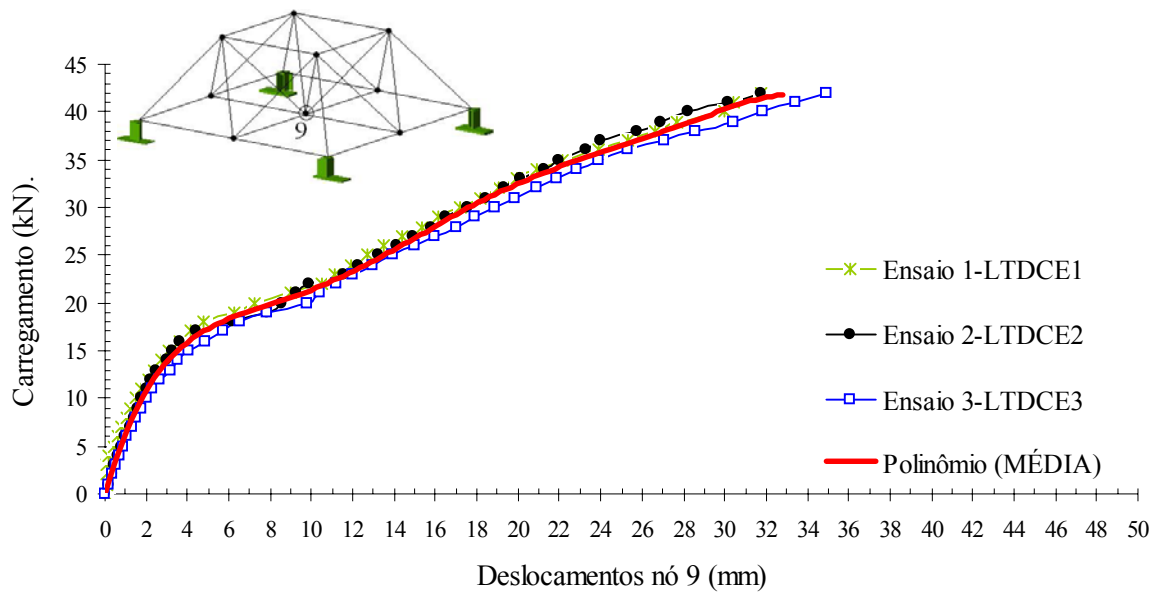


Figura 5.64 – Diagrama carregamento versus deslocamento – (LTDCE1, LTDCE2 e LTDCE3)

#### 5.3.3.4. Final do ensaio – Colapso global

As Figuras 5.65, 5.66 e 5.67 mostram as conformações finais das barras, respectivamente das estruturas LTDCE1, LTDCE2 e LTDCE3, em consequência das cargas de colapso. O colapso global ocorreu de forma abrupta caracterizado pela perda de resistência ao carregamento aplicado. O colapso global foi proveniente da instabilidade dos elementos sujeitos a compressão. Tal fato caracterizou os três protótipos LTDCE1, LTDCE2 e LTDCE3, respectivamente com cargas de colapso de 42,7kN, 42,8kN e 42,4kN.



Figura 5.65 – Colapso global da estrutura com carga de 42,7kN – Protótipo LTDCE1



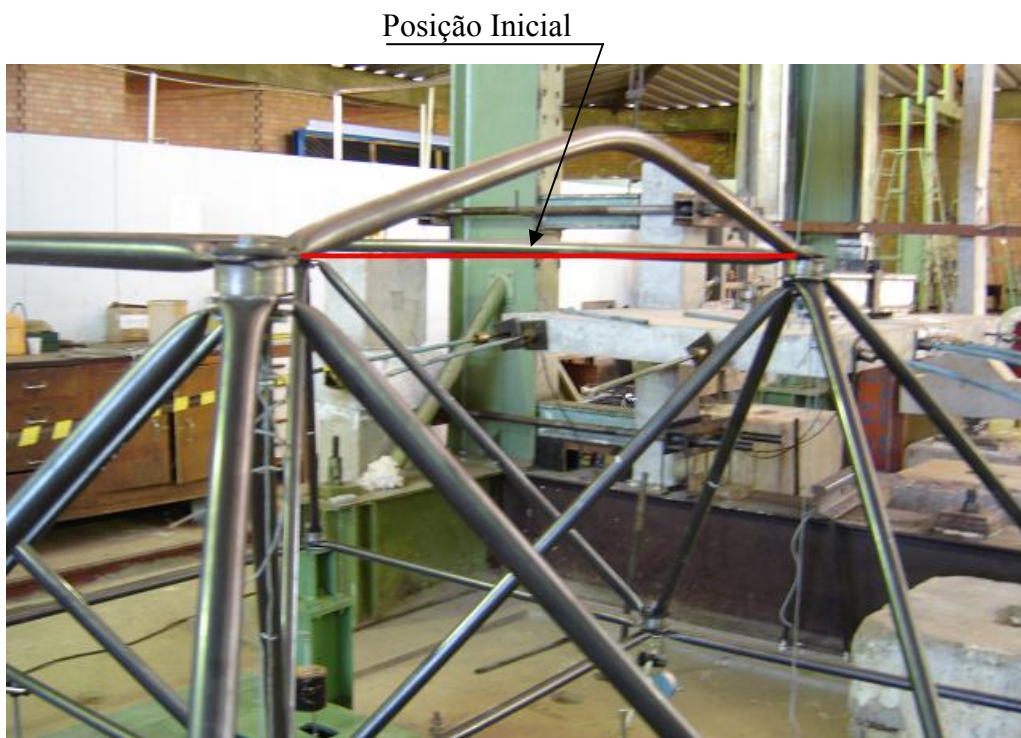


Figura 5.66 – Colapso global da estrutura com carga de 42,8kN – Protótipo LTDCE2



Figura 5.67 – Colapso global da estrutura com carga de 42,4kN – Protótipo LTDCE3

## 5.4. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

### 5.4.1. Verificação do momento fletor na ligação

As Figuras 5.29, 5.43 e 5.57 mostram os diagramas carregamento versus diferença de deformação para os três modelos de ligação em estudo, LTE, LTDE e LTDCE. Note nestes diagramas a linha “Polinômio (MÉDIA)” que representa a linha de tendência polinomial da média aritmética entre os ensaios realizados para cada modelo. Desta forma a Figura 5.68 apresenta de forma comparativa o diagrama carregamento versus diferença de deformação para os três modelo. Onde a linha “Polinômio (LTE)” representa a linha de tendência polinomial da média aritmética entre os ensaios LTE2 e LTE3; a linha “Polinômio (LTDE)” representa da mesma forma os ensaios LTDE1 , LTDE2 e LTDE3; e a linha “Polinômio (LTDCE)” representa os ensaios LTDCE, LTDCE e LTDCE.

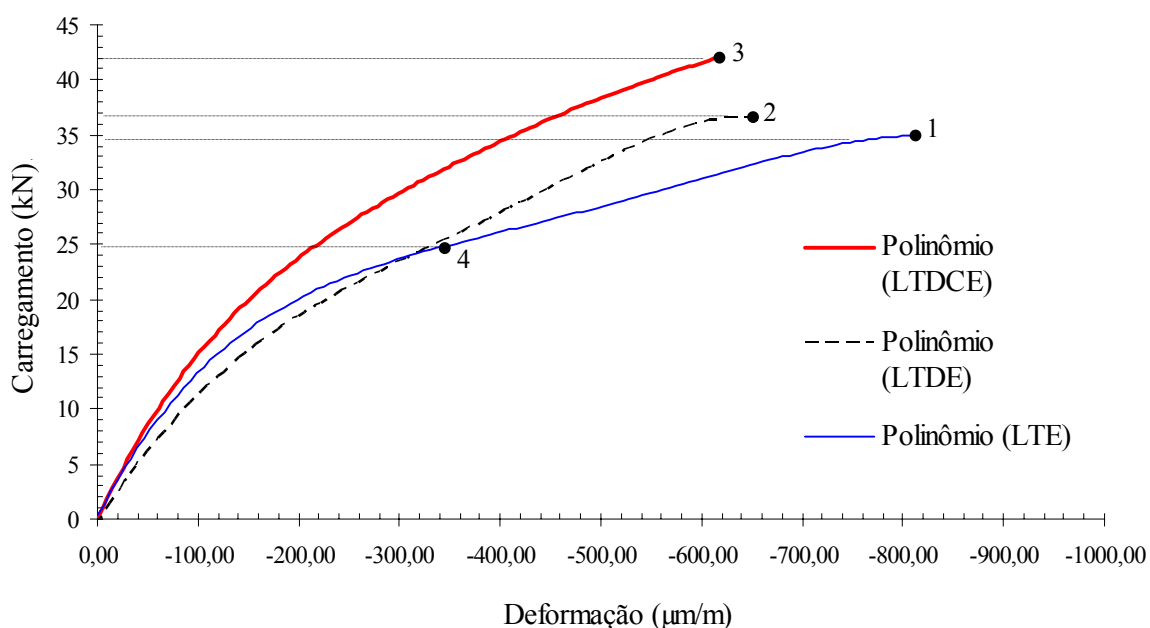


Figura 5.68 – Diagrama carregamento x diferença de deformação (LTE, LTDE e LTDCE)

Quanto maior a diferença de deformação entre os EER superior e inferior maior a flexão na barra. Desta forma, observando o diagrama da Figura 5.68, pode-se concluir que as estruturas com ligações típicas (LTE) apresentam maior momento fletor que as estruturas com ligações típicas com distanciador e cobrejunta (LTDCE). Os pontos 1, 2 e 3 representam as diferenças de deformação obtidas com os carregamentos de colapso global das estruturas, respectivamente para os modelo LTE, LTDE e LTDCE. Note que os modelos LTDCE apresentam menor momento em relação ao modelo LTE.

#### 5.4.2. Deslocamento vertical do nó 9 nas estruturas

As Figuras 5.36, 5.50 e 5.64 mostram os diagramas carregamento versus deslocamento vertical do nó 9 para os três modelos de ligação em estudo, LTE, LTDE e LTDCE. Note nestes diagramas a linha “Polinômio (MÉDIA)” que representa a linha de tendência polinomial da média aritmética entre os ensaios realizados para cada modelo. Desta forma a Figura 5.69 apresenta de forma comparativa o diagrama carregamento versus deslocamento vertical do nó 9 para os três modelo. Onde a linha “Polinômio (LTE)” representa a linha de tendência polinomial da média aritmética entre os ensaios LTE1, LTE2 e LTE3; a linha “Polinômio (LTDE)” representa os ensaios LTDE1, LTDE2 e LTDE3; e a linha “Polinômio (LTDCE)” os ensaios LTDCE, LTDCE e LTDCE.

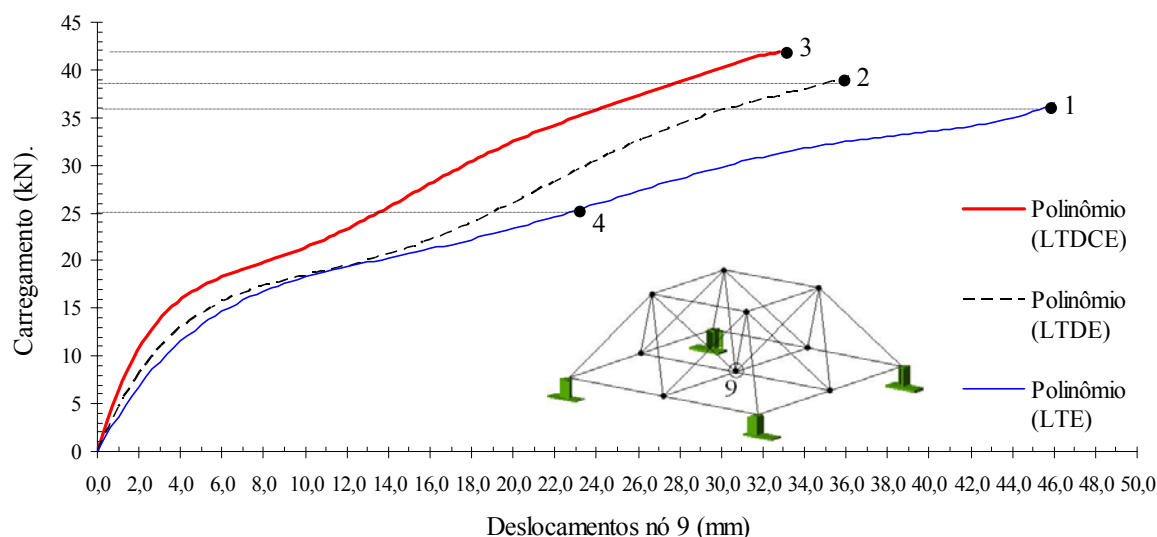


Figura 5.69 – Diagrama carregamento versus deslocamento vertical do nó 9 (LTE, LTDE e LTDCE)

Observando o diagrama da Figura 5.69, pode-se concluir que as estruturas com ligações típicas (LTE) apresentam maior deslocamento com a aplicação de carga que as estruturas com ligações típicas com distanciador e cobrejunta (LTDCE). O ponto “1” (36kN; 46mm), ponto “2” (38kN; 36mm) e ponto “3” (42kN) representam os pontos de deslocamentos obtidos com os carregamentos de colapso global das estruturas, respectivamente para os modelos LTE, LTDE e LTDCE. Note que os modelos LTDCE apresentam menor deslocamento para uma maior carga de colapso em relação aos modelos LTE e LTDE. Apesar do ensaio das estruturas com ligação típica ter prosseguido até a estrutura não absorver mais carregamento (ponto “1”), o colapso da estrutura com nó típico é considerado quando esta sofre deformações excessivas (ponto “4”).

### 5.4.3. Deformada e colapso das estruturas

As Figuras 5.70, 5.72 e 5.74 mostram as deformadas das ligações LTE, LTDE e LTDCE, respectivamente para uma carga de atuação de 25kN. Note que a estrutura LTE apresenta um colapso local para esta carga. As estruturas LTDE e LTDCE apresentam uma configuração de estabilidade para a mesma carga.



Figura 5.70 – Deformada - LTE (25kN)

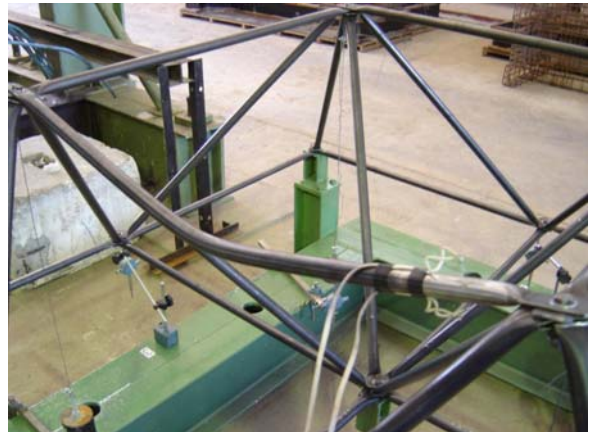


Figura 5.71 – Colapso da LTE



Figura 5.72 – Deformada – LTDE (25kN)



Figura 5.73 – Colapso da LTDE



Figura 5.74 – Deformada - LTDCE (25kN)



Figura 5.75 – Colapso da LTDCE

As Figuras 5.71, 5.73 e 5.75 mostram as configurações finais das estruturas LTE, LTDE e LTDCE, respectivamente, para uma carga de colapso global. No protótipo LTE o colapso global ocorreu de forma abrupta nos elementos comprimidos com cargas na estrutura de 35kN, 35,9kN e 35,9kN, por ordem de ensaio. A Figura 5.71 exemplifica os colapsos que ocorreram na diagonal, no banzo superior e no banzo superior, cronologicamente. No protótipo LTDE colapso global foi proveniente do colapso local da extremidade dos banzos com cargas de colapso de 38kN, 40kN e 36kN, por ordem de ensaio. O colapso global do protótipo LTDCE foi proveniente da instabilidade dos elementos sujeitos a compressão. Tal fato caracterizou os três protótipos com cargas de colapso de 42,7kN, 42,8kN e 42,4kN.

A estrutura com ligação com nó típico, distanciador e chapa cobrejunta (LTDCE) foi considerado como o produto final do reforço do nó típico para este trabalho. Foi constatado um aumento da rigidez da estrutura LTDCE (nó típico com distanciador e chapa cobrejunta), devido a menores deslocamentos para maiores carregamentos aplicados em relação à estrutura com nó típico (LTE).

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. O Capítulo 6 apresenta um estudo experimental dinâmico comparando estruturas com nó típico e estruturas com o reforço proposto LTDCE.

## 6. ESTUDO EXPERIMENTAL COM CARREGAMENTO DINÂMICO

Neste capítulo pode-se observar toda a instrumentação, geometria de protótipos, materiais e equipamentos utilizados nos ensaios dinâmicos, bem como os resultados dos ensaios.

### 6.1. PROTÓTIPOS DO ENSAIO COM CARREGAMENTO DINÂMICO

#### 6.1.1. Discriminação dos elementos dos protótipos

A geometria dos protótipos da etapa dinâmica é a mesma dos protótipos utilizados no estudo estático. Adotando, desta forma, um sistema modular piramidal com base de 1000mm e altura de 707mm. O ângulo de inclinação das diagonais é de 45°. As estruturas são compostas por diagonais, banzos e ligações. As estruturas estão fixadas em uma base de ensaio e o carregamento é imposto por um sistema mecânico.

Foram ensaiados dois modelos de estruturas, diferenciadas pelo detalhe da ligação. As Figuras 6.1 e 6.2 mostram os modelos de ligações adotados nos ensaios dinâmicos, respectivamente a ligação típica e a ligação típica com distanciador e cobrejunta. Nos dois modelos foram mantidas as dimensões dos banzos e diagonais.

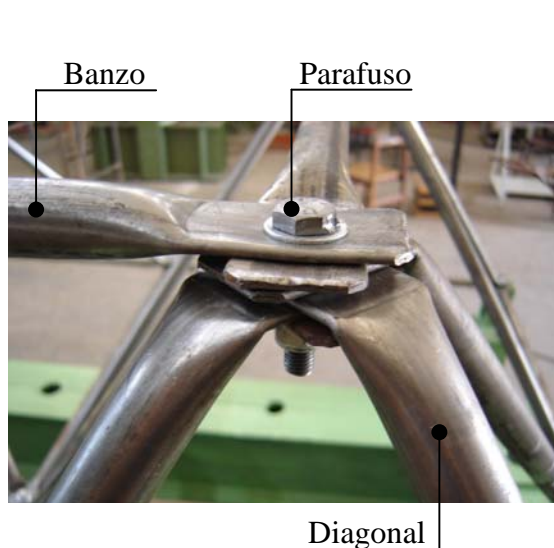


Figura 6.1 – Ligação típica – LTD

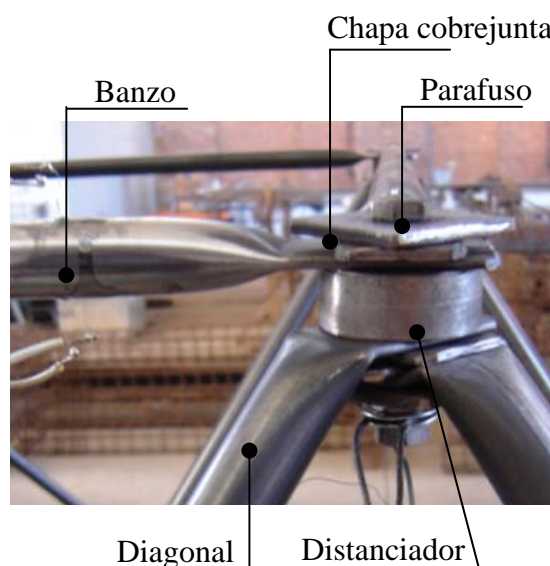


Figura 6.2 – Ligação típica com distanciador e cobrejunta - LTDCD

### 6.1.2. Rótulos de identificação dos protótipos

Foram realizados quatro ensaios com cada um dos dois modelos de ligação, totalizando oito ensaios dinâmicos. A Tabela 6.1 mostra a lista dos rótulos adotados nos protótipos, a fim de organizar a realização dos ensaios e processamento dos resultados.

Tabela 6.1 – Lista de abreviatura dos protótipos dos ensaios experimentais dinâmicos

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 com distanciador e cobrejunta - ensaio dinâmico 1
LTDCD2	Ligação típica com distanciador e cobrejunta - ensaio dinâmico 2
LTDCD3	Ligação típica com distanciador e cobrejunta - ensaio dinâmico 3
LTDCD4	Ligação típica com distanciador e cobrejunta - ensaio dinâmico 4

### 6.1.3. Lista dos elementos construtivos dos protótipos

A Tabela 6.2 expõe o quantitativo dos materiais utilizados nos oito ensaios dinâmicos. Nesta podem ser observadas as quantidades de materiais por modelo unitário de protótipo (1 unid.), por modelo de protótipo (4 unid.) e o total de material em todos os modelos. Como o distanciador foi fabricado em eixo maciço, não houve desgaste deste durante os ensaios, logo este foi reaproveitado nos ensaios necessários (\*).

Tabela 6.2 – Quantitativo dos materiais utilizados nos ensaios dinâmicos

RELAÇÃO DO MATERIAL	LTE		LTDCE		Total
	1 unid.	4 unid.	1 unid.	4 unid.	
Banzo - Tubo Ø25,4x1060mm	16	64	16	64	128
Diagonal - Tubo Ø25,4x1076mm	16	64	16	64	128
Distanciador - Eixo Ø50x20mm	-	-	13	13	13(*)
Cobrejunta - Chapa #3/4"	-	-	26	104	104
Parafuso de aço – ASTM Ø10mm	1	3	1	3	6
Parafuso sextavado - Ø10mm	12	48	-	-	48
Parafuso sextavado - Ø10mm	-	-	12	48	48
Porca p/ parafuso Ø10mm	13	52	13	52	104
Arruela p/ parafuso Ø10mm	26	104	26	104	208

#### 6.1.4. Dimensões dos elementos dos protótipos

As Figuras 5.22 e 5.23 mostram os desenhos dos banzos e diagonais, respectivamente. Note o detalhe do amassamento das extremidades e furação. A Figura 5.24 mostra o detalhe da diagonal em sua configuração final, após dobrar as extremidades. Na Figura 5.25 e 5.26 podem ser observados o distanciador e a chapa cobrejunta, respectivamente.

### 6.2. INSTRUMENTAÇÃO DOS PROTÓTIPOS DE ENSAIO

Neste item segue os detalhes da fixação da estrutura em base de ensaio, o sistema de oscilação dos protótipos, detalhes do monitoramento dos ciclos, equipamentos de alimentação de energia e apresentação do inversor de frequência do motor elétrico.

#### 6.2.1. Fixação da estrutura em base de ensaio

Para o ensaio com carregamento dinâmico foi utilizada a mesma base de ensaio do estudo estático, porém com algumas adaptações. Nesta etapa dinâmica a base de ensaio foi apoiada sobre blocos de concreto, fora da laje de reação. Note na Figura 6.3 a localização dos blocos de concreto, bem como a colocação de uma viga para suporte do sistema mecânico. Quanto ao modo de fixação da estrutura treliçada na base permanece o suporte de ligação como pode ser apreciado nas Figuras 5.2 e 5.3 do capítulo 5.

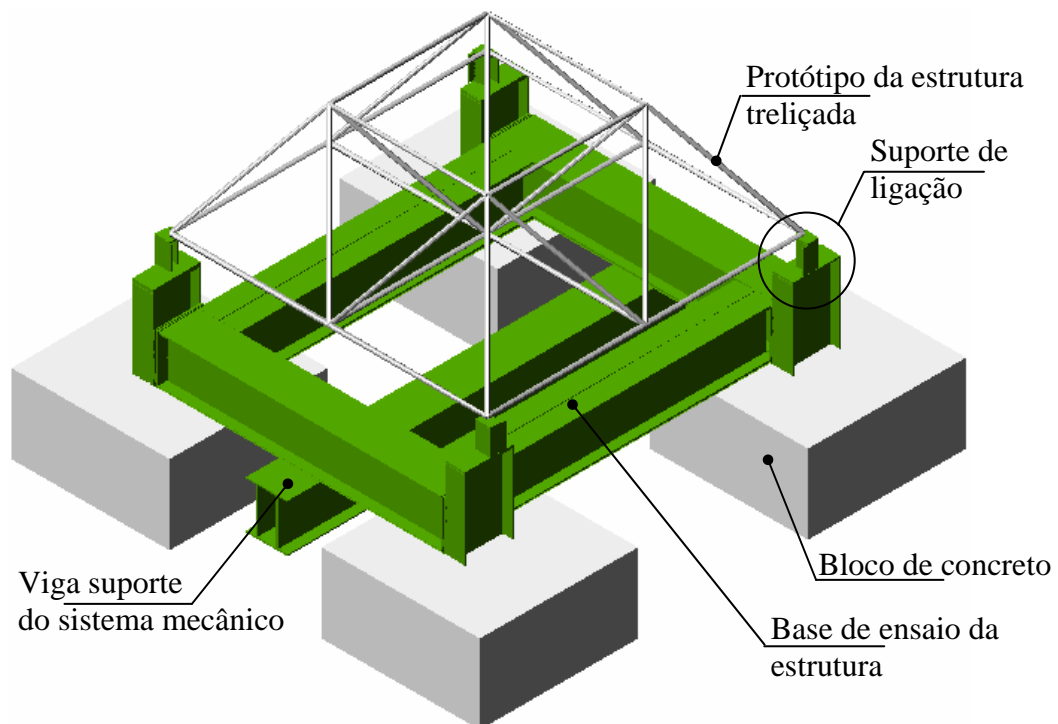


Figura 6.3 – Estrutura base para ensaio dos protótipos do estudo dinâmico



### 6.2.2. Sistema de aplicação de carga alternada nos protótipos

Foi imposta nos protótipos, do ensaio com carregamento 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 6.4. Note que este sistema mecânico foi fixado na base de ensaio.

A Figura 6.5 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). O sistema de controle de rotações, painel de leitura do contador de ciclos, bem como os equipamentos de alimentação de energia serão detalhados posteriormente. A frequência do excêntrico foi constante para todos os ensaios e foi de 220rpm.

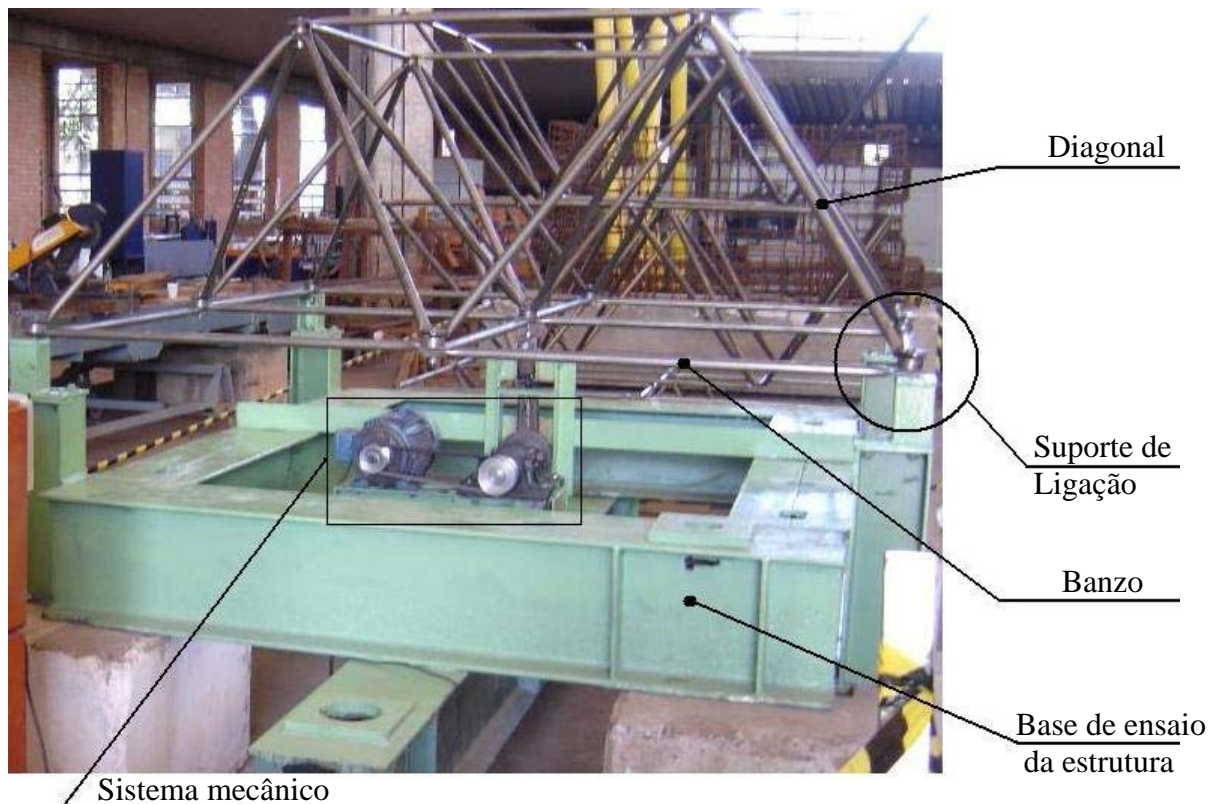


Figura 6.4 – Elementos de composição dos protótipos do ensaio dinâmico

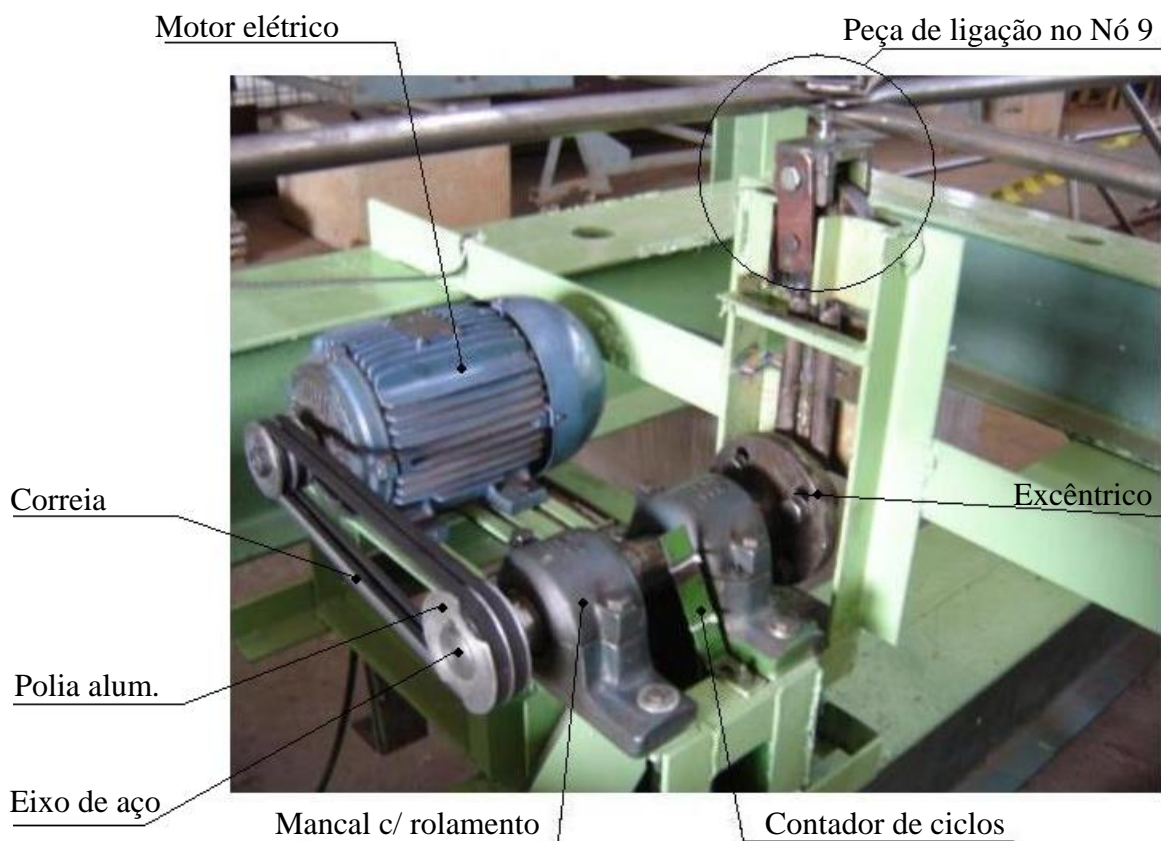


Figura 6.5 – Sistema mecânico de oscilação do ensaio dinâmico

O sistema de oscilação impõe um deslocamento repetitivo e uniforme ao protótipo através do nó 9. A Figura 6.6 mostra em detalhe a ligação do sistema de oscilação à estrutura. 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.

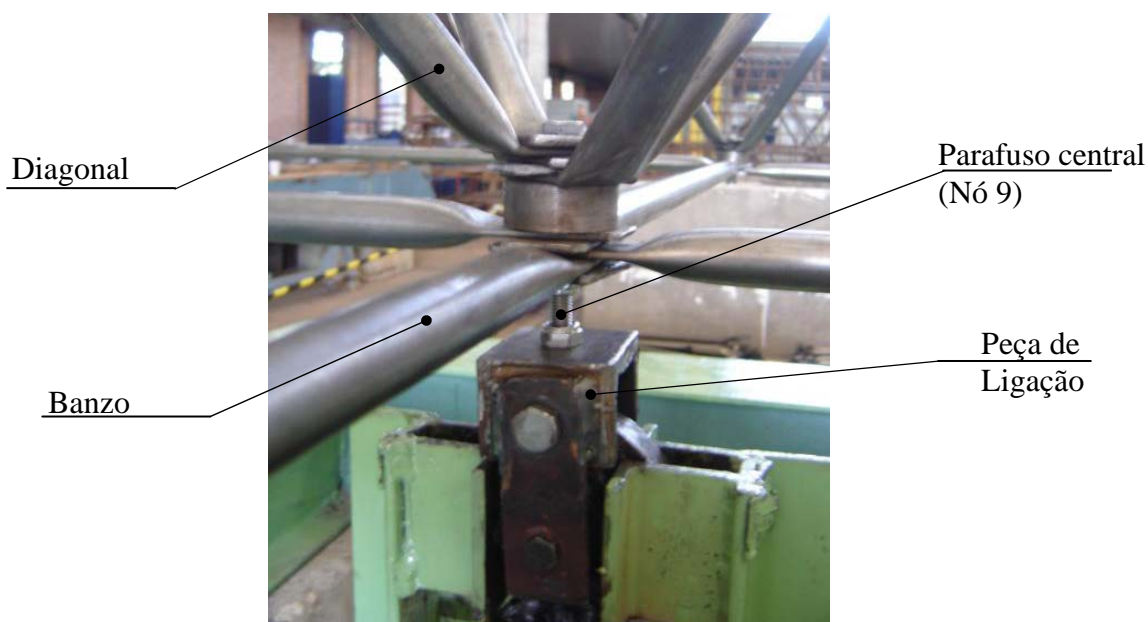


Figura 6.6 – Detalhe da ligação do sistema de oscilação ao nó 9

### 6.2.3. Monitoramento dos ciclos, alimentação de energia e controlador de frequência.

A Figura 6.7 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 ao painel de leitura, Figura 6.8. Este painel possui um circuito programado para codificar o sinal do sensor e gerar uma saída visual em um visor de cristal liquido.

Este painel de leitura é alimentado por uma corrente de 12v, para tanto foi utilizado um transformador. Este foi ligado a um “No break” (equipamento eletrônico de manutenção de energia), o qual garante energia ao painel em uma eventual falta de energia do laboratório.

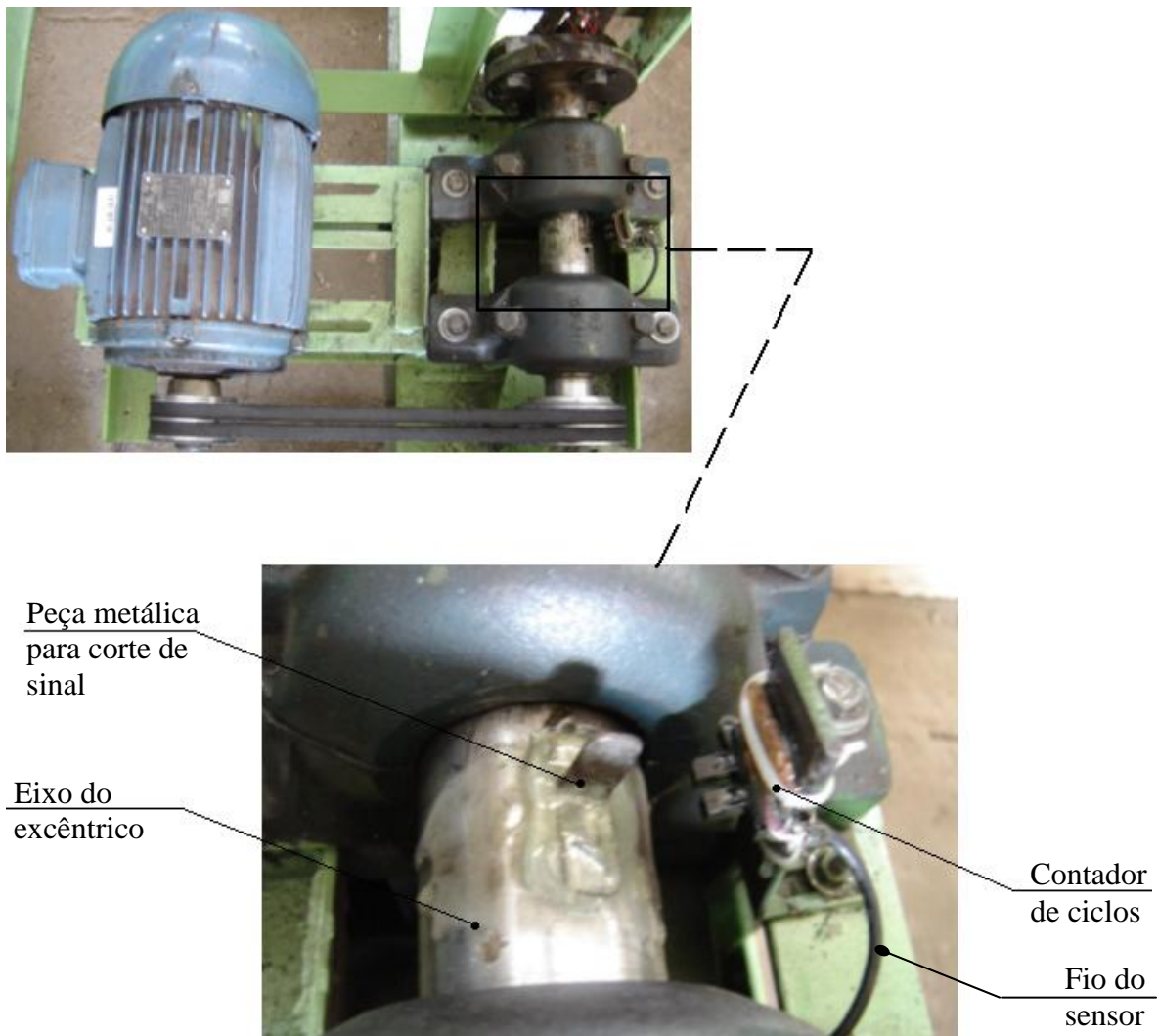


Figura 6.7 – Sistema de contagem dos ciclos do ensaio dinâmico



Figura 6.8 – Painel de leitura dos ciclos do ensaio dinâmico

A Figura 6.9 mostra o esquema de alimentação de energia dos equipamentos do ensaio dinâmico. O inversor de frequência do motor é utilizado para o controle de velocidade do ciclo. Este inversor ajusta a diferença de potencial elétrico para a frequência do motor desejada. A Figura 6.10 mostra o variador de frequência WEG (série CFW-08).

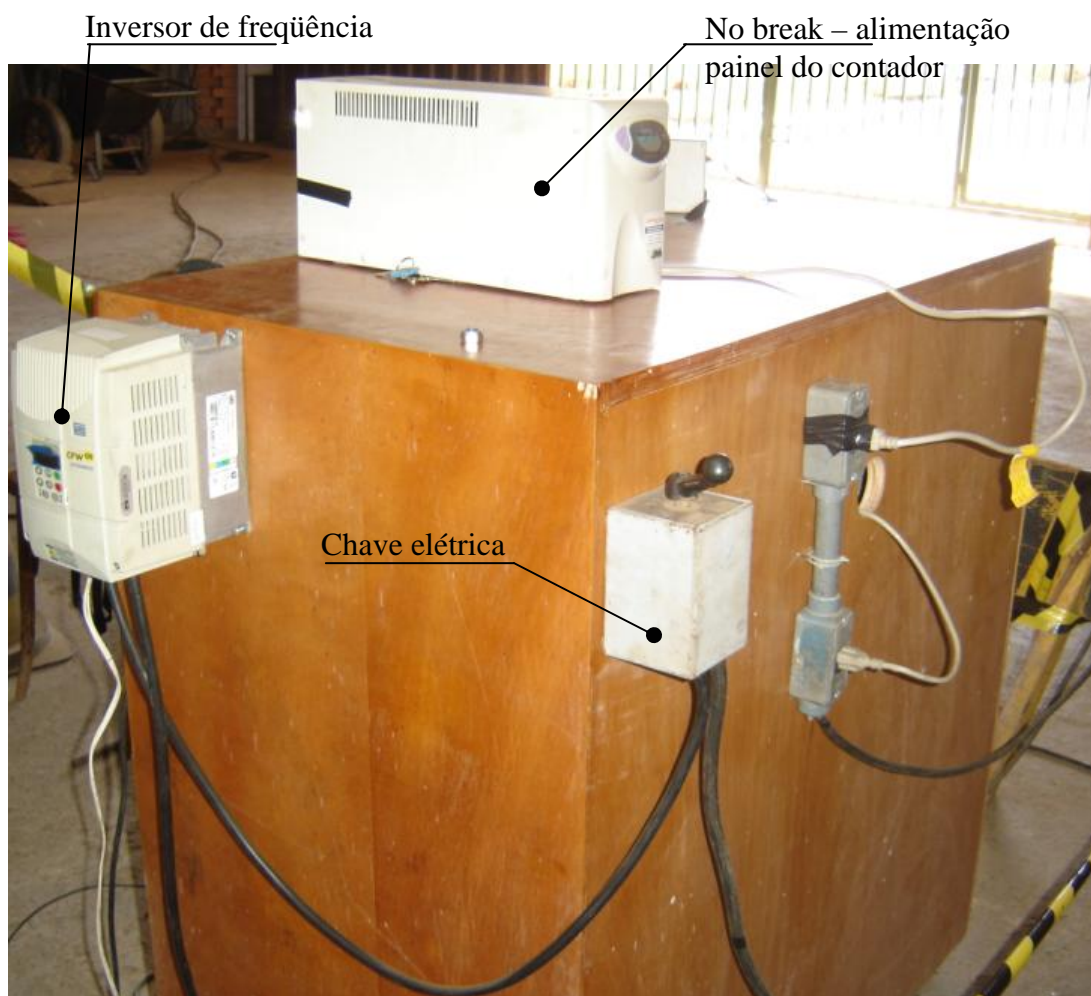


Figura 6.9 – Alimentação de energia dos equipamentos do ensaio dinâmico



Figura 6.10 – Inversor de frequência do motor elétrico

### 6.3. DADOS GERAIS DO ENSAIO DINÂMICO

#### 6.3.1. Ajustes finais antes do ensaio

O deslocamento imposto no protótipo pelo sistema de oscilação foi aferido com um defletômetro digital (Mitutoyo). A Figura 6.11 mostra em detalhe o procedimento adotado para o ajuste do deslocamento.

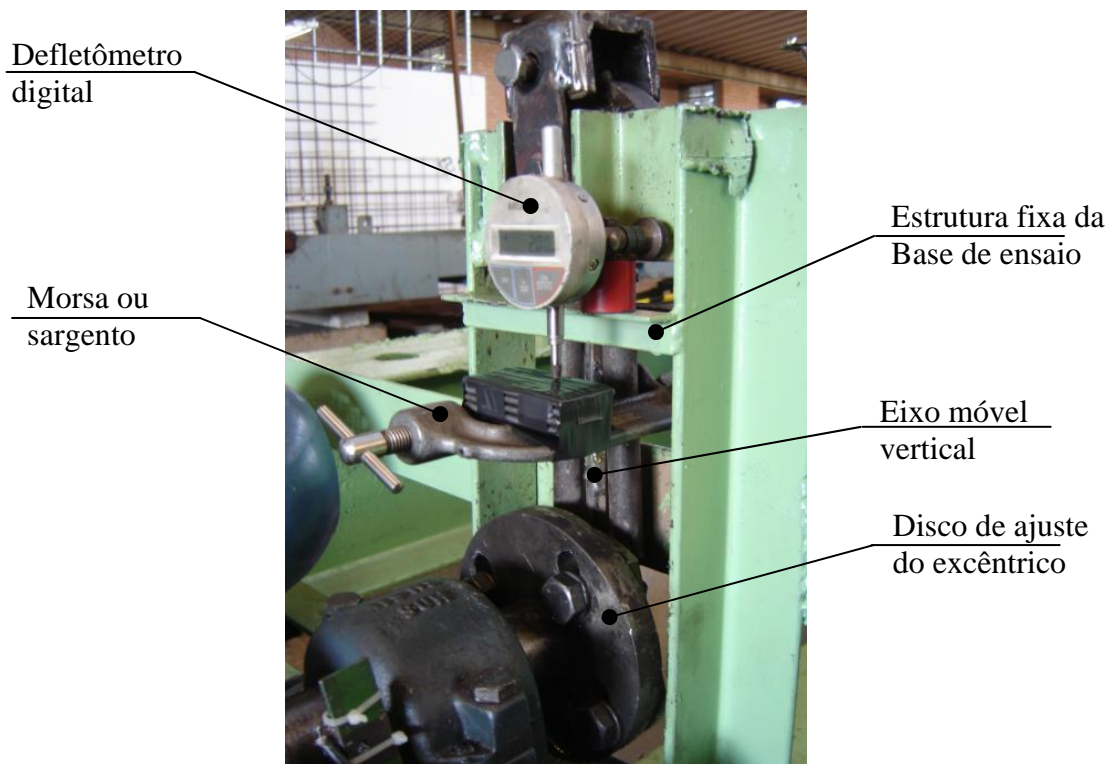


Figura 6.11 – Ajuste do deslocamento do sistema de oscilação

O defletômetro, que possui uma base magnética, foi posto sobre a estrutura da base de ensaio. Uma morsa (ou sargento) foi apertada no eixo móvel vertical do excêntrico. Com o ajuste dos discos excêntricos pode-se controlar a amplitude da oscilação.

A Figura 6.12 mostra o aperto do parafuso da ligação da estrutura treliçada com torquímetro analógico (vareta). A norma brasileira NBR8800/86 não estabelece o valor para o aperto mínimo para parafusos comuns ou parafusos com diâmetro menor que 1/2". Logo foi adotado um valor padrão de aperto de 40kN por parafuso.

Para garantir que as ligações não folgassem durante o ensaio dinâmico foram colocadas contra-porcas de pressão. Nestas não foram impostas apertos com torquímetro, sendo apenas aplicado um aperto de contato com a porca da ligação (Figura 6.13).



Figura 6.12 – Aperto dos parafusos com torquímetro



Figura 6.13 – Colocação de contra-porcas de pressão nas ligações

### 6.3.2. Deslocamentos aplicados nos protótipos

Considerando o fenômeno de fadiga dentro do regime elástico, os ensaios dinâmicos foram realizados com pequenos deslocamentos respeitando este limite. O gráfico da Figura 6.14 (um detalhe da Figura 5.69) mostra o comportamento dos ensaios estáticos dos protótipos LTE e LTDCE obtidos na etapa de ensaio estático. Note neste gráfico a região aproximada de comportamento elástico do protótipo até 4mm. Desta forma foram aplicados deslocamentos de no máximo 3,8mm no nó central dos protótipos no ensaio dinâmico. A Tabela 6.3 expõe os deslocamentos aplicados nos protótipos do ensaio dinâmico, e as respectivas cargas iniciais observadas no ensaio com carregamento estático. Nota-se que estas cargas são fictícias e que ao longo do ensaio dinâmico não houve controle destas cargas. Elas estão reportadas na tabela apenas para se ter uma idéia da magnitude da força que pode inicialmente provocar estes deslocamentos (em regime elástico) impostos e mantidos constantes ao longo dos ensaios dinâmicos.

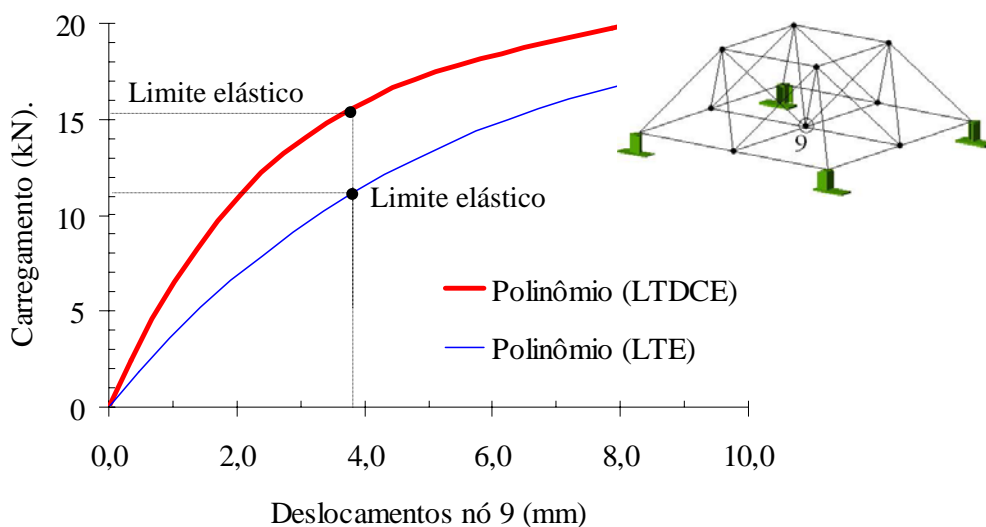


Figura 6.14 – Carregamento versus deslocamento do nó 9 dos protótipos nos ensaios experimentais estáticos

Tabela 6.3 – Deslocamentos aplicados no nó 9 dos protótipos dos ensaios dinâmicos

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

#### 6.4. RESULTADOS DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS.

Neste item podem ser observados os resultados dos ensaios dinâmicos das estruturas espaciais com dois modelos de ligação. Sendo ensaiados quatro protótipos com ligações típicas (LTD1 a LTD4) e quatro protótipos com ligações típicas com distanciador e chapa sobrejunta (LTDCD1 a LTDCD4).

##### 6.4.1. Ensaio das estruturas com ligações típicas - LTD

A Figura 6.15 mostra em planta os locais de ruptura das barras para os protótipos LTD2, LTD3 e LTD4, estes com amplitude de deslocamento no nó 9 respectivamente de 2,10mm, 2,50mm e 3,80mm.

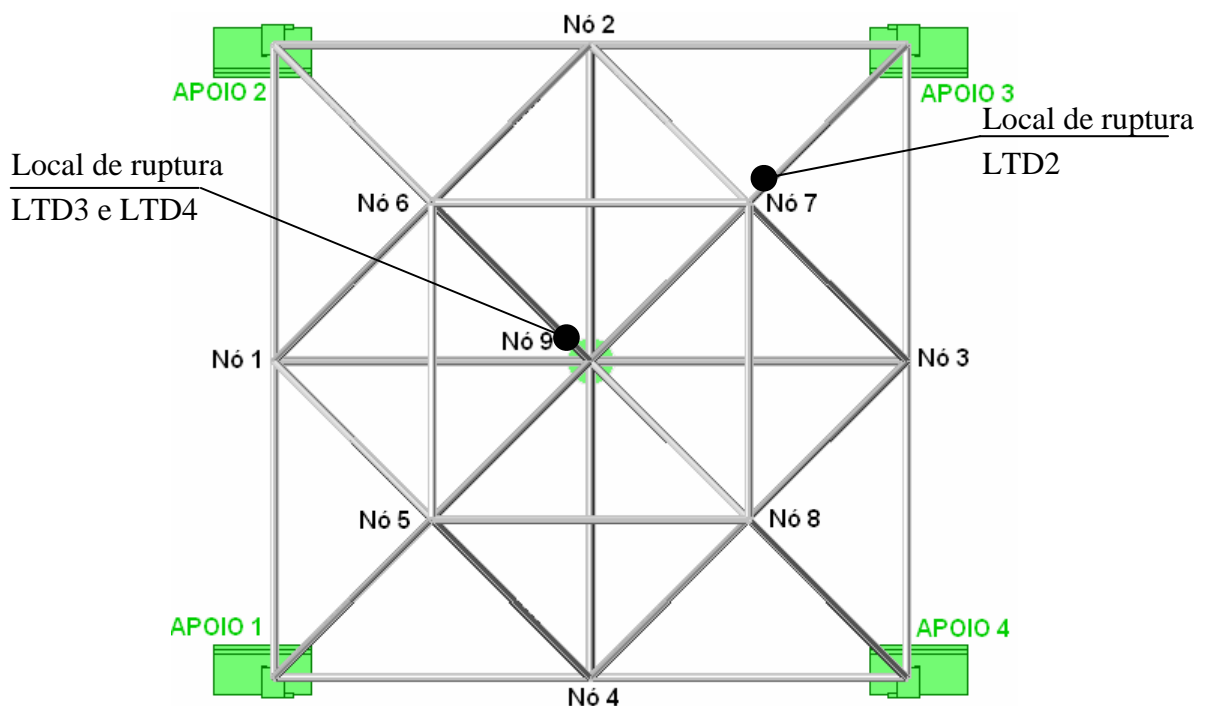


Figura 6.15 – Planta de localização das barras rompidas durante ensaio dinâmico - LTD



No protótipo LTD1, com 1,5mm de amplitude de deslocamento, não houve ruptura após 1.200.000 ciclos e o ensaio foi finalizado. As Figuras 6.16, 6.17 e 6.18, mostram respectivamente, os detalhes das rupturas dos elementos dos protótipos LTD2, LTD3 e LTD4. Foi possível notar que as rupturas ocorreram sempre nas diagonais das estruturas espaciais.



Figura 6.16 – Detalhe da ruptura da diagonal no ensaio do protótipo LTD2



Figura 6.17 – Detalhe da ruptura da diagonal no ensaio do protótipo LTD3



Figura 6.18 – Detalhe da ruptura da diagonal no ensaio do protótipo LTD4

A Tabela 6.4 mostra o resultado dos ensaios dinâmicos LTD. Nesta pode se apreciada o número de ciclos obtidos em relação à amplitude do deslocamento imposto ao nó 9. A Figura 6.19 mostra o gráfico do 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.

Tabela 6.4 – Resultado dos ensaios dinâmicos LTD

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

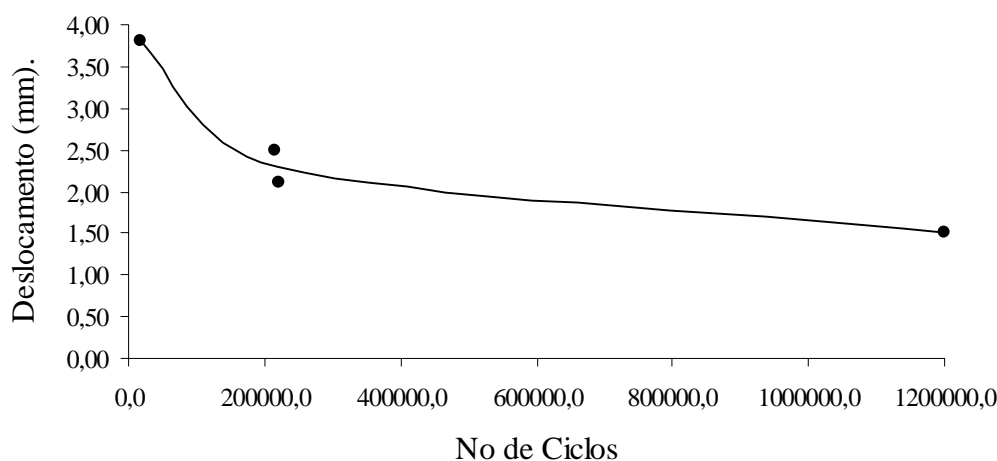


Figura 6.19 – Diagrama deslocamento no nó 9 versus número de ciclos - LTD

#### 6.4.2. Ensaio das estruturas com ligações típicas, distanciador e cobrejunta - LTDCD

No protótipo LTDCD1, com 1,5mm de amplitude de deslocamento, não houve ruptura após 1.200.000 ciclos e o ensaio foi finalizado. A Figura 6.20 mostra em planta os locais de ruptura das barras para os protótipos LTDCD2, LTDCD3 e LTDCD4, estes com amplitude de deslocamento no nó 9 respectivamente de 2,10mm, 2,64mm e 3,80mm.

As Figuras 6.21, 6.22 e 6.23, mostram respectivamente, os detalhes das rupturas dos elementos dos protótipos LTDCD2, LTDCD3 e LTDCD4. Foi possível notar que as rupturas ocorreram sempre nas diagonais das estruturas espaciais.

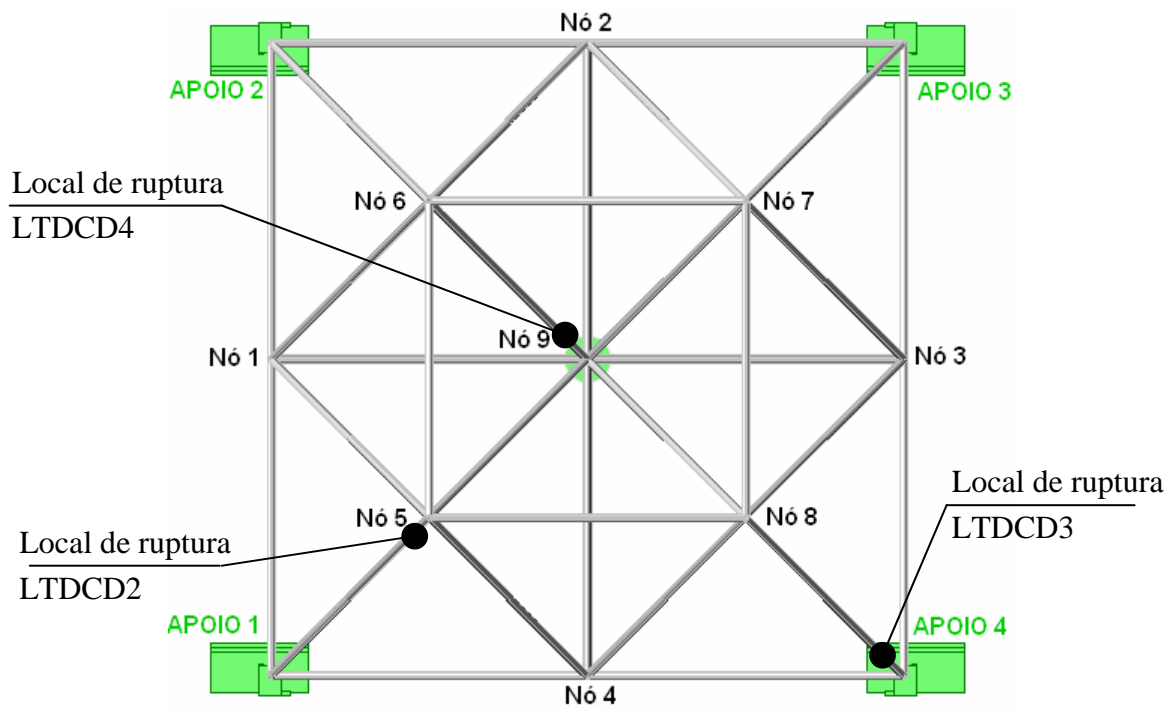


Figura 6.20 – Planta de localização das barras rompidas no ensaio dinâmico - LTDCD



Figura 6.21 – Detalhe da ruptura da diagonal no ensaio do protótipo LTDCD2



Figura 6.22 – Detalhe da ruptura da diagonal no ensaio do protótipo LTDCD3



Figura 6.23 – Detalhe da ruptura da diagonal no ensaio do protótipo LTDCD4

A Tabela 6.5 mostra o resultado dos ensaios dinâmicos LTDCD. Nesta tabela pode-se apreciar o número de ciclos obtidos em relação à amplitude do deslocamento imposto ao nó 9. A Figura 6.24 mostra o gráfico do comportamento do deslocamento em relação aos ciclos obtidos.

Tabela 6.5 – Resultado dos ensaios dinâmicos LTDCD

Protótipos do ensaio	Deslocamento (mm)	Nº de ciclos
LTDCD1	1,50	1.200.000
LTDCD2	2,10	243.969
LTDCD3	2,64	190.000
LTDCD4	3,80	27.111

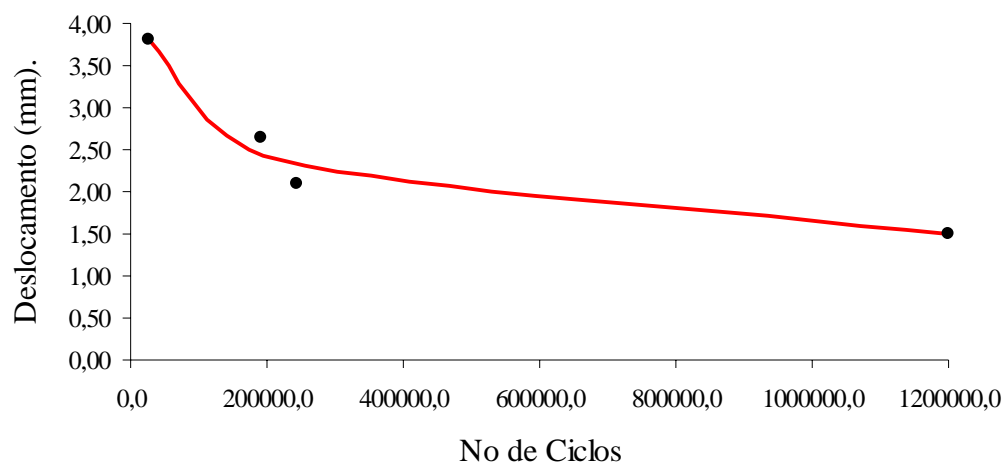


Figura 6.24 – Diagrama deslocamento no nó 9 versus número de ciclos - LTDCD

## 6.5. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DOS PROTÓTIPOS LTD E LTDCD

A Figura 6.25 mostra um comparativo entre os protótipos LTD e LTDCD em um diagrama deslocamento versus número de ciclos. É possível perceber que os protótipos LTDCD e LTD apresentaram comportamento similar quanto ao número de ciclos para um deslocamento imposto. No entanto considerando a carga inicial necessária para gerar o mesmo deslocamento imposto, nota-se um acréscimo substancial de resistência à fadiga no nó dos protótipos LTDCD da ordem de 51% em relação aos protótipos LTD – Figura 6.26.

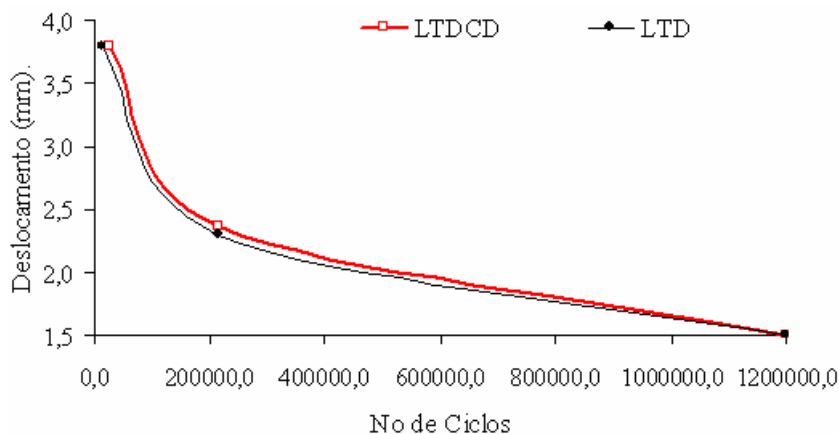


Figura 6.25 – Diagrama deslocamento versus número de ciclos – LTD e LTDCD

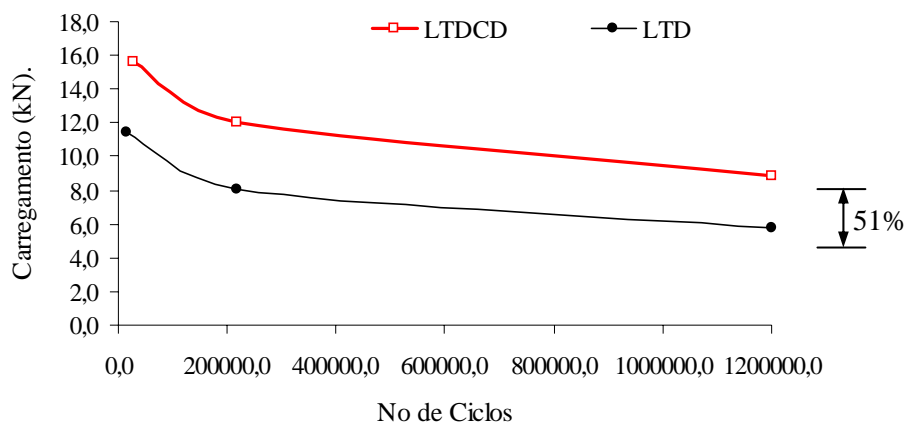


Figura 6.26 – Diagrama carregamento versus número de ciclos – LTD e LTDCD

O ganho de resistência à fadiga, deve-se a uma menor tensão atuante no protótipo LTDCD em relação ao protótipo LTD (para um mesmo deslocamento). Um gráfico S-N (tensão x número de ciclos) pode explicar tal ganho, pois para menor tensão o número de ciclos é maior até a ruptura por fadiga para o mesmo material. Para plotar um gráfico S-N típico para estes protótipos é necessário um estudo de tensões no regime elástico. No Capítulo 7 pode ser apreciado um estudo numérico pelo método dos elementos finitos, aplicando o programa SAP2000, e considerando apenas o regime elástico do material.

## 7. ESTUDO NUMÉRICO NO REGIME ELÁSTICO – MEF

Neste capítulo é exposto um estudo computacional via método dos elementos finitos, com a finalidade de verificar as tensões nos elementos das estruturas. Desta forma, foram estudados os 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.

### 7.1. DISCRETIZAÇÃO DOS MODELOS

O programa de análise, fundamentado no método de elementos finitos, aplicado no estudo foi o SAP2000. Este considera apenas análise linear. 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 205.000MPa , tensão de escoamento de 250 MPa, peso específico do material de  $7,7 \times 10^{-7}$  kN/mm<sup>2</sup> e coeficiente de Poisson de 0,3.

#### 7.1.1. Elemento de placa (SHELL)

O elemento “SHELL” serve também como 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. A geometria e o sistema de coordenadas podem ser vistas na Figura 7.1.

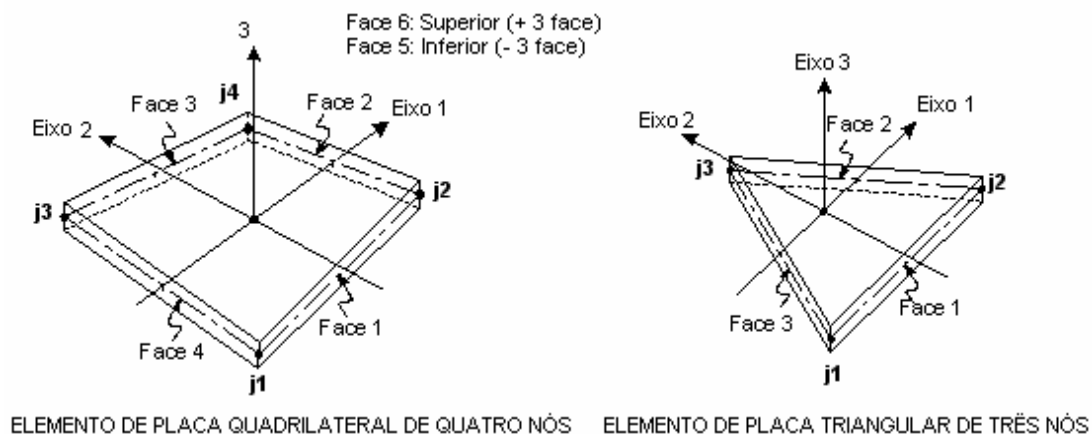


Figura 7.1– Elemento de Placa (SHELL)

### 7.1.2. Discretização dos banzos e diagonais dos protótipos

Os protótipos discretizados apresentam a mesma geometria para banzos e diagonais. A Figura 7.2 mostra uma planta típica da estrutura a ser discretizada. Note que esta é composta por banzos e diagonais. A Figura 7.3a mostra um detalhe da ligação do nó de apoio e a Figura 7.3b um detalhe do nó central. A ligação entre banzos e diagonais foi possibilitada por parafusos.

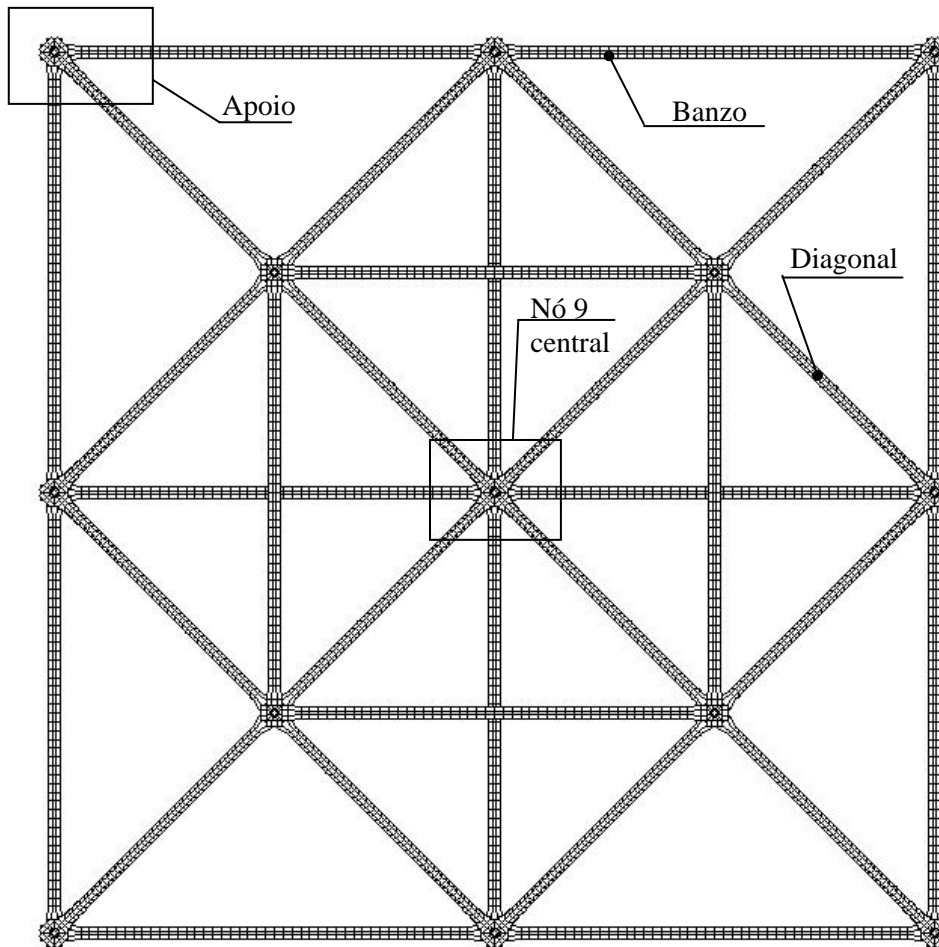


Figura 7.2– Planta típica dos protótipos para discretização

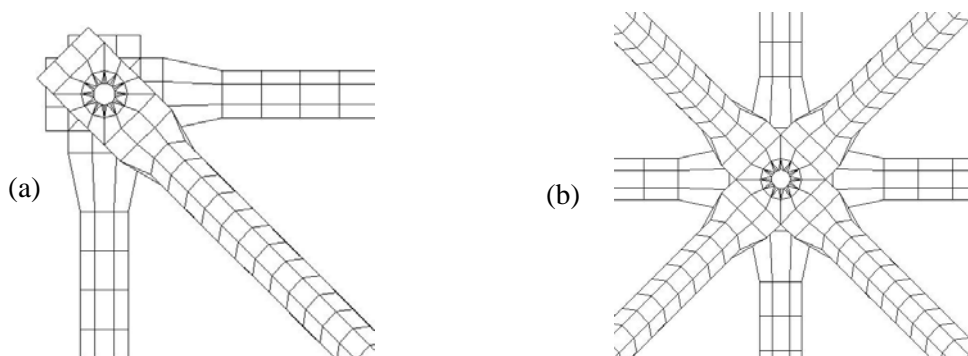


Figura 7.3– Detalhe: (a) apoio da estrutura (b) nó central

A Figura 7.4 mostra a malha em elementos finitos da diagonal. Na discretização do corpo do tubo foram utilizados 416 elementos de placa (SHELL), com a espessura da parede do tubo (espessura = 1,5mm). Os elementos do corpo da diagonal foram dispostos radialmente formando a parede do tubo. Na discretização das extremidades amassadas do tubo foram utilizados 108 elementos de placa (SHELL), com a espessura dupla da parede do tubo (espessura = 3mm). Observe o detalhe da extremidade amassada na Figura 7.6.

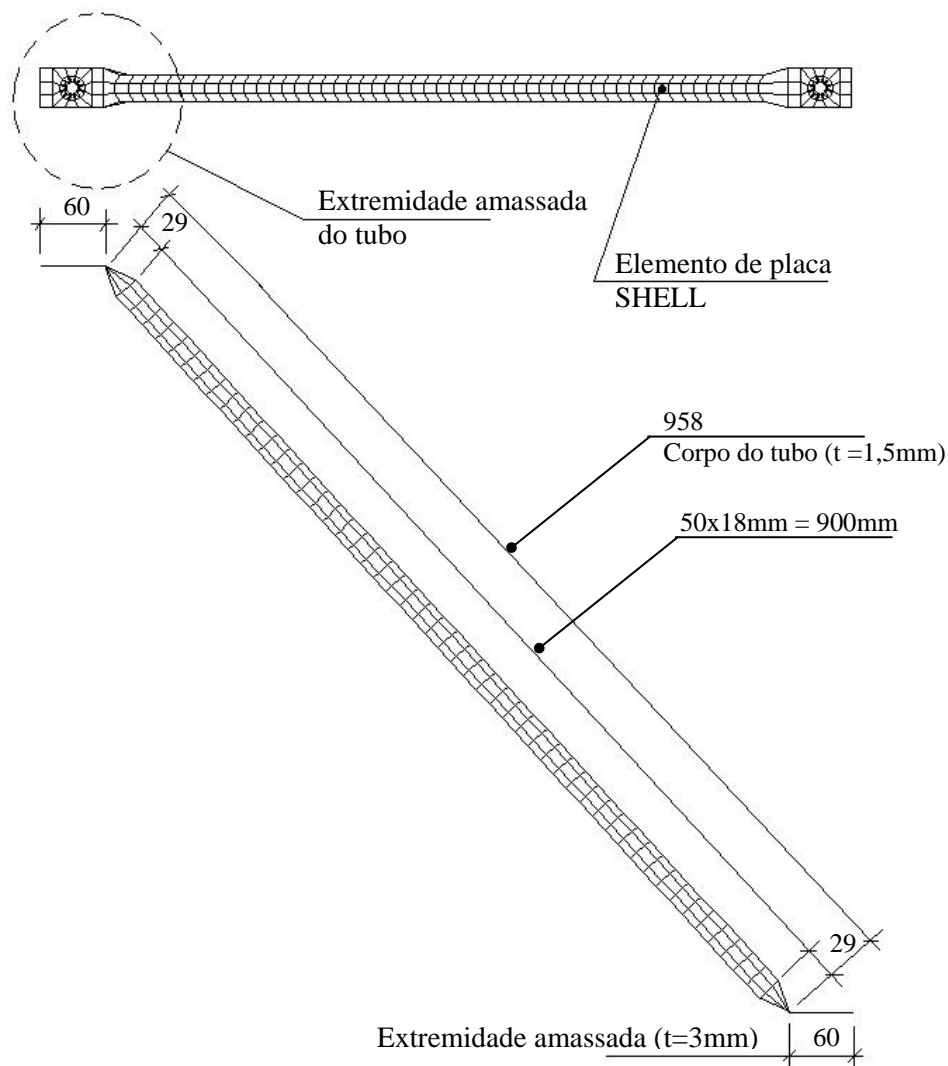


Figura 7.4– Discretização da diagonal em elementos de placa (cotas em milímetro)

A Figura 7.5 mostra a malha em elementos finitos do banzo. Na discretização do corpo do tubo foram utilizados 368 elementos de placa (SHELL), com a espessura da parede do tubo (espessura,  $t = 1,5\text{mm}$ ). Os elementos do corpo do banzo foram dispostos radialmente formando a parede do tubo. Na discretização das extremidades amassadas do tubo foram utilizados 108 elementos de placa (SHELL), com a espessura dupla da parede do tubo (espessura,  $t = 3\text{mm}$ ). Observe o detalhe da extremidade amassada na Figura 7.6.



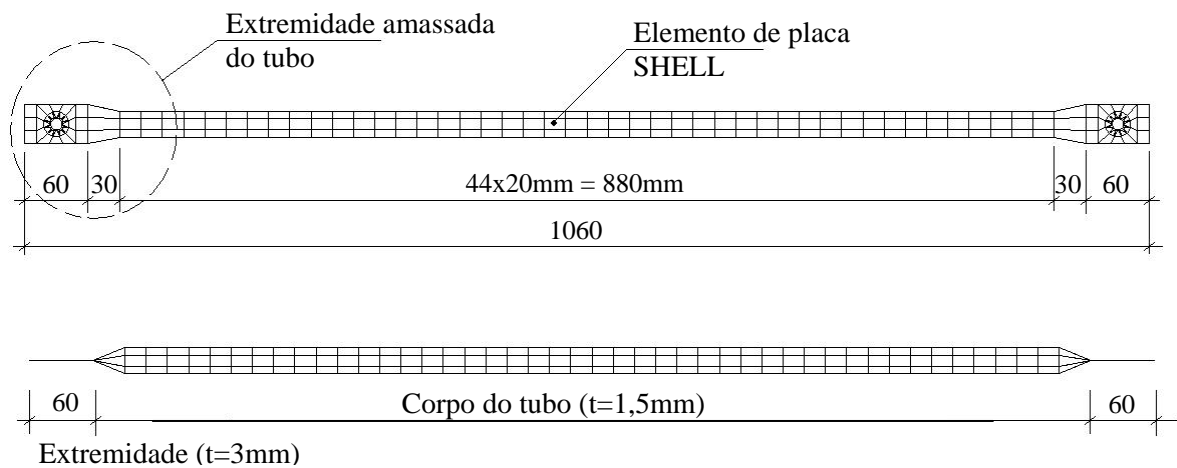


Figura 7.5– Planta e elevação do banzo da estrutura (cotas em milímetro)

A Figura 7.6 mostra o detalhe da discretização da extremidade amassada do tubo. Um polígono de 24 lados e 10mm de diâmetro forma o furo para ligação com parafuso. Note também, nesta malha, um polígono de 12 lados que delimitou o distanciador a ser utilizado nas estruturas LTDC. Na Figura 7.7 pode ser observada a evolução do tubo experimental para o polígono de 12 lados utilizado na discretização de banzos e diagonais. Este polígono é uma média do polígono circunscrito e inscrito ao diâmetro do tubo ( $d=25,4\text{mm}$ ).

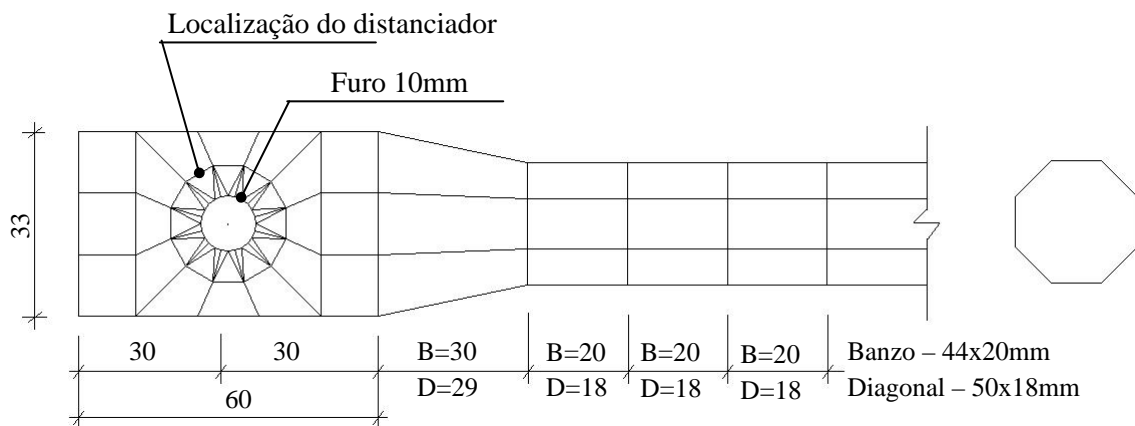


Figura 7.6– Detalhe da extremidade amassada do tubo (cotas em milímetro)

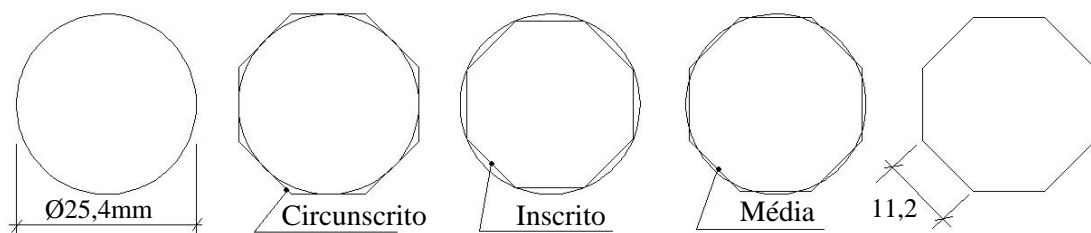


Figura 7.7– Desenvolvimento da seção do tubo das diagonais e montantes

### 7.1.3. Discretização da estrutura com nó típico (LT)

A Figura 7.8 mostra a discretização do conjunto completo da estrutura treliçada tridimensional com nó típico. Note nesta figura a posição dos banzos e diagonais. As dimensões externas são similares às estruturas do ensaio experimental. A Figura 7.9 dá ênfase ao detalhe da ligação. A ligação entre banzos e diagonais foi feita com parafusos discretizados em elementos de placa (SHELL).

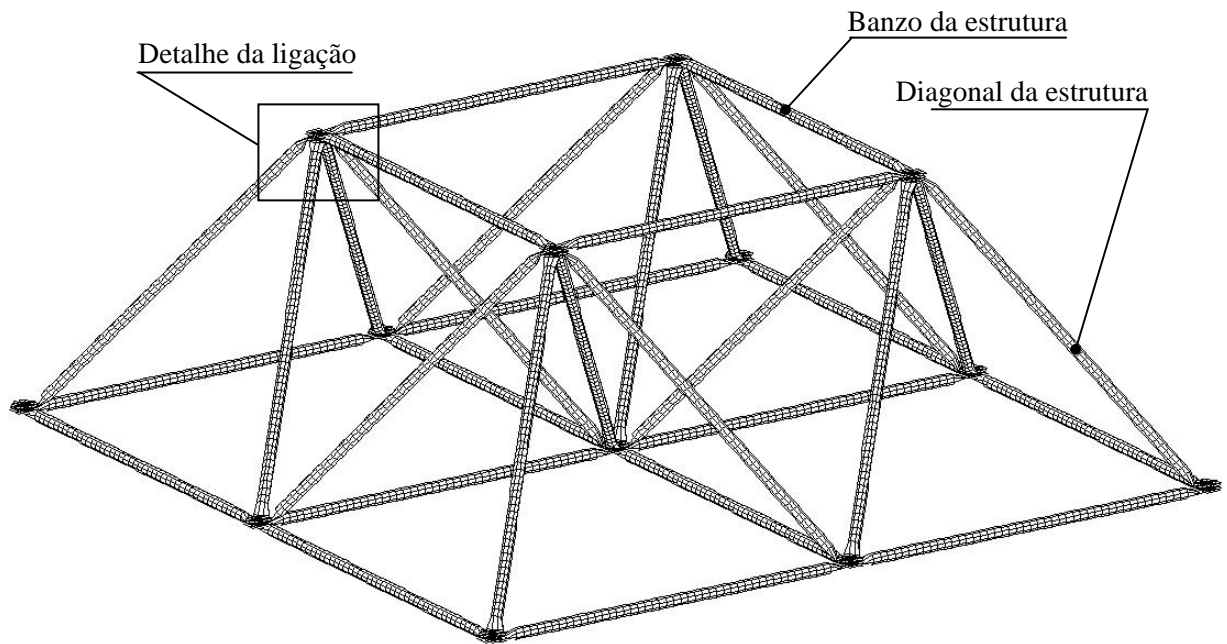


Figura 7.8 – Modelo de treliça com ligação com nó típico - LT

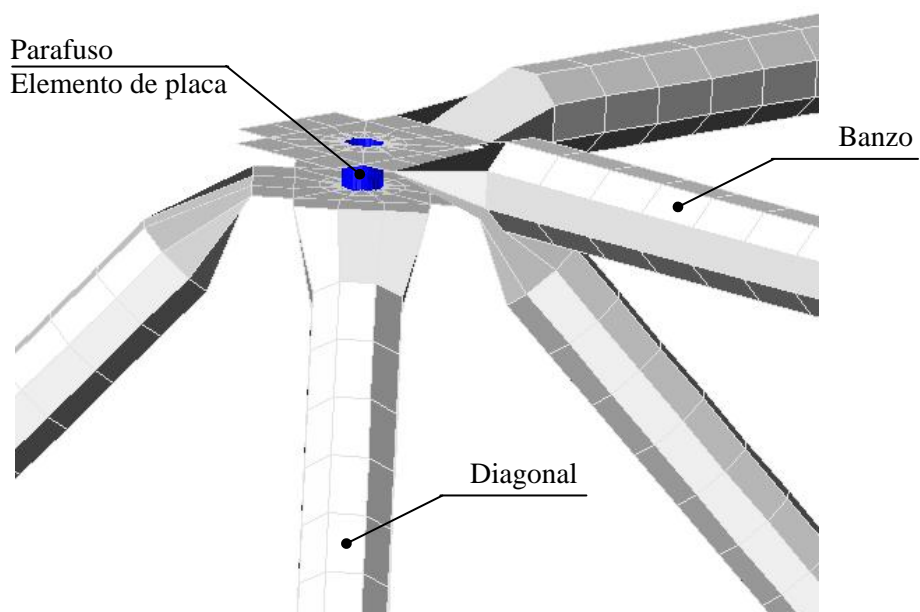


Figura 7.9 – Detalhe da ligação com nó típico

Na discretização da estrutura treliçada tridimensional constituída com nó típico 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, como pode ser observado na Figura 7.10 e 7.11. A Figura 7.12 mostra em detalhe a malha do parafuso, discretizada 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.

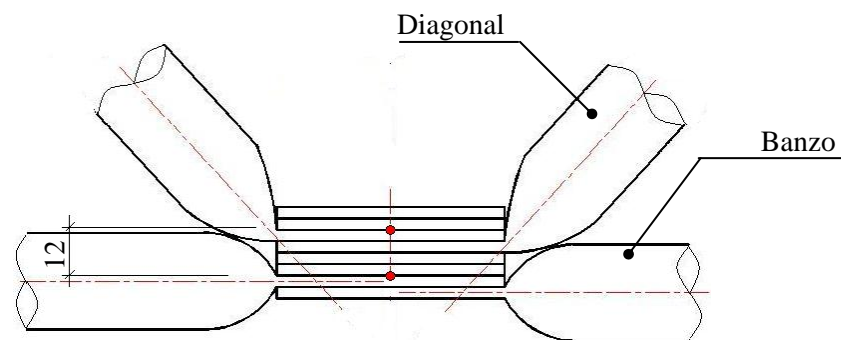


Figura 7.10 – Comprimento do parafuso para ligação com nó típico

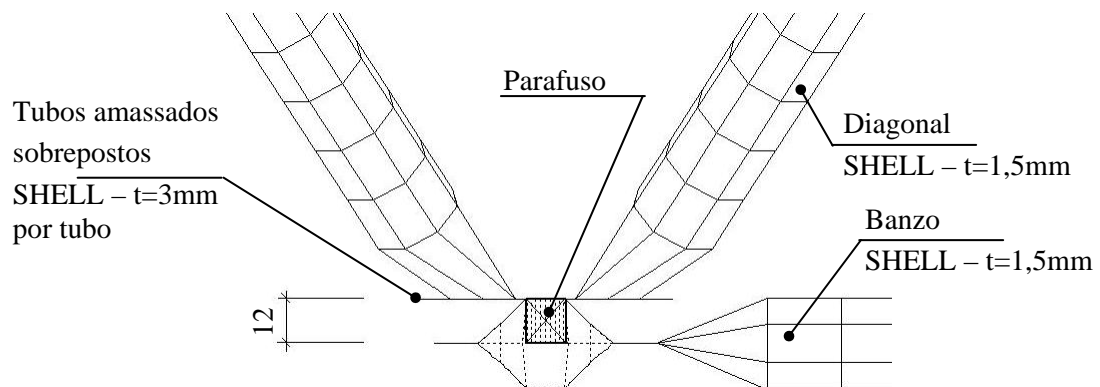


Figura 7.11 – Elementos da ligação com nó típico

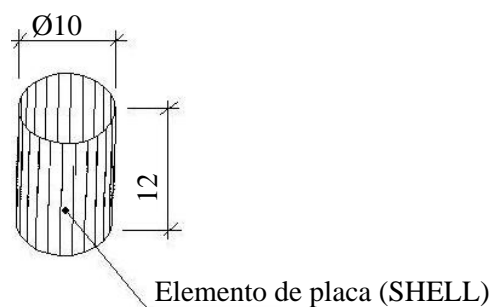


Figura 7.12 – Parafuso da ligação com nó típico

#### 7.1.4. Discretização da estrutura com nó típico, distanciador e cobrejunta (LTDC)

A Figura 7.13 mostra a discretização do conjunto completo da estrutura treliçada tridimensional com nó típico, distanciador e cobrejunta. Note nesta figura a posição dos banzos e diagonais. As dimensões externas são similares às estruturas do ensaio experimental. A Figura 7.14 dá ênfase ao detalhe da ligação. A ligação entre banzos e diagonais foi feita com parafusos e distanciadores discretizados em elementos de placa (SHELL). A cobrejunta foi considerada a partir do acréscimo de espessura na ligação.

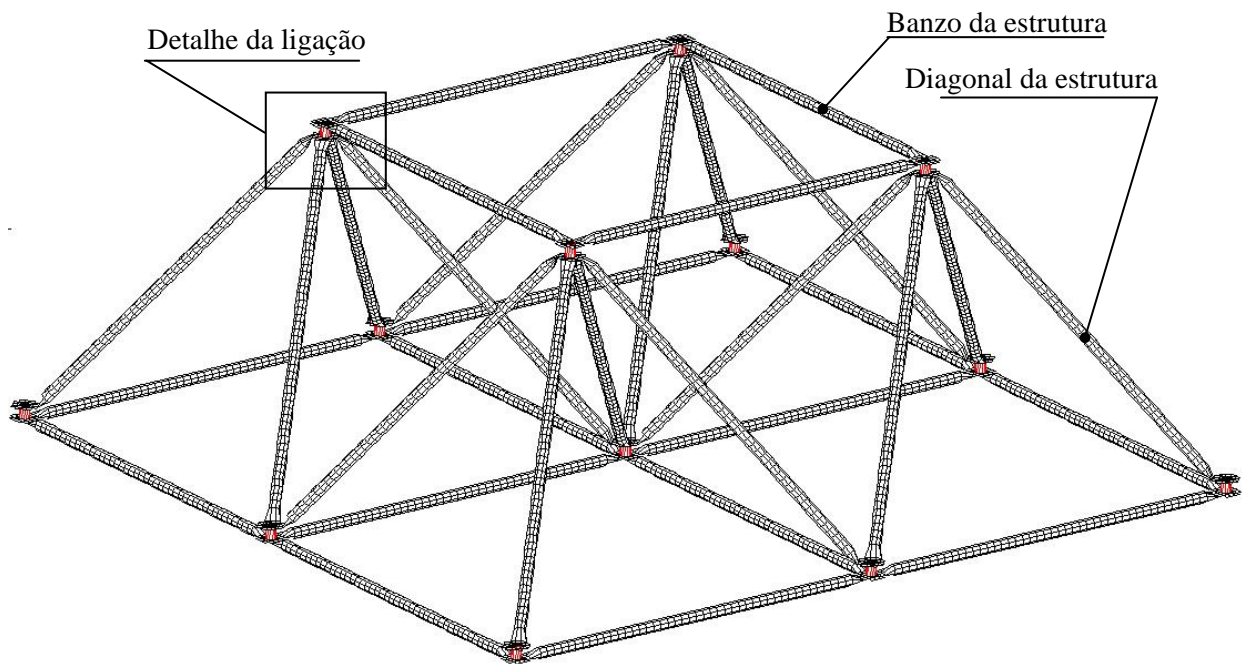


Figura 7.13 – Treliça com ligação com nó típico, distanciador e cobrejunta - LTDC

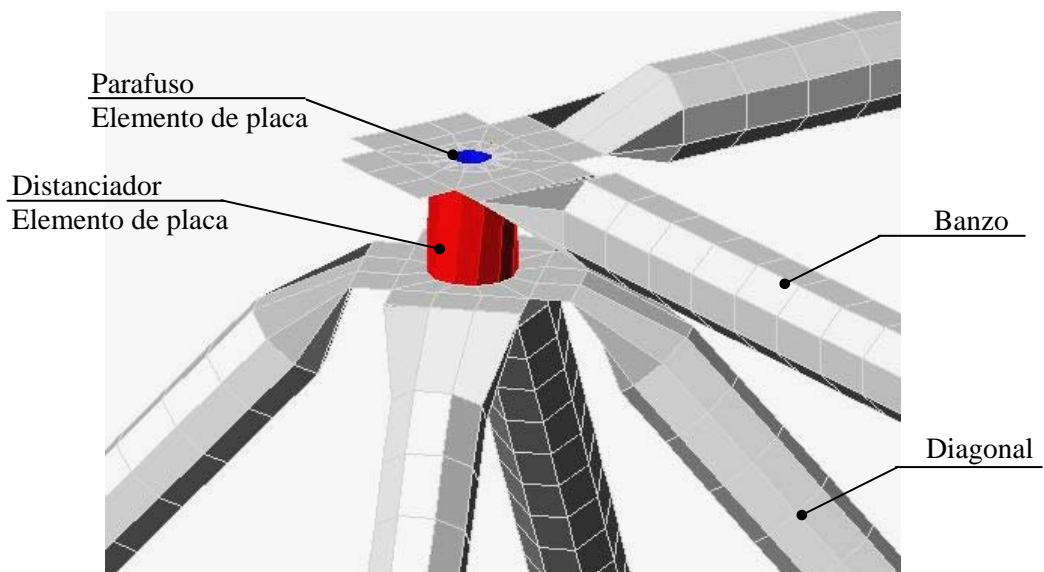


Figura 7.14 – Detalhe da ligação com nó típico, distanciador e cobrejunta

Na discretização da estrutura treliçada tridimensional com típico e distanciador (LTDC) 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 composição dos parafusos.

A Figura 7.15 detalha a discretização da ligação. 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, como pode ser observado na Figura 7.10 e 7.11, acrescido da distância de correção de excentricidade de 20mm. A Figura 7.16 mostra em detalhe a malha do parafuso, discretizada com 24 elementos de placa e a malha do distanciador, discretizada em 12 elementos de placa (SHELL).

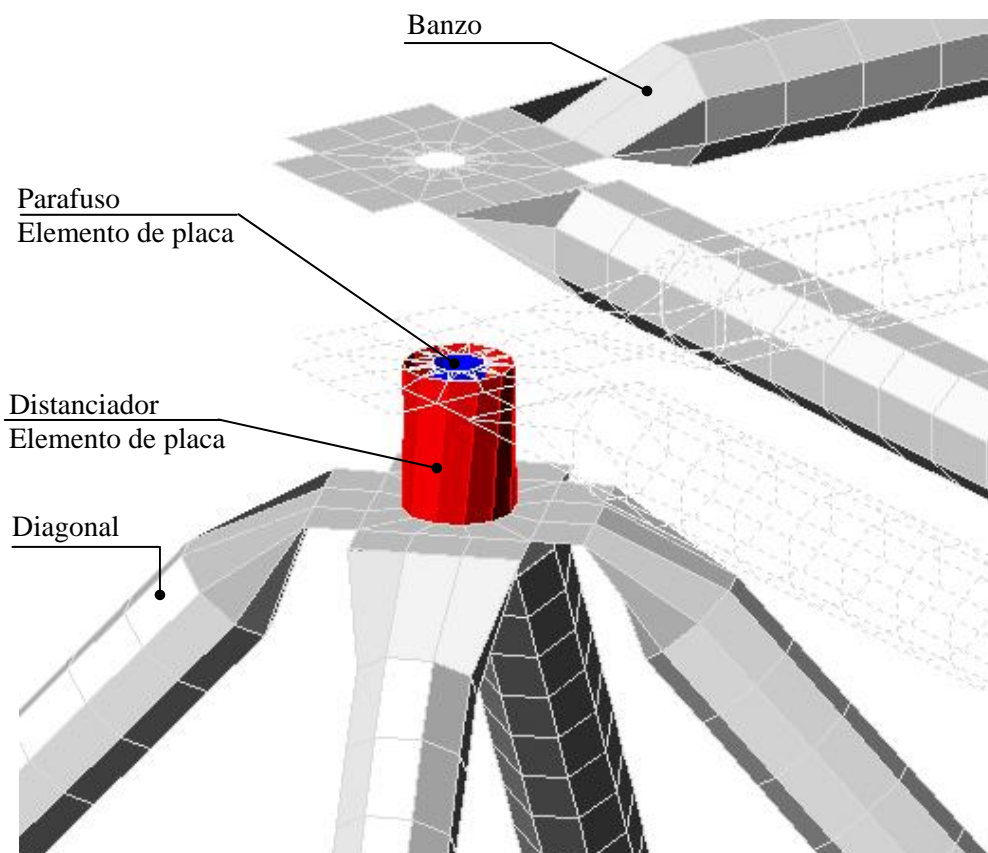


Figura 7.15 – Detalhe da localização dos elementos da ligação com distanciador

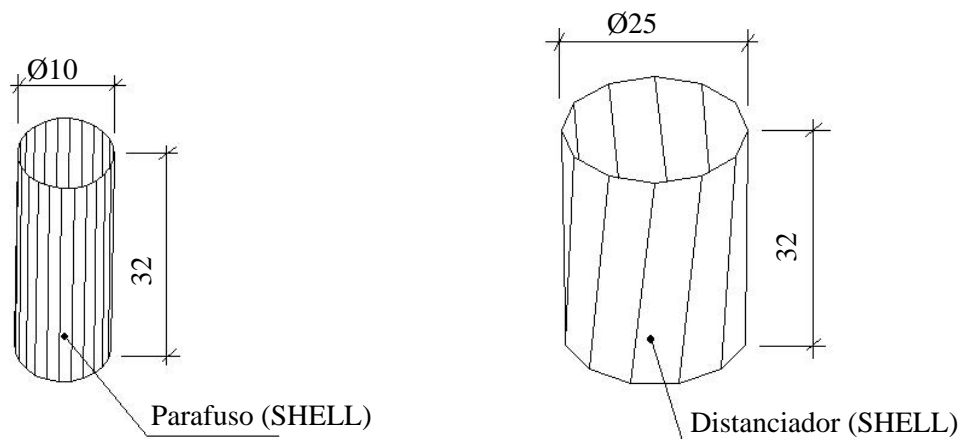


Figura 7.16 – Discretização da malha do parafuso e distanciador

### 7.1.5. Restrições e carregamentos no modelo

A Figura 7.17 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. Na Figura 7.18 pode ser observada a estrutura treliçada de uma vista inferior (de baixo para cima), a fim de possibilitar a locação das restrições de apoio e localização da carga aplicada. Nesta figura são destacados os detalhes do apoio, ampliado na Figura 7.19, e nó de aplicação da carga, ampliado na Figura 7.21. Note na Figura 7.20 que foram impostas restrições de 2º gênero nos 24 nós do perímetro do furo dos parafusos dos apoios (Apoios 1, 2, 3 e 4). A Figura 7.22 dá ênfase à distribuição nodal do carregamento no perímetro do furo do nó 9.

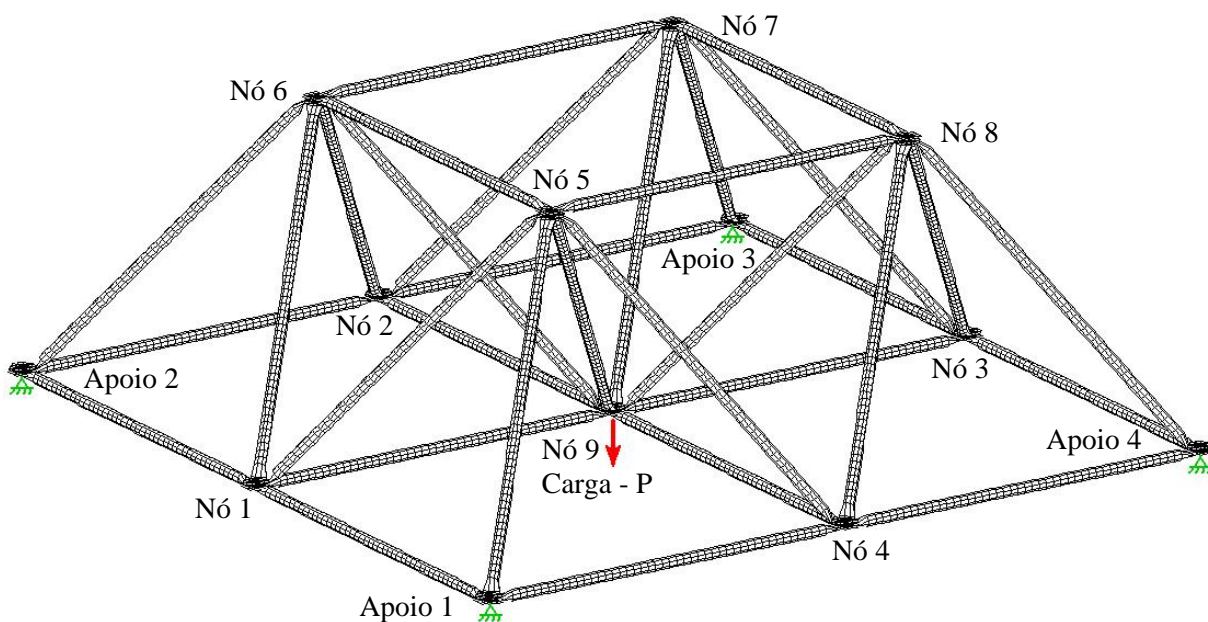


Figura 7.17 – Discretização da malha da estrutura treliçada com numeração dos nós

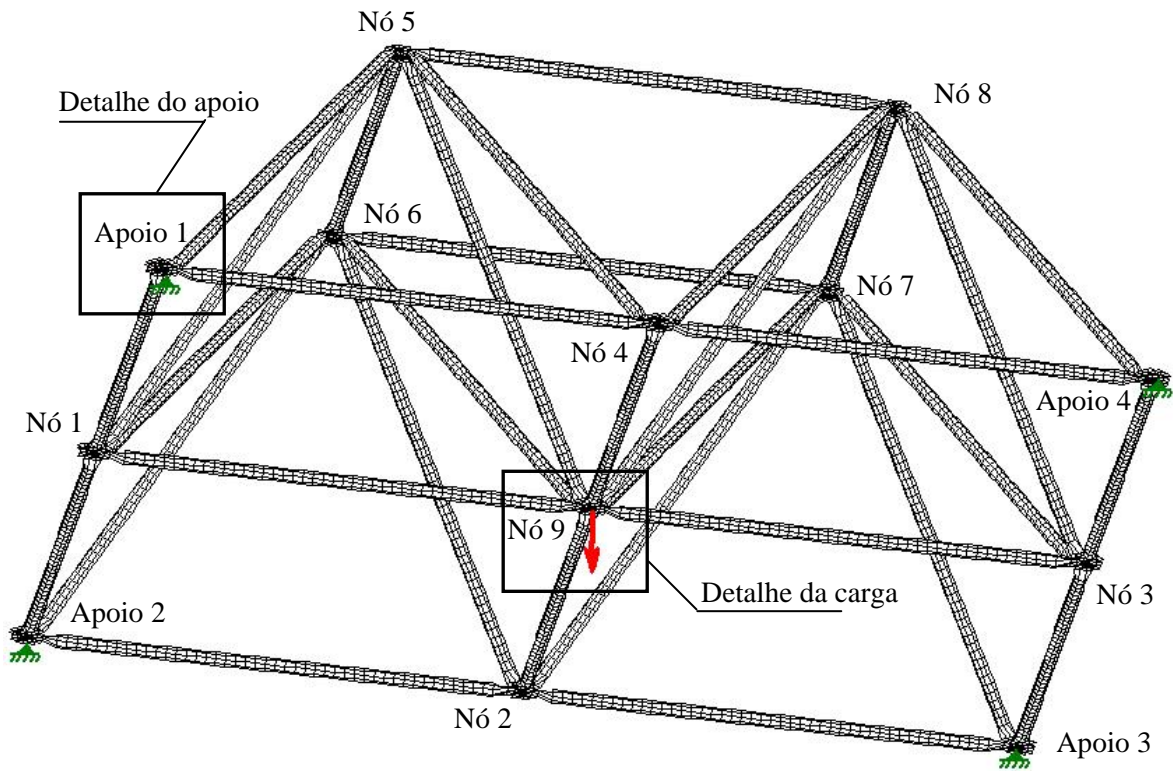


Figura 7.18 – Vista inferior da malha da estrutura treliçada

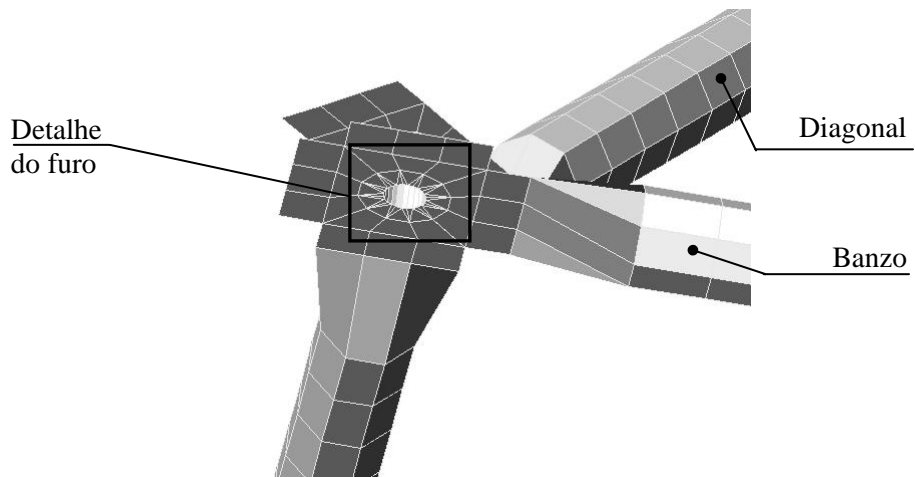


Figura 7.19 – Detalhe da malha do nó de apoio 1 (Similar a apoios 2,3 e 4)

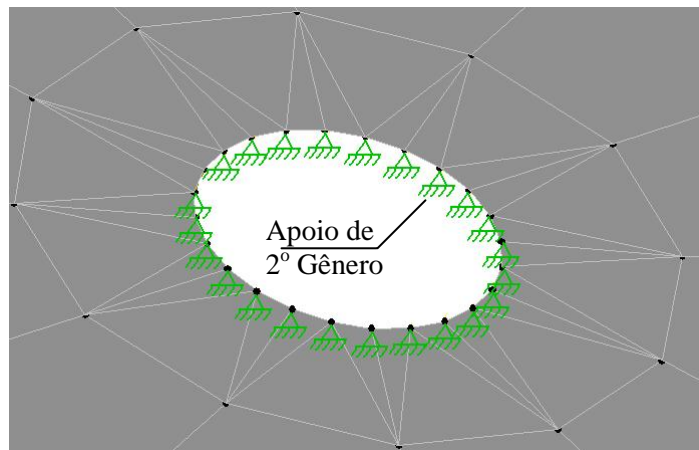


Figura 7.20 – Restrição dos nós perímetro do furo (Apoios 1, 2, 3 e 4)

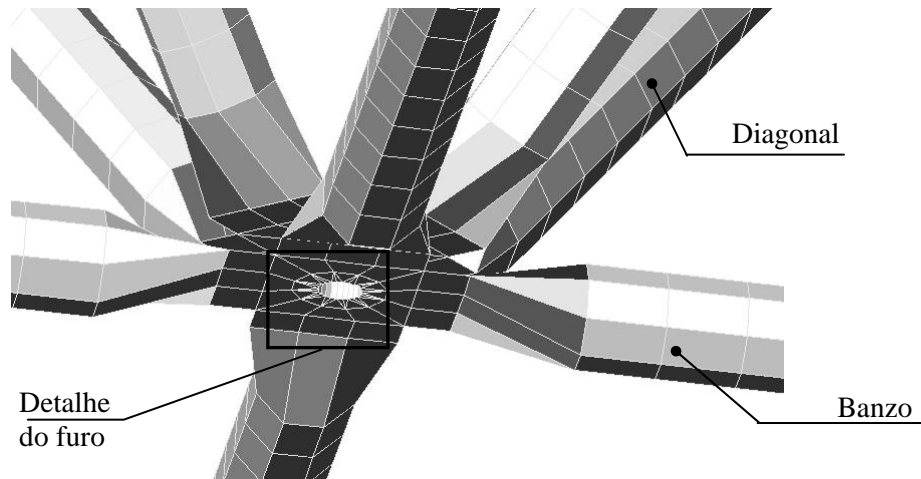


Figura 7.21 – Detalhe da malha do nó 9 central de aplicação do carregamento

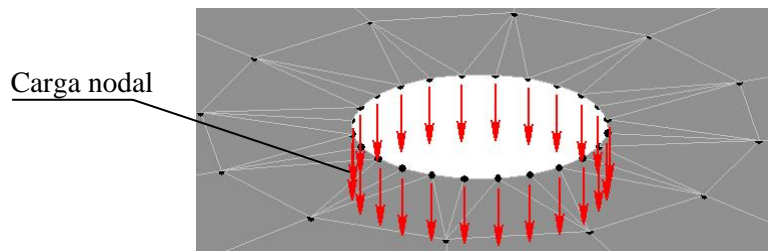


Figura 7.22 – Distribuição do carregamento nodal ao longo do perímetro do furo

Como pode ser visto na Figura 7.22 o carregamento aplicado na estrutura foi distribuído igualmente nos nós do perímetro do furo da ligação central (nó 9). Este perímetro apresenta 24 nós.

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 (ver Capítulo 6). Desta forma será possível fazer um comparativo com a etapa experimental e traçar o diagrama de tensão versus número de ciclos. A Tabela 7.1 e 7.2 expõe os carregamentos aplicados no estudo computacional.

Tabela 7.1 – Carregamentos aplicados no estudo da estrutura com ligação típica (LT)

Passos de carga	Carga (kN)	Carga nodal (kN)	Deslocamento (mm)
Carga 1	5,77	0,240	1,5
Carga 2	7,57	0,315	2,1
Carga 3	8,63	0,359	2,5
Carga 4	11,44	0,476	3,8



Tabela 7.2 – Carregamentos aplicados no estudo da estrutura com ligação típica, distanciador e chapa cobrejunta (LTDC)

Passos de carga	Carga (kN)	Carga nodal (kN)	Deslocamento (mm)
Carga 1	8,83	0,368	1,5
Carga 2	11,21	0,467	2,1
Carga 3	12,93	0,539	2,64
Carga 4	15,58	0,649	3,8

### 7.1.6. Parâmetros analisados

Os principais parâmetros analisados foram às tensões de VON MISES nos elementos dos modelos em relação aos carregamentos aplicados. As tensões de VON MISES são decorrentes da combinação das tensões principais (S11, S12, S22) atuantes nos elementos. A Figura 7.23 mostra a representação das tensões principais nos elementos de placa. A Equação 7.1 mostra analiticamente a composição da tensão de VON MISES (SMV) através das combinações das tensões (S11, S12 e S22).

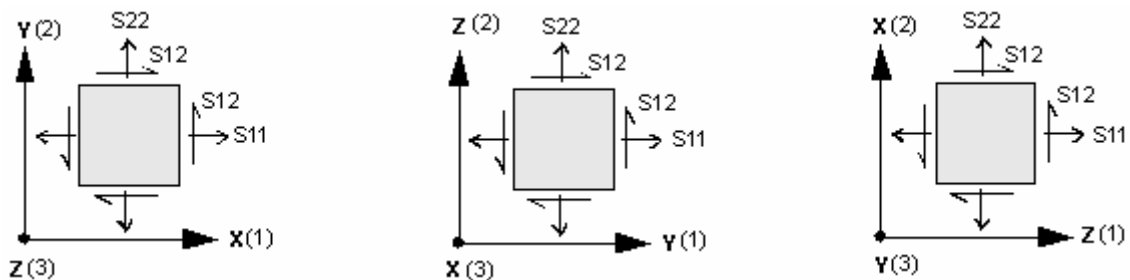


Figura 7.23 – Representação das tensões nos elementos de placa

$$SVM = \sqrt{(S11 - S22)^2 + (S11 - S12)^2 + (S22 - S12)^2} \quad (7.1)$$

Foram realizadas duas análises comparativas das tensões nos elementos. A primeira refere-se à comparação entre as tensões, no meio e na extremidade, de banzos e diagonais. A segunda foi uma comparação das tensões no perímetro interno e externo dos elementos da estrutura. A seguir seguem os detalhes dos elementos a serem analisados. A Figura 7.24 mostra em destaque os elementos adotados para estudo das tensões na primeira análise. Foram analisados os elementos do meio e extremidade do banzo superior, respectivamente os elementos 11993 e 12169. Foram analisados também os elementos do meio e extremidade da diagonal, respectivamente os elementos 1445 e 1645.

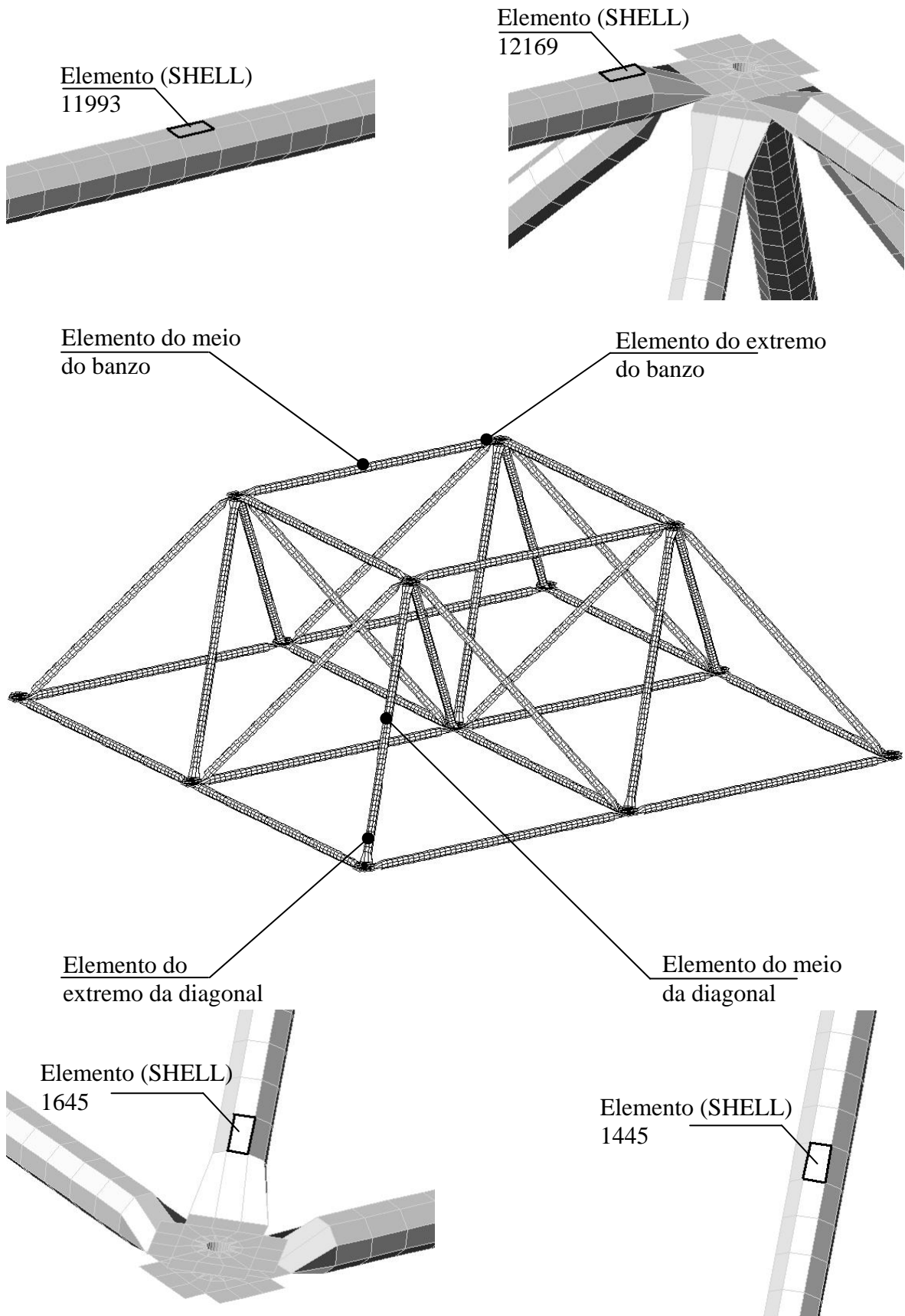


Figura 7.24 – Destaque dos elementos adotados para análise das tensões

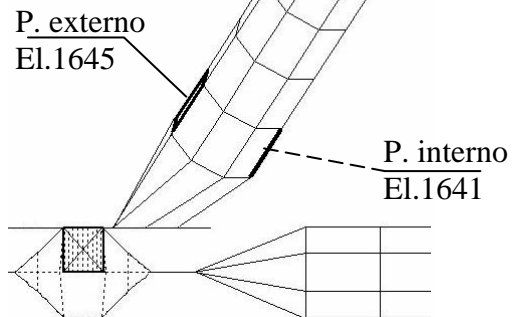


Figura 7.25 – Detalhe da extremidade da diagonal

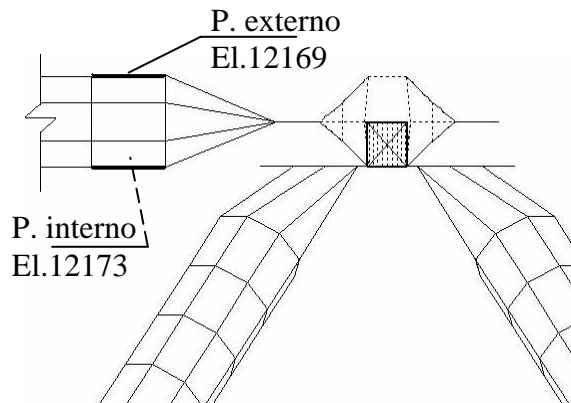


Figura 7.26 – Detalhe da extremidade do banzo superior

As Figuras 7.25 e 7.26 mostram os elementos adotados para análise comparativa das tensões do perímetro interno e externo da estrutura. A Figura 7.25 dá ênfase aos elementos da extremidade da diagonal. Na diagonal foram adotados o elemento externo 1645 e o elemento interno 1641. A Figura 7.26 dá ênfase aos elementos da extremidade do banzo superior. No banzo foram adotados o elemento externo 12169 e o elemento interno 12173.

As tensões nos elementos seleccionados, nas Figuras 7.24 a 7.26, podem ser analisadas por um quadro esquemático conforme mostra a Figura 7.27. Observe a identificação dos elementos e o valor da tensão de VON MISES em  $\text{kN/cm}^2$  localizada no meio do elemento em destaque.

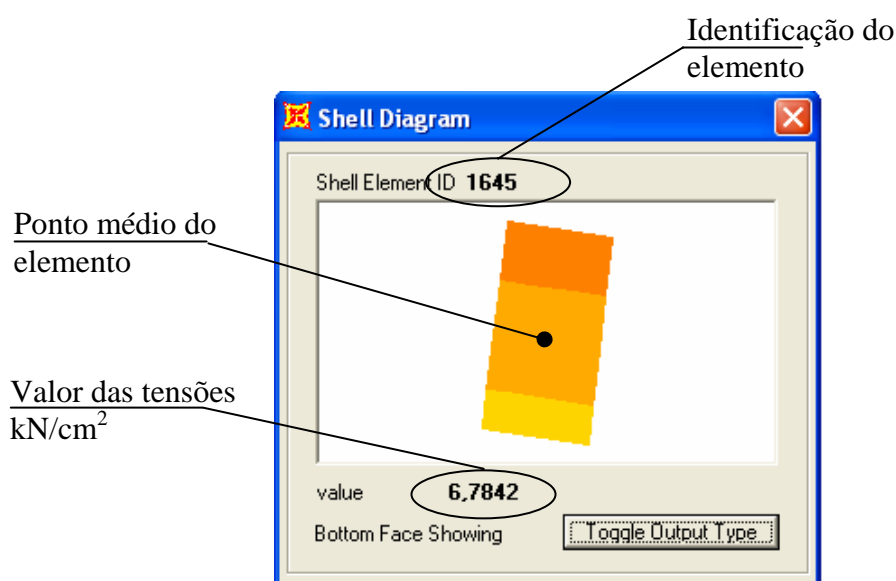


Figura 7.27 – Quadro das tensões no elemento de placa

## 7.2. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

### 7.2.1. Resultados do modelo com ligação típica (LT)

#### 7.2.1.1. Tensões nos banzos e diagonais – LT

A Tabela 7.3 expõe o resumo das tensões de VON MISES nos elementos da estrutura para os quatro carregamentos considerados. Nesta tabela 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.1445), 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 7.28 a 7.31 mostram os diagramas de distribuição das tensões, respectivamente para os quatro casos de carregamentos considerados (5,77kN; 7,57kN; 8,63kN e 11,44kN).

Tabela 7.3 – 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
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

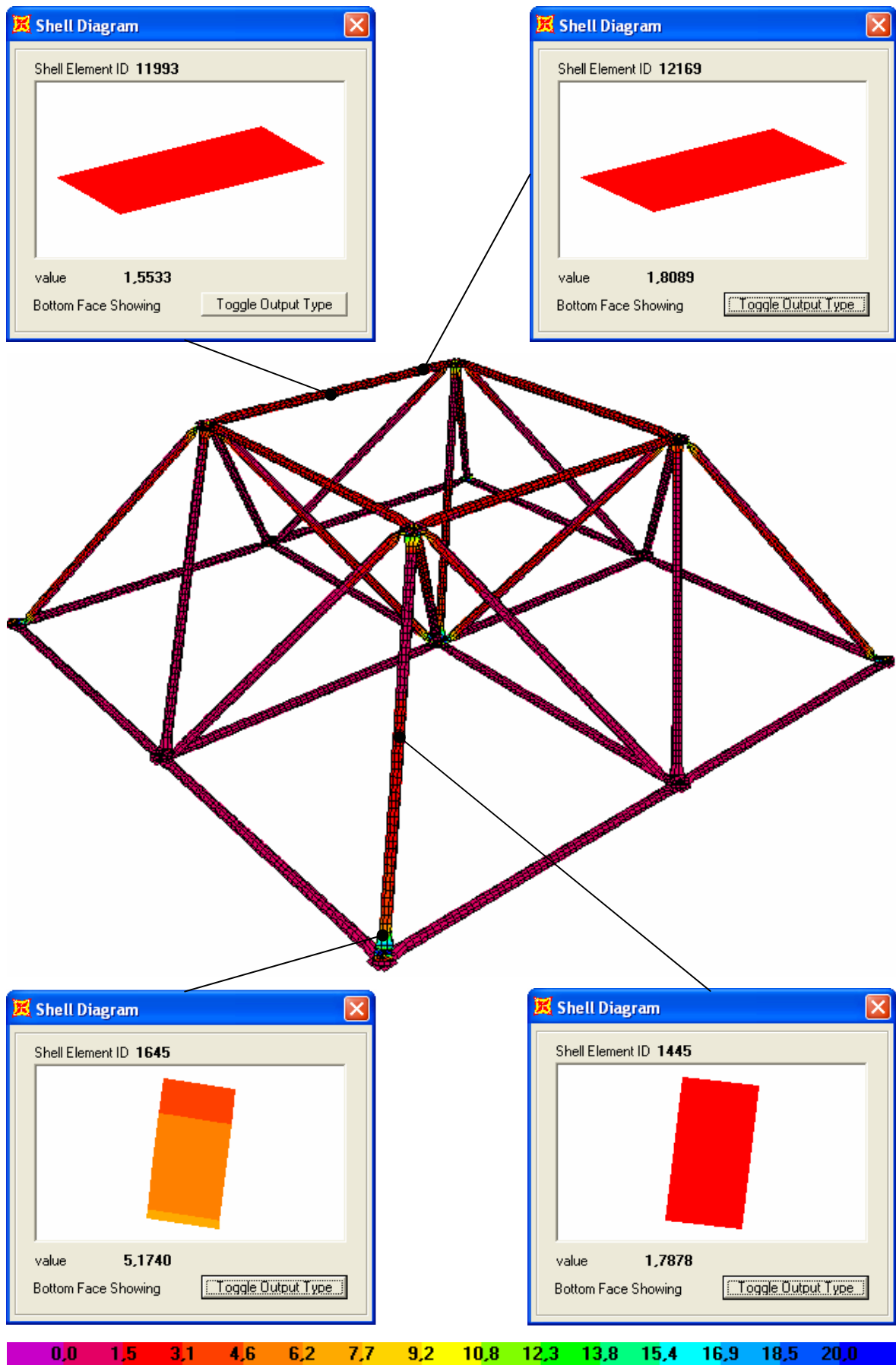


Figura 7.28 – Diagrama de distribuição de tensões ( $\text{kN/cm}^2$ ) – Carga 1= 5,77kN - LT

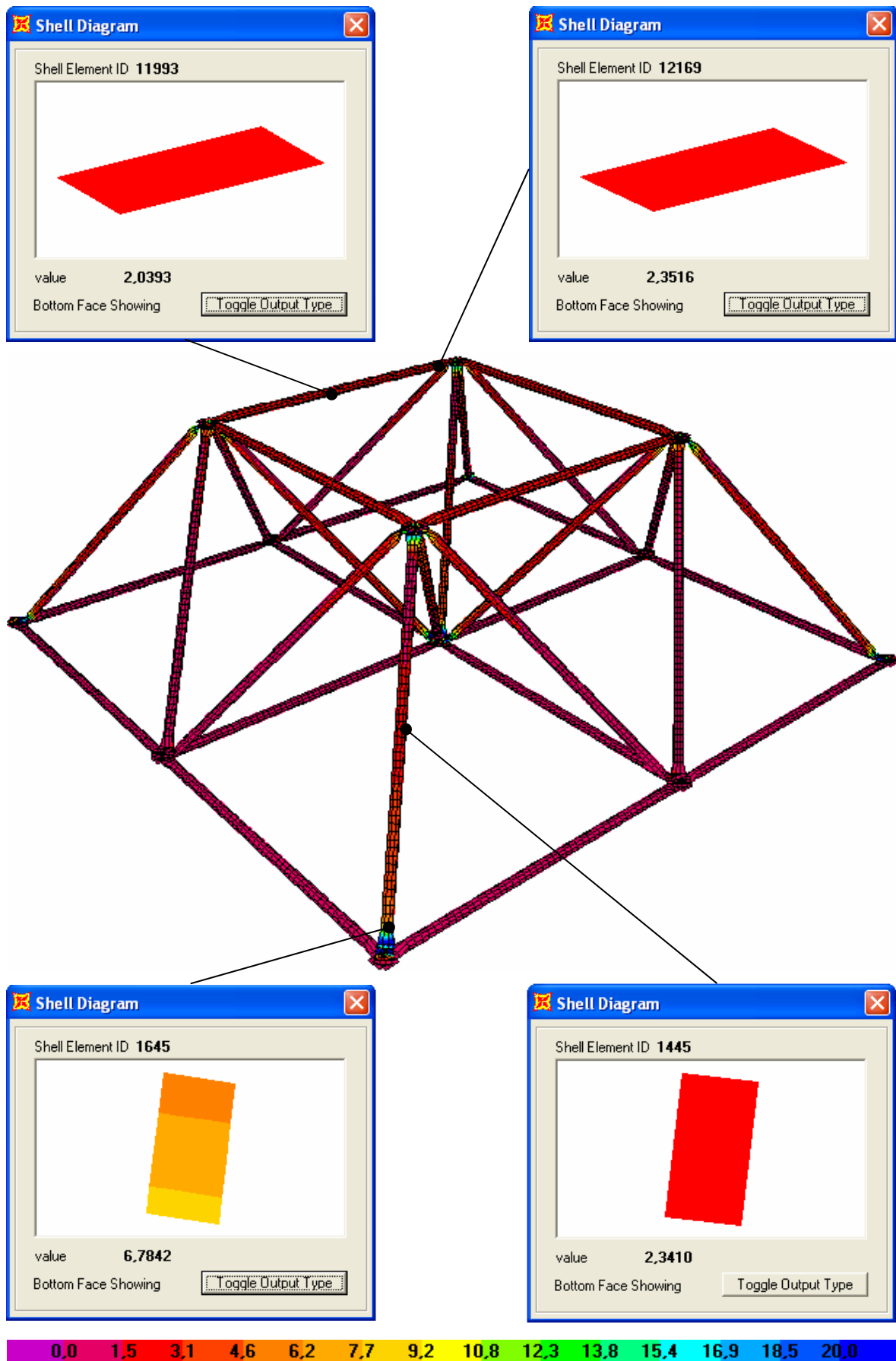


Figura 7.29 – Diagrama de distribuição de tensões ( $\text{kN/cm}^2$ ) – Carga 2= 7,57kN - LT

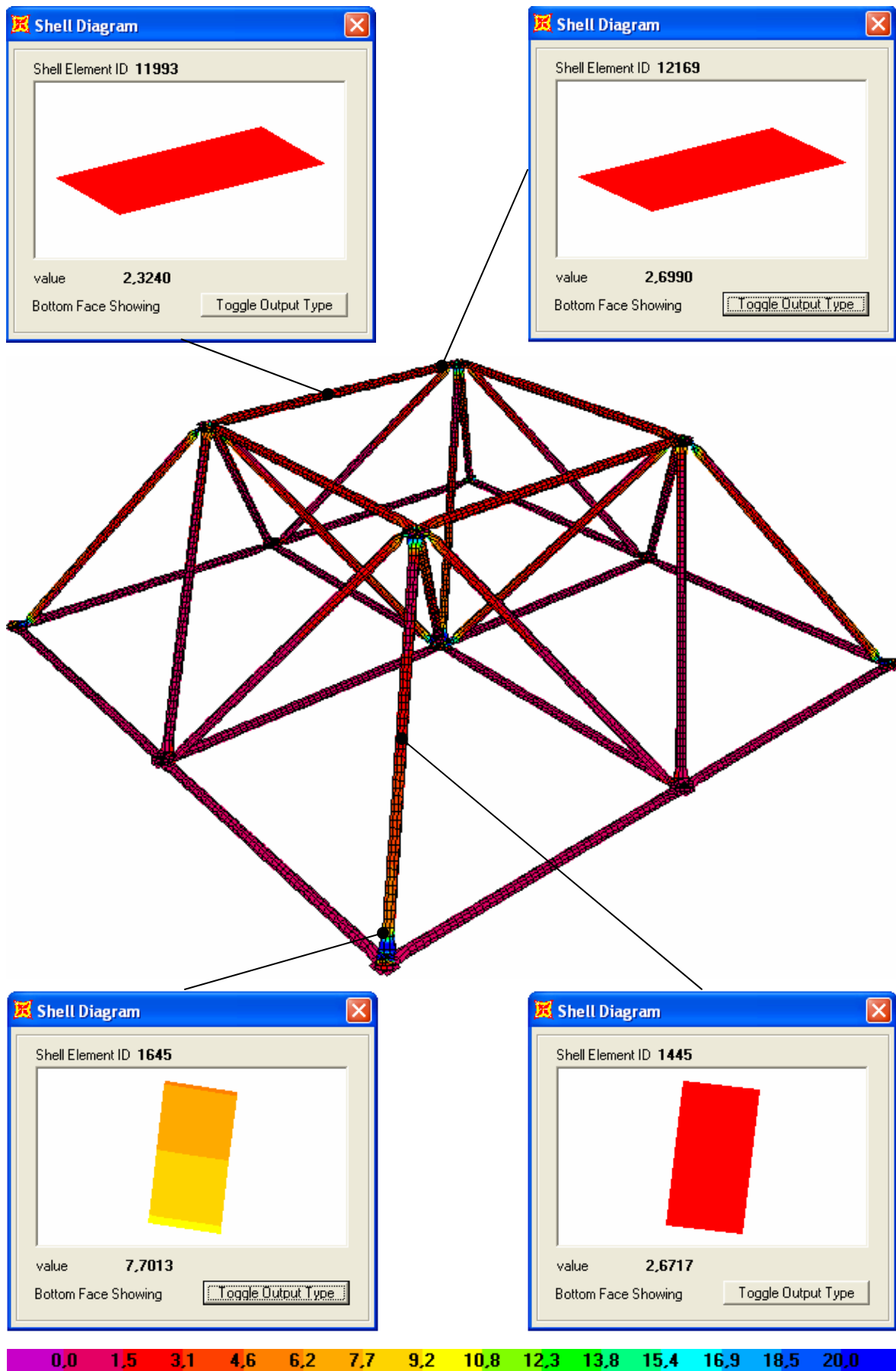


Figura 7.30 – Diagrama de distribuição de tensões ( $\text{kN/cm}^2$ ) – Carga 3= 8,63kN - LT

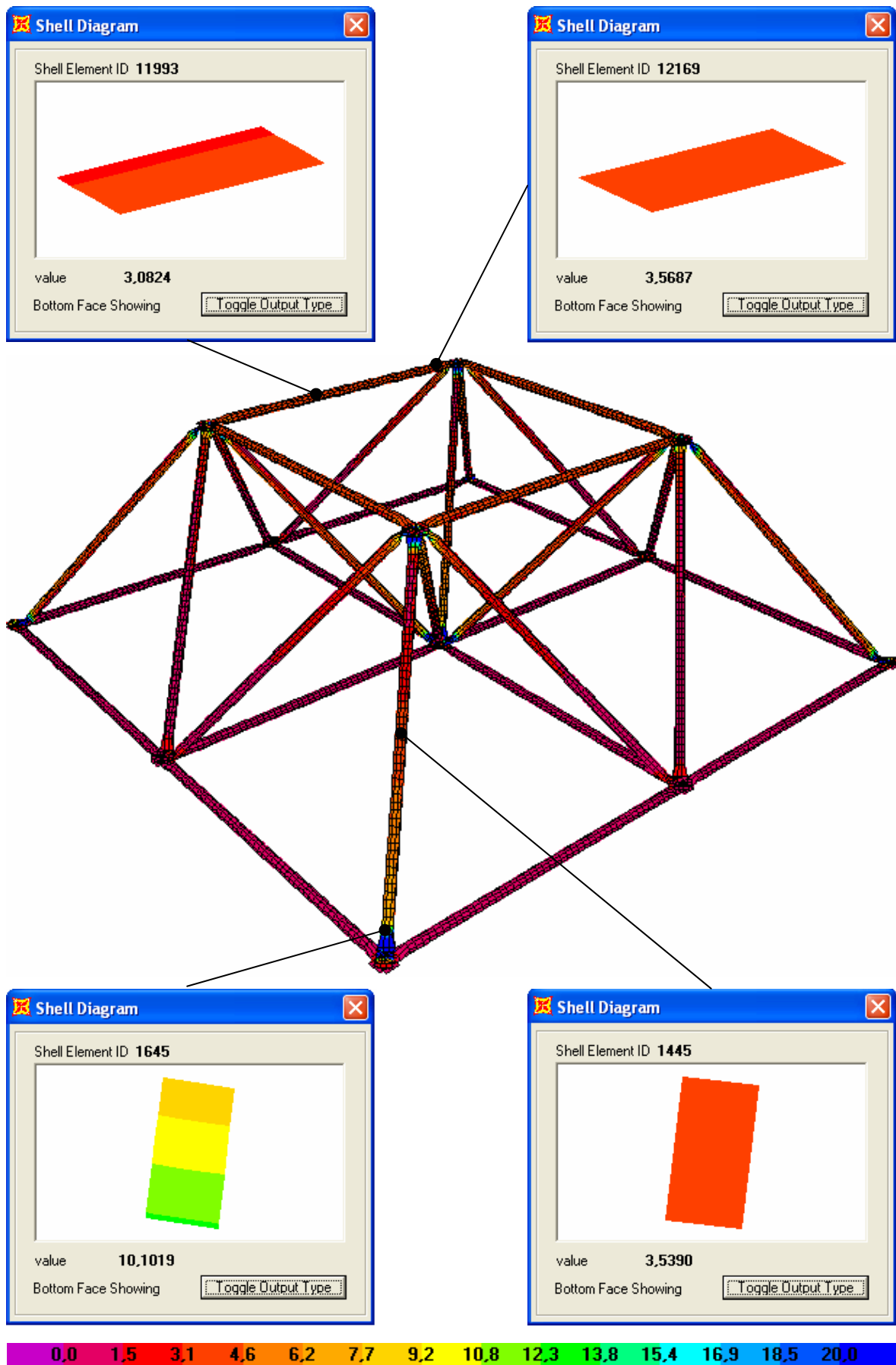


Figura 7.31 – Diagrama de distribuição de tensões ( $\text{kN/cm}^2$ ) – Carga 4= 11,44kN - LT



### 7.2.1.2. Evolução das tensões próxima ao nó em função das cargas aplicadas - LT

A Figura 7.32 mostra os diagramas de distribuição de tensões na extremidade da diagonal para os carregamentos que provocam apenas tensões dentro do regime elástico, para as estruturas com ligação típica. Note nestes gráficos as tensões no perímetro interno e externo da diagonal.

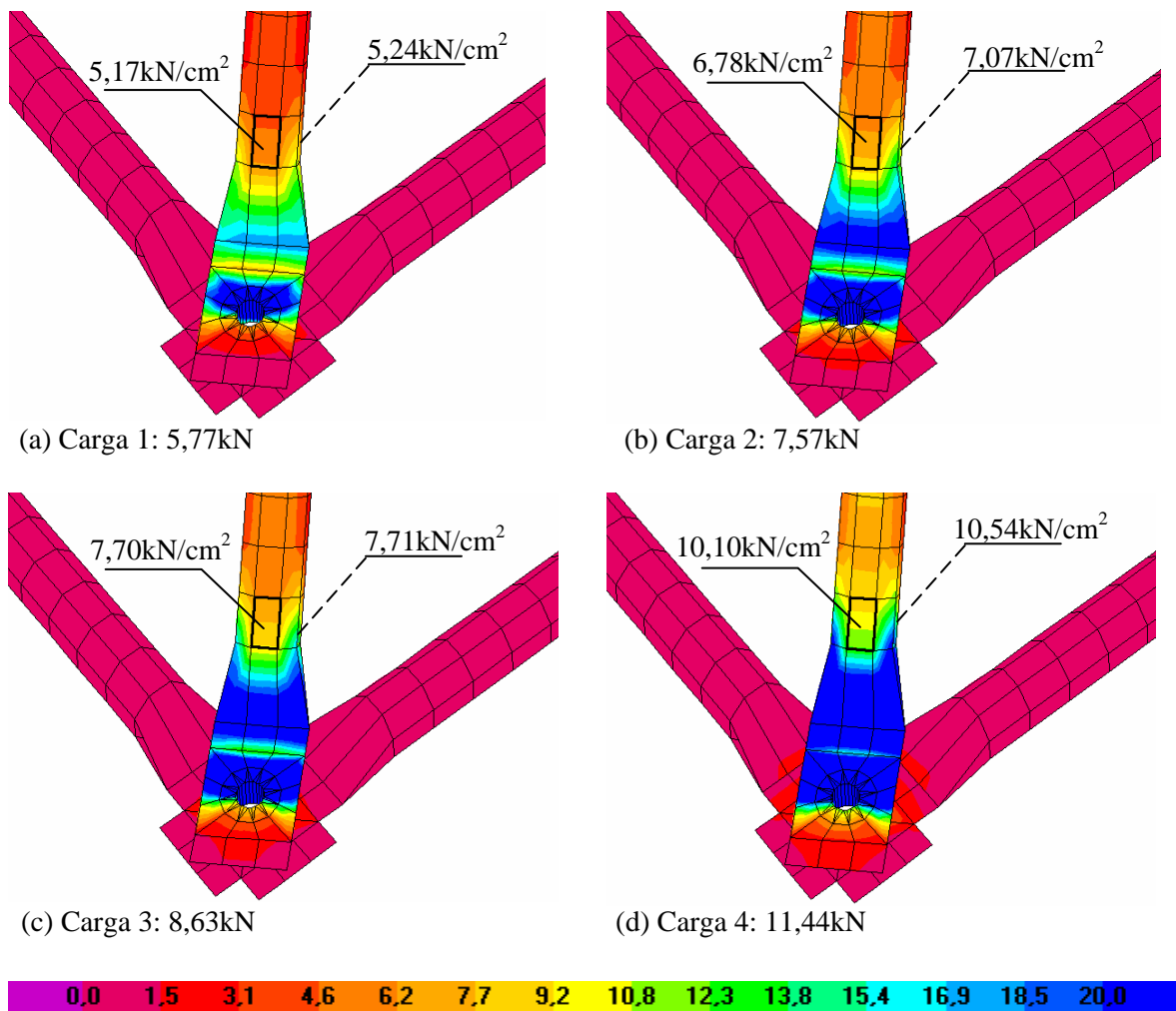


Figura 7.32 – Distribuição de tensões na extremidade da diagonal - LT (kN/cm<sup>2</sup>)

A Figura 7.33 mostra os diagramas de distribuição de tensões na extremidade do banzo para os carregamentos que provocam apenas tensões dentro do estado elástico. Note nestes gráficos as tensões no perímetro interno e externo do banzo. A Tabela 7.4 expõe um resumo das tensões nos elementos do perímetro interno e externo.

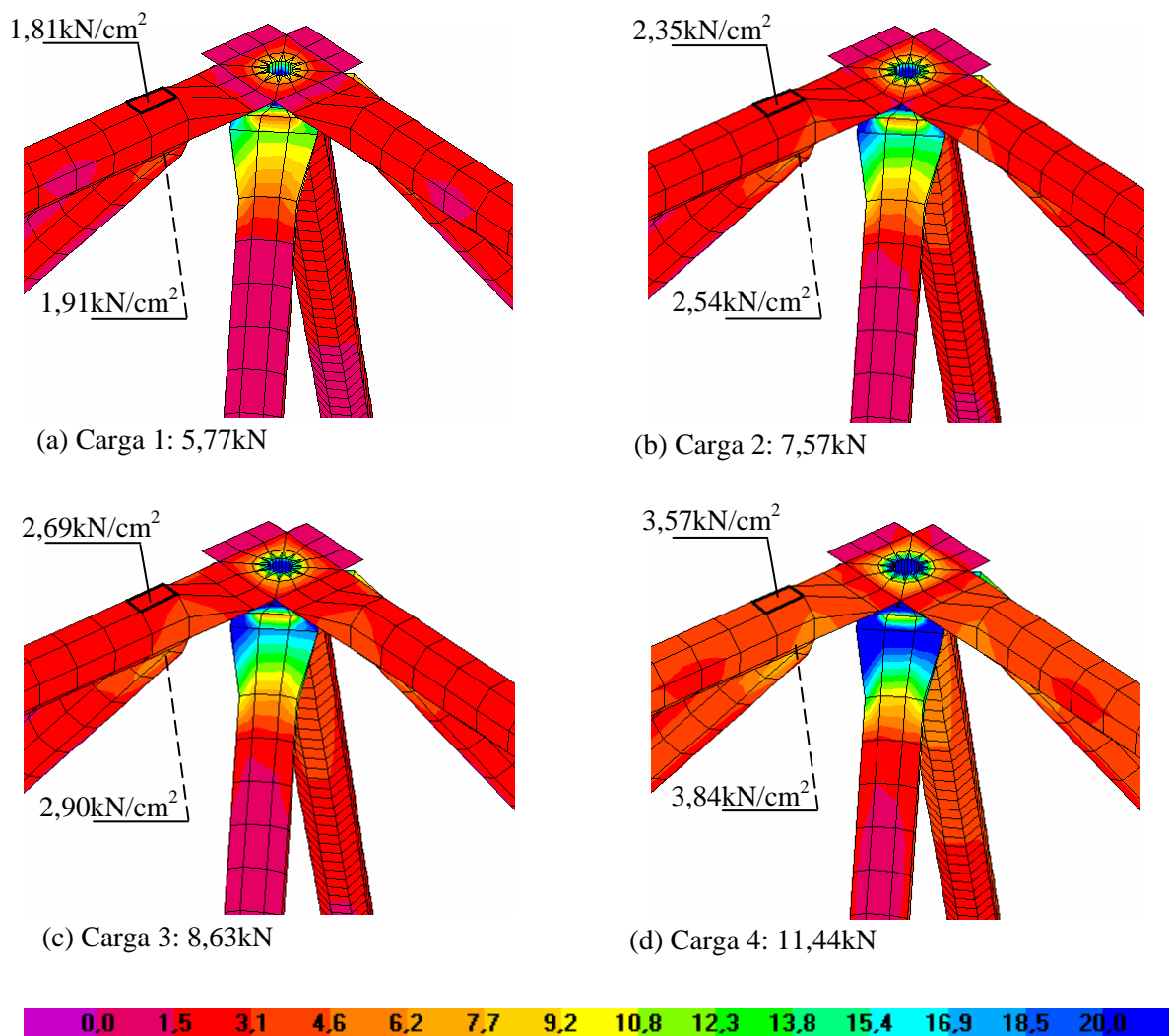


Figura 7.33 – Distribuição de tensões na extremidade do banzo – LT ( $\text{kN/cm}^2$ )

Tabela 7.4 – Tensões de VON MISES nos banzos e diagonais - LT ( $\text{kN/cm}^2$ )

CARGA (kN)	DIAG.EXT. EL.1645	DIAG.INT. EL.1641	BANZ.EXT. EL.12169	BANZ.INT. EL.12173
5,77	5,174	5,245	1,809	1,910
7,57	6,784	7,073	2,350	2,541
8,63	7,701	7,708	2,699	2,904
11,44	10,102	10,542	3,569	3,840

## 7.2.2. Resultados do modelo com ligação típica, distanciador e cobrejunta (LTDC)

### 7.2.2.1. Tensões nos banzos e diagonais – LTDC

A Tabela 7.5 expõe o resumo das tensões de VON MISES nos elementos da estrutura para os quatro carregamentos considerados. Nesta tabela 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.1445), 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 7.34 a 7.37 mostram os diagramas de distribuição das tensões, respectivamente para os quatro casos de carregamentos considerados (8,83kN; 11,21kN; 12,93kN e 15,58kN).

Tabela 7.5 – Tensões de VON MISES nos banzos e diagonais - LTDC (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

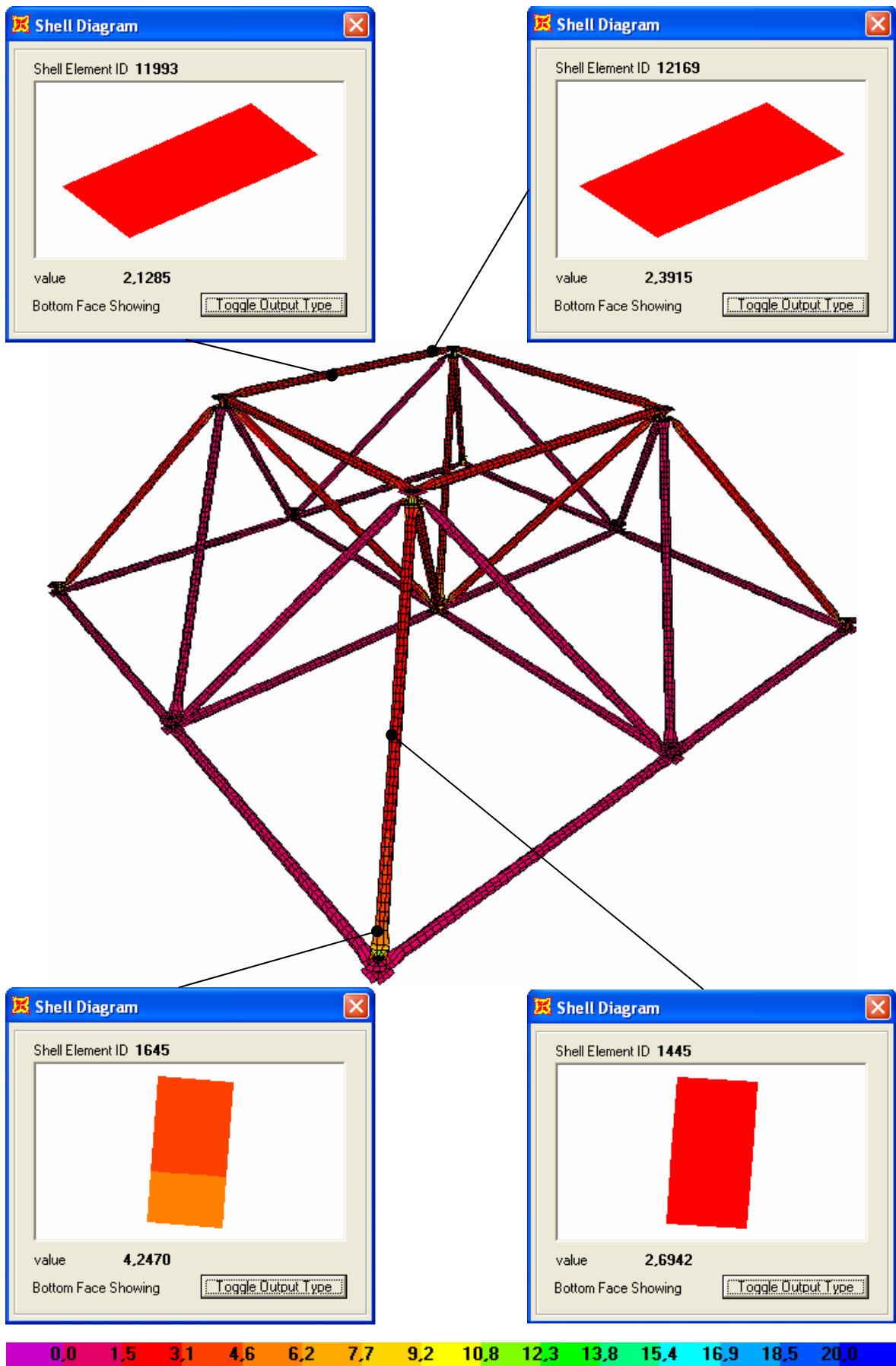


Figura 7.34 – Diagrama de distribuição de tensões ( $\text{kN/cm}^2$ ) – Carga 1= 8,83kN - LTDC

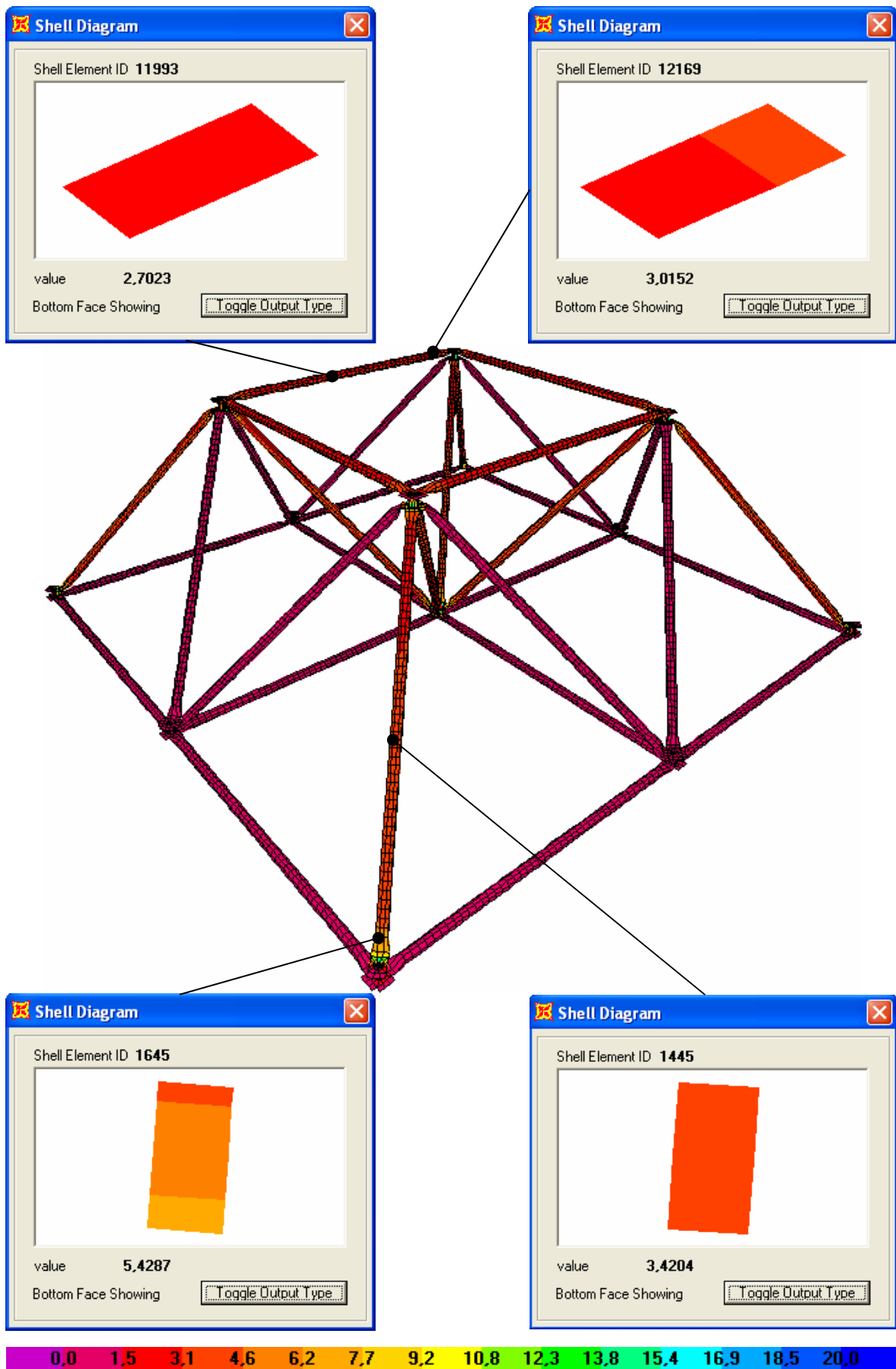


Figura 7.35 – Diagrama de distribuição de tensões (kN/cm<sup>2</sup>) – Carga 2= 11,21kN - LTDC

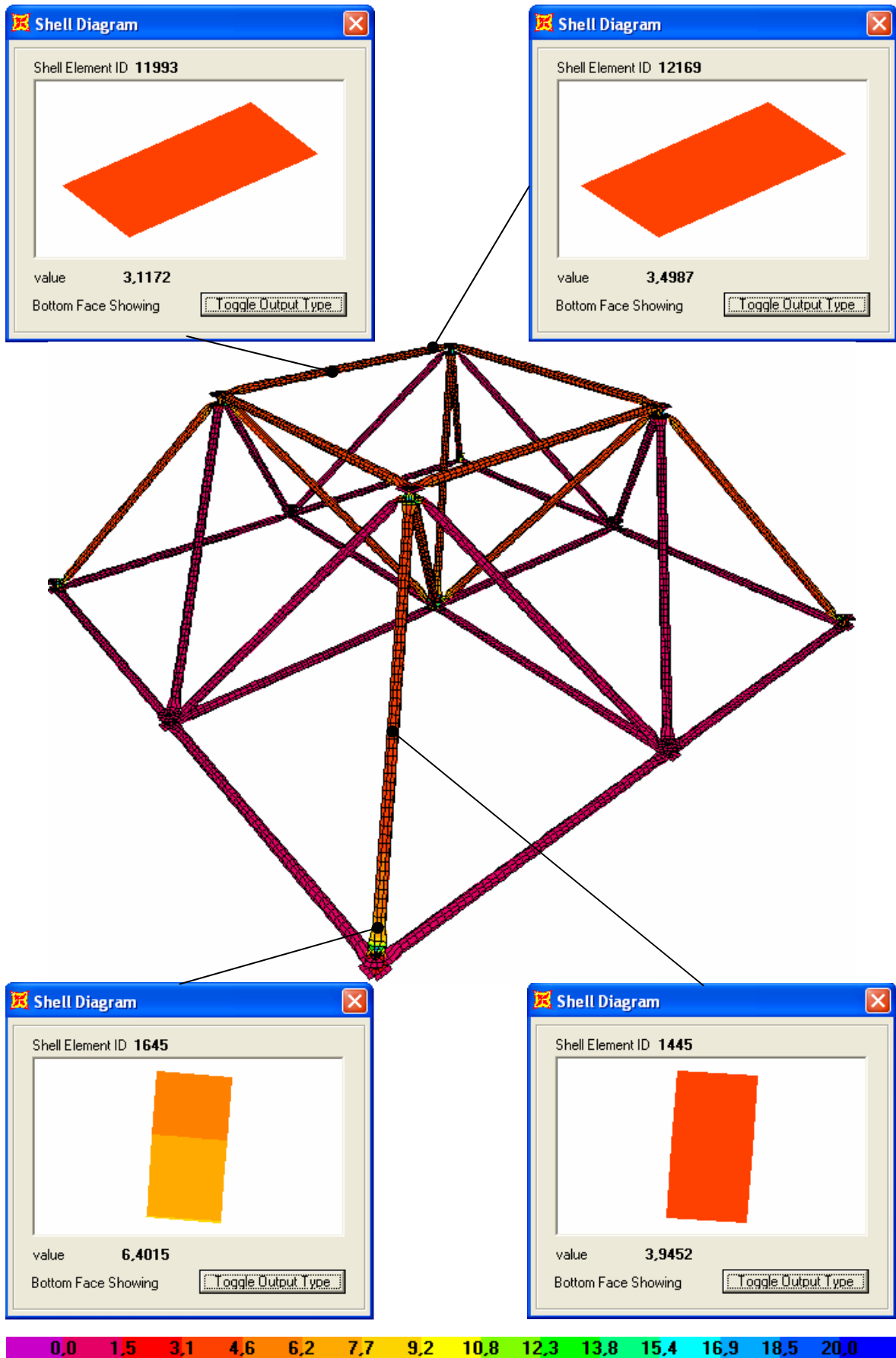


Figura 7.36 – Diagrama de distribuição de tensões ( $\text{kN/cm}^2$ ) – Carga 3= 12,93kN - LTDC

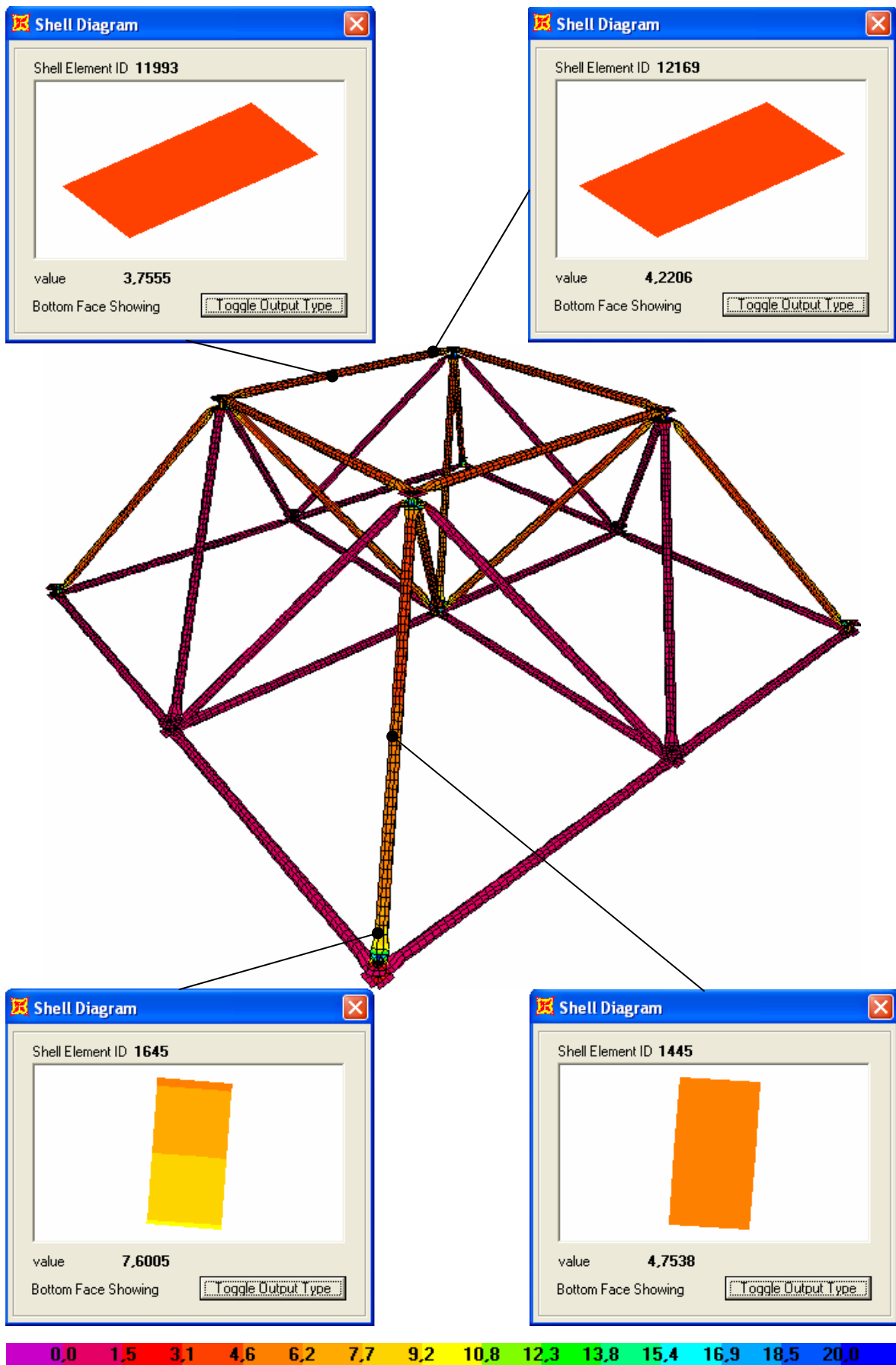


Figura 7.37 – Diagrama de distribuição de tensões (kN/cm<sup>2</sup>) – Carga 4= 15,58kN - LTDC

### 7.2.2.2. Evolução das tensões próxima ao nó em função das cargas aplicadas – LTDC

A Figura 7.38 mostra os diagramas de distribuição de tensões na extremidade da diagonal para os carregamentos que provocam apenas tensões dentro do estado elástico. Note nestes gráficos as tensões no perímetro interno e externo nas extremidades das diagonais.

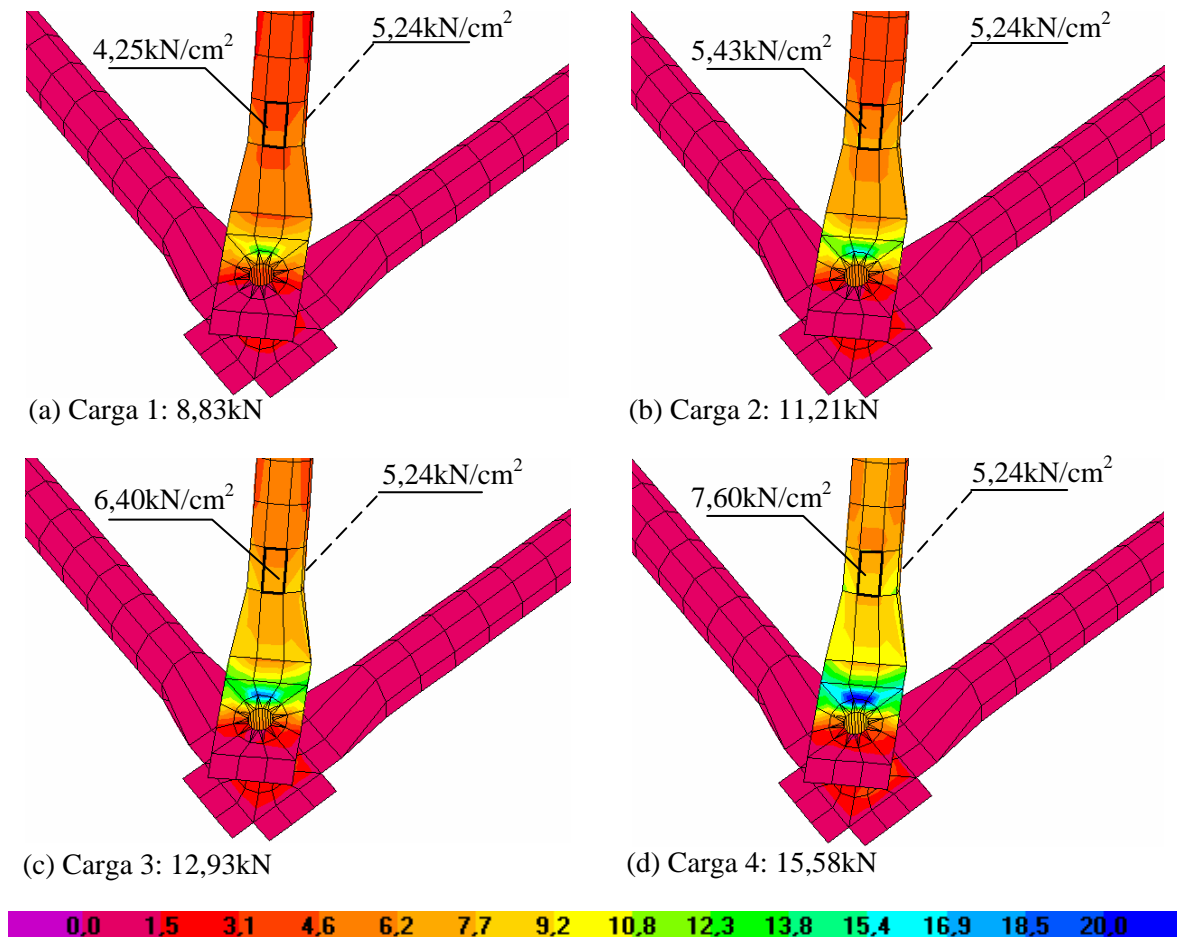


Figura 7.38 – Distribuição de tensões na extremidade da diagonal – LTDC (kN/cm<sup>2</sup>)

A Figura 7.39 mostra os diagramas de distribuição de tensões na extremidade do banzo para os carregamentos que provocam apenas tensões dentro do estado elástico. Note nestes gráficos as tensões no perímetro interno e externo da extremidade do banzo. A Tabela 7.6 expõe um resumo das tensões nos elementos do perímetro interno e externo aqui analisados.



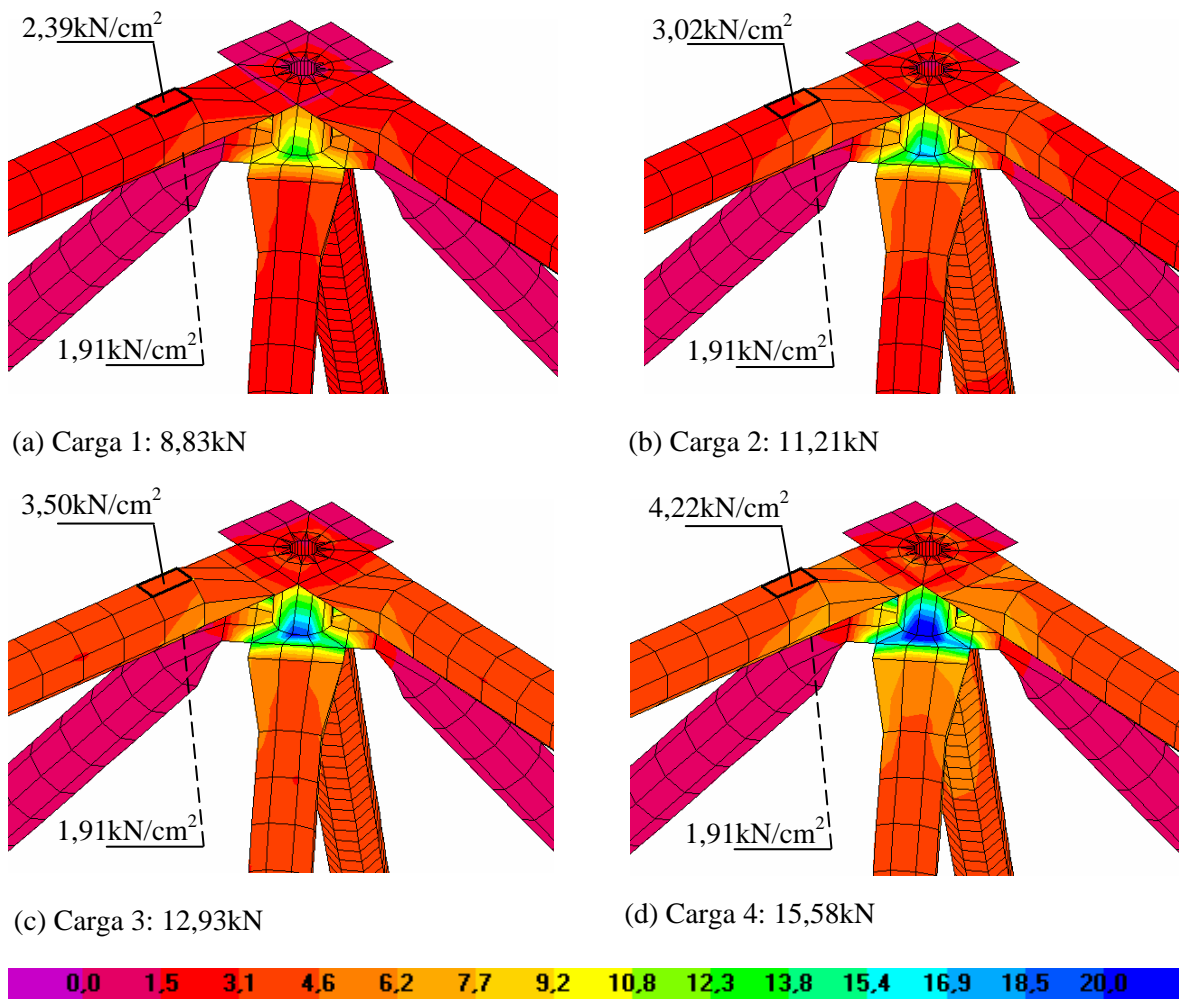


Figura 7.39 – Distribuição de tensões na extremidade do banzo – LTDC (kN/cm<sup>2</sup>)

Tabela 7.6 – Tensões de VON MISES nos banzos e diagonais - LTDC (kN/cm<sup>2</sup>)

CARGA (kN)	DIAG.EXT. EL.1645	DIAG.INT. EL.1641	BANZ.EXT. EL.12169	BANZ.INT. EL.12173
8,83	4,247	2,605	2,392	3,062
11,21	5,429	3,319	3,015	3,888
12,93	6,402	3,807	3,499	4,477
15,58	7,600	4,604	4,221	5,397

### 7.3. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DOS MODELOS LT E LTDC

#### 7.3.1. Comparação das tensões do meio e extremidade de banzos e diagonais

A Figura 7.40 mostra o gráfico comparativo das tensões nos elementos, da extremidade e do meio da diagonal, entre as estruturas com ligação típica (LT) e estruturas com ligação típica, distanciador e cobre-junta (LTDC). Se comparados os elementos da extremidade da diagonal (EL.1645) é possível observar que houve uma significativa redução na tensão do elemento da estrutura com distanciador e cobre-junta (LTDC-EXT-EL.1645) em relação ao elemento da estrutura típica (LT-EXT-EL.1645). Tal redução é de extrema importância pois é na extremidade onde ocorre o colapso da estrutura típica, tanto com carregamento estático como a fadiga. Quanto aos elementos do ponto médio da diagonal (EL.1445), não houve alteração nas tensões entre as estruturas com distanciador e cobre-junta (LTDC-MED-EL.1445) em relação à estrutura típica (LT-MED-EL.1445).

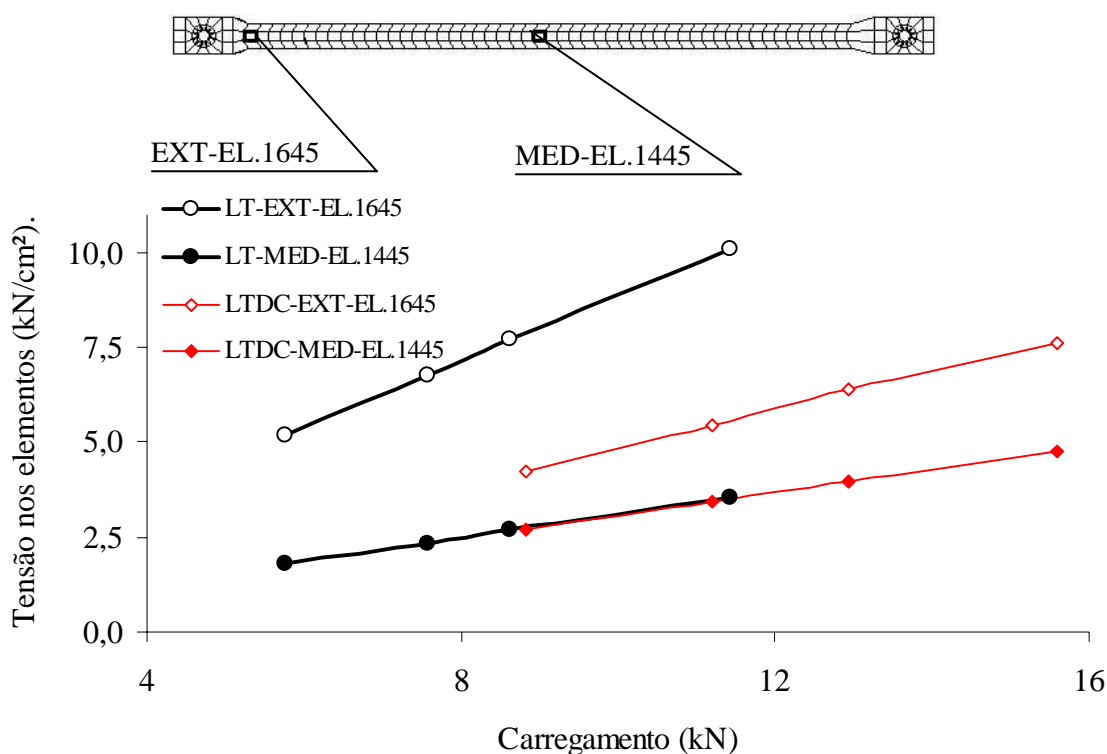


Figura 7.40 – Tensão nos elementos da diagonal versus carregamento aplicado

A Figura 7.41 mostra o gráfico comparativo das tensões nos elementos, da extremidade e do meio do banzo, entre as estruturas com ligação típica (LT) e estruturas com ligação típica, distanciador e cobre-junta (LTDC). Se comparados os elementos da extremidade do

banzo (EL.12169) é possível observar que houve uma pequena redução na tensão do elemento da estrutura com distanciador e cobre-junta (LTDC-EXT-EL.12169) em relação ao elemento da estrutura típica (LT-EXT-EL.12169). Quanto aos elementos do ponto médio do banzo (EL.11993), também houve uma redução nas tensões entre as estruturas com distanciador e cobre-junta (LTDC-MED-EL.11993) em relação à estrutura típica (LT-MED-EL.11993).

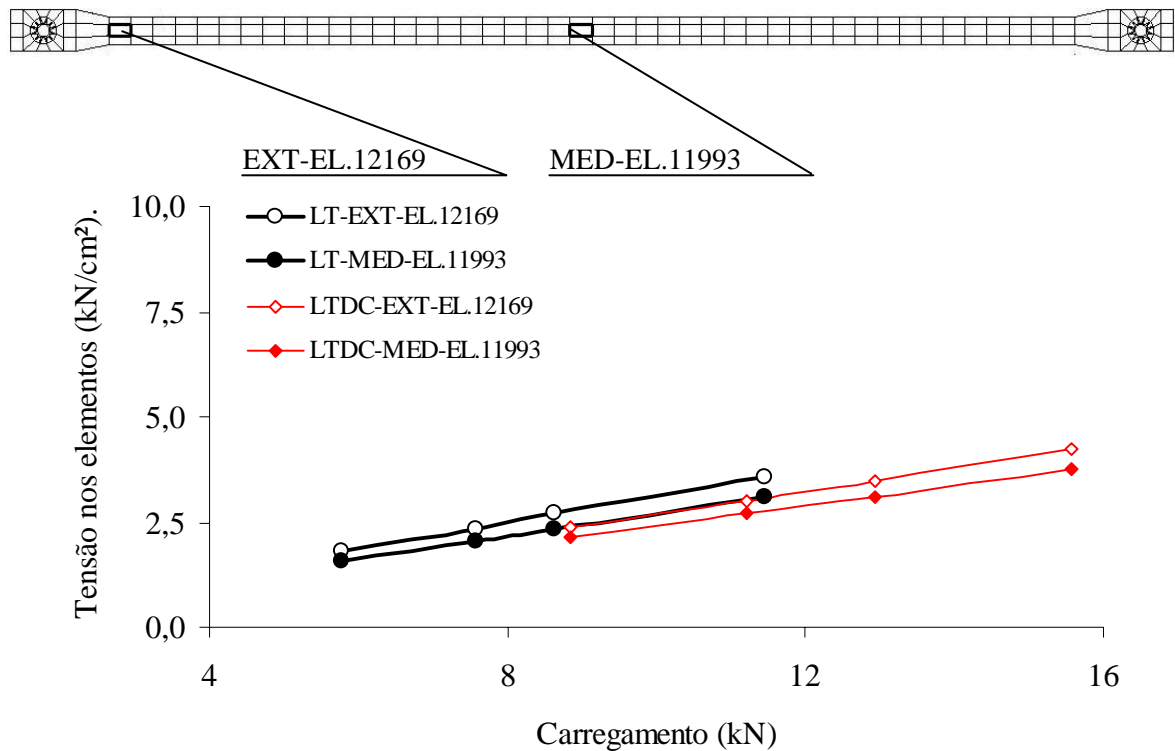


Figura 7.41 – Tensão nos elementos do banzo versus carregamento aplicado

### 7.3.2. Comparação das tensões do perímetro interno e externo dos banzos e diagonais

A Figura 7.52 mostra o gráfico comparativo das tensões nos elementos, do perímetro externo e interno da diagonal próximo à ligação, entre as estruturas com ligação típica (LT) e estruturas com ligação típica, distanciador e cobre-junta (LTDC). Se comparados os elementos do perímetro externo (EL.1645) é possível observar que houve uma significativa redução na tensão do elemento da estrutura com distanciador e cobre-junta (LTDC-EXT-EL.1645) em relação ao elemento da estrutura típica (LT-EXT-EL.1645).

Quanto aos elementos do perímetro interno (EL.1641), também houve uma redução nas tensões entre as estruturas com distanciador e cobre-junta (LTDC-INT-EL.1641) em relação à estrutura típica (LT-INT-EL.1641).

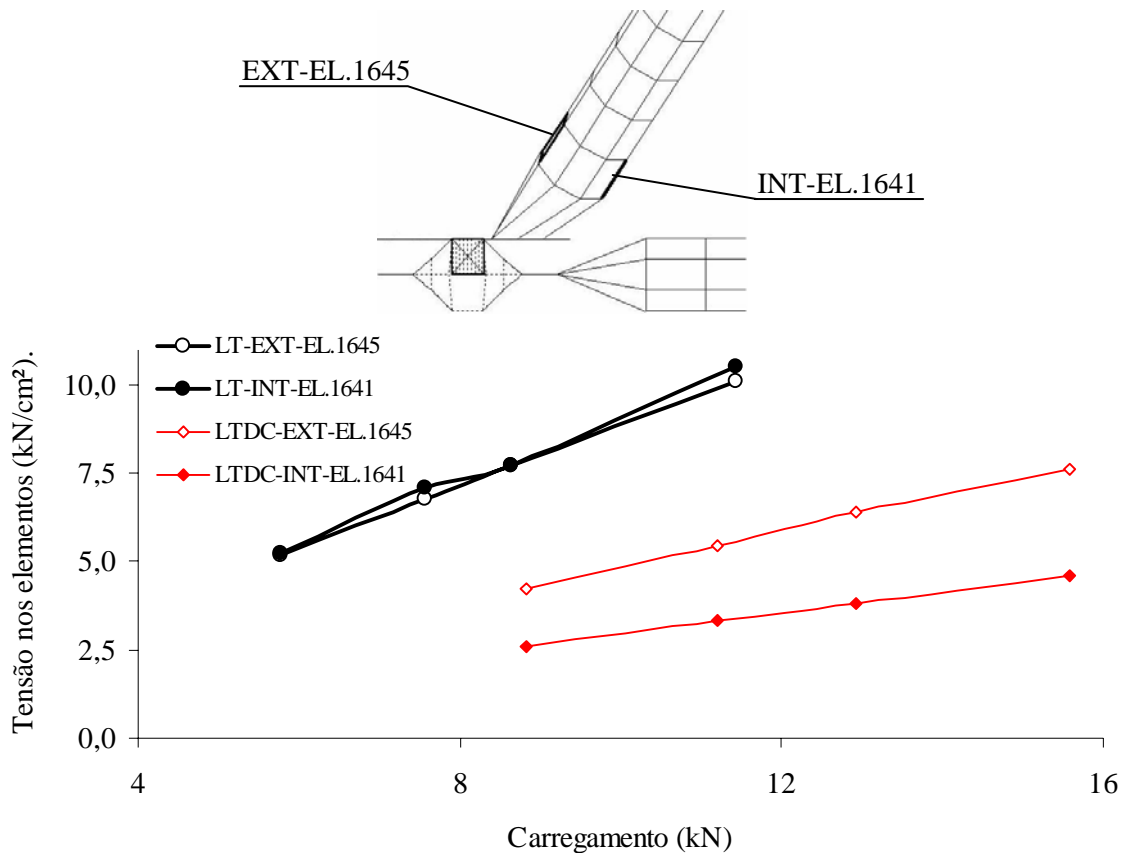


Figura 7.42 – Tensão nos elementos na extremidade da diagonal x carregamento aplicado

A Figura 7.43 mostra o gráfico comparativo das tensões nos elementos, do perímetro externo e interno do banzo próximo à ligação, entre as estruturas com ligação típica (LT) e estruturas com ligação típica, distanciador e cobre-junta (LTDC). Se comparados os elementos do perímetro externo (EL.12169) é possível observar que houve uma pequena redução na tensão do elemento da estrutura com distanciador e cobre-junta (LTDC-EXT-EL.12169) em relação ao elemento da estrutura típica (LT-EXT-EL.12169).

Quanto aos elementos do perímetro interno (EL.12173), houve um pequeno acréscimo nas tensões entre as estruturas com distanciador e cobre-junta (LTDC-INT-EL.12173) em relação à estrutura típica (LT-INT-EL.12173).

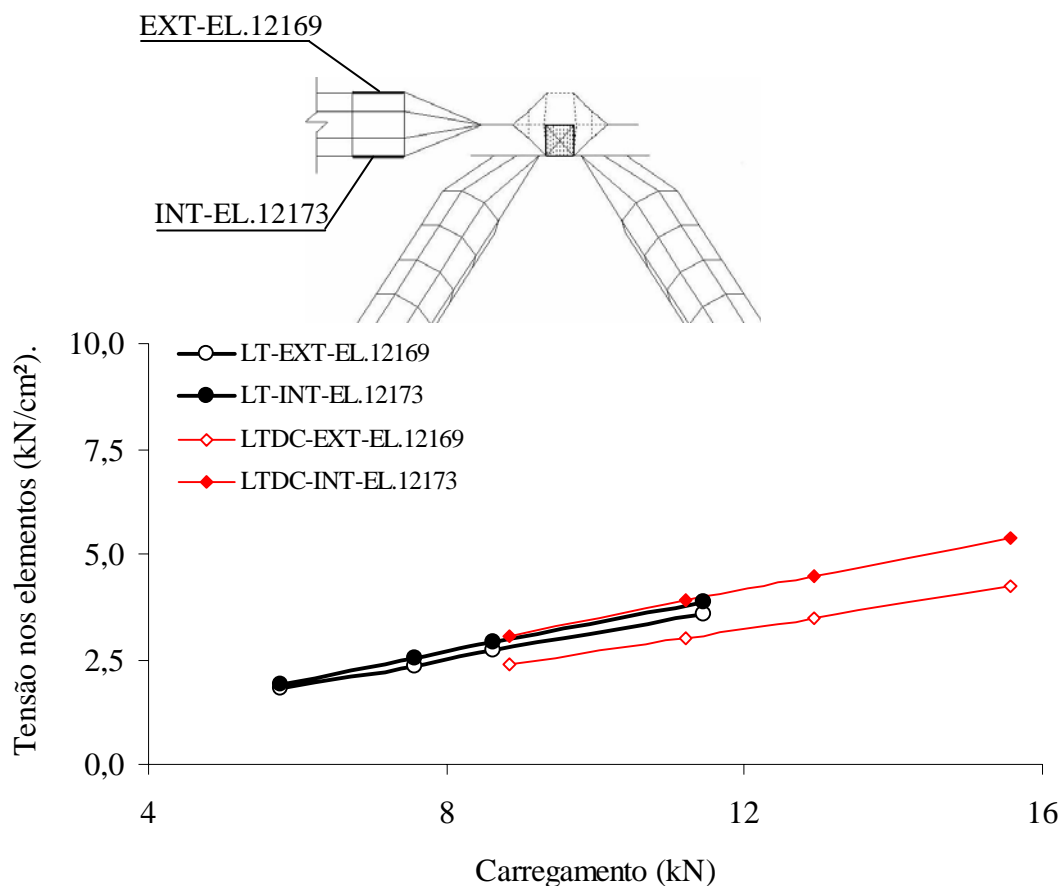


Figura 7.43 – Tensão nos elementos da extremidade do banzo x carregamento aplicado

Após análise e comparação dos resultados pôde-se concluir que as tensões nas diagonais são sempre maiores que as tensões nos banzos, quando comparadas extremidades e meio das barras. Tal fato é válido tanto para ligações típicas como para estruturas com ligações típicas com distanciador e chapa cobrejunta. As tensões nas extremidades das barras (diagonais ou banzos) são sempre maiores que as tensões no meio destas.

Existe uma diferença de tensão entre o perímetro externo e interno das barras, o que caracteriza a existência de momento, nos dois tipos de ligação. No entanto esta diferença de tensão foi amenizada com a correção e reforço da ligação. O que pode justificar o acréscimo de resistência à estrutura reforçada tanto nos ensaios estáticos, como nos ensaios dinâmicos.

Nos ensaios com carregamentos dinâmicos foram observados que as barras romperam por fadiga nas extremidades das diagonais. No estudo numérico ficou comprovado que são nas extremidades das diagonais os pontos da estrutura espacial de maior tensão. O estudo numérico, considerando apenas o comportamento elástico do material, foi realizado para possibilitar a construção dos gráficos com as curvas S-N dos protótipos. No Capítulo 9, comparação e análise dos resultados, podem ser apreciadas as curvas características de fadiga considerando as tensões obtidas neste capítulo.

Dando seqüência ao estudo do comportamento estrutural de estruturas espaciais com nó típico e nó típico reforçado (distanciador e chapa cobrejunta), no Capítulo 8 a seguir será apresentado um estudo numérico considerando o regime plástico do material. Tal estudo possibilitará uma comparação com os estudos já realizados.

## 8. ESTUDO NUMÉRICO NO REGIME PLÁSTICO – MEF

Neste capítulo é exposto um estudo numérico via método dos elementos finitos, considerando o comportamento elasto-plástico 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.

### 8.1. DISCRETIZAÇÃO DOS MODELOS

O programa de análise, fundamentado no método de elementos finitos, aplicado no estudo foi o ANSYS. Neste será 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.

#### 8.1.1. Elemento de placa (SHELL43)

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 8.1. Na Figura 8.2 podem ser observados a direção e sentidos dos esforços no elemento, convencionados pelo programa.

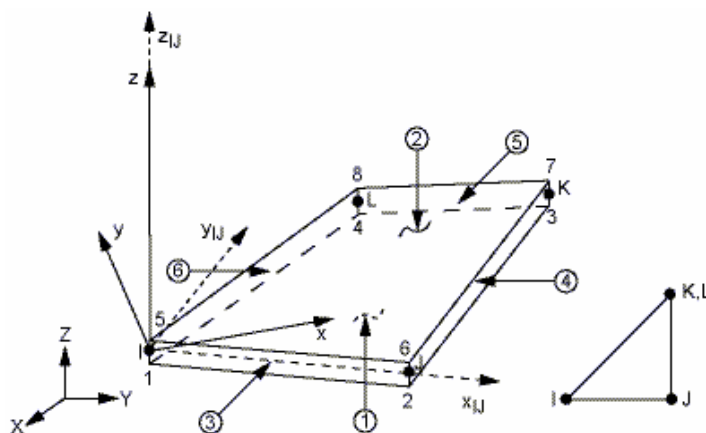


Figura 8.1– Elemento de Placa (SHELL43)

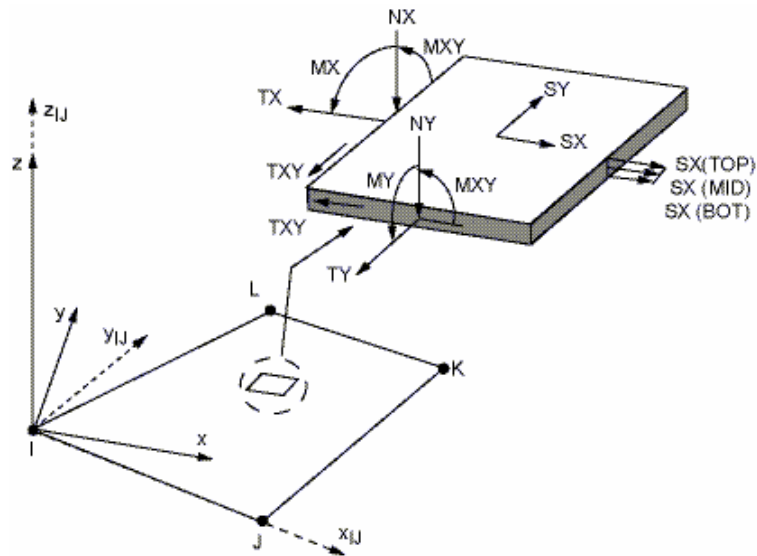


Figura 8.2– Direção e sentidos dos esforços no elemento de placa (SHELL43)

### 8.1.2. Discretização dos banzos e diagonais dos protótipos

A discretização aplicada no Capítulo 7, para banzos e diagonais, foi adotada na íntegra no Capítulo 8. Assim foram adotadas as coordenadas nodais e conectividade dos elementos. A diferença nos modelos foi apenas o elemento utilizado. No Capítulo 7 foi adotado o elemento de placa SHELL da biblioteca do programa SAP2000, e no Capítulo 8 foi adotado o elemento de placa SHELL43 da biblioteca do programa ANSYS.

Desta forma a Figura 7.4 mostra a malha em elementos finitos da diagonal. Na discretização do corpo do tubo foram utilizados 416 elementos de placa (SHELL43), com a espessura da parede do tubo (espessura = 1,5mm). Na discretização das extremidades amassadas do tubo foram utilizados 108 elementos de placa (SHELL43), com a espessura dupla da parede do tubo (espessura = 3mm). Observe o detalhe da extremidade amassada na Figura 7.6.

A Figura 7.5 mostra a malha em elementos finitos do banzo. Na discretização do corpo do tubo foram utilizados 368 elementos de placa (SHELL43), com a espessura da parede do tubo (espessura,  $t = 1,5\text{mm}$ ). Os elementos do corpo do banzo foram dispostos radialmente formando a parede do tubo. Na discretização das extremidades amassadas do tubo foram utilizados 108 elementos de placa (SHELL43), com a espessura dupla da parede do tubo (espessura,  $t = 3\text{mm}$ ).



### 8.1.3. Discretização da estrutura com nó típico (LT)

A Figura 8.3 mostra a discretização do conjunto completo da estrutura treliçada tridimensional com nó típico. Note nesta figura a posição dos banzos e diagonais, nestes foi adotado o material tipo 1. As dimensões externas são similares às estruturas do ensaio experimental. A Figura 8.4 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. As características dos materiais serão expostas posteriormente.

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, como pode ser observado na Figura 7.10 e 7.11. A Figura 7.12 mostra em detalhe a malha do parafuso, discretizada com 24 elementos de placa.

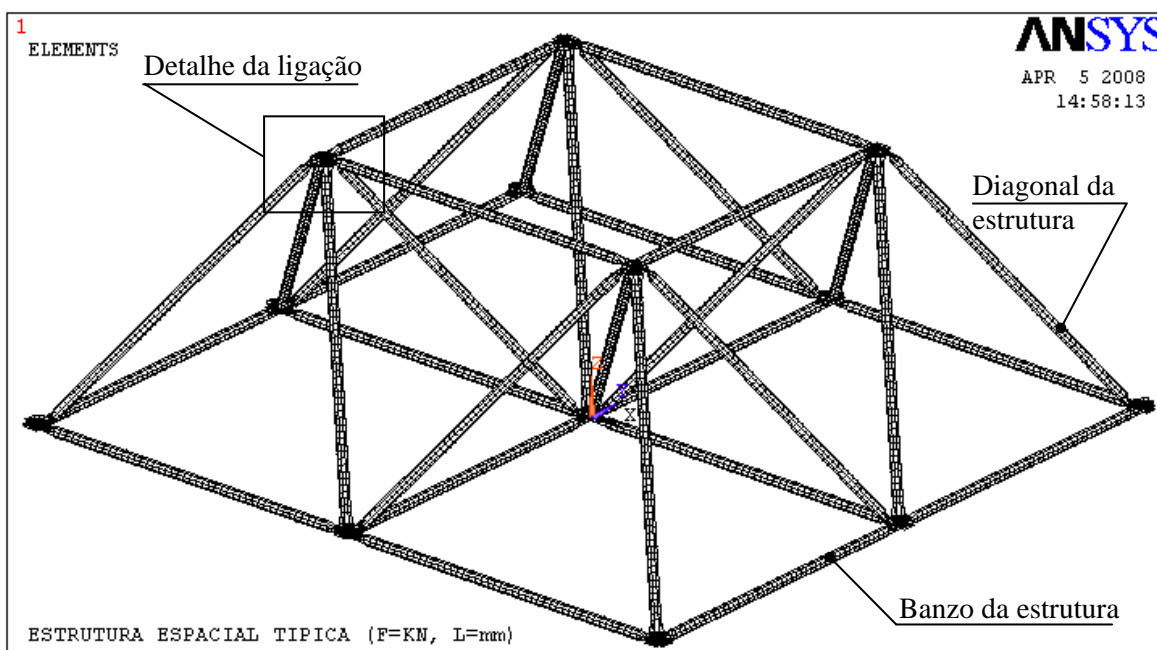


Figura 8.3 – Modelo de treliça com ligação com nó típico – LT (ANSYS)

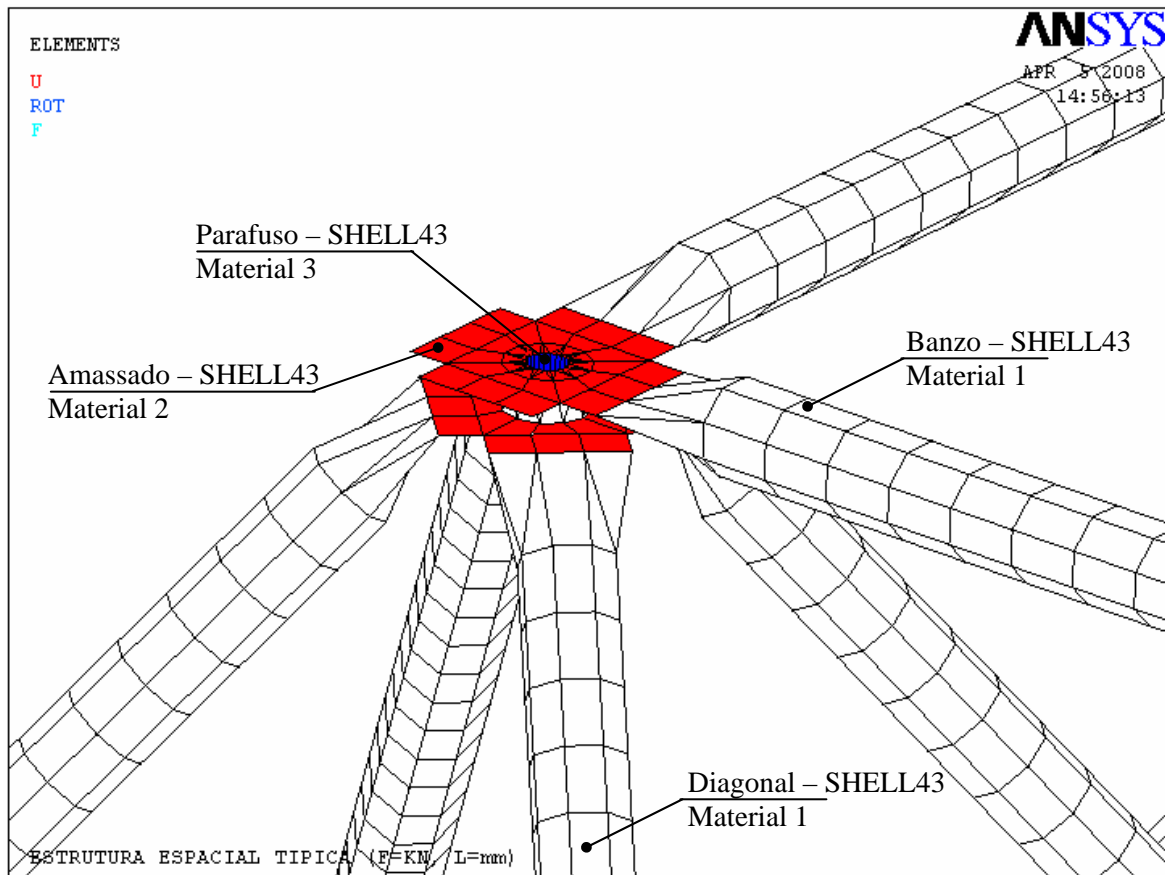


Figura 8.4 – Detalhe da ligação com nó típico

#### 8.1.4. Discretização da estrutura com nó típico, distanciador e cobrejunta (LTDC)

A Figura 8.5 mostra a discretização do conjunto completo da estrutura treliçada tridimensional com nó típico, distanciador e cobrejunta. Note nesta figura a posição dos banzos e diagonais, nestes foi adotado o material tipo 1. A Figura 8.6 dá ênfase ao detalhe da ligação. 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 na ligação. Nos elementos da extremidade amassada foram adotados elementos de placa (SHELL43) e o material tipo 2.

Na discretização da estrutura treliçada tridimensional com nó 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.

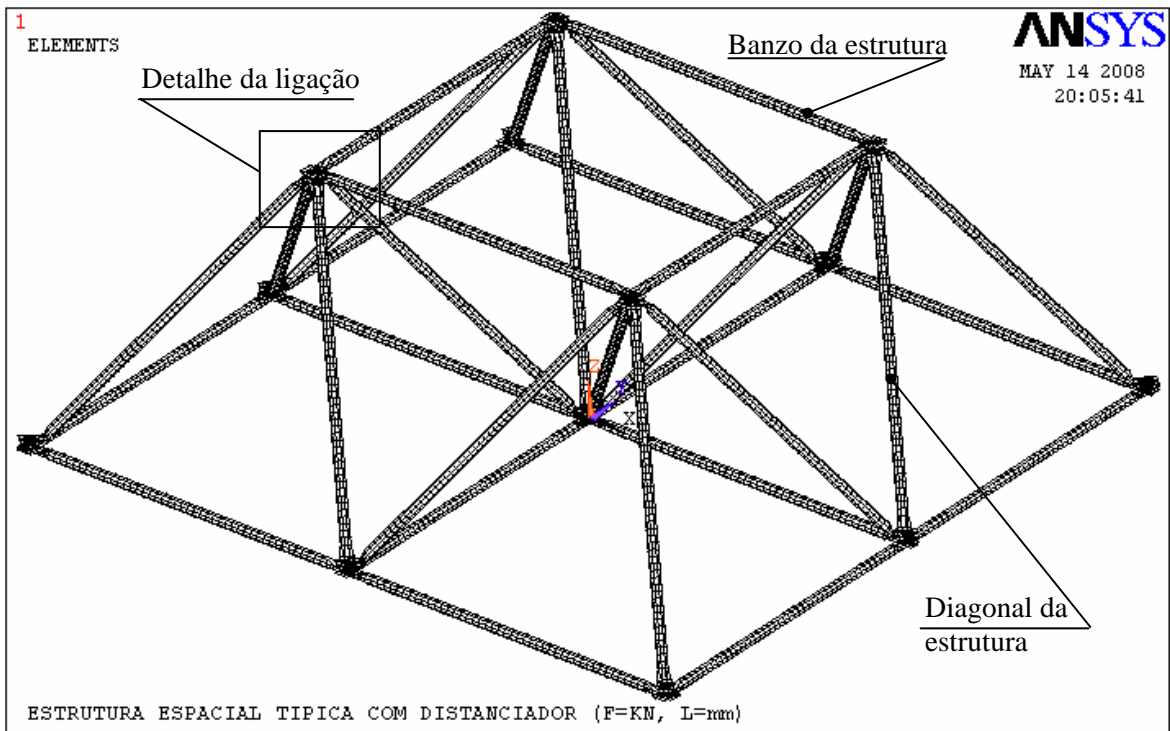


Figura 8.5 – Treliça com ligação com nó típico, distanciador e cobrejunta - LTDC

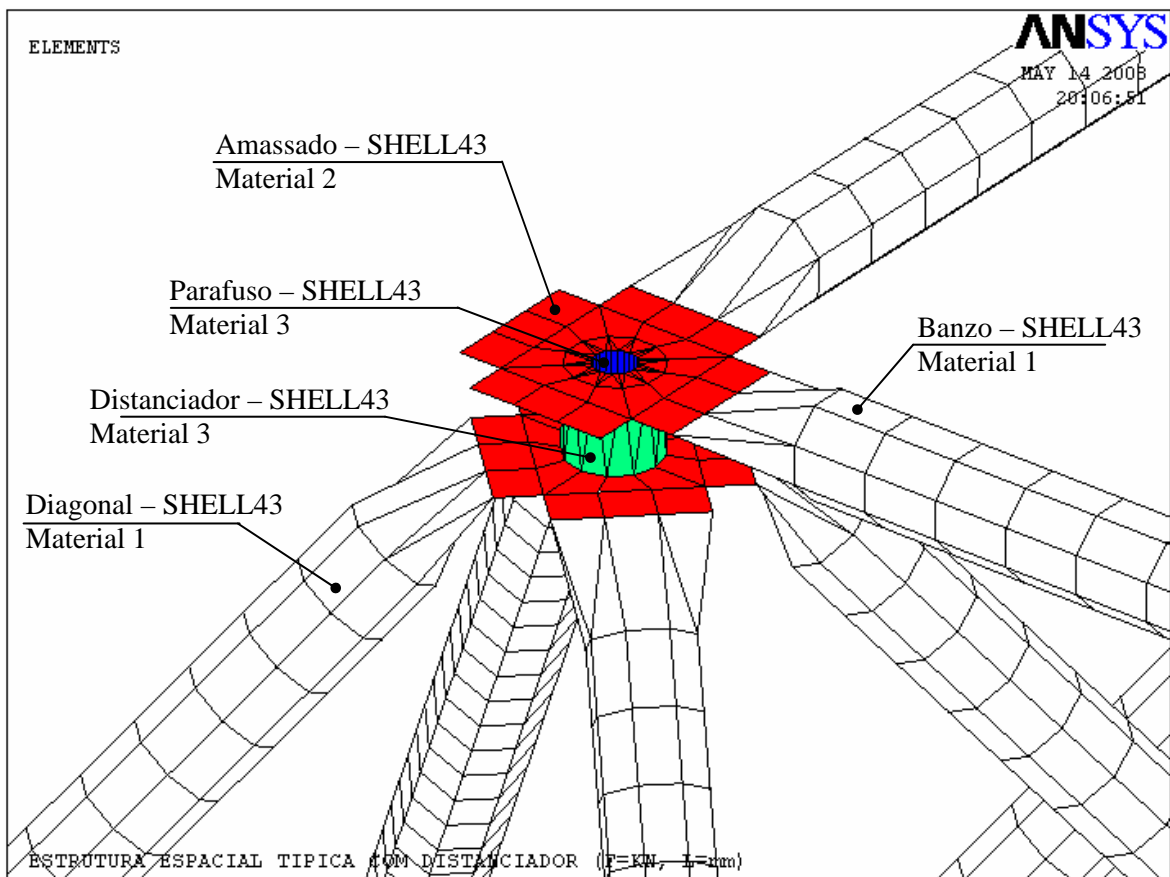


Figura 8.6 – Detalhe da ligação com nó típico, distanciador e cobrejunta

### 8.1.5. Restrições nos modelos – LT e LTDC

A Figura 8.7 mostra as restrições impostas na estrutura treliçada. Estas são validas tanto para o modelo com ligação típica como para o modelo com ligação típica, distanciador e chapa cobrejunta. Nos nós de apoio (Apoio 1, 2, 3 e 4) onde foram aplicadas as restrições. Foram impostas restrições de 2º gênero aos 24 nós do perímetro do furo dos parafusos dos apoios (Apoios 1, 2, 3 e 4), similar ao modelo da Figura 7.20, do Capítulo 7.

Além destas restrições, durante os estudo observou-se à necessidade de adotar mais restrições aos nós de apoio, como mostra a Figura 8.8. Tais restrições são de primeiro gênero, 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.

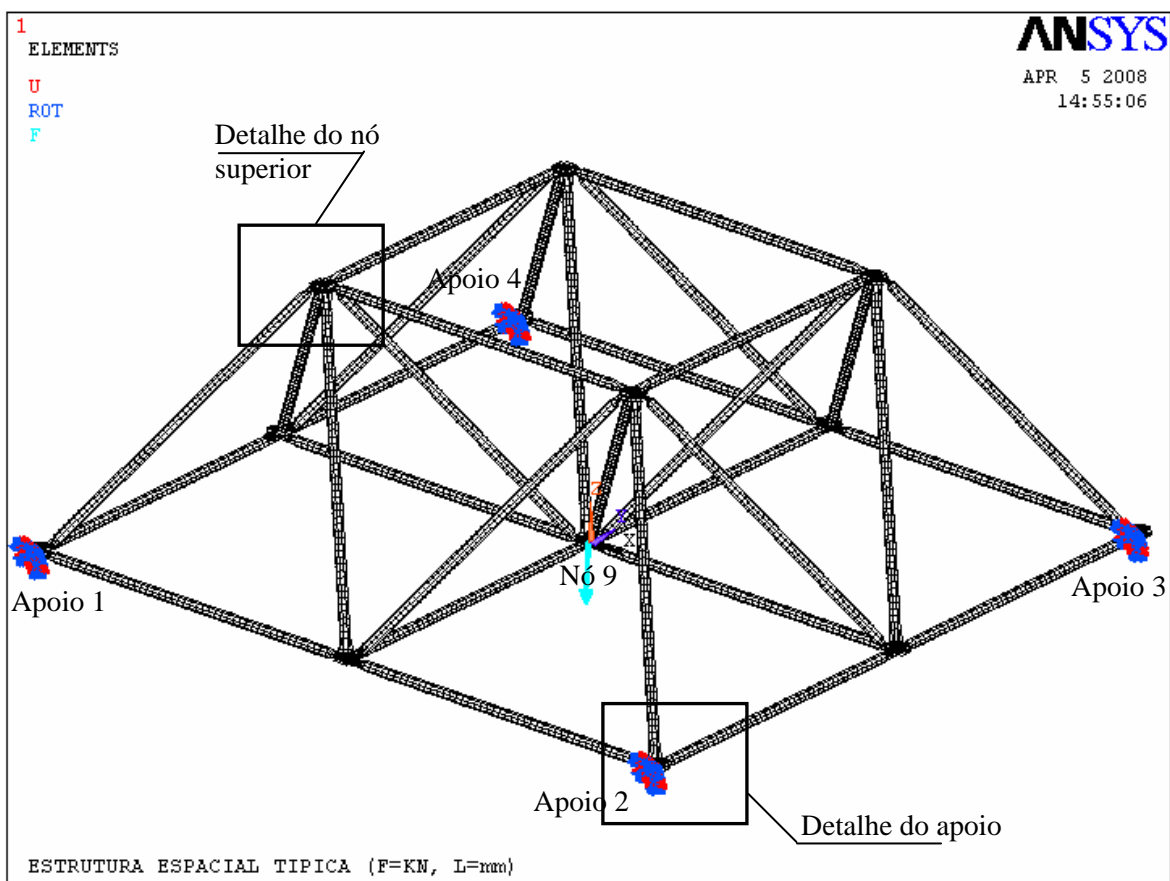


Figura 8.7 – Vista inferior da malha estrutura treliçada

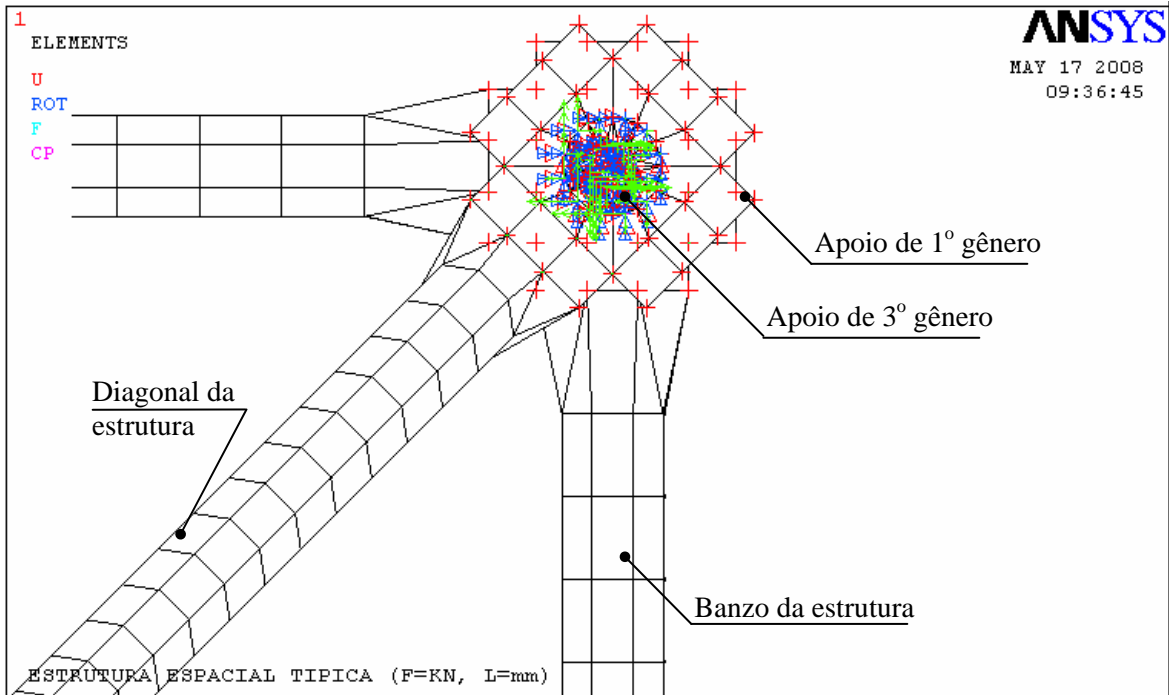


Figura 8.8 – Detalhe das restrições no apoio

Durante a calibração do modelo foi evidenciada a necessidade de solidarizar banzos e diagonais. Para tanto alguns nós das diagonais e banzos, da região amassada, foram acoplados. A Figura 8.9 mostra este acoplamento. Esta consideração gerou resultados satisfatórios, comparados com os resultados de Souza (2003), que utilizou elementos de contato nas faces dos elementos amassados.

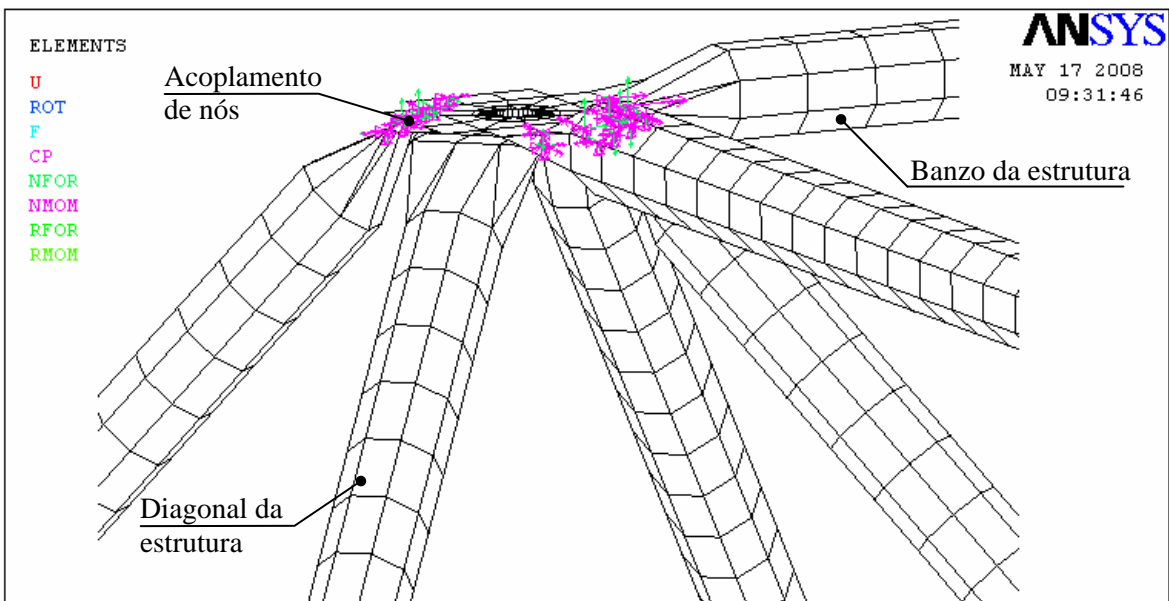


Figura 8.9 – Detalhe dos nós acoplados nos modelos

### **8.1.6. Carregamentos nos modelos – LT e LTDC**

O carregamento foi aplicado no nó 9, como mostra a Figura 8.7. 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.

### **8.1.7. Materiais e calibração do modelo**

Os parafusos e distanciadores são maciços e os ensaios experimentais comprovaram que não houve deformação nestes componentes. Desta forma considerando-se que os materiais componentes destes elementos 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/mm<sup>2</sup> e coeficiente de Poisson de 0,3.

Para os elementos dos banzos e diagonais foram adotados os resultados do ensaio de caracterização do material (Apêndice C). 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/mm<sup>2</sup> e coeficiente de Poisson de 0,3. A Figura 8.10 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 8.11, foi

determinado pela calibração do modelo. O gráfico do material tipo 2 foi alterado diversas vezes, até que o resultado do deslocamento da estrutura com nó típico computacional converge para o resultado 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.

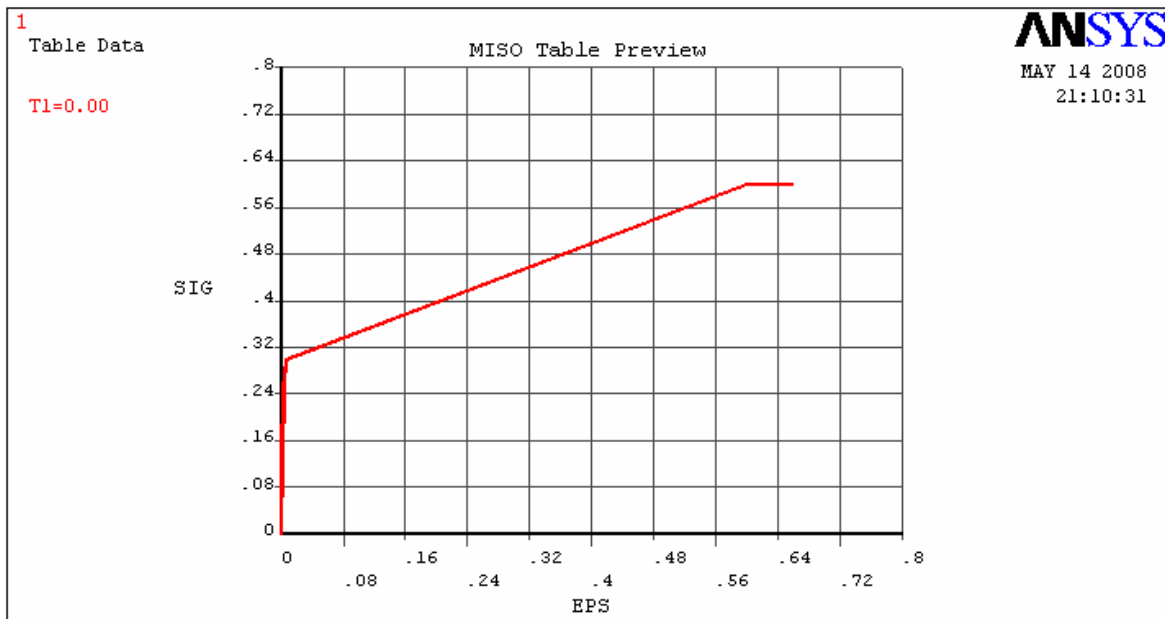


Figura 8.10 – Comportamento físico do material tipo 1 (kN/mm<sup>2</sup>)

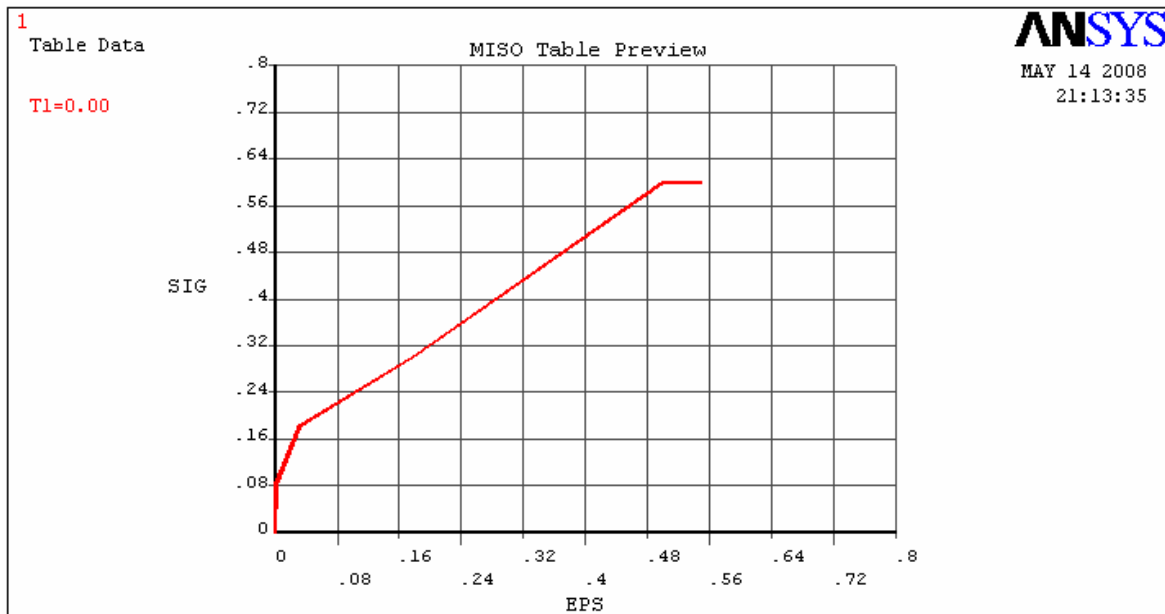
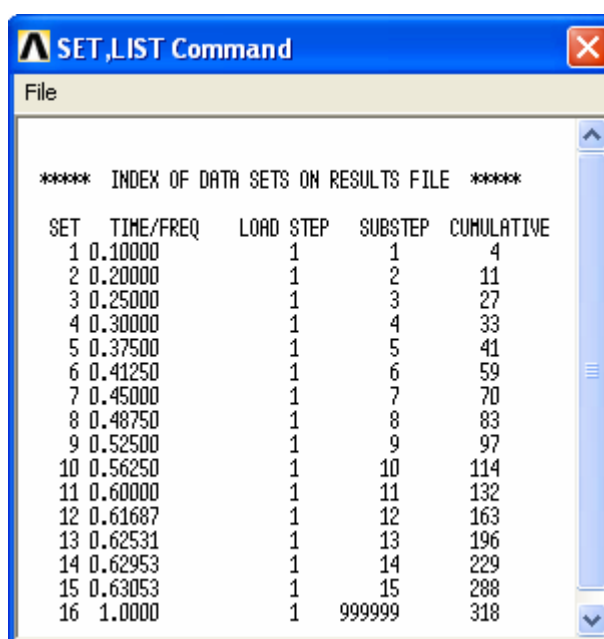


Figura 8.11 – Comportamento físico do material tipo 2 (kN/mm<sup>2</sup>)

## 8.2. RESULTADOS DO ESTUDO NUMÉRICO

### 8.2.1. Análise da estrutura com ligação típica - LT

Após a calibração do modelo com base nos resultados experimentais, foi processada a análise do modelo definitivo. Este modelo foi processado com passos de carga, definidos automaticamente pelo programa, de acordo com quantidade de iterações necessárias e possibilidade de convergência. Desta forma a Figura 8.12 mostra o resumo das análises geradas pelo programa. Nesta figura tem-se: “SET” é a quantidade de passos de carga, com um total de dezesseis; “TIME/FREQ” é a fração da carga total aplicada no modelo; “CUMULATIVE” é o número de iterações geradas em cada passo de carga, de forma acumulativa. É possível notar que o modelo convergiu até o 15º passo com 63,053% da carga aplicada (48kN), com 288 iterações totais.



The screenshot shows a window titled "SET,LIST Command" with a "File" menu. The main content is a table titled "INDEX OF DATA SETS ON RESULTS FILE". The table has five columns: SET, TIME/FREQ, LOAD STEP, SUBSTEP, and CUMULATIVE. The data is as follows:

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 8.12 – Resumo das análises processadas pelo programa ANSYS - LT

A Tabela 8.1 mostra: o resumo dos passos de carga; o percentual da carga aplicada; o valor numérico da carga aplicada no modelo; o deslocamento no nó central (nó 9); e a tensão máxima de VON MISSES, verificada entre banzos e diagonais, não considerando a região amassada e parafusos.

A partir dos dados da Tabela 8.1, foram traçados os gráficos das Figuras 8.13 e 8.15. A Figura 8.13 expressa graficamente o deslocamento do nó central em relação à carga



aplicada. Após a aplicação dos passos de carga a ligação da estrutura adquiriu a configuração final de acordo com a Figura 8.14, para o 15º passo, com 63,05% da carga aplicada. Neste gráfico “DMX” é o deslocamento máximo obtido. A Figura 8.15 plota graficamente a evolução das tensões na estrutura, banzos e diagonais, de acordo com o acréscimo do carregamento aplicado. Neste estudo foram considerados apenas banzos e diagonais, como mostra a Figura 8.16.

Tabela 8.1 – Resumo das cargas, deslocamentos e tensões do estudo - LT

Passo de carga	Percentual da carga 48kN (%)	Carga aplicada (kN)	Deslocamento no nó central (mm)	Tensão de VON MISSES (kN/m <sup>2</sup> )
-	0,00%	0,00	0,00	0,000
1	10,00%	4,80	0,57	0,048
2	20,00%	9,60	2,06	0,117
3	25,00%	12,00	3,49	0,133
4	30,00%	14,40	5,82	0,153
5	37,50%	18,00	10,36	0,159
6	41,25%	19,80	13,43	0,165
7	45,00%	21,60	16,93	0,180
8	48,75%	23,40	20,55	0,213
9	52,50%	25,20	24,15	0,245
10	56,25%	27,00	27,77	0,256
11	60,00%	28,80	31,43	0,264
12	61,69%	29,61	32,98	0,268
13	62,53%	30,01	33,90	0,271
14	62,95%	30,22	34,54	0,273
15	63,05%	30,27	35,01	0,274

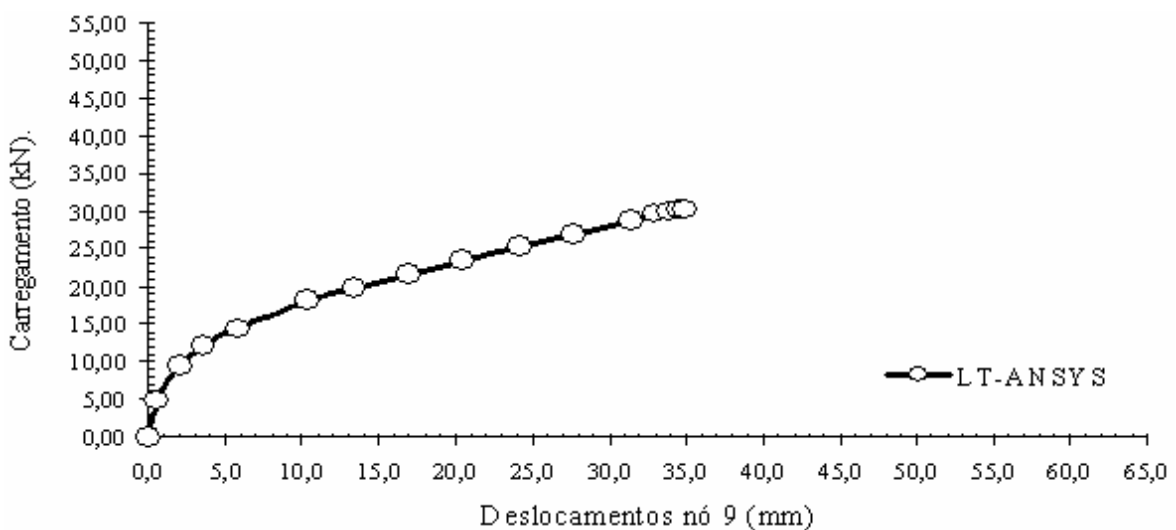


Figura 8.13 – Carregamento aplicado versus deslocamento do nó central - LT

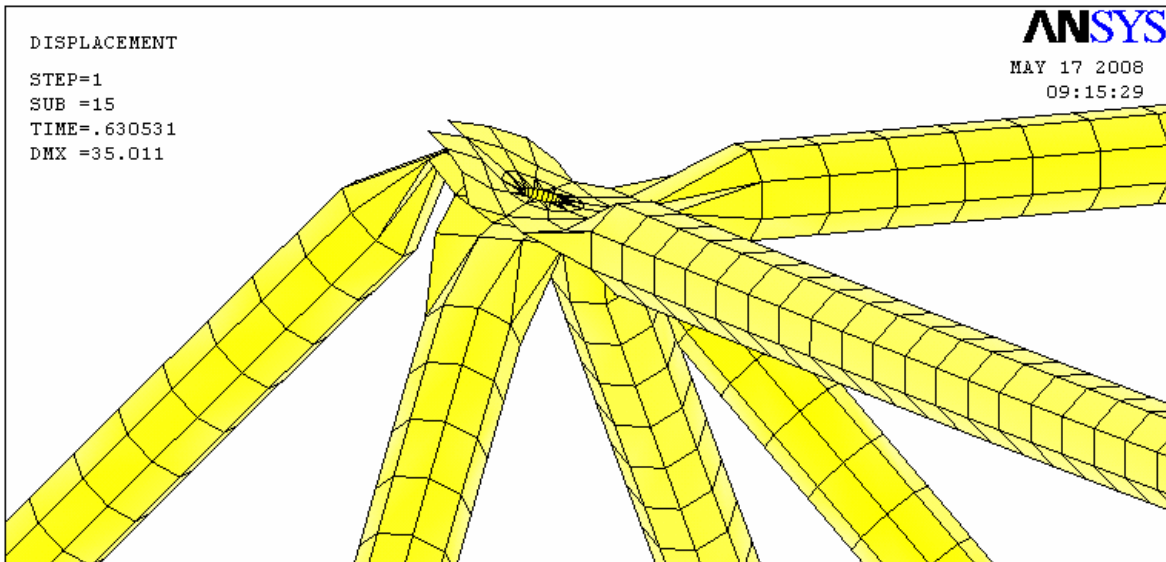


Figura 8.14 – Deformada da ligação para o carregamento final - LT

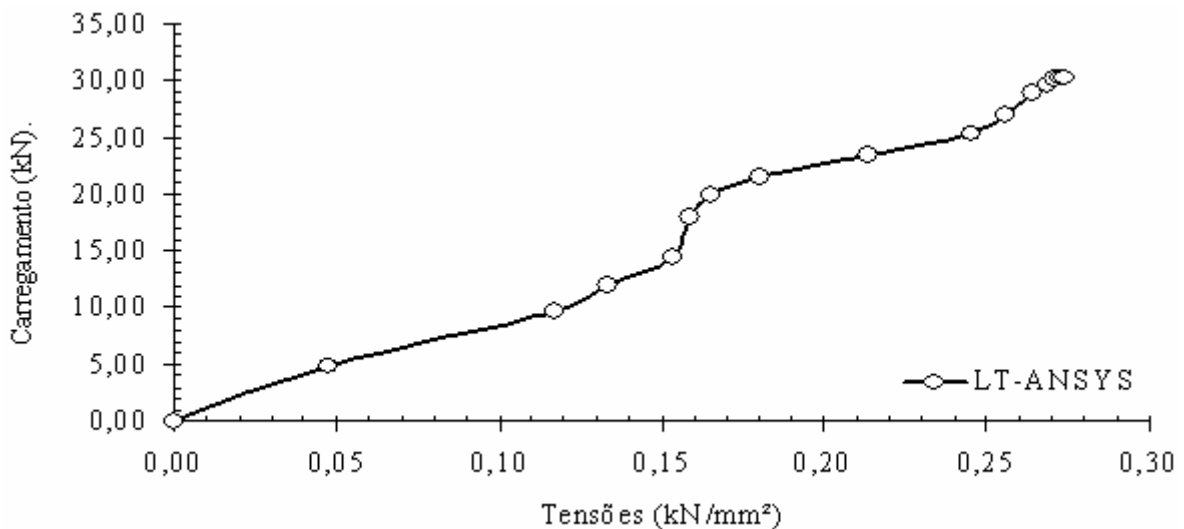


Figura 8.15 – Evolução das tensões na estrutura com a aplicação do carregamento - LT

A Figura 8.16 mostra a distribuição das tensões de VON MISSES nos elementos da estrutura, banzos e diagonais, para o 15º passo de carga. É possível notar que não foi considerada a tensão da região amassada. Nesta figura “SMN” é deformação máxima obtida e “SMX” é a tensão de VON MISSES máxima obtida no modelo.

A estrutura com nó típico entrou em colapso global devido ao colapso local da ligação, configurada pela Figura 8.14. Na Figura 8.15 foi possível observar que para a carga de colapso da ligação (30kN) as tensões nos banzos e diagonais não ultrapassaram

0,3kN/mm<sup>2</sup>, menor que a tensão de escoamento do material. Desta forma fica comprovado que não há colapso nas barras antes do colapso da ligação.

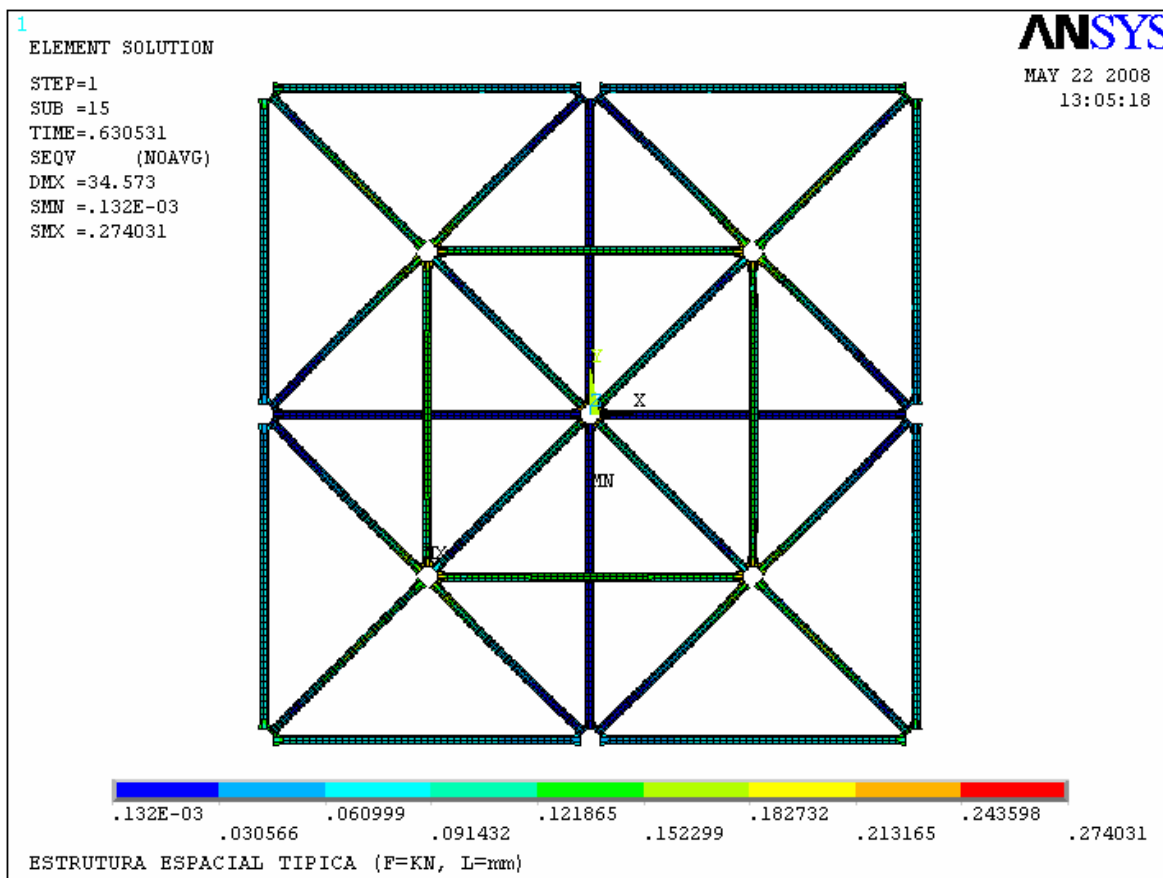


Figura 8.16 – Distribuição das tensões de VON MISSES nos elementos da estrutura - LT

### 8.2.2. Análise da estrutura com ligação típica, com distanciador e cobrejunta - LTDC

A Figura 8.17 mostra o resumo das análises geradas pelo programa. Nesta figura tem-se: “SET” é a quantidade de passos de carga, com um total de vinte e dois; “TIME/FREQ” é a fração da carga total aplicado no modelo; “CUMULATIVE” é o número de iterações geradas em cada passo de carga, de forma acumulativa. É possível notar que o modelo convergiu até o 21º passo com 71,89% da carga aplicada (72kN), com 305 iterações totais.

A Tabela 8.2 mostra: o resumo dos passos de carga; o percentual da carga aplicada; o valor numérico da carga aplicada no modelo; o deslocamento no nó central (nó 9); e a tensão máxima de VON MISSES, verificada entre banzos e diagonais, não considerando a região amassada e parafusos.

**SET,LIST Command**

File

\*\*\*\*\* INDEX OF DATA SETS ON RESULTS FILE \*\*\*\*\*

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 8.17 – Resumo das análises processadas pelo programa ANSYS - LTDC

A partir dos dados da Tabela 8.1, foram traçados os gráficos das Figuras 8.18 e 8.20. A Figura 8.18 expressa graficamente o deslocamento do nó central em relação a carga aplicada. Após a aplicação dos passos de carga a ligação da estrutura adquiriu a configuração final de acordo com a Figura 8.19, para o 21º passo, com 71,89% da carga aplicada. A Figura 8.20 plota graficamente a evolução das tensões na estrutura, banzos e diagonais, de acordo com o acréscimo do carregamento aplicado.

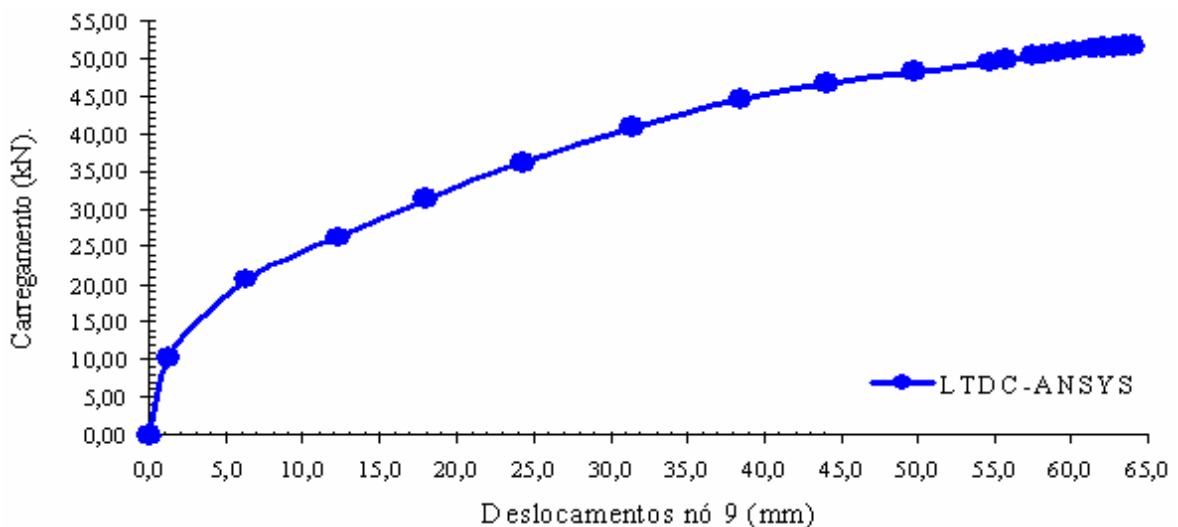


Figura 8.18 – Carregamento aplicado versus deslocamento do nó central - LTDC

Tabela 8.2 – Resumo das cargas, deslocamentos e tensões do estudo - LTDC

Passo de carga	Percentual da carga 72kN (%)	Carga aplicada (kN)	Deslocamento no nó central (mm)	Tensão de VON MISSES (kN/m <sup>2</sup> )
-	0,00%	0,00	0,00	0,000
1	14,29%	10,29	1,24	0,140
2	28,57%	20,57	6,27	0,251
3	36,54%	26,31	12,26	0,271
4	43,44%	31,27	18,02	0,295
5	50,34%	36,24	24,25	0,301
6	56,82%	40,91	31,42	0,304
7	61,85%	44,53	38,48	0,308
8	64,89%	46,72	44,12	0,313
9	67,11%	48,32	49,90	0,320
10	68,77%	49,52	54,82	0,325
11	69,40%	49,97	55,70	0,326
12	70,00%	50,40	57,51	0,328
13	70,30%	50,62	58,17	0,328
14	70,58%	50,82	59,16	0,330
15	70,86%	51,02	60,24	0,331
16	71,14%	51,22	61,29	0,332
17	71,29%	51,33	61,63	0,333
18	71,44%	51,44	62,15	0,333
19	71,59%	51,54	62,76	0,334
20	71,74%	51,65	63,47	0,335
21	71,89%	51,76	64,03	0,336

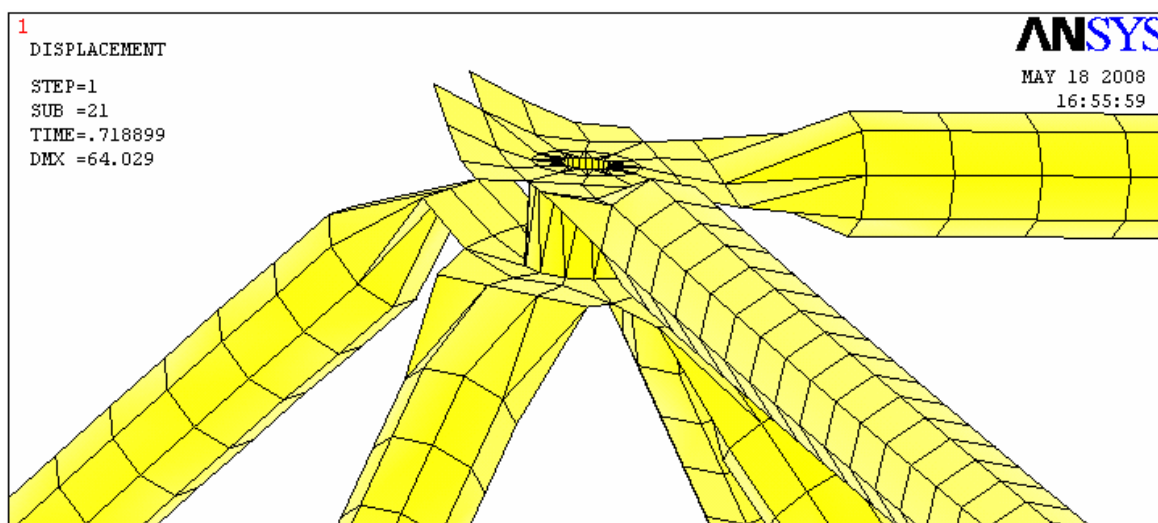


Figura 8.19 – Deformada da ligação para o carregamento final - LTDC

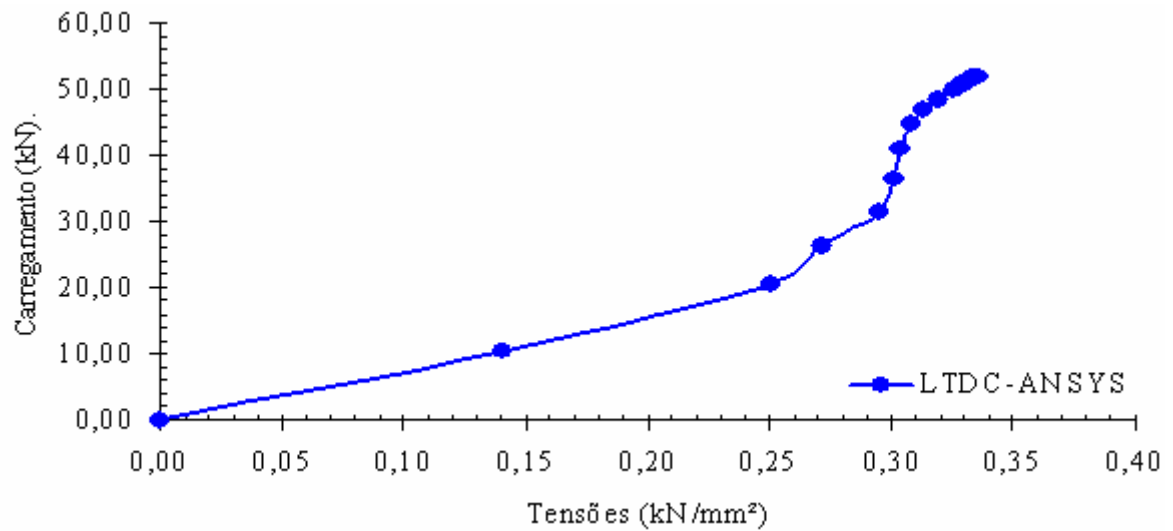


Figura 8.20 – Evolução das tensões na estrutura com a aplicação do carregamento - LTDC

A Figura 8.21 mostra a distribuição das tensões de VON MISSES nos elementos da estrutura, banzos e diagonais, para o 21º passo de carga. É possível notar que não foi considerada a tensão da região amassada.

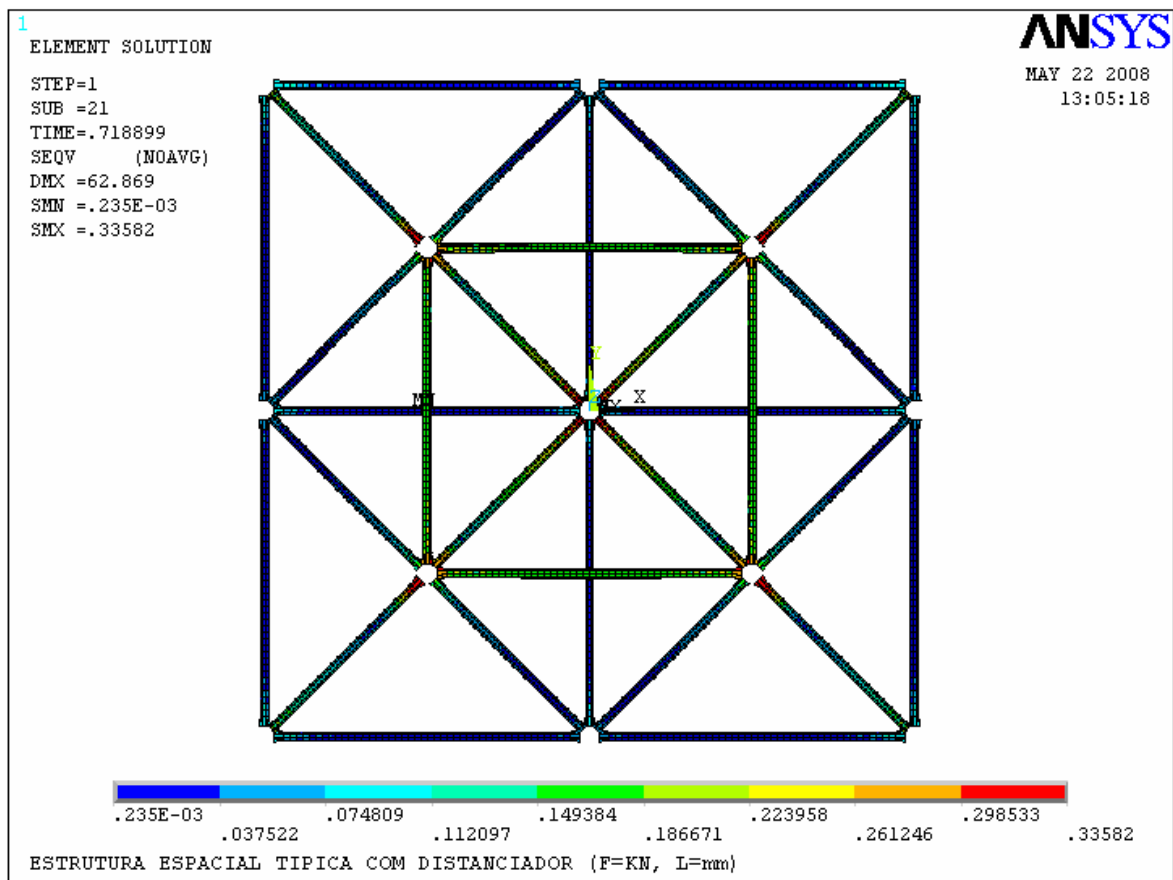


Figura 8.21 – Distribuição das tensões de VON MISSES nos elementos da estrutura - LT

### 8.2.3. Comparação dos resultados

A Figura 8.22 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.

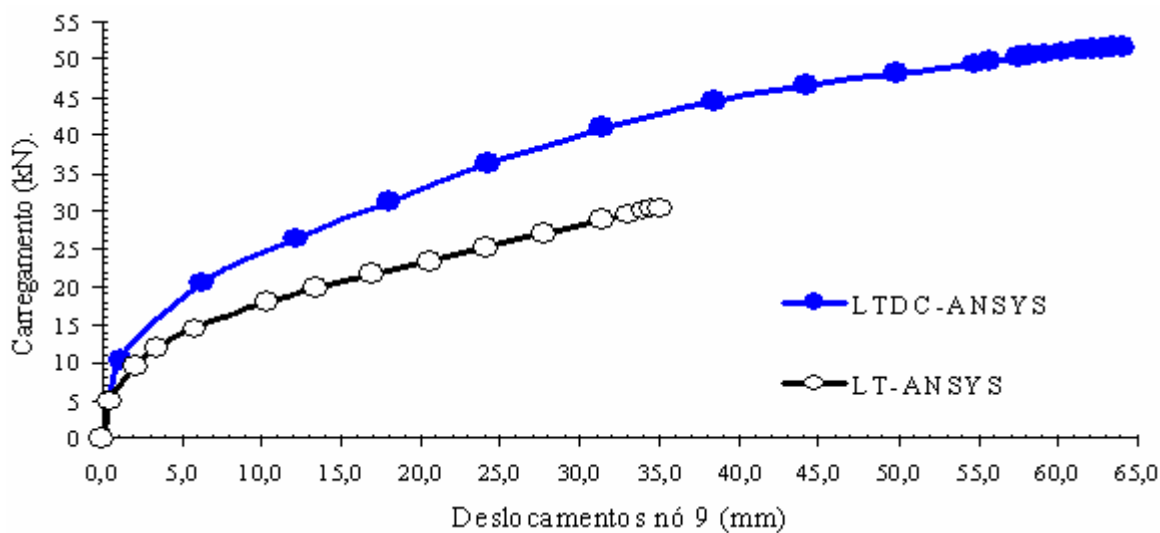


Figura 8.22 – Carregamento versus deslocamento do nó central considerando os modelos LT e LTDC

A Figura 8.23 apresenta, também graficamente, um comparativo das análises das estruturas com ligação típica (LT) e ligação típica com distanciador e cobrejunta (LTDC). Neste é considerando a evolução das tensões (VON MISSES) nos banzos e diagonais, desconsiderando as extremidades amassadas, em relação a evolução do carregamento aplicado.

Para os dois modelos é possível observar que não há uma linearidade nos resultados das tensões, o que comprova a análise não linear (plasticidade) dos modelos. É possível notar que a estrutura com ligação LTDC resistiu a tensões acima de  $0,3\text{kN/mm}^2$  (limite de resistência elástica do material). O que não ocorreu com a estrutura com LT, que entrou em colapso com tensões inferiores a  $0,3\text{kN/mm}^2$ .

No Capítulo 9, a seguir, pode-se apreciar a comparação dos resultados do estudo numérico não linear (ANSYS), com os resultados experimentais.

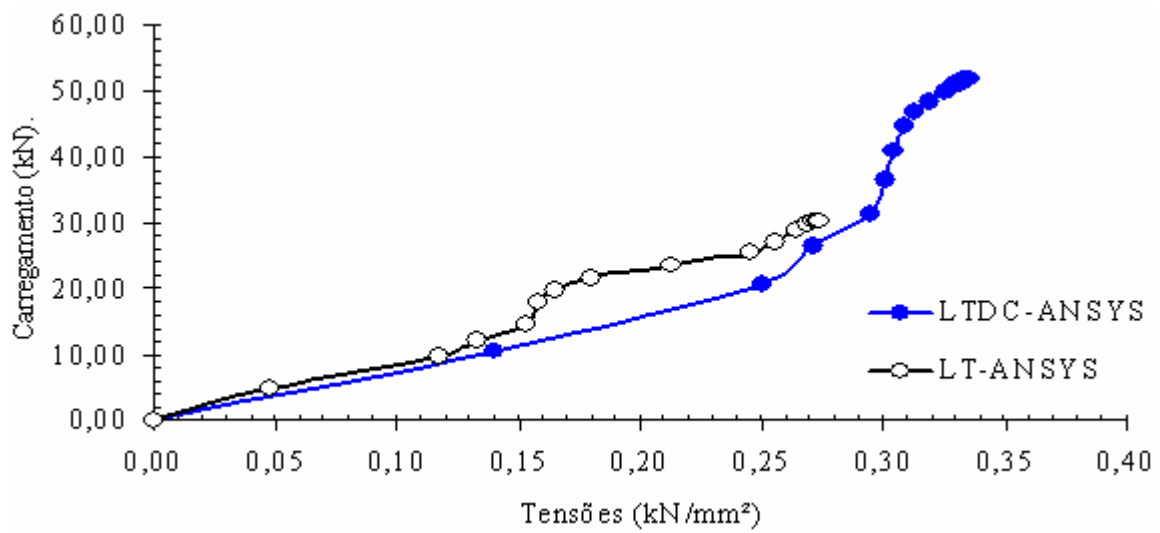


Figura 8.23 – Carregamento versus tensões máximas na estrutura considerando os modelos LT e LTDC



## 9. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo foi verificada a eficiência do reforço do nó típico, com a aplicação do distanciador e a chapa cobrejunta (proposta 1). Para tanto, foram comparados os resultados experimentais da carga de colapso nos protótipos com resultados da aplicação de normas já consagradas. Também foram comparados os comportamentos dinâmicos das estruturas com ligação típica e ligação típica com distanciador e cobrejunta (proposta 1, reforço). Outro comparativo foi entre os resultados dos estudos experimentais com os resultados do estudo numérico em regime não linear (ANSYS).

### 9.1. VERIFICAÇÃO DA CARGA DE COLAPSO

Neste item pode ser apreciada uma comparação do resultado da carga de colapso quando calculada pelas Normas NBR8800 (1986), AISC-LRFD (1991), e EUROCODE (1992) com a carga de colapso obtida experimentalmente, da estrutura com nó típico e da estrutura com nó típico com distanciador e cobrejunta. Estes estudos abrangem apenas os resultados dos protótipos 2x2 (Figura 9.1), ensaiadas nesta tese. Neste pode ser observada a carga de projeto “Nd” e a carga aplicada “P”. A carga “P” é a carga aplicada no nó central 9.

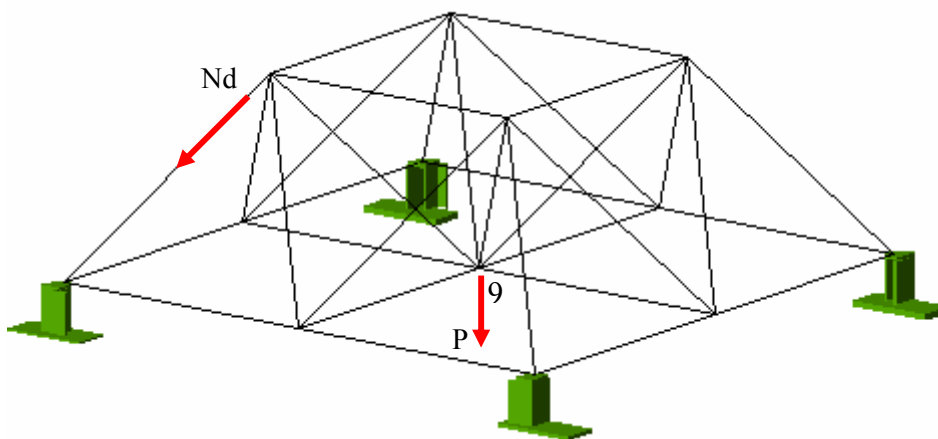


Figura 9.1 – Localização das cargas no Protótipo 2x2m

#### 9.1.1. Carga de colapso teórica para estruturas com ligações típicas – NBR8800 (1986)

No Capítulo 4, a carga de colapso considerada foi calculada a partir das características teóricas da resistência do material do tubo. Neste item a carga de colapso da estrutura foi recalculada considerando as características do material após ensaios de caracterização.

A tensão de escoamento do material “ $f_y$ ” é igual a 30kN/cm<sup>2</sup> e o módulo de elasticidade “E” é igual a 20500kN/cm<sup>2</sup>, verificados nos ensaios de caracterização do material, Apêndice C. 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, podemos considerar o coeficiente de redução que considera a flambagem local igual a um ( $Q=1$ ). O raio de giração “ $i$ ” igual a 0,8467cm, 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 9.1, encontramos o parâmetro de esbeltez “ $\bar{\lambda}$ ” igual a 1,4382.

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\pi} \frac{KL}{i} \sqrt{\frac{Qf_y}{E}} = \frac{1}{3,1415} \times \frac{1 \times 100}{0,8467} \sqrt{\frac{1 \times 30}{20500}} \rightarrow \lambda = 1,4382 \quad (9.1)$$

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 “ $\rho$ ” igual a 0,408. Adotando este coeficiente, as recomendações da norma e desconsiderando o coeficiente de minoração do material obtemos, aplicando a Equação 9.2, uma resistência à compressão “ $N_d$ ” de 13,79kN.

$$N_d = A_g f_y \rho \quad (9.2)$$

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 9.1, 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). A direção da carga é aplicada verticalmente com sentido de cima para baixo.

### 9.1.2. Carga de colapso experimental para estruturas com ligações típicas - LT

Os protótipos de estruturas espaciais com nós típicos apresentaram dois modos de colapso. O colapso local da ligação com uma carga “P” de 25kN no nó 9 (central), caracterizado por um excesso de deformação no nó, Figura 9.2. E o colapso global da estrutura com uma carga “P” de 36kN no nó 9 (central), caracterizado pela flambagem dos elementos comprimidos, Figura 9.3.

Alguns pesquisadores como Souza (2003), consideram o colapso da estrutura no momento do colapso local do nó típico. Foi considerado como colapso global o momento em que a estrutura não absorve acréscimo de carregamento externo, sendo este ponto coincidente com o colapso da barra comprimida.



Figura 9.2 – Colapso local ( $P=25\text{kN}$ )



Figura 9.3 – Colapso global ( $P=36\text{kN}$ )

### 9.1.3. Carga de colapso experimental para estruturas com ligações típicas com distanciador e chapas cobrejunta - LTDC

O colapso das estruturas espaciais com nó típico reforçado (distanciador e cobrejunta) foi evidenciado a uma carga “P” de 42kN no nó 9 (central). Tal colapso foi caracterizado pela flambagem abrupta de um elemento comprimido, Figura 9.4. Não foi observada deformação na ligação, Figura 9.5.



Figura 9.4 – Colapso global ( $P=42\text{kN}$ )



Figura 9.5 – Detalhe da ligação LTDC

#### 9.1.4. Cálculo da resistência à compressão segundo a AISC-LRFD (1991)

A tensão de escoamento do material “ $f_y$ ” é igual a 30kN/cm<sup>2</sup> e o módulo de elasticidade “ $E$ ” é igual a 20500kN/cm<sup>2</sup>. O raio de giração “ $i$ ” igual a 0,8467cm, o comprimento de flambagem “ $L$ ” é igual a 100cm e o parâmetro de flambagem “ $K$ ” igual a 1. Aplicando a Equação 9.5 do AISC (1991), tem-se o parâmetro de esbeltez “ $\bar{\lambda}_c$ ” igual a 1,4382.

$$\bar{\lambda}_c = \frac{1}{\pi} \frac{KL}{i} \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{1}{3,1415} \times \frac{1 \times 100}{0,8467} \sqrt{\frac{30}{20500}} \rightarrow \lambda_c = 1,4382 \quad (9.5)$$

Como “ $\bar{\lambda}_c$ ” é menor que 1,5 foi aplicado a condição I da Equação 9.6, e obtida uma tensão crítica “ $f_{cr}$ ” de 12,62kN/cm<sup>2</sup>.

$$\begin{aligned} I) \bar{\lambda}_c \leq 1,5 &\Rightarrow f_{cr} = (0,658^{\lambda_c^2}) f_y \\ II) \bar{\lambda}_c > 1,5 &\Rightarrow f_{cr} = \left( \frac{0,877}{\lambda_c^2} \right) f_y \end{aligned} \quad (9.6)$$

Adotando esta tensão crítica “ $f_{cr}$ ”, a área bruta “ $A_g$ ” de 1,126cm<sup>2</sup> e desconsiderando o coeficiente de minoração do material obtemos, aplicando a Equação 9.7, uma resistência à compressão “ $N_d$ ” de 14,21kN.

$$N_d = A_g f_{cr} = 1,126 \times 12,62 \rightarrow N_d = 14,21kN \quad (9.7)$$

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 9.1, 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). A direção da carga é aplicada verticalmente com sentido de cima para baixo.

#### 9.1.5. Cálculo da resistência à compressão segundo o EUROCODE (1992)

Considerando as características do tubo já citadas anteriormente, neste item foi calculada a resistência segundo o EUROCODE (1992). Considerando ainda o parâmetro de esbeltez “ $\lambda_c$ ” igual a 1,4382, e a constante “ $\alpha$ ” igual a 0,281, foi calculado os coeficientes “ $\beta$ ” e “ $\rho$ ”, com as Equações 9.8 e 9.9, respectivamente.

$$\beta = \frac{1}{2\lambda^2} [1 + \alpha(\lambda - 0,2) + \lambda] \Rightarrow \beta = 0,8258 \quad (9.8)$$

$$\rho = \beta - \sqrt{\beta^2 - \frac{1}{\lambda^2}} \Rightarrow \rho = 0,38 \quad (9.9)$$

$$fcr = \rho fy \Rightarrow fcr = 11,41 \text{ kN} / \text{cm}^2 \quad (9.10)$$

Adotando esta tensão crítica “fcr”, a área bruta “Ag” de 1,126cm<sup>2</sup> e desconsiderando o coeficiente de minoração do material obtemos, aplicando a Equação 9.11, uma resistência à compressão “Nd” de 12,84kN.

$$N_d = A_g fcr = 1,126 \times 11,41 \rightarrow N_d = 12,84 \text{ kN} \quad (9.11)$$

O colapso do tubo é obtido pela flambagem devido à carga axial de compressão “Nd” de 12,84kN. Para tanto, por decomposição vetorial segundo a Figura 9.1, 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). A direção da carga é aplicada verticalmente com sentido de cima para baixo.

#### 9.1.6. Comparação dos resultados de carga de colapso do protótipo

O gráfico da Figura 9.6 apresenta os valores de carga de colapso para a estrutura espacial estudada nos ensaios experimentais. São expostos os resultados das estruturas com nó típico e estruturas com nó típico reforçado. Para a estrutura com nó típico foi calculada a carga de colapso através da aplicação de normas AISC-LRFD (1991), NBR8800 (1986) e EUROCODE (1992) e verificada através de estudo experimental. Outro valor apresentado é o resultado da carga crítica para a estrutura com nó típico com distanciador e chapa cobrejunta (PROPOSTA 1).

Quanto às estruturas com nó típico ensaiadas experimentalmente será considerado como colapso da estrutura o ponto do “colapso do nó” (25kN), pois a estrutura apresenta excessivas deformações plásticas. Apesar da estrutura resistir a um acréscimo de carga de 44% até o ponto de “colapso global” (36kN), para a estrutura estudada em particular.

Quanto aos valores de carga máxima, em estruturas com nó típico, encontrados com a aplicação das normas “AISC-LRFD” (40,41kN), “NBR8800” (39,2kN) e “EUROCODE” (36,54kN), são superiores 61,64%, 56,8% e 46,16%, respectivamente, ao valor do colapso da estrutura “Colapso do nó” (25kN). Logo as normas não estão a favor da segurança no que se refere à estrutura com nó típico. 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 das estruturas com nó típico, distanciador e chapa cobrejunta “PROPOSTA 1” (42kN), foi observado um acréscimo de 68% em relação à carga de colapso do nó (25kN). Tal resultado evidencia um novo marco no estudo do reforço de ligações com nó típico. Porém o aumento da resistência da estrutura reforçada interfere diretamente na rigidez da estrutura, e conseqüentemente na resistência da estrutura a cargas cíclicas (fadiga). Portanto, foi de suma importância o estudo comparativo, de estruturas com nó típico e nó típico reforçado (PROPOSTA 1), quanto ao efeito da fadiga.

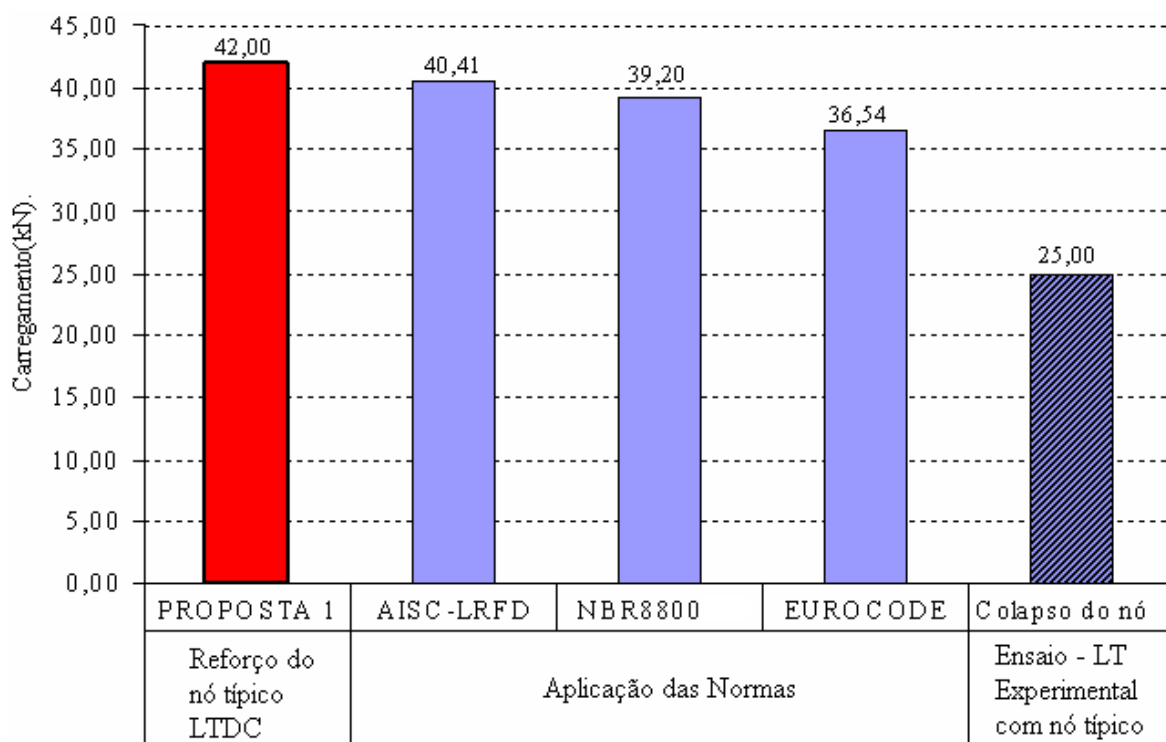


Figura 9.6 – Comparação das cargas de colapso

## 9.2. VERIFICAÇÃO DO EFEITO CÍCLICO (FADIGA)

No Capítulo 6 foram apresentados o estudo experimental dinâmico em estruturas espaciais com ligação típica e ligação típica com distanciador e chapa sobreposta (PROPOSTA 1), com geometria 2x2m, Figura 9.1. Foi observado que em todos os protótipos ensaiados a ruptura da estrutura ocorreu nas extremidades das diagonais. As estruturas com nó típico apresentaram menor número de ciclos antes da ruptura em comparação com as estruturas com nó típico, distanciador e sobreposta (PROPOSTA 1). cíclico

No Capítulo 7 estas estruturas foram discretizadas em elementos finitos de placa e analisadas suas tensões. Foram aplicados carregamentos de acordo com a amplitude do estudo dinâmico. Pode-se observar que as maiores tensões ocorrem nas extremidades das diagonais, para ambos os sistemas de ligações estudados. As estruturas típicas apresentaram tensões mais elevadas que as estruturas com a ligação típica com distanciador e sobreposta (PROPOSTA 1).

Nas Figuras 9.7 e 9.8 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 sobreposta (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 devida à correção da ligação.

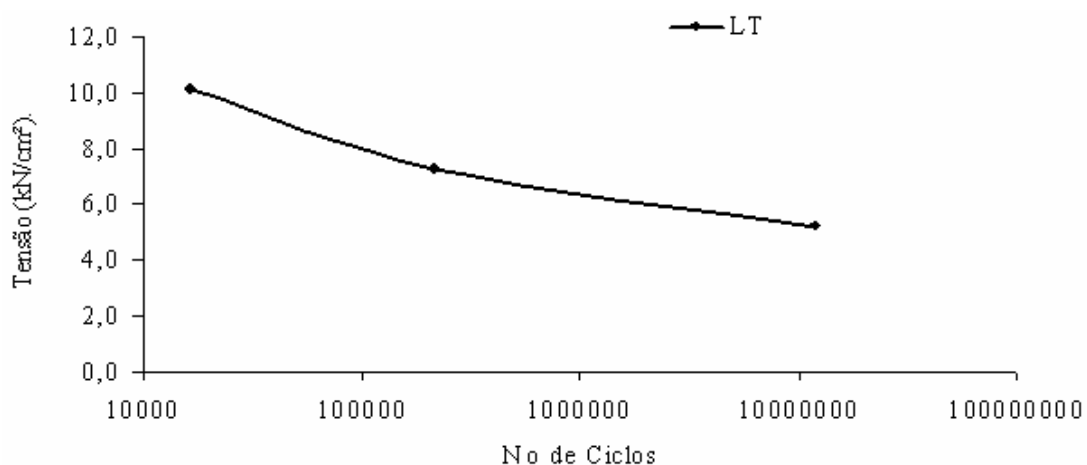


Figura 9.7 – Curva S-N do protótipo com ligação típica

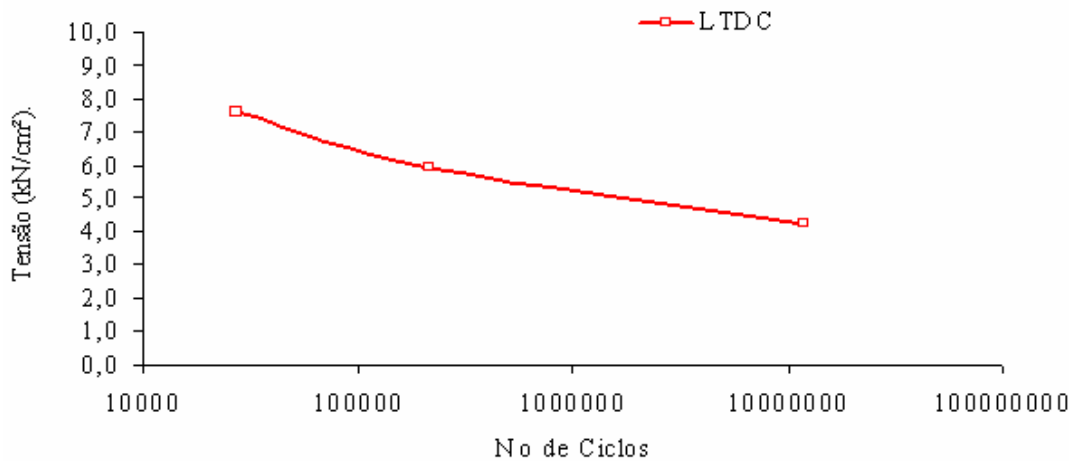


Figura 9.8 – Curva S-N do protótipo com ligação típica com distanciador e cobrejunta

### 9.3. RESULTADO EXPERIMENTAL VERSUS ANÁLISE NUMÉRICA NÃO LINEAR (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 9.8 e 9.9 podem ser observados os resultados dos deslocamentos devido às cargas aplicadas para as estruturas LT e LTDC, respectivamente. 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 9.8, a análise numérica não atingiu a carga máxima obtida experimentalmente. O contrário ocorreu com o modelo com LTDC onde à carga final da análise numérica superou a carga máxima obtida no ensaio experimental.

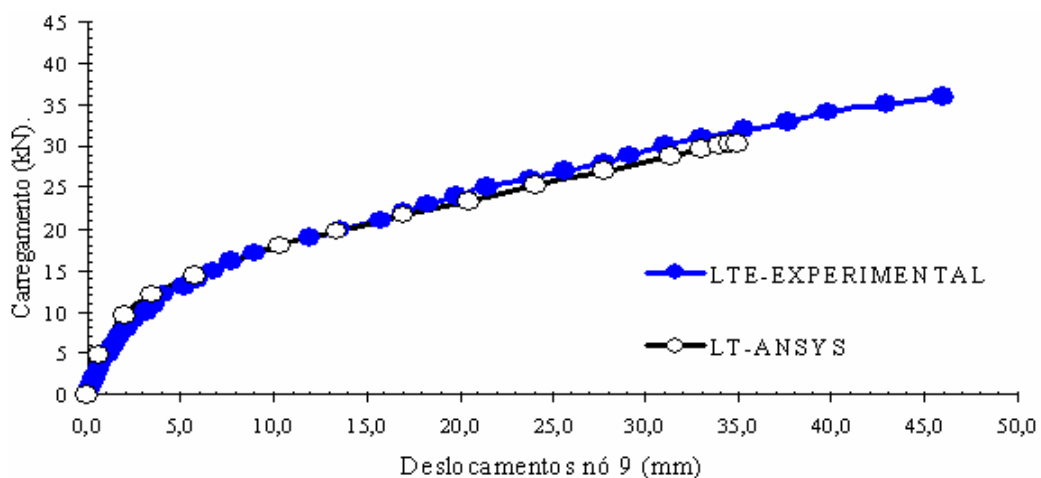


Figura 9.9 – Deslocamento do nó central devido a carga aplicada - LT



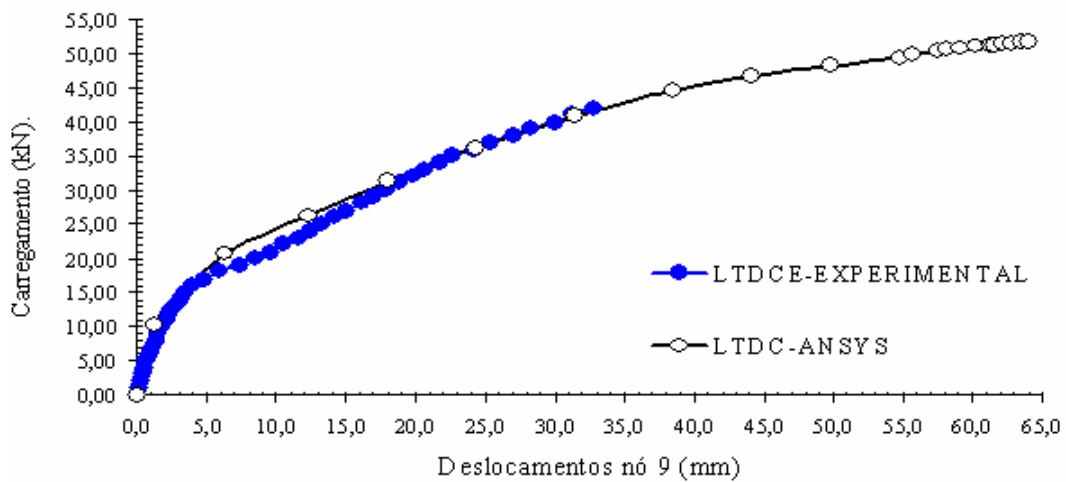


Figura 9.10 – Deslocamento do nó central devido a carga aplicada – LTDC

Ao final deste capítulo observa-se que as estruturas treliçadas tridimensionais, constituídas com ligação típica, distanciador e cobrejunta (PROPOSTA 1) se mostraram mais resistentes mecanicamente, que as estruturas com ligação típica. As estruturas com LTDC apresentaram cargas de colapso maior que as estruturas com LT. As estruturas com ligação típica apresentam ainda cargas de colapso experimentais com intensidade inferior as calculadas pelas normas AISC-LRFD (1991), NBR8800 (1986) e EUROCODE (1992).

Desta forma, para garantir a segurança estrutural da LT, no Capítulo 10 é apresentada uma proposta para o cálculo da carga última de estruturas com ligação típica.

## 10. PROPOSTA PARA O CÁLCULO DE ESTRUTURAS COM NÓ TÍPICO E A METODOLOGIA APLICADA NESTE ESTUDO

Na primeira etapa deste trabalho (Capítulos 3 ao 9) foi estudado um reforço estrutural para a ligação com nó típico. No Capítulo 9 foram aplicados métodos de cálculo recomendados por normas já consagradas, para a obtenção da carga de colapso da estrutura com nó típico. Observou-se que as estruturas ensaiadas experimentalmente apresentaram cargas de colapso menores que as calculadas teoricamente. Logo a segunda etapa deste trabalho tem como propósito analisar o comportamento estrutural da estrutura treliçada tridimensional, com nó típico, propondo uma nova abordagem matemática para o dimensionamento dos elementos, a fim de garantir uma maior segurança para este sistema estrutural.

### 10.1. PROPOSTA DE CÁLCULO PARA ESTRUTURA COM NÓ TÍPICO

#### 10.1.1 Desenvolvimento matemático

A ligação formada com nó típico é compreendida por tubos com extremidades amassadas e conectadas por um único parafuso, como pode ser observado na Figura 10.1. Sabe-se que a excentricidade “ $E_1$ ”, horizontal, é devida ao amassamento do tubo. A excentricidade “ $E_2$ ”, vertical, é proporcional ao ângulo “ $\theta$ ”, e é equivalente a distância “ $d$ ”. No Capítulo 3 foi proposto que esta distância pode ser calculada pela Equação 10.1, para o caso geral, e pela Equação 10.2 para estruturas com disposição em planta quadrado sobre quadrado. Nestas equações “ $t$ ” é a espessura da barra, “ $D$ ” é à distância da projeção da diagonal, “ $H$ ” a altura da treliça e “ $\ell$ ” é o comprimento do banzo.

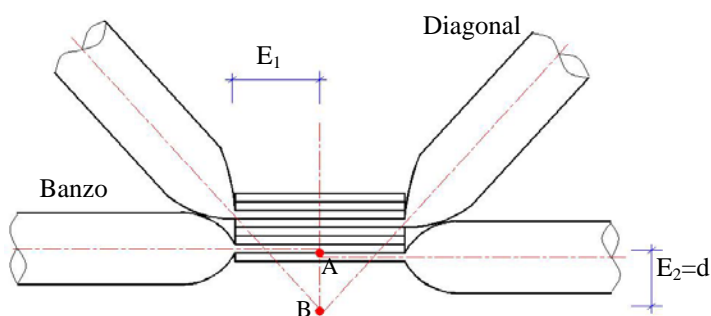


Figura 10.1 – Excentricidade no nó típico de estruturas treliçadas tridimensionais

$$d = \frac{HE_1}{D - 2E_1} - (5t_1 + 3t_2) \quad (10.1)$$

$$d = \frac{2HE_1}{\ell\sqrt{2} - 4E_1} - 8t \quad (10.2)$$

Nas ligações de estruturas treliçadas tridimensionais constituídas com nó típico há um momento fletor devido às excentricidades intrínsecas desta ligação. Como foi observado na revisão bibliográfica, Capítulo 2, para o dimensionamento dos elementos sujeitos a compressão é considerado apenas o esforço axial na barra. Desta forma este trabalho apresenta, como uma segunda proposta, uma abordagem matemática considerando o efeito do momento fletor na ligação.

Para tanto, foi considerada a hipótese que o momento fletor no nó é gerado devido ao produto da força axial de compressão da diagonal “ $P_c$ ” pela distância perpendicular “ $e$ ” definida pela reta AC. A Figura 10.2 expõe no detalhe do nó típico superior a composição das forças consideradas. Nesta figura o ponto “A” representa o ponto de interseção dos banzos, o ponto “B” é a interseção das diagonais e a distância “ $e$ ” representa a excentricidade considerada. Para o cálculo desta excentricidade adotou-se o triângulo reto ABC gerado pela interseção dos eixos de banzos e diagonais.

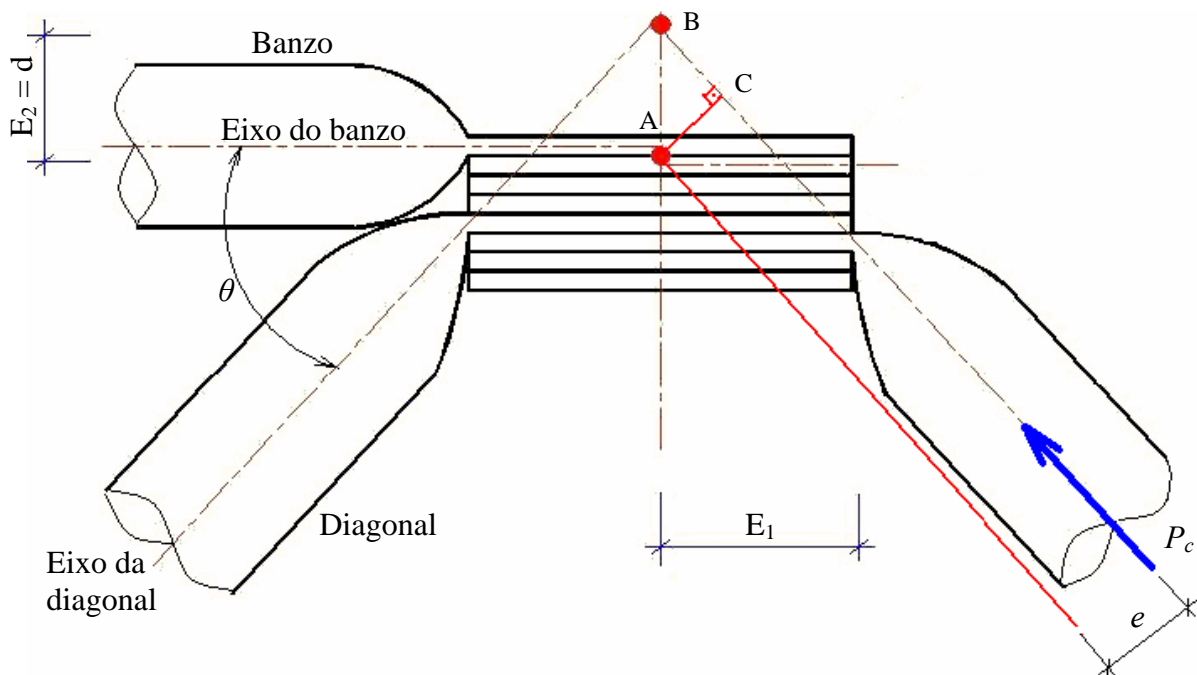


Figura 10.2 – Detalhe da ligação do nó superior com tubos amassados (típica)

A Figura 10.3 destaca a geometria formada pela interseção dos eixos de banzos e diagonais, ressaltando o cateto “ $e$ ”, a hipotenusa “ $d$ ” e o ângulo “ $\theta$ ”. A Equação 10.3 expressa o cálculo da excentricidade “ $e$ ”, por trigonometria. Da mesma forma, aplicando trigonometria na Figura 3.2 obtém-se o co-seno do ângulo “ $\theta$ ”, ver Equação 10.4.

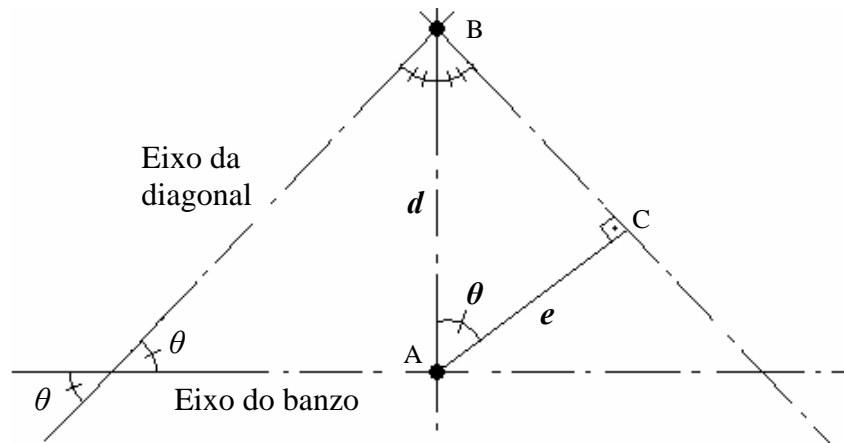


Figura 10.3 – Modelo de interseção dos eixos de banzos e diagonais

$$\cos(\theta) = \frac{e}{d} \Rightarrow e = d \cos(\theta) \quad (10.3)$$

$$\cos(\theta) = \frac{E_1}{\sqrt{E_1^2 + (d + d_2)^2}} \quad (10.4)$$

Com a combinação das Equações 10.3 e 10.4, obtém-se a formulação geral para o cálculo da excentricidade “e” na Equação 10.5. Neste trabalho as diagonais e os banzos apresentam mesma espessura ( $t_1 = t_2 = t$ ). Desta forma, pode-se escrever a formulação de acordo com a Equação 10.6. Posteriormente esta formulação será validada com a aplicação matemática na geometria de algumas estruturas. Será adotada, para os cálculos dos momentos nas barras comprimidas, a Equação 10.7. Onde  $P_c$  é o valor do esforço axial máximo de compressão observado no modelo.

$$e = \frac{dE_1}{\sqrt{E_1^2 + [d + (5t_1 + 3t_2)]^2}} \quad (10.5)$$

$$e = \frac{dE_1}{\sqrt{E_1^2 + (d + 8t)^2}} \quad (10.6)$$

$$M = P_c e \quad (10.7)$$

Finalmente, quanto ao dimensionamento de estruturas espaciais com ligações típicas sem reforço, é sugerida uma verificação de esforços considerando também o momento fletor na ligação. Assim sugere-se a aplicação da verificação da resistência da seção quanto à combinação dos esforços.

A Equação 10.8 apresenta expressão iterativa para combinação dos esforços axiais e dos momentos fletores para a condição de escoamento, Item 5.6.1.3.1 da Norma NBR8800 (1986). A Equação 10.9 apresenta expressão iterativa para combinação dos esforços axiais e dos momentos fletores para a condição de estabilidade, Item 5.6.1.3.2 da Norma NBR8800 (1986). Onde “ $N_d$ ” e “ $M_d$ ” são os esforços de projeto atuantes na barra, devido as cargas; e “ $N_{res}$ ” e “ $M_{res}$ ” são os esforços resistentes da seção quanto a compressão e ao momento fletor, respectivamente. “ $C_{mx}$ ” e “ $C_{my}$ ” são coeficientes correspondentes à flexão. “ $N_{ex}$ ” e “ $N_{ey}$ ” são cargas de flambagem elástica.

$$\frac{N_d}{N_{res}} + \frac{M_{dx}}{M_{ressx}} + \frac{M_{dy}}{M_{resy}} \leq 1,0 \quad (10.8)$$

$$\frac{N_d}{N_{res}} + \frac{C_{mx}M_{dx}}{\left(1 - \frac{N_d}{0,73N_{ex}}\right)M_{ressx}} + \frac{C_{my}M_{dy}}{\left(1 - \frac{N_d}{0,73N_{ey}}\right)M_{resy}} \leq 1,0 \quad (10.9)$$

Sabe-se que para elementos sujeitos ao esforço combinado de compressão e momento fletor o dimensionamento deve atender as duas condições, escoamento (Eq.10.8) e estabilidade (Eq.10.9). No entanto para possibilitar uma aplicação direta da combinação dos esforços foi adotada a condição de escoamento (Eq.10.8). Considerando apenas o momento fletor de maior intensidade, e a Equação 10.7 obtém-se a Equação 10.10, para o cálculo da carga de colapso da estrutura.

$$\frac{N_d}{N_{res}} + \frac{N_d e}{M_{res}} \leq 1,0 \Rightarrow N_d = \frac{N_{res} M_{res}}{M_{res} + e N_{res}} \quad (10.10)$$

## 10.1.2 Síntese da metodologia de cálculo apresentada em fluxograma

### 10.1.2.1 Obtenção dos esforços nos elementos da estrutura espacial

A metodologia para o calculo do momento fletor, dos elementos sobre flexocompressão, de uma estrutura espacial com nó típico pode ser apreciada no fluxograma da Figura 10.4. O primeiro passo é a discretização, da estrutura espacial desejada, adotando ligações com nós ideais e os devidos carregamentos externos. O segundo passo é adotar o maior esforço axial de compressão (UPPER BOUND). O terceiro passo é calcular a excentricidade da carga. O quarto passo é calcular o momento fletor teórico da ligação.

Os passos de 1 a 4 foram implementados para possibilitar o cálculo do momento fletor teórico na ligação de uma estrutura com nó típico, a partir da análise de uma estrutura com nó ideal. Tal procedimento possibilita uma modelagem numérica menos arrojada da estrutura a ser projetada.

No entanto os passos de 1 a 4 podem ser substituídos por um único procedimento. Sendo este, uma modelagem numérica da estrutura com o nó típico considerando as não linearidades geométricas intrínsecas da ligação. Tal procedimento é mais trabalhoso computacionalmente devido a discretização do nó. No entanto este possibilita a obtenção dos momentos fletores em cada elemento de barra da estrutura, possibilitando a otimização do dimensionamento.

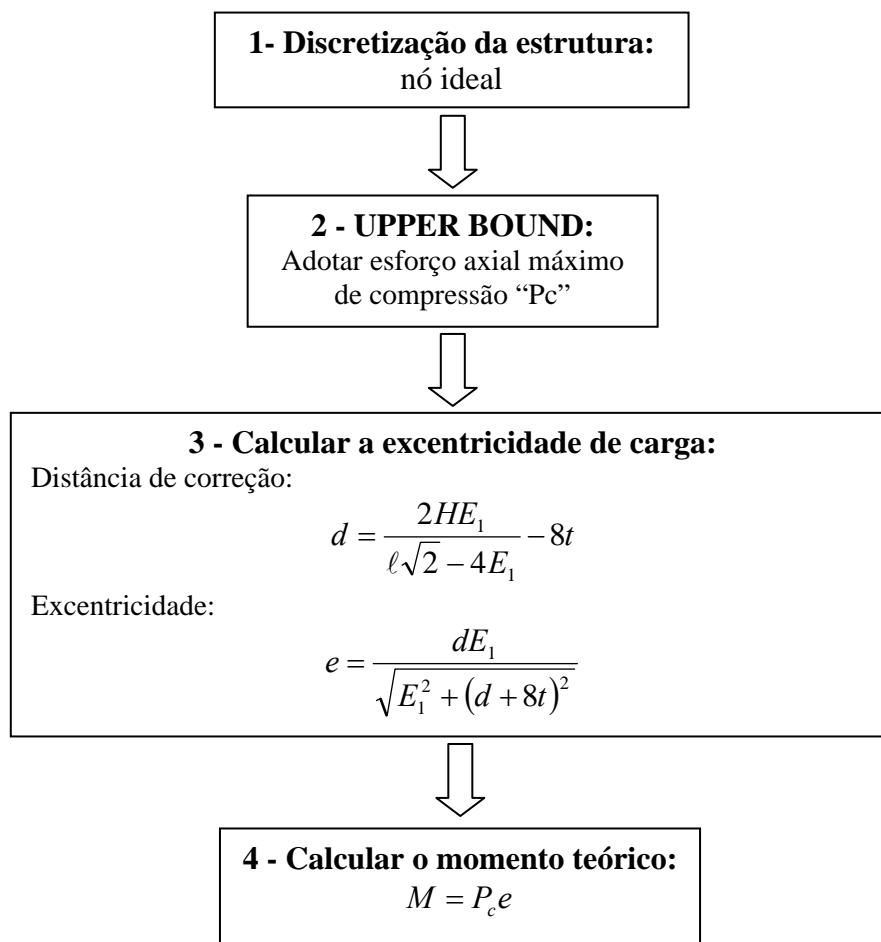


Figura 10.4 – Metodologia do cálculo do momento teórico de uma ligação com nó típico

### 10.1.2.2 Dimensionamento dos elementos da estrutura submetidos a flexocompressão

Após a análise estrutural da estrutura a ser projetada e obtenção dos esforços nos elementos de barra prossegue-se o dimensionamento. A Figura 10.5 apresenta o fluxograma proposto para o cálculo do dimensionamento do elemento da estrutura espacial com nó típico considerando, como proposta, o esforço de flexocompressão nos elementos.

O primeiro passo, já comentado, é a obtenção dos esforços nos elementos a serem dimensionados. Seja pela proposta do fluxograma da Figura 10.4, ou pela discretização considerando as não linearidades do modelo. O segundo passo é adotar um perfil comercial para a barra.

O terceiro passo é calcular a resistência à compressão da barra, considerando os parâmetros geométricos e físicos do perfil adotado. Para tanto devem ser observadas as recomendações do item 5.3.4. da norma NBR8800 (1986).

O quarto passo é calcular a resistência ao momento fletor da barra, considerando os parâmetros geométricos e físicos do perfil adotado. Para tanto devem ser observadas as recomendações do Anexo D da norma NBR8800 (1986).

O quinto passo trata da verificação da combinação dos esforços atuando, simultaneamente, na barra. Neste caso devem ser atendidas as condições (escoamento e estabilidade) prescritas pela norma NBR8800 (1986) no item 5.6.1.

Ao final do processo descrito o perfil deve atender a todos os critérios estabelecidos. Caso contrário um novo perfil deve ser adotado com dimensões geométricas superiores ao anterior, e também comercialmente existente. Após a nova escolha do novo perfil, repetem-se os passos de 3 ao 5 para verificação deste. Assim os passos de 2 ao 5 são processados até a seleção de um perfil de seção adequada.

Outra possibilidade, caso o perfil não seja aprovado no dimensionamento, é a consideração de um material com resistência física mais elevada. Este também deve ser encontrado comercialmente.

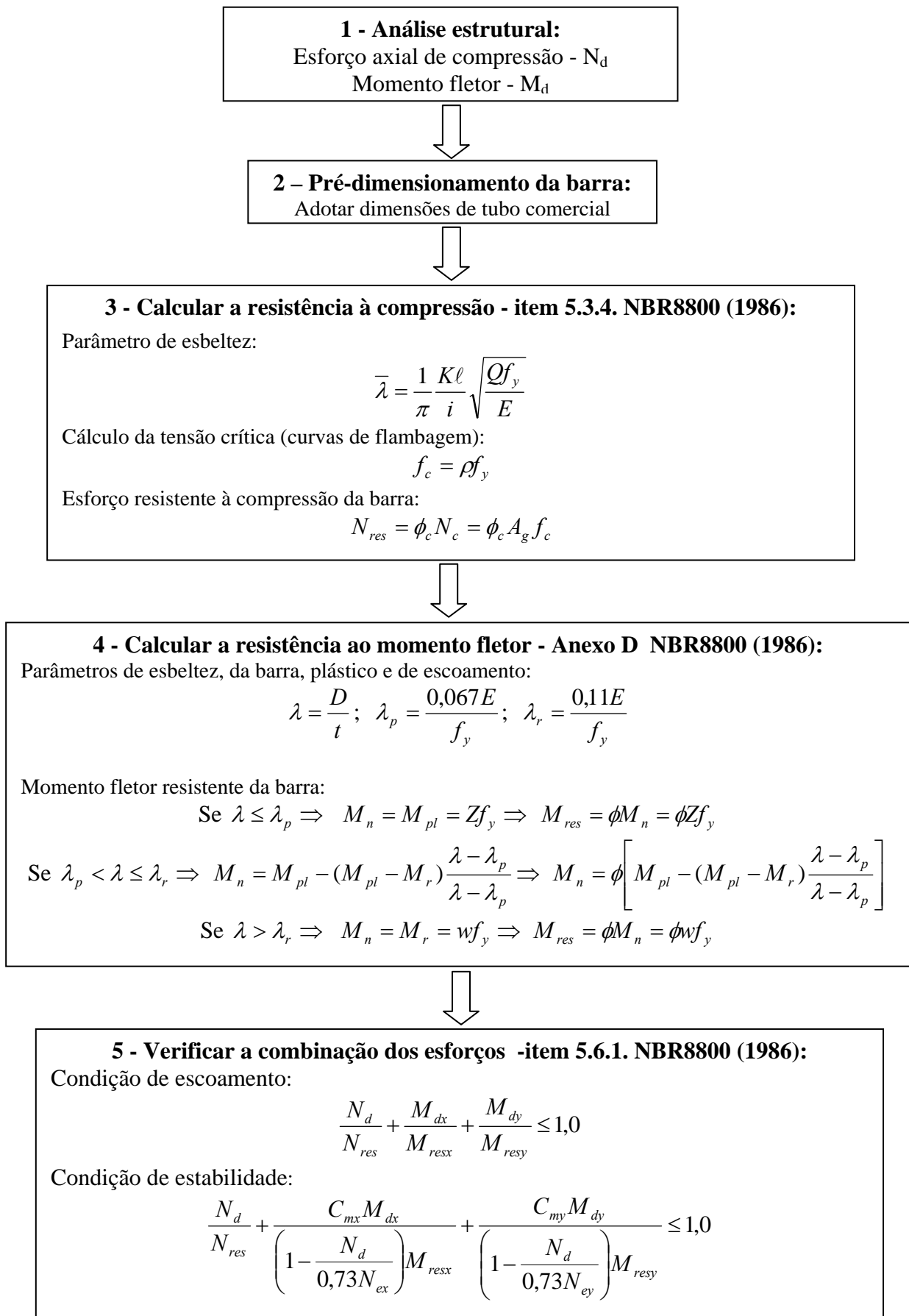


Figura 10.5 – Metodologia do dimensionamento considerando a flexocompressão na barra



## 10.2. METODOLOGIA DO ESTUDO DE VALIDAÇÃO DAS PROPOSTAS

Dois estudos de validação foram realizados. O primeiro foi realizado para verificação do cálculo do momento fletor teórico na ligação de uma estrutura com nó típico, a partir da análise de uma estrutura com nó ideal. Para tanto, foram estudados doze modelos teóricos de estruturas espaciais. O segundo estudo de validação foi para verificar a metodologia aplicada para dimensionar estruturas espaciais considerando flexocompressão. Neste estudo foi aplicada, a metodologia sugerida, em protótipos ensaiados por outros autores.

### 10.2.1 Validação da proposta de cálculo do momento fletor teórico

Para a validação da formulação, do cálculo do momento fletor teórico, foram investigados doze modelos de estruturas treliçadas tridimensionais em um programa fundamentado no MEF. Sendo seis modelos com ligação ideal e seis modelos com ligação típica. As geometrias dos modelos têm vãos de 4x4m; 6x4m; 8x4m; 6x6m; 8x6m e 8x8m (ver respectivamente as Figuras 10.6 a 10.11). Estes modelos foram formados com a combinação do módulo padrão (Figura 3.5). Considerando desta forma, um sistema modular com pirâmides com base de 1000mm e altura de 707mm. Os materiais utilizados, bem como diâmetro e espessuras dos tubos são equivalentes ao protótipo do item 3.2.1.

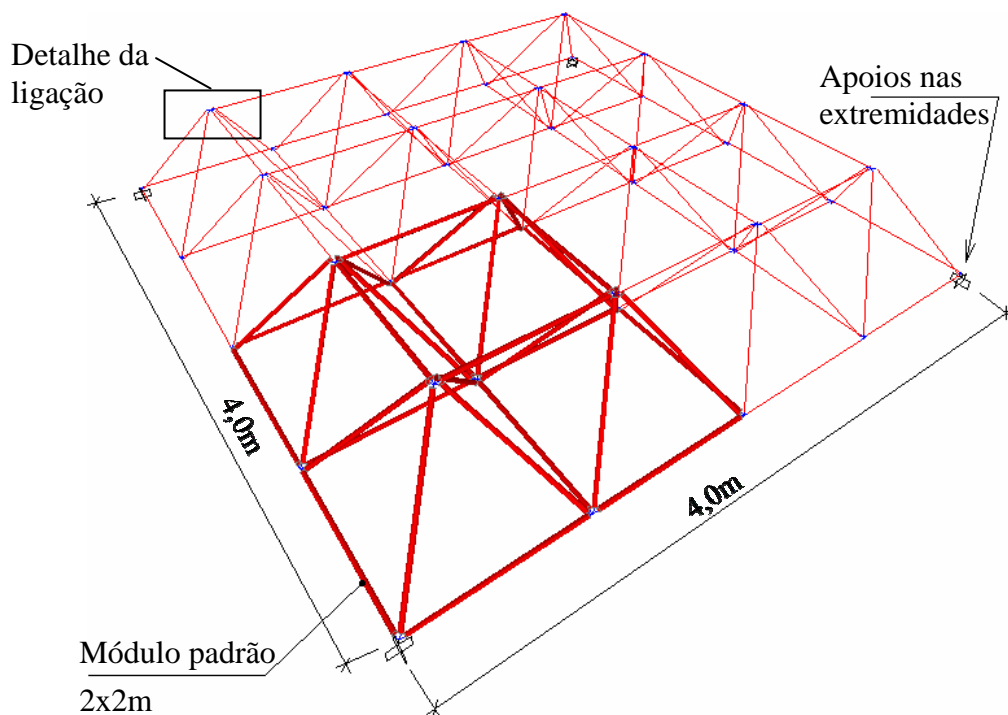


Figura 10.6 – Modelo da estrutura treliçada tridimensional 4x4 metros, M1-4x4

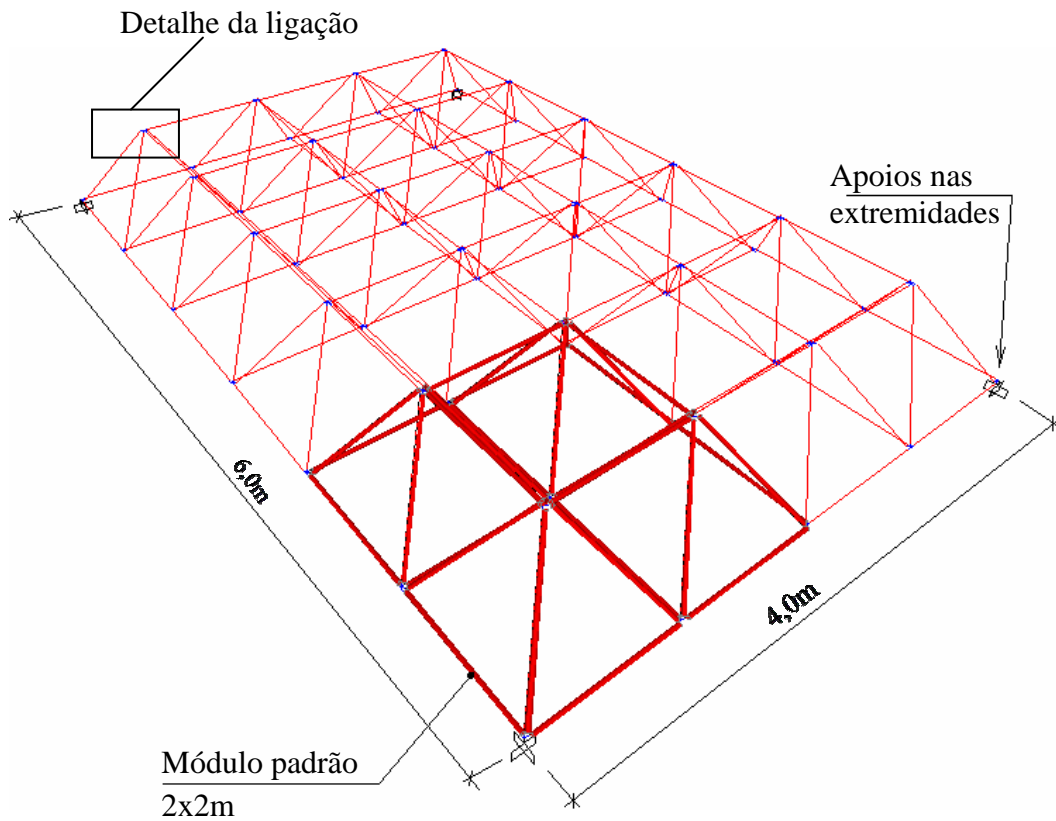


Figura 10.7 – Modelo da estrutura treliçada tridimensional 6x4 metros, M2-6x4

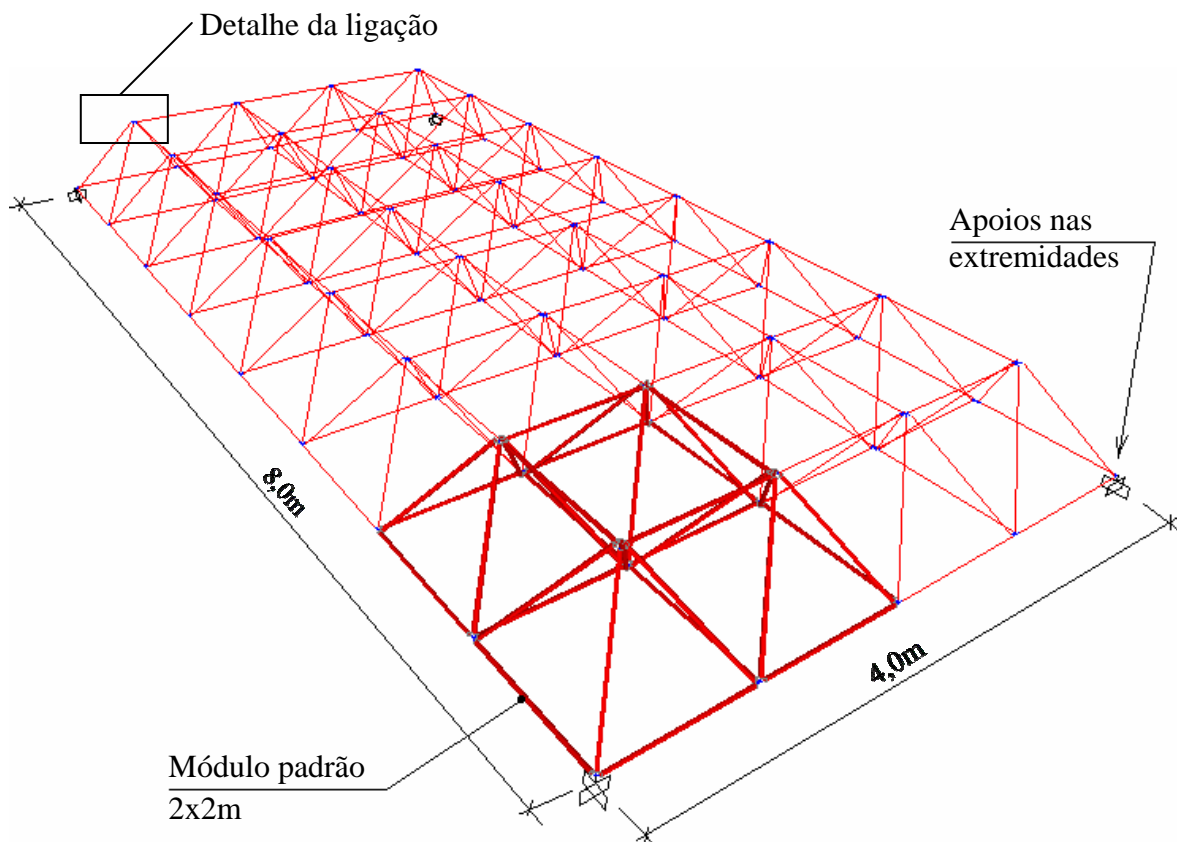


Figura 10.8 – Modelo da estrutura treliçada tridimensional 8x4 metros, M3-8x4

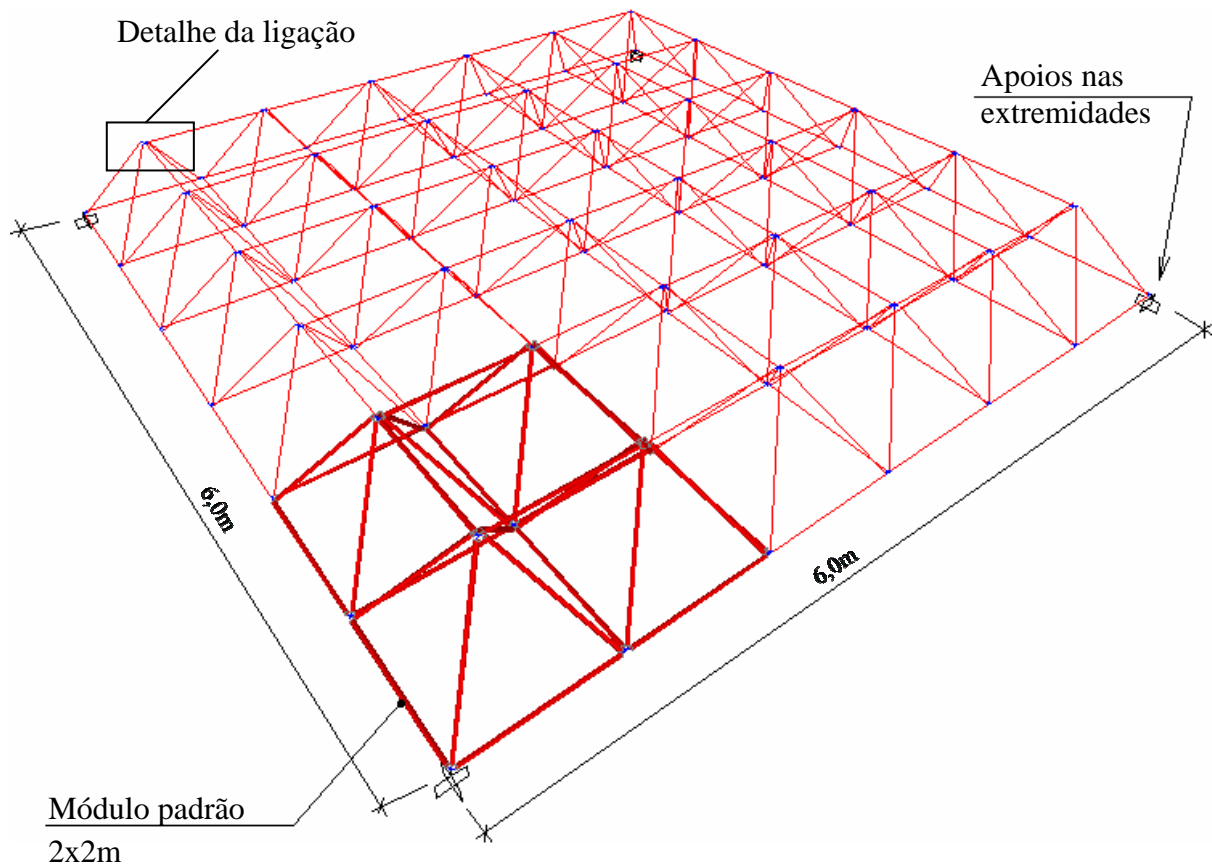


Figura 10.9 – Modelo da estrutura treliçada tridimensional 6x6 metros, M4-6x6

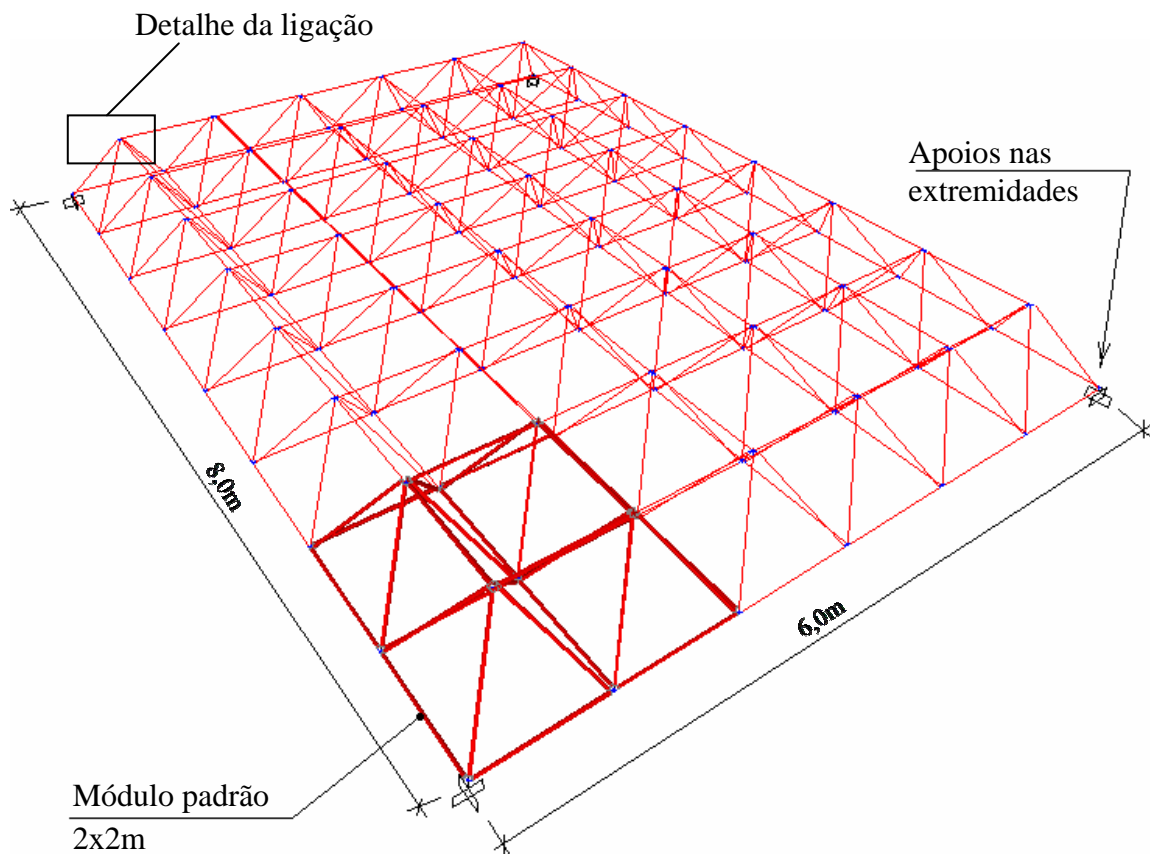


Figura 10.10 – Modelo da estrutura treliçada tridimensional 8x6 metros, M5-8x6

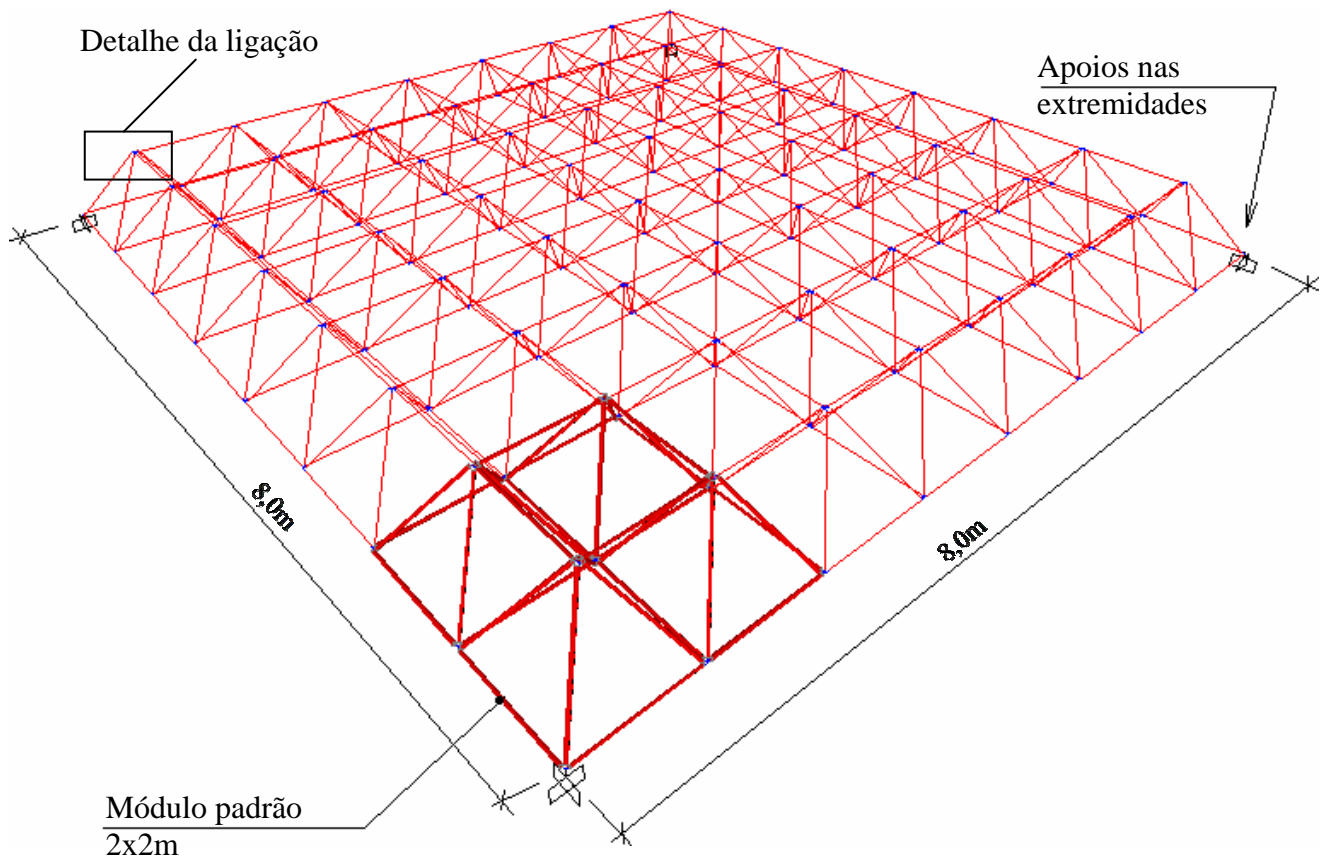


Figura 10.11 – Modelo da estrutura treliçada tridimensional 8x8 metros, M6-8x8

Para aplicação da formulação proposta foram analisados seis modelos com a ligação ideal, “LI”, ver Fig.10.12a. Para comparação dos resultados da formulação, aplicados no modelo ideal, foram considerados seis modelos com a ligação típica, “LT”, ver Fig.10.12b.

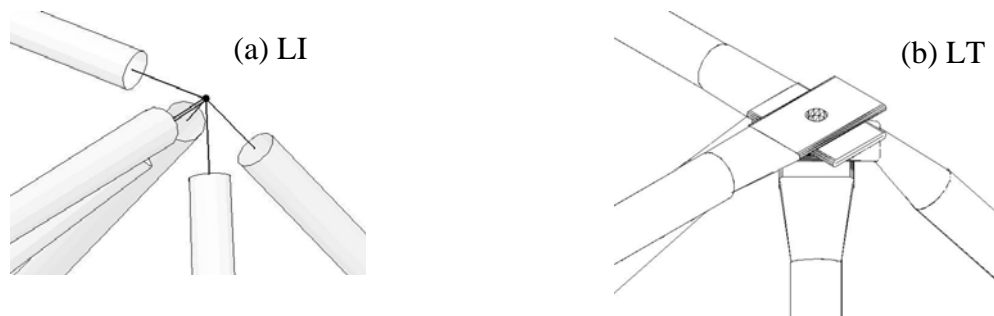


Figura 10.12 – Detalhes da ligação nos protótipos do estudo de validação

Os principais parâmetros coletados e comparados no estudo de validação foram:

- O esforço axial nos elementos;
- O momento fletor;

### 10.2.1.1 Fluxograma do estudo para validação da proposta de cálculo do momento fletor teórico

A Figura 10.13 expõe o fluxograma da organização deste estudo. Desta forma é possível visualizar as etapas desenvolvidas na pesquisa. Note as abreviações de ligação típica “LT” e Ligação ideal “LI”.

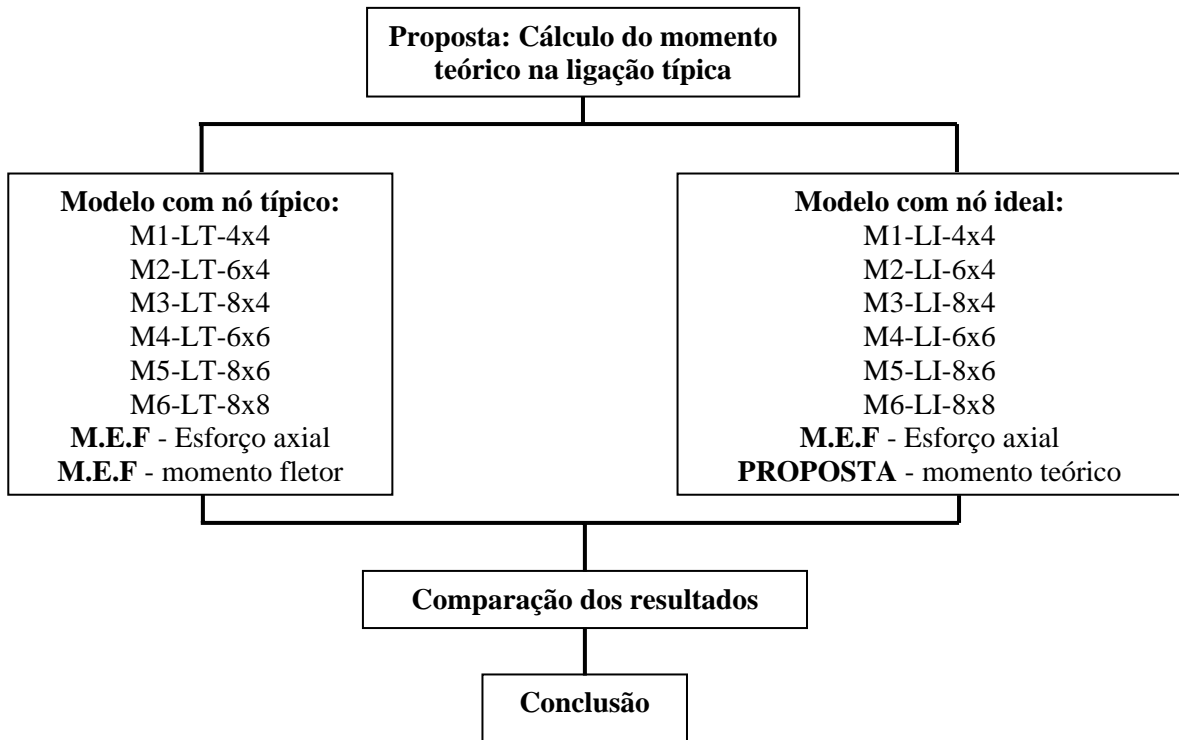


Figura 10.13 – Fluxograma da organização do estudo de validação do momento teórico

### 10.2.1.2 Cálculo da excentricidade da carga aplicando a formulação matemática proposta

Considerando a geometria do protótipo da Figura 3.5, observam-se tubos com espessura de 1,5mm e amassamento do tubo de 60mm resultando a uma excentricidade “E1” de 30mm. Adotando a distância “d” de 20mm, calculada no item 3.2.1, e aplicando-se a Equação 10.6, encontra-se uma excentricidade de carga de aproximadamente 13,68mm (Equação 10.11). Esta excentricidade foi aplicada no cálculo do momento fletor teórico da ligação com nó típico.

$$e = \frac{dE_1}{\sqrt{E_1^2 + (d + 8t)^2}} = \frac{20 \times 30}{\sqrt{30^2 + (20 + 8 \times 1,5)^2}} \Rightarrow e \cong 13,68mm \quad (10.11)$$

### 10.2.2 Validação da metodologia proposta para o dimensionamento de elementos de estruturas espaciais com ligações típicas sobre flexocompressão

A segunda proposta trata do dimensionamento dos elementos comprimidos, de estruturas espaciais com nó típico, considerando o momento fletor intrínseco da ligação. Para o cálculo da carga crítica, considerando esta metodologia, foi implementada a Equação 10.10. Para validação desta proposta foi comparada a carga crítica (calculada com a Equação 10.10), com a carga de colapso do ensaio experimental realizado neste trabalho. Estes resultados foram comparados também com a carga de colapso de estruturas espaciais estudadas pelos autores; Maiola (1999) e Souza (2003). E também comparada com as cargas de colapso aplicando as normas AISC-LRFD (1991), NBR8800 (1986) e EUROCODE (1992).

A Figura 10.13 expõe o fluxograma da organização do trabalho. Desta forma é possível visualizar as etapas desenvolvidas na pesquisa. Os estudos de validação das propostas matemáticas podem ser apreciados no Capítulo 11.

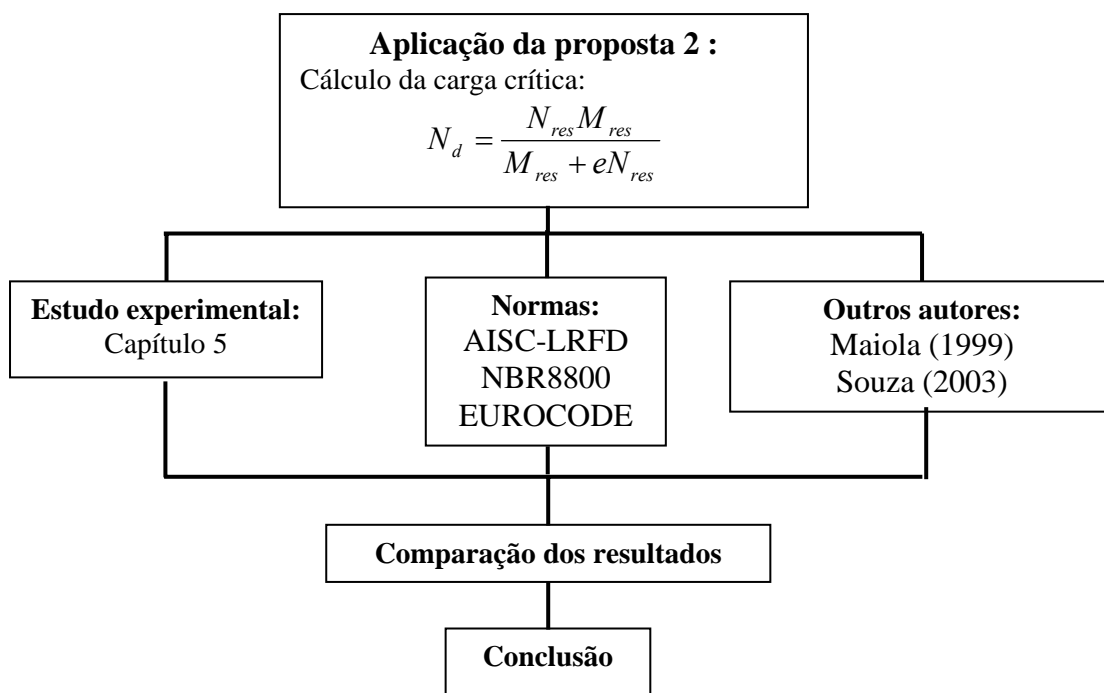


Figura 10.14 – Fluxograma da organização do estudo de validação da proposta 2

## **11. APLICAÇÃO DAS PROPOSTAS MATEMÁTICAS**

Este capítulo aborda a aplicação das duas propostas matemáticas em casos particulares de estruturas espaciais. A primeira proposta trata do cálculo do momento fletor teórico em estruturas espaciais com nós típicos a partir da análise de estruturas com nós ideais. Para a validação desta proposta serão estudados modelos estruturais numericamente. A segunda proposta matemática trata do dimensionamento dos elementos de estruturas espaciais considerando o momento fletor intrínseco da ligação típica. Para verificação desta metodologia proposta será aplicada em modelos ensaiados experimentalmente e comparada a resultados de normas já consagradas.

### **11.1. VALIDAÇÃO DA FORMULAÇÃO DO CÁLCULO DO MOMENTO FLETOR TEÓRICO EM ESTRUTURAS COM NÓ TÍPICO**

Para a validação desta proposta serão comparados os momentos fletores teóricos, em estruturas com nós típicos, obtidos pela análise de estruturas com nós ideais, com os momentos obtidos em estrutura com nó típico já discretizado. Desta forma, foram estudados seis modelos estruturais com vãos de 4x4m; 6x4m; 6x6m; 8x6m; 8x8m e 8x4m. Destes modelos, seis estruturas são compreendidas com nós ideais e seis estruturas com nós típicos, totalizando doze modelos estudados. É possível observar nos itens seguintes os elementos finitos utilizados, a discretização dos modelos e comparação dos resultados.

#### **11.1.1. Elementos finitos utilizados**

São aplicados elementos de barras nas treliças e elementos de placas nos distanciadores, quando necessário. É admitido um módulo de elasticidade de  $205\text{kN/mm}^2$ , peso específico do material de  $7,7 \times 10^{-7} \text{ kN/mm}^2$  e coeficiente de Poisson de 0,3. Para a discretização das barras é utilizado o elemento “FRAME”. O elemento “FRAME” é um elemento de barra do programa de elementos finitos SAP2000, usado para uma modelagem bidimensional ou tridimensional. Esse elemento é definido com dois 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 11.1.

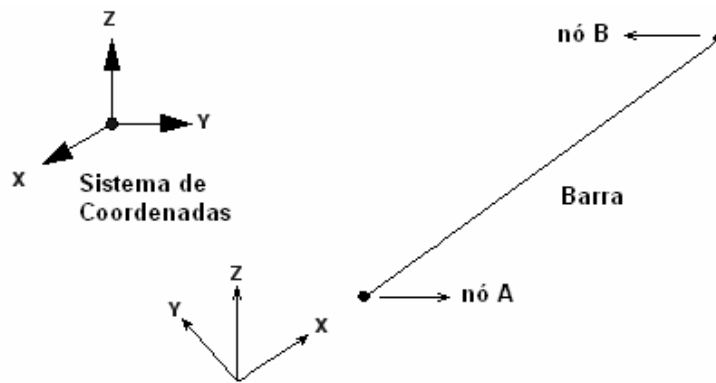


Figura 11.1 – Elemento de Barra (FRAME)

### 11.1.2. Detalhe das ligações dos modelos

A Figura 11.2.a mostra o detalhe do nó ideal a ser adotado nas estruturas: MI1-4x4, MI2-6x4, MI3-8x6, MI4-6x6, MI5-8x6 e MI6-8x8, sendo “MI” modelo ideal. Neste modelo os elementos de barra são concêntricos nas ligações. A Figura 11.2.b mostra o detalhe do nó típico a ser adotado nas estruturas: MT1-4x4, MT2-6x4, MT3-8x4, MT4-6x6, MT5-8x6 e MT6-8x8, sendo “MT” modelo típico. Neste modelo os elementos de barra são excêntricos nas ligações, e para simular tal comportamento foi considerado o amassamento das barras.

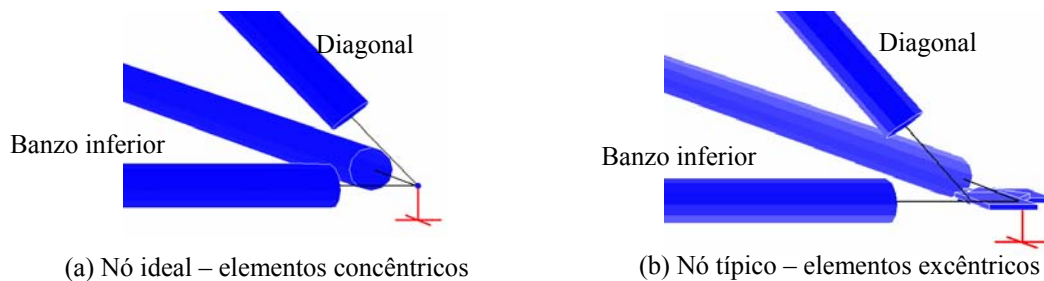


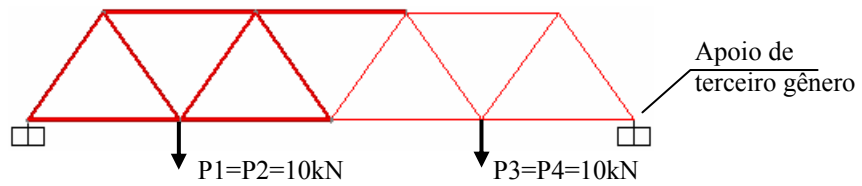
Figura 11.2 – Modelos de ligação estudados

### 11.1.3. Discretização dos modelos do estudo de validação

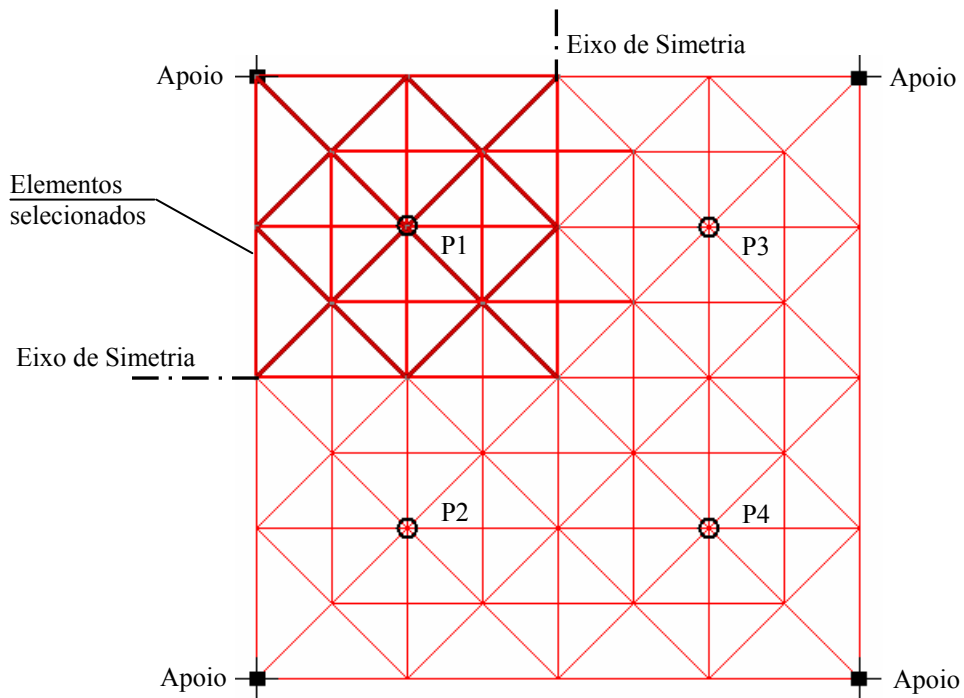
Na discretização das estruturas treliçadas tridimensionais foram utilizados elementos de barra (FRAME). Observe nas Figuras 11.3 a 11.8 as discretizações, as condições de contorno e os pontos de aplicação do carregamento nos modelos MT1-4x4, MT2-6x4, MT3-8x4, MT4-6x6, MT5-8x6 e MT6-8x8, respectivamente.



Restrições de terceiro gênero foram aplicadas nos nós de apoio. Carregamentos verticais com intensidade adotada de 10kN foram aplicados nos pontos “P” localizados nas figuras. Considerando os dois eixos de simetria do modelo, após o processamento do modelo completo serão analisados apenas os resultados de um quarto (1/4) dos elementos estruturais, que estão em destaque nas figuras como elementos selecionados.

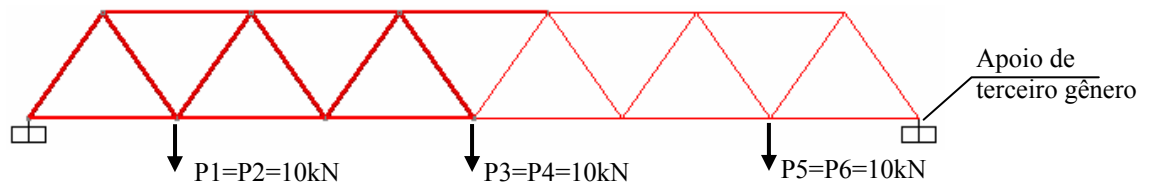


(a) Vista longitudinal da estrutura

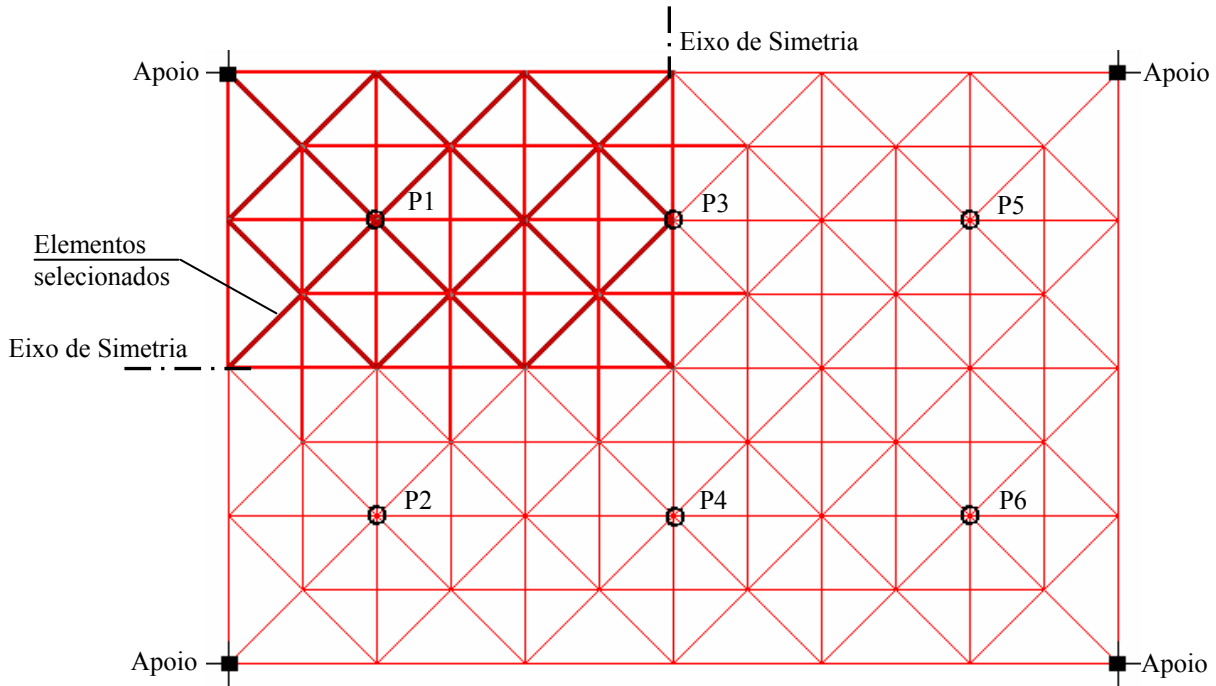


(b) Planta baixa da estrutura

Figura 11.3 – Discretização, condições de contorno e carga do modelo M1-4x4

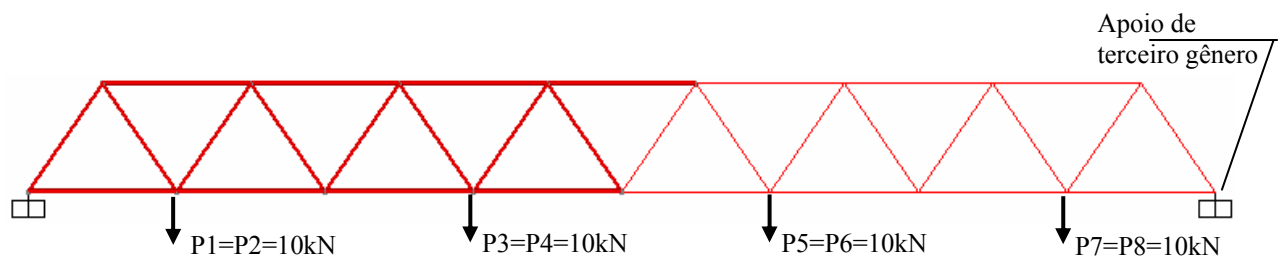


(a) Vista longitudinal da estrutura

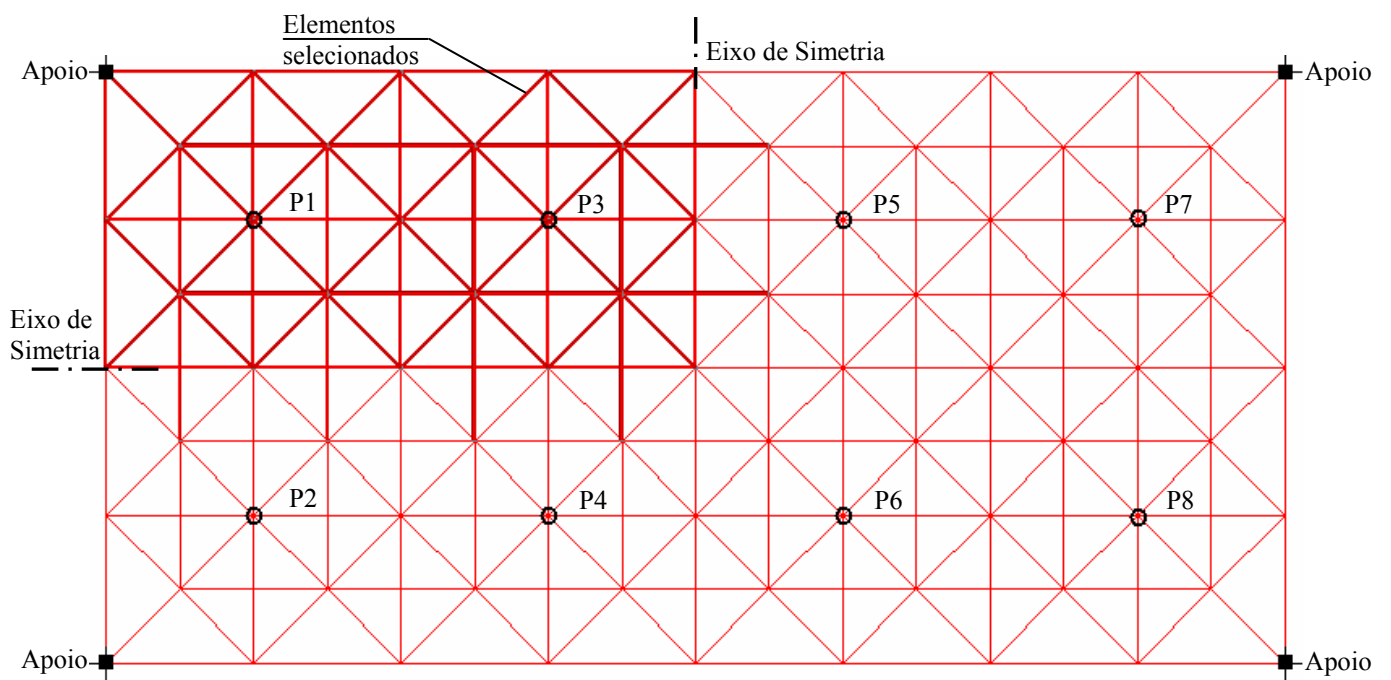


(b) Planta baixa da estrutura

Figura 11.4 – Discretização, condições de contorno e carga do modelo M2-6x4

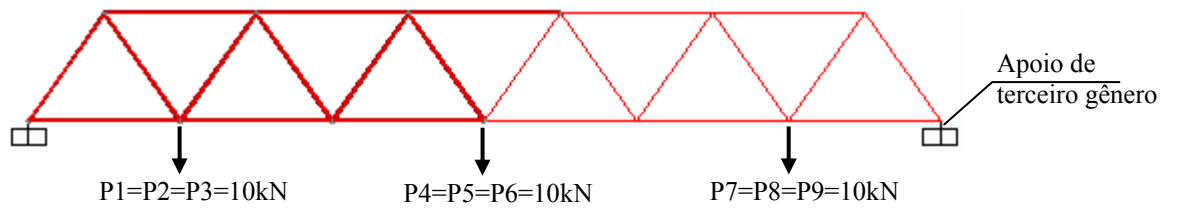


(a) Vista longitudinal da estrutura

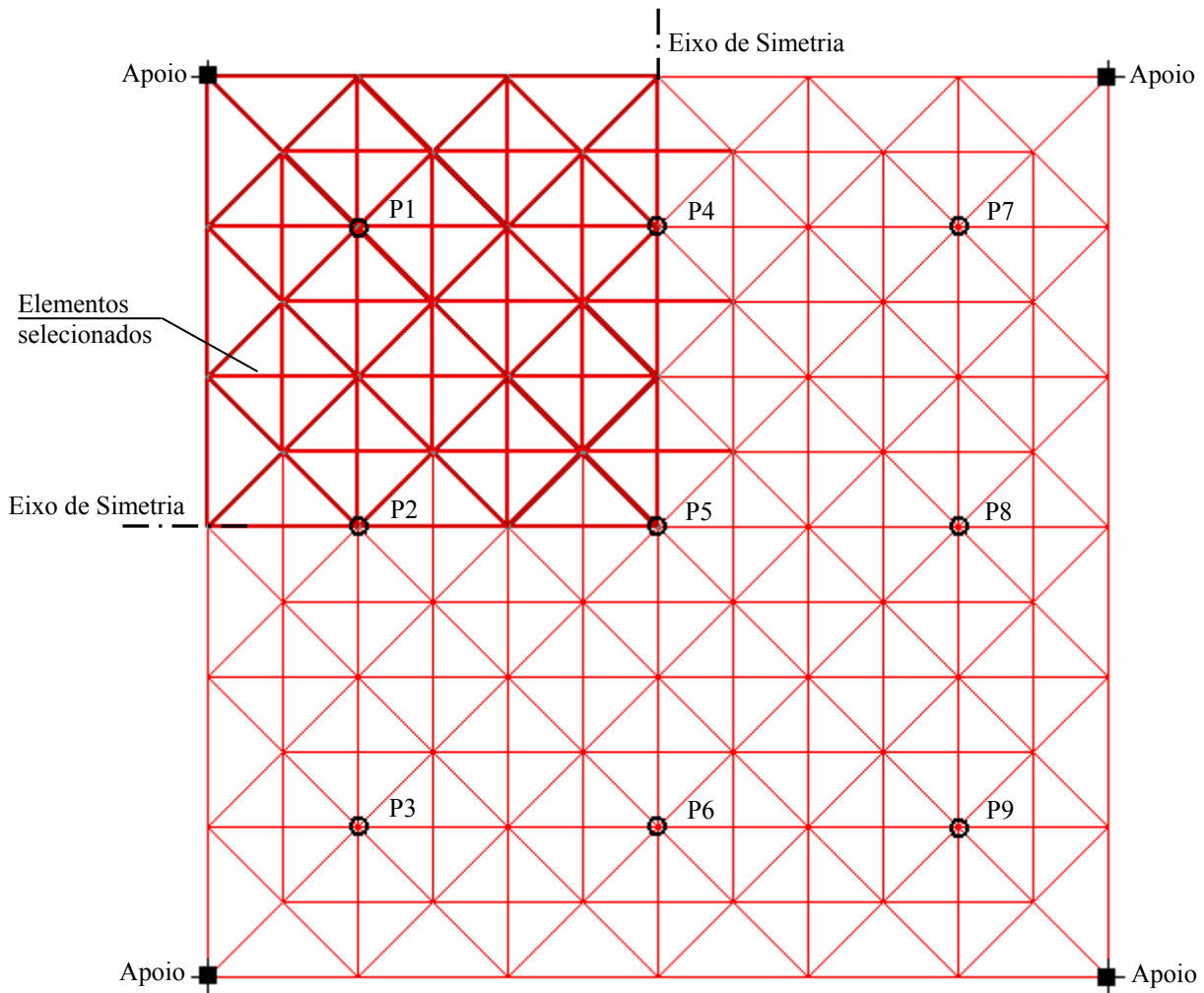


(b) Planta baixa da estrutura

Figura 11.5 – Discretização, condições de contorno e carga do modelo M3-8x4

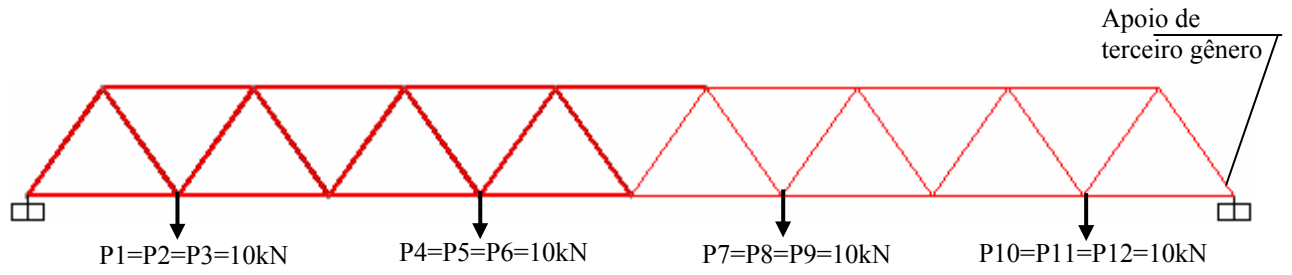


(a) Vista longitudinal da estrutura

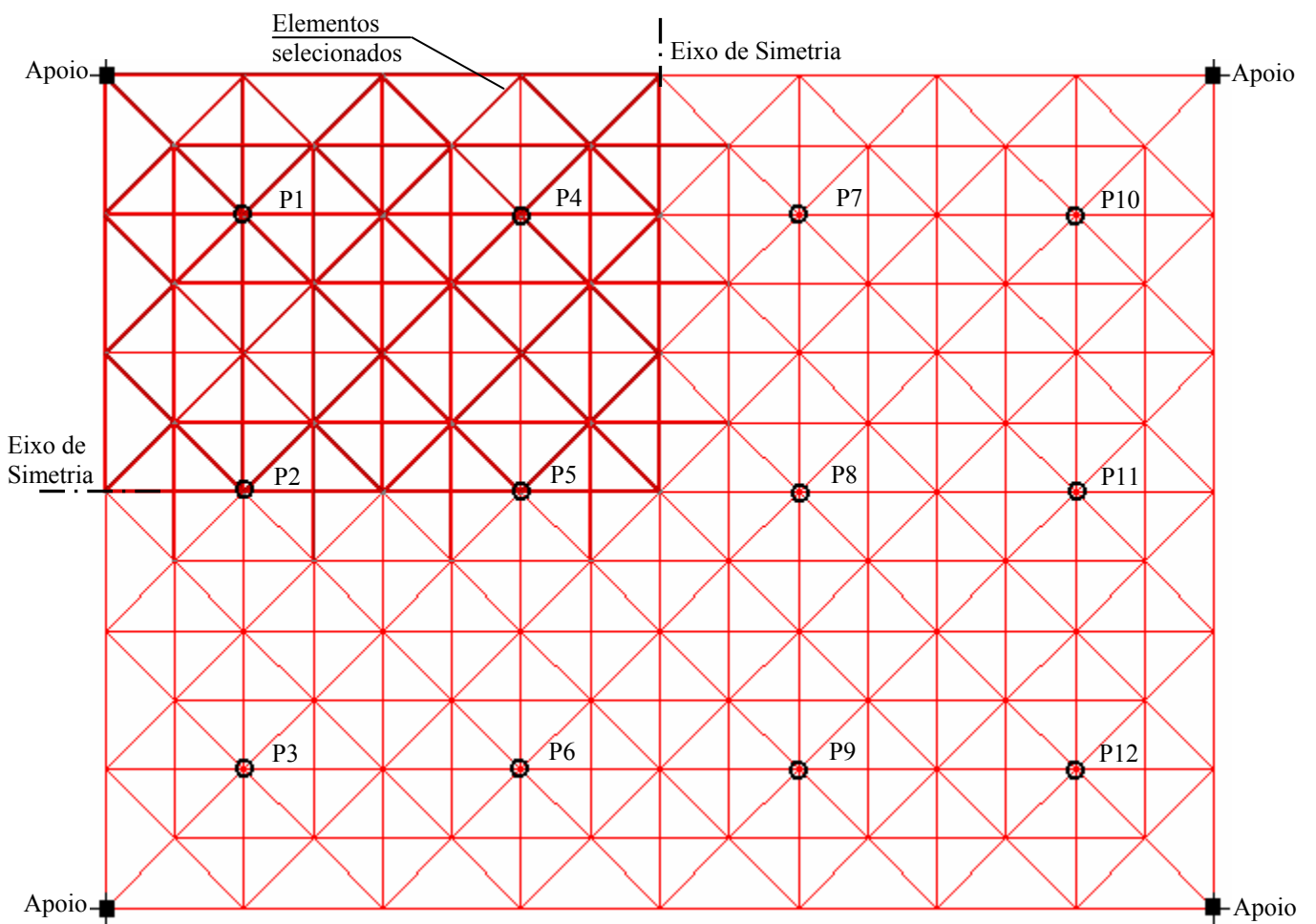


(b) Planta baixa da estrutura

Figura 11.6 – Discretização, condições de contorno e carga do modelo M4-6x6



(a) Vista longitudinal da estrutura



(b) Planta baixa da estrutura

Figura 11.7 – Discretização, condições de contorno e carga do modelo M5-8x6

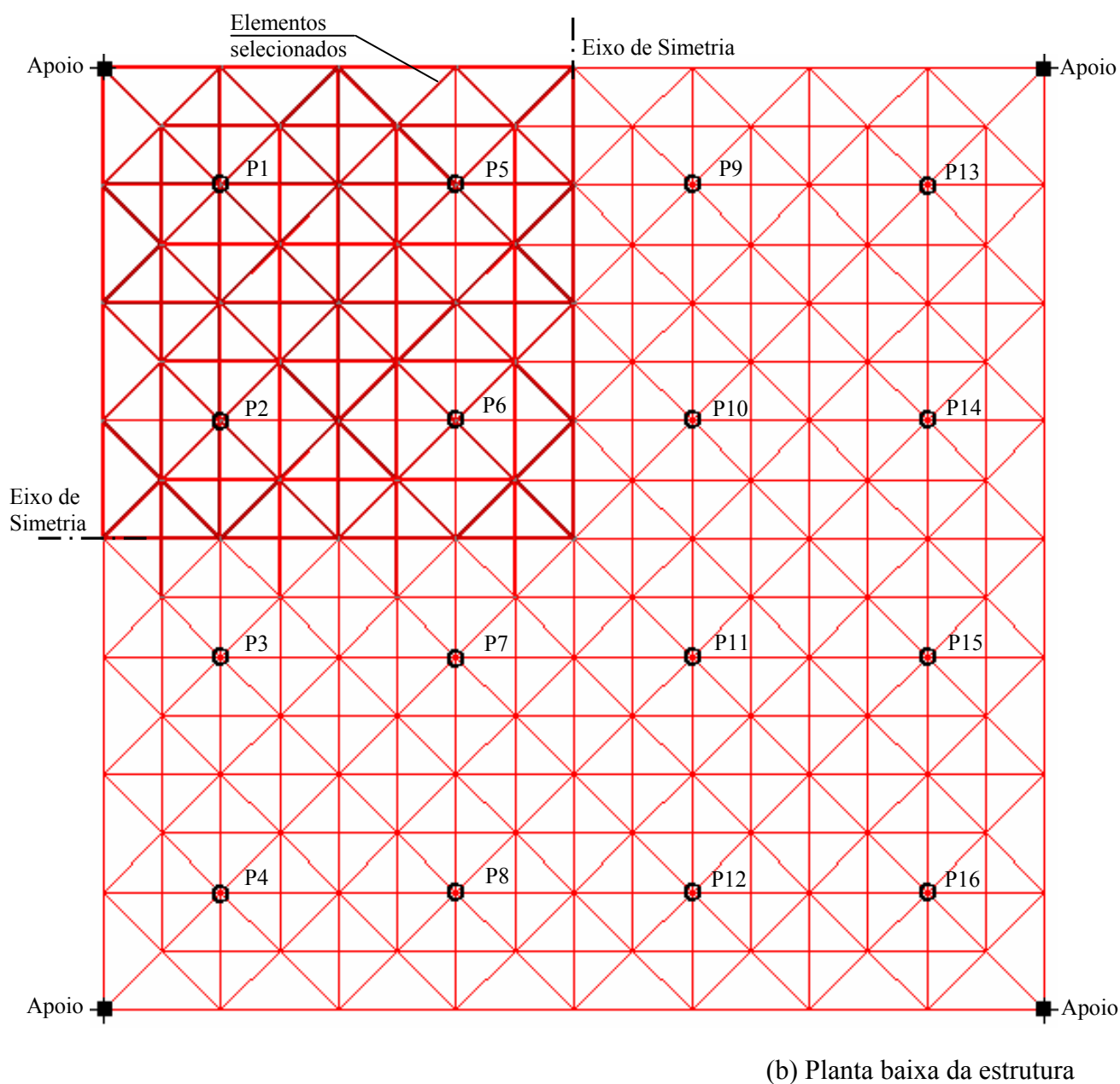
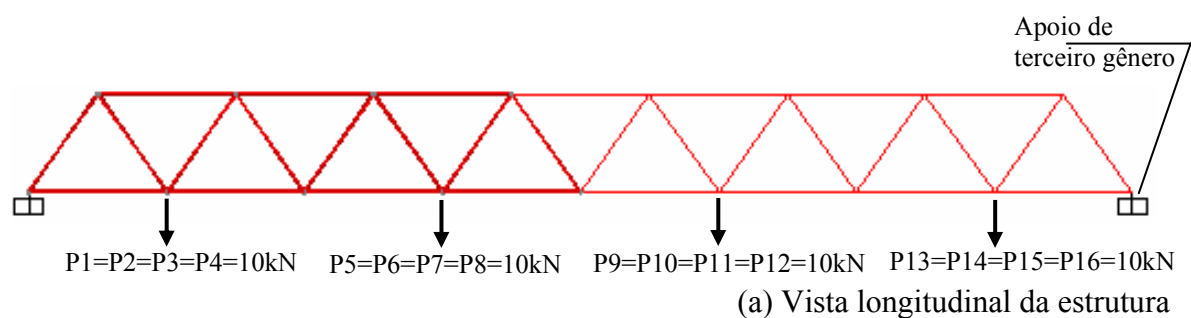


Figura 11.8 – Discretização, condições de contorno e carga do modelo M6-8x8

#### 11.1.4. Aplicação da formulação do momento teórico

Os parâmetros a serem analisados neste item são os esforços axiais de compressão e os momentos fletores, nos elementos destacados nas estruturas descritas. Considerando as simetrias longitudinal e transversal dos modelos, foram selecionados apenas  $\frac{1}{4}$  (um quarto) dos elementos, após o processamento do modelo completo. Destes, elementos selecionados, foram destacados apenas os que apresentavam esforço axial de compressão, e seu respectivo momento fletor.

Para uniformizar e simplificar a nomenclatura nos gráficos considere “LI”, ligação ideal, as estruturas treliçadas tridimensionais constituídas com ligações das barras perfeitamente centradas no nó; “LT”, ligação típica, as estruturas constituídas com ligação das barras excêntricas ao nó e extremidades amassadas.

##### 11.1.4.1. Esforços axiais e momentos fletores nos elementos dos modelos

As Figuras 11.9, 11.11, 11.13, 11.15, 11.17 e 11.19, apresentam graficamente o resultados dos esforços axiais de compressão para os modelos M1-4x4, M2-6x6, M3-8x4, M4-6x6, M5-8x6 e M6-8x8, respectivamente. É possível notar que os resultados dos esforços axiais de compressão para os modelos com ligação ideal “LI” e ligação típica “LT”, são similares. Nestes gráficos estão destacados os valores máximos de compressão obtidos nos modelos com ligação ideal, para aplicação na formulação proposta.

As Figuras 11.10, 11.12, 11.14, 11.16, 11.18 e 11.20, apresentam graficamente os resultados dos momentos fletores para os modelos M1-4x4, M2-6x6, M3-8x4, M4-6x6, M5-8x6 e M6-8x8, respectivamente. É possível notar que os resultados dos momentos fletores não são proporcionais à intensidade dos esforços axiais de compressão.

Portanto não há possibilidade de aplicar a formulação proposta em cada elemento das estruturas separadamente. Logo a formulação foi aplicada nos valores máximos de esforços (UPPER BOUND). Nestes gráficos estão destacados os valores máximos de momentos fletores obtidos nos modelos com ligação típica, para comparação com a formulação proposta. Os gráficos superpõem valores, mas os valores de cada análise e em cada barra podem ser apreciados no Apêndice B em detalhes, Tabelas B.1 a B.6.

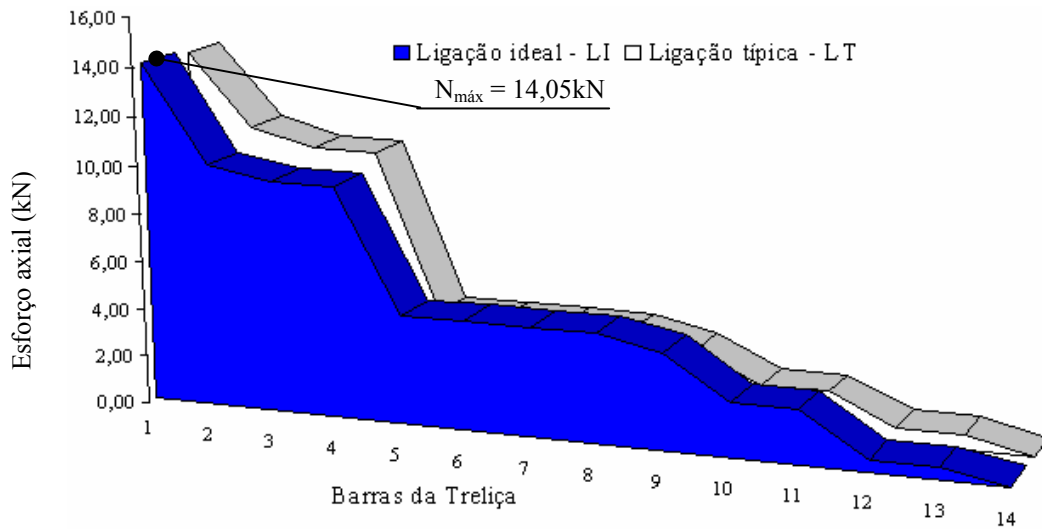


Figura 11.9 – Esforço axial nas barras da treliça do modelo M1-4x4

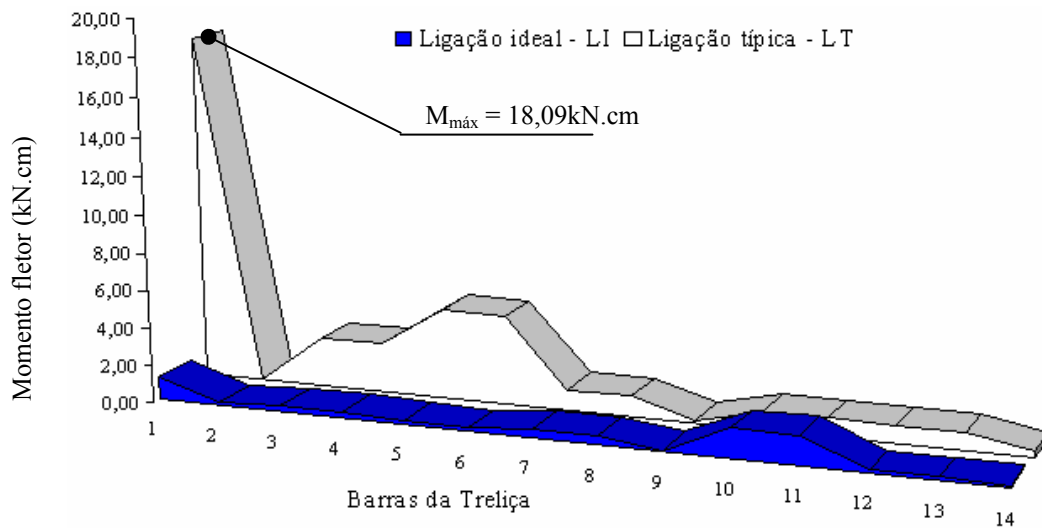


Figura 11.10 – Momento fletor nas barras da treliça do modelo M1-4x4

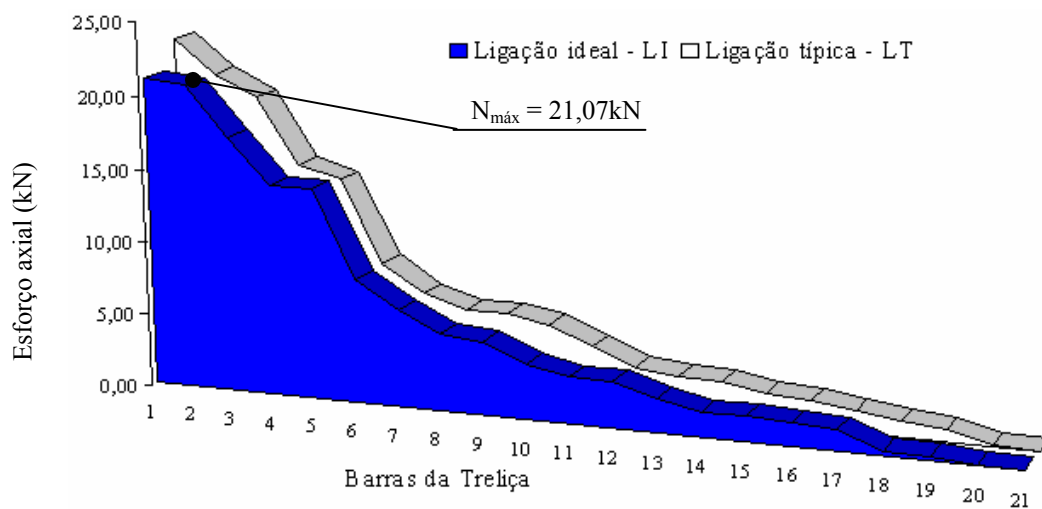


Figura 11.11 – Esforço axial nas barras da treliça do modelo M2-6x4



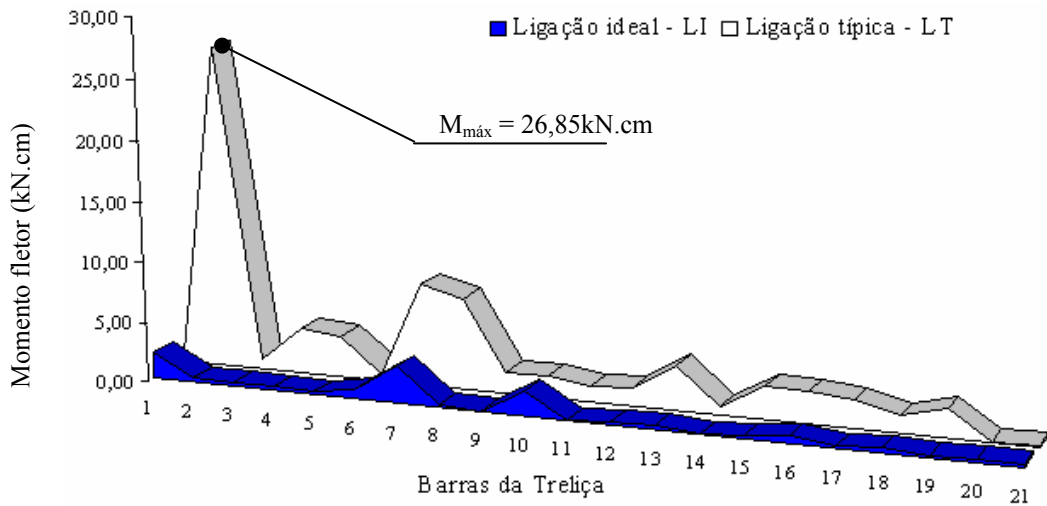


Figura 11.12 – Momento fletor nas barras da treliça do modelo M2-6x4

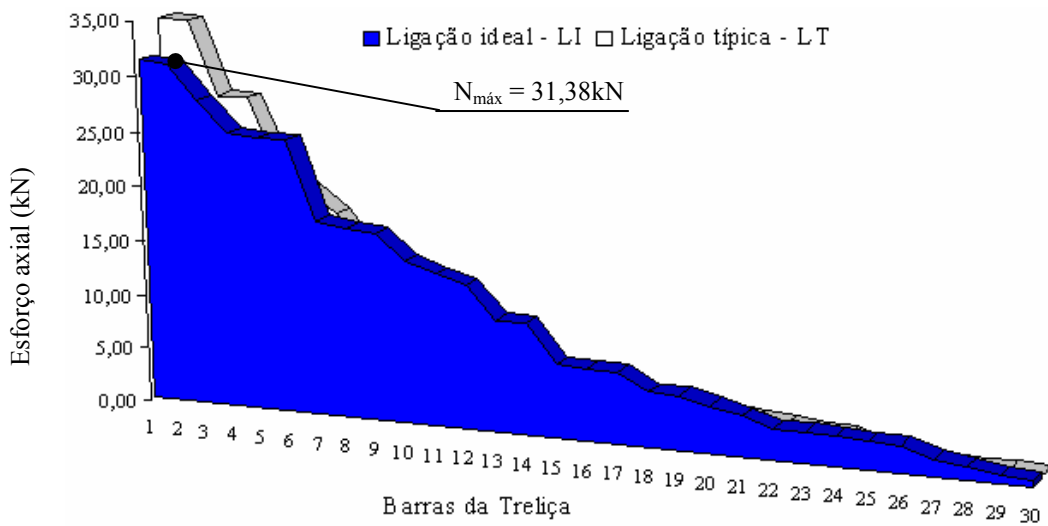


Figura 11.13 – Esforço axial nas barras da treliça do modelo M3-8x4

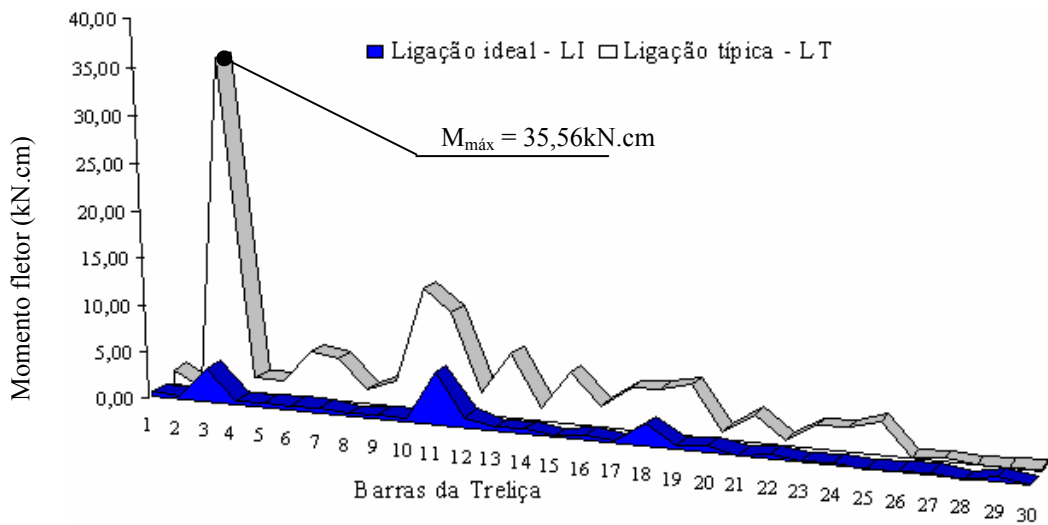


Figura 11.14 – Momento fletor nas barras da treliça do modelo M3-8x4

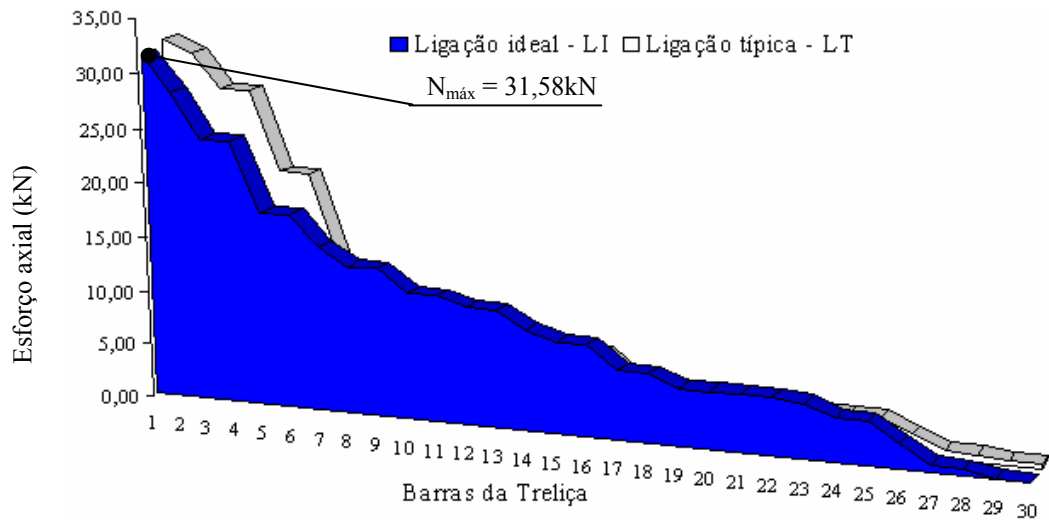


Figura 11.15 – Esforço axial nas barras da treliça do modelo M4-6x6

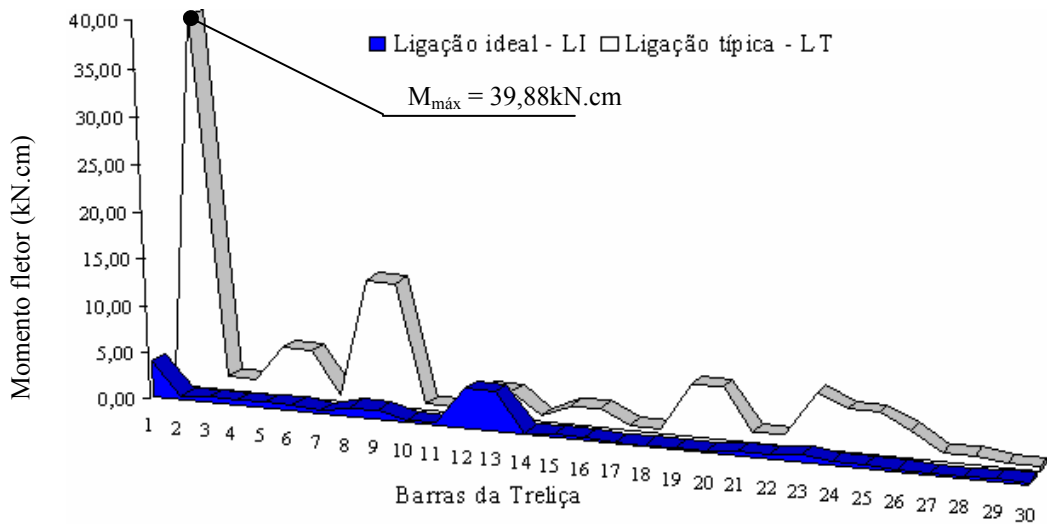


Figura 11.16 – Momento fletor nas barras da treliça do modelo M4-6x6

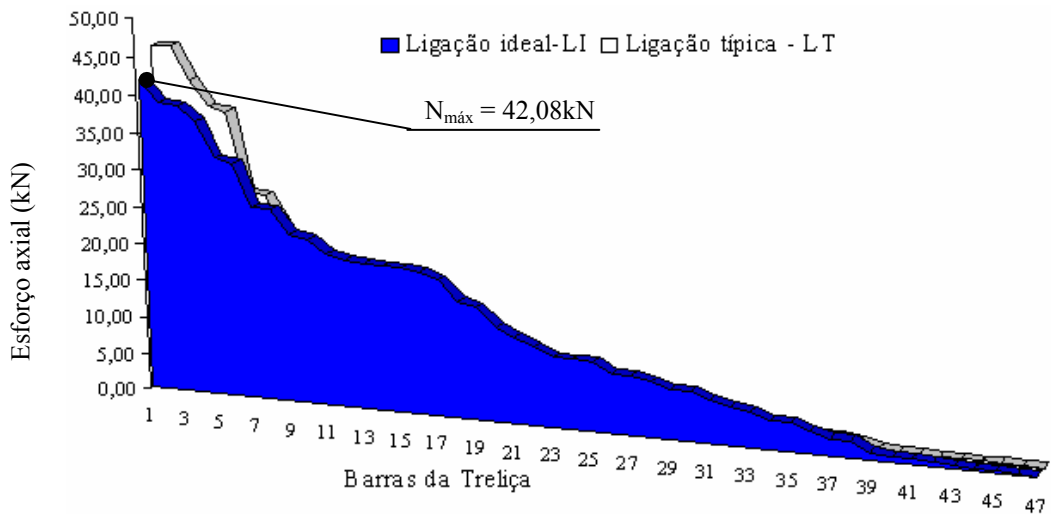


Figura 11.17 – Esforço axial nas barras da treliça do modelo M5-8x6

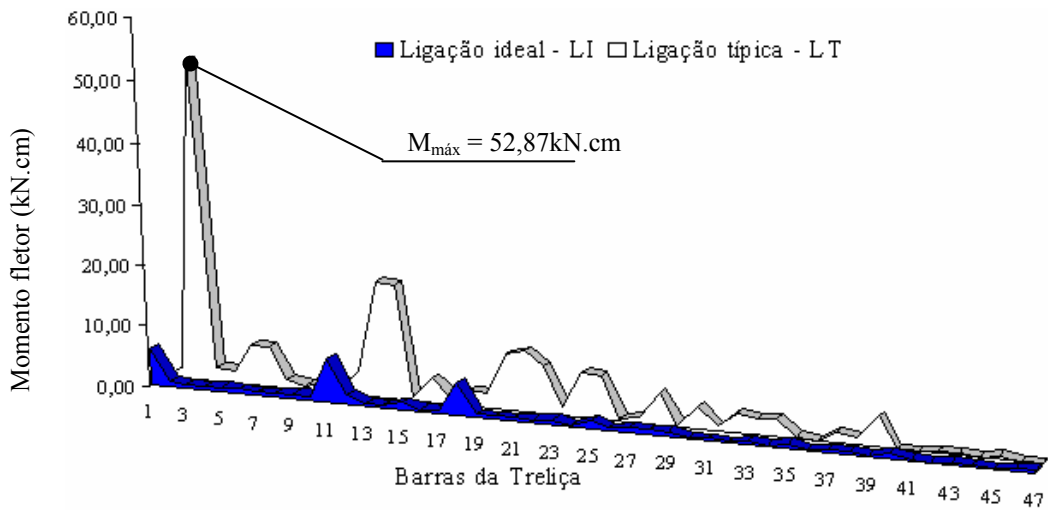


Figura 11.18 – Momento fletor nas barras da treliça do modelo M5-8x6

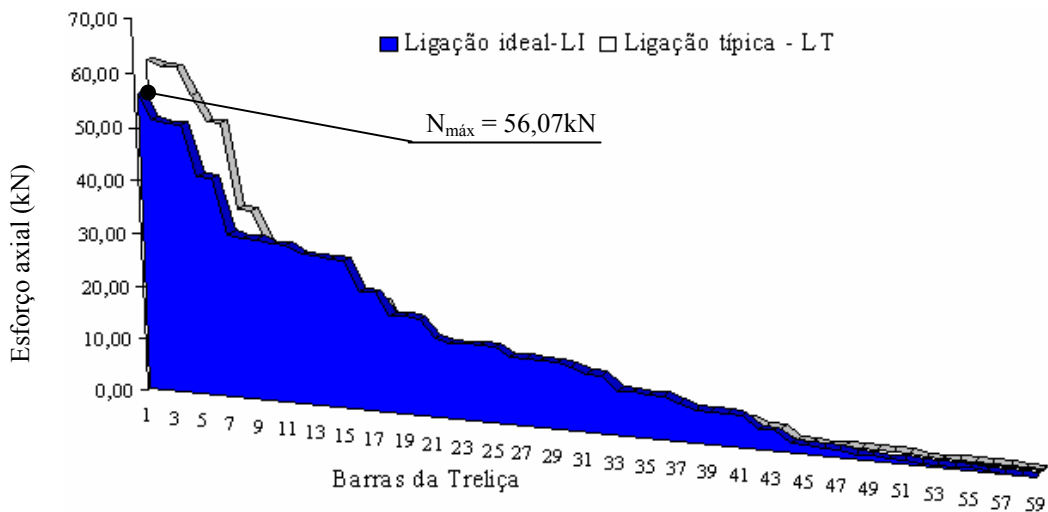


Figura 11.19 – Esforço axial nas barras da treliça do modelo M6-8x8

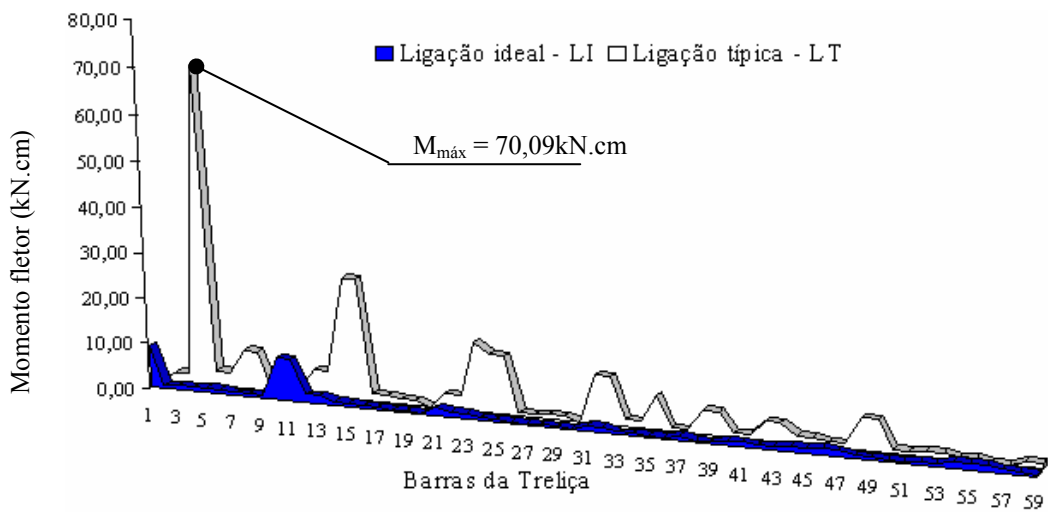


Figura 11.20 – Momento fletor nas barras da treliça do modelo M6-8x8

#### 11.1.4.2. Cálculo do momento fletor teórico e comparação com modelo não linear

No item 10.2.1.2, Capítulo 10, foi calculada a excentricidade ( $e = 1,368\text{cm}$ ) dos esforços axiais através da formulação proposta e consideradas as características geométricas dos protótipos. Para o cálculo do momento fletor teórico foi aplicando a Equação 10.7, descrita no item 10.1.1. O momento fletor teórico “ $M_{\text{teor.}}$ ” foi obtido através do produto do esforço axial de compressão “ $N_{\text{máx}}$ ”, dos elementos das estruturas com nó ideal, pela excentricidade calculada. A metodologia do cálculo do momento teórico em uma estrutura com nó típico a partir da análise de uma estrutura espacial com nó ideal está resumida no fluxograma da Figura 10.4.

A Tabela 11.1, expõe os valores dos esforços axiais máximos observados nos modelos com nó ideal, os valores dos momentos fletores máximos nas estruturas com nó típico, os resultados da aplicação da formulação e o erro percentual entre os momentos nos nós típicos e os momentos obtidos com a formulação. A Figura 11.21 representa graficamente os valores da Tabela 11.1.

Tabela 11.1 – Aplicação da formulação no cálculo dos momentos nos modelos estudados.

Modelos Estudados	Nó Ideal $N_{\text{máx}}$ (kN)	Nó Típico $M_{\text{máx}}$ (kN.cm)	Formulação $M_{\text{teor.}}$ (kN.cm)	Erro percentual
M1-4x4	14,05	18,09	19,22	5,92%
M2-6x4	21,07	26,85	28,82	6,84%
M3-8x4	31,38	35,56	42,93	17,18%
M4-6x6	31,58	39,88	43,20	7,68%
M5-8x6	42,08	52,87	57,56	8,14%
M6-8x8	56,07	70,09	76,69	8,61%

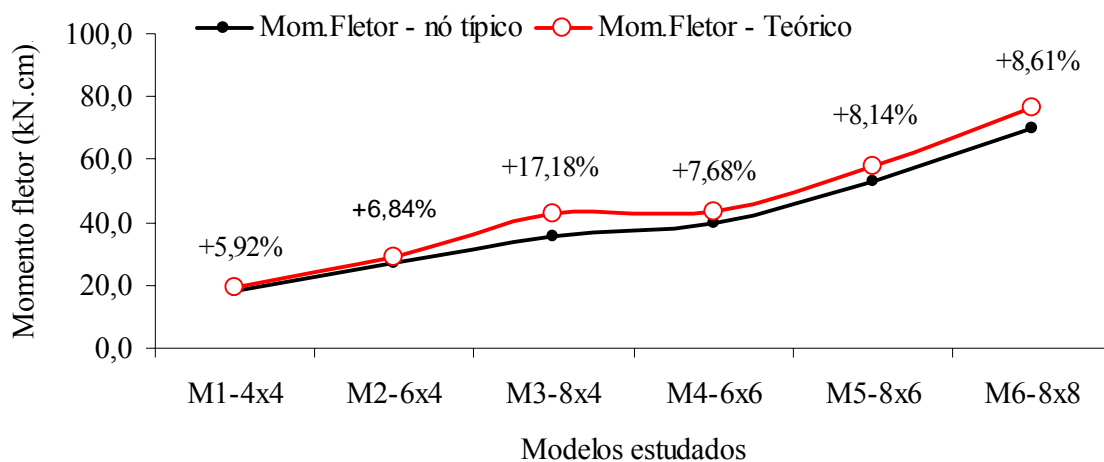


Figura 11.21 – Comparação do momento fletor máximo versus teórico nos modelos

Algumas conclusões podem ser retiradas ao final do estudo numérico, em elementos finitos, destes doze (12) modelos de estruturas espaciais. Constatou-se que os momentos fletores não são proporcionais às forças axiais em um mesmo elemento. Os esforços axiais em modelos com nós típicos são similares aos esforços axiais em modelos com nós ideais. Porém, os momentos fletores em estruturas com nós ideais podem ser desprezados, diferentemente dos momentos fletores em estruturas com nós típicos.

Por fim, como pôde ser observado no gráfico da Figura 11.21, os momentos fletores teóricos, calculados pela formulação proposta, têm valores próximos (superiores) aos momentos das estruturas com nó típico. Como os valores são ligeiramente superiores é constatado que a formulação é a favor da segurança estrutural. Esta proposta pode ser aplicada no cálculo dos momentos em estruturas espaciais onde o dimensionamento será gerido pela barra mais solicitada. Para otimização do dimensionamento recomenda-se a discretização da estrutura considerando as não linearidades geométricas para obtenção dos esforços axiais e momentos fletores.

Após a obtenção dos esforços nos elementos estruturais, segue-se o dimensionamento deste. No próximo item pode ser apreciado um estudo para validação de uma proposta para o dimensionamento destes elementos considerando o esforço combinado de momento e esforço axial (flexocompressão).

## **11.2. VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA PARA O DIMENSIONAMENTO DE ELEMENTOS DE ESTRUTURAS ESPACIAIS COM NÓS TÍPICOS SOB FLEXOCOMPRESSÃO**

A formulação proposta consiste em sugerir a adoção do momento fletor, intrínseco do nó típico, no cálculo dos elementos comprimidos de estruturas espaciais. A metodologia proposta para o cálculo dos elementos comprimidos, foi aplicada em geometrias de estruturas espaciais estudadas por outros autores. Foram calculadas as cargas de colapso pelas normas AISC-LRFD (1991), NBR8800 (1986) e EUROCODE (1992), pela metodologia proposta e comparados os resultados com a carga de colapso experimental. Foram estudados os modelos de Maiola (1999) e Souza (2003).

### 11.2.1. Estrutura ensaiada no estudo experimental estático (Capítulo 5)

No Capítulo 9 pode ser observado o cálculo da carga de colapso através da aplicação de normas AISC-LRFD (1991), NBR8800 (1986) e EUROCODE (1992) no modelo de estrutura espacial ensaiado experimentalmente. Pode ser observado também que a carga de colapso experimental, observada no Capítulo 5, é inferior a estas cargas. Configurando assim falta de segurança estrutural.

Desta forma para validar a nova metodologia de dimensionamento, a formulação é aplicada na estrutura espacial do ensaio. No Item 4.3.2, do Capítulo 4, foi calculado o esforço axial de compressão “ $N_d$ ” de 13,79kN, ou esforço nominal “ $N_n$ ” sem majoração.

Considerando as características já descritas do material, o momento de resistência plástico “ $Z$ ” de 0,8579cm<sup>3</sup>, e a relação do diâmetro e a espessura do tubo conforme a Tabela 1 da Norma 8800/86, pode-se calcular o momento nominal do tubo aplicando a Equação 11.1.

$$M_n = Zfy = 0,8579 \times 30 \rightarrow M_n = 25,73kN.cm \quad (11.1)$$

Considerando ainda a Equação 10.10 do Capítulo 10, que considera a interação do esforço axial com momento fletor, adotando a excentricidade teórica calculada no item 10.2.1.2 “ $e_t$ ” de 1,368cm, pode-se obter a carga de colapso “ $N_d$ ”, de acordo com a Equação 11.2.

$$N_d = \frac{N_n M_n}{M_n + e N_n} = \frac{13,79 \times 25,73}{25,73 + 1,368 \times 13,79} \Rightarrow N_d = 8,20kN \quad (11.2)$$

Por decomposição vetorial, para que um elemento da estrutura seja submetido a um esforço axial “ $N_d$ ” de 8,20kN é necessária uma aplicação uma carga “ $P$ ” de 23,30kN no nó 9 (ver Figura 9.1, Capítulo 9). A direção da carga é aplicada verticalmente com sentido de cima para baixo.

O gráfico da Figura 11.22 apresenta os valores de carga de colapso para a estrutura espacial estudada através da aplicação de normas AISC-LRFD (1991), NBR8800 (1986) e EUROCODE (1992), verificado através de estudo experimental (Colapso do nó) e obtido também através de uma nova metodologia de cálculo.

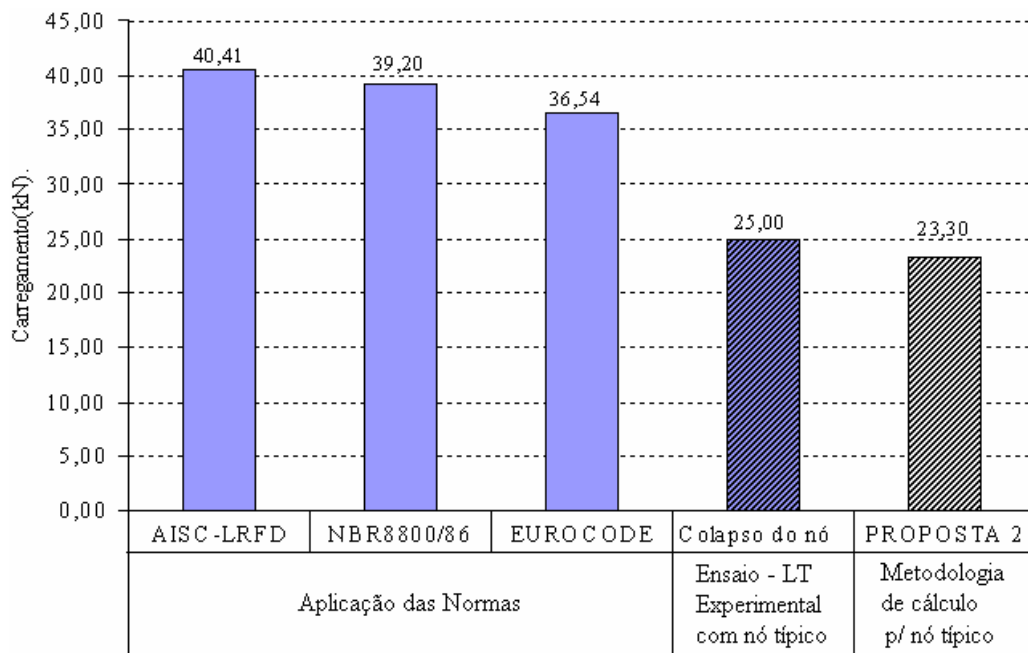


Figura 11.22 – Comparação das cargas de colapso

A formulação para cálculo da carga de colapso de estruturas com nó típico (PROPOSTA 2), apresentou resultado 6,80% menor que o valor do colapso da estrutura, e portanto a favor da segurança. Esta metodologia considera o momento fletor intrínseco da ligação típica sem reforço.

Como visto no Capítulo 9, os resultados teóricos decorrentes da aplicação das normas AISC-LRFD (1991), NBR8800 (1986) e EUROCODE (1992), são superiores aos obtidos experimentalmente. Desta forma, a estrutura não apresenta segurança satisfatória.

### 11.2.2. Estruturas ensaiadas por Maiola (1999)

No Capítulo 2 (Revisão bibliográfica), item 2.3.2.4, pode ser apreciado o estudo realizado por Maiola (1999). A Figura 11.23 apresenta a geometria da estrutura espacial ensaiada. Ele ensaiou estruturas espaciais com diferentes tipos de ligação, dentre estas com nó típico. Aqui, foram considerados apenas os protótipos com ligação com nó típico, PROT1 e PROT2. O carregamento foi aplicado em quatro pontos. A estrutura está apoiada nas quatro extremidades.

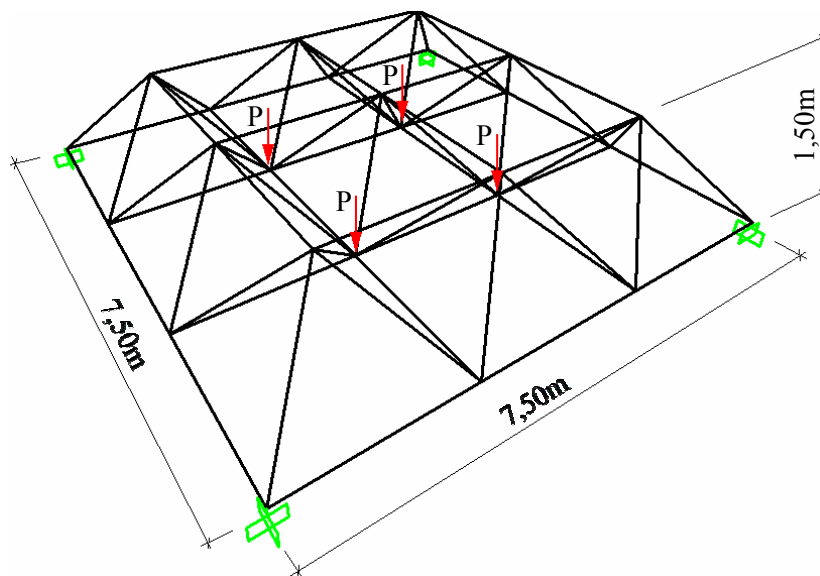


Figura 11.23 – Protótipo 7,5x7,5m estudado por Maiola (1999)

#### 11.2.2.1. Estudo do protótipo 1: PROT1

A Tabela 11.2 apresenta as características dos elementos de barra do protótipo 1. A geometria deste protótipo segue a exposta na Figura 11.23. A Tabela 11.3 expõe os valores de resistência nominal à compressão dos elementos que constituem a estrutura ensaiada. Para tanto foram aplicadas as normas AISC-LRFD (1991), NBR8800 (1986) e EUROCODE (1992) e a metodologia sugerida para o cálculo dos elementos comprimidos em estruturas com nó típico (PROPOSTA 2).

Tabela 11.2 – Elementos de barra do protótipo 1 – PROT1

ELEMENTOS	Lb (mm)	$\lambda$	$f_y$ (kN/cm <sup>2</sup> )
Banzo - Ø76x2	2500	95,4	37,40
Diagonal - Ø60x2	2318	112,5	42,00
Diagonal apoio - Ø88x2,65	2318	76,7	35,88

Tabela 11.3 – Resistência nominal a compressão (kN) – PROT1

ELEMENTOS	AISC-LRFD	NBR8800	EUROCODE	PROPOSTA 2
Banzo - Ø76x2	84,56	82,42	76,29	46,98
Diagonal - Ø60x2	49,59	49,44	46,52	29,86
Diagonal apoio - Ø88x2,65	163,05	166,73	153,77	88,99



Considerando os valores de resistência nominal a compressão dos elementos (Tabela 11.3), e a geometria da estrutura ensaiada (Figura 11.23), foram obtidas as cargas “P” atuantes em quatro pontos da estrutura por decomposição vetorial. A Tabela 11.4 expõe os valores de carregamento a serem aplicados para provocar as intensidades de resistência nominal calculadas.

É fácil notar que a menor carga aplicada será a carga de colapso da estrutura. Neste caso o banzo é o elemento de barra provável a entrar em colapso. A Carga de colapso experimental observada por Maiola (1999) foi de 161,30kN. A Figura 11.24 representa graficamente os resultados das cargas de colapso considerando as normas, a proposta e o ensaio experimental. O resultado da proposta é o valor que mais se aproxima do obtido experimentalmente. A proposta resulta em valores com maior segurança estrutural.

Tabela 11.4 – Cargas de colapso para os elementos da estrutura (kN) – PROT1

ELEMENTOS	AISC-LRFD	NBR8800	EUROCODE	PROPOSTA 2
Banzo - Ø76x2	<b>274,61</b>	<b>267,65</b>	<b>247,74</b>	<b>152,56</b>
Diagonal - Ø60x2	507,31	505,74	475,88	305,44
Diagonal apoio - Ø88x2,65	426,23	435,84	401,96	232,63

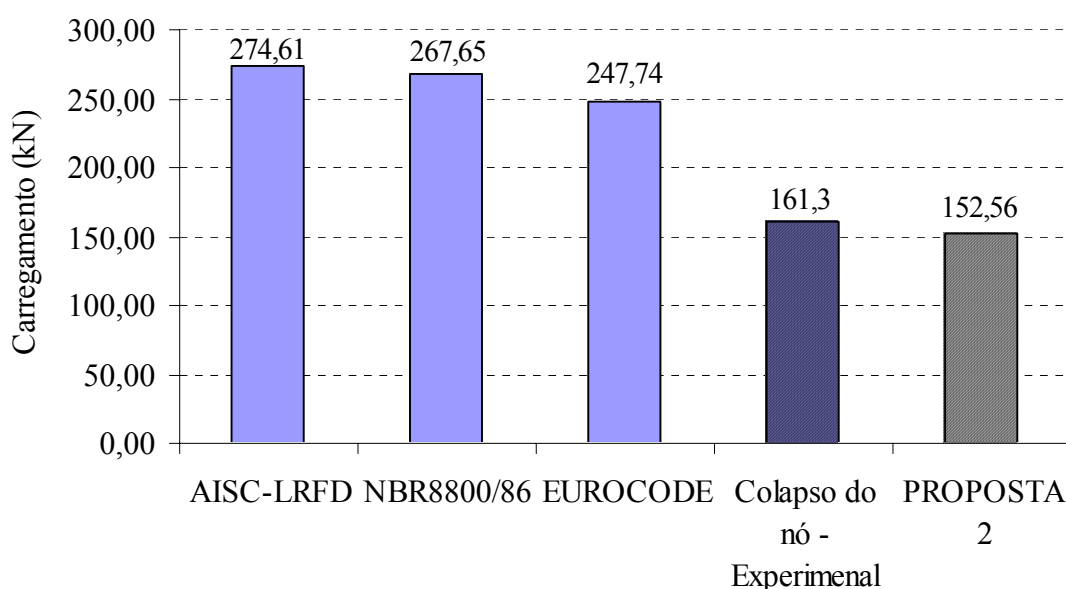


Figura 11.24 – Comparação das cargas de colapso para o protótipo 1 de Maiola (1999)

### 11.2.2.2. Estudo do protótipo 2: PROT2

A Tabela 11.5 apresenta as características dos elementos de barra do protótipo 2. A geometria deste protótipo segue a exposta na Figura 11.23. A Tabela 11.6 expõe os valores de resistência nominal a compressão dos elementos que constitui a estrutura ensaiada.

Tabela 11.5 – Elementos de barra do protótipo 2 – PROT2

ELEMENTOS	Lb (mm)	$\lambda$	fy (kN/cm <sup>2</sup> )
Banzo - Ø76x2	2500	95,4	37,40
Diagonal - Ø60x2	2318	112,5	42,00
Diagonal apoio – Ø76x2	2318	88,5	37,40

Tabela 11.6 – Resistência nominal a compressão (kN) – PROT2

ELEMENTOS	AISC-LRFD	NBR8800	EUROCODE	PROPOSTA 2
Banzo - Ø76x2	84,56	82,42	76,29	46,98
Diagonal - Ø60x2	49,59	49,44	46,52	29,86
Diagonal apoio – Ø76x2	93,57	91,64	85,20	49,84

Considerando os valores de resistência nominal a compressão dos elementos (Tabela 11.6), e a geometria da estrutura ensaiada (Figura 11.23), foram obtidas as cargas “P” atuantes em quatro pontos da estrutura por decomposição vetorial. A Tabela 11.7 expõe os valores de carregamento a serem aplicados para provocar as intensidades de resistência nominal calculadas. É fácil notar que a menor carga aplicada será a carga de colapso da estrutura. Neste caso o banzo é o elemento de barra provável a entrar em colapso. A Carga de colapso experimental observada por Maiola (1999) foi de 160,20kN. A Figura 11.25 representa graficamente os resultados das cargas de colapso considerando as normas, a proposta e o ensaio experimental.

Tabela 11.7 – Cargas de colapso para os elementos da estrutura (kN) – PROT2

ELEMENTOS	AISC-LRFD	NBR8800	EUROCODE	PROPOSTA 2
Banzo - Ø76x2	274,56	267,61	247,70	152,53
Diagonal - Ø60x2	506,01	504,45	474,67	304,66
Diagonal apoio – Ø76x2	<b>244,68</b>	<b>239,64</b>	<b>222,80</b>	<b>130,33</b>

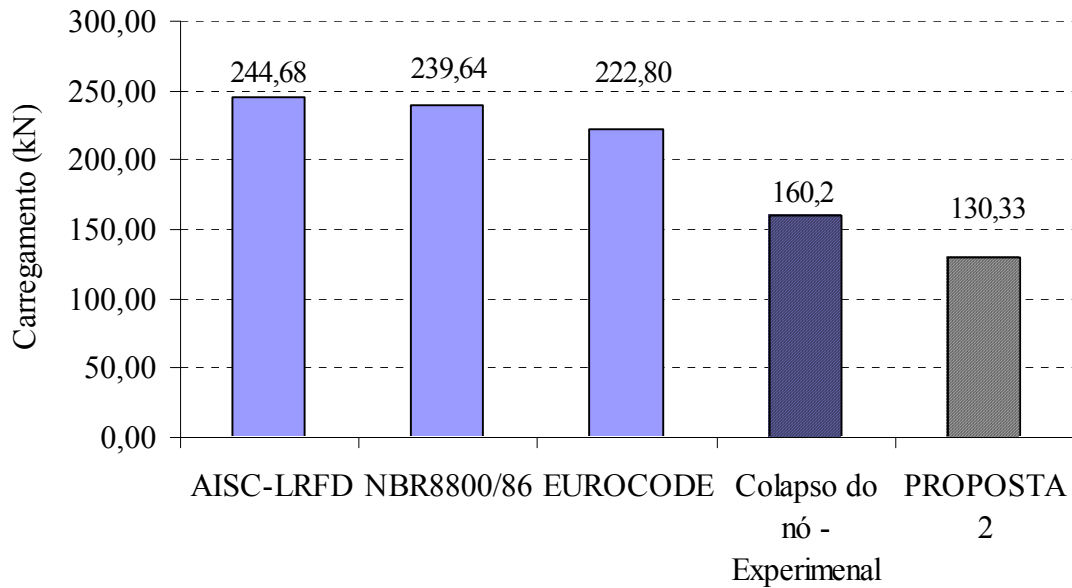


Figura 11.25 – Comparação das cargas de colapso para o protótipo 2 de Maiola (1999)

### 11.2.3. Estruturas ensaiadas por Souza (2003)

No Capítulo 2 (Revisão bibliográfica), item 2.3.2.6, pode ser apreciado o estudo realizado por Souza (2003). A Figura 11.26 apresenta a geometria da estrutura espacial ensaiada. Ele ensaiou estruturas espaciais com diferentes tipos de ligação, dentre estas com nó típico. Aqui, foram considerados apenas os protótipos com ligação com nó típico, TE1 e TE2. O carregamento foi aplicado em dez pontos. A estrutura está apoiada nas quatro extremidades.

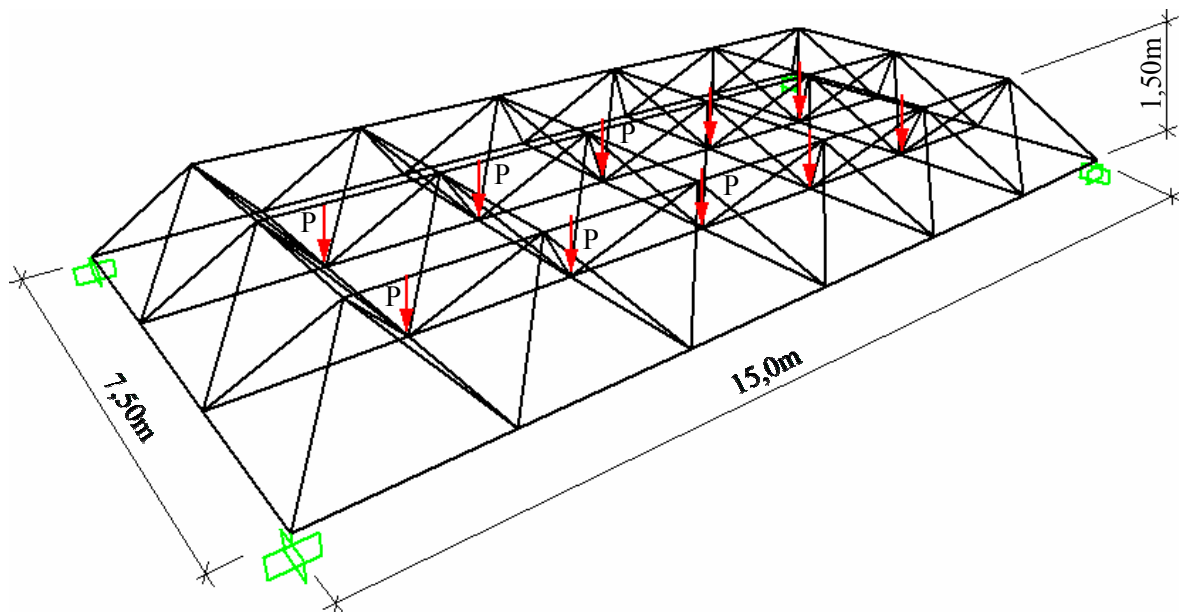


Figura 11.26 – Protótipo 7,5x15m estudado por Souza (2003)

### 11.2.3.1. Estudo do protótipo 1: TE1

A Tabela 11.8 apresenta as características dos elementos de barra do protótipo 1. A geometria deste protótipo segue a exposta na Figura 11.26. A Tabela 11.9 expõe os valores de resistência nominal à compressão dos elementos que constituem a estrutura ensaiada. Para tanto foram aplicadas as normas AISC-LRFD (1991), NBR8800 (1986) e EUROCODE (1992) e a metodologia sugerida para o cálculo dos elementos comprimidos em estruturas com nó típico (PROPOSTA 2).

Tabela 11.8 – Elementos de barra do protótipo 1 – TE1

ELEMENTOS	Lb (mm)	$\lambda$	$f_y$ (kN/cm <sup>2</sup> )
Banzo - Ø76x2	2500	96	39,10
Diagonal - Ø60x2	2318	113	42,90

Tabela 11.9 – Resistência nominal a compressão (kN) – TE1

ELEMENTOS	AISC-LRFD	NBR8800	EUROCODE	PROPOSTA 2
Banzo - Ø76x2	85,56	82,90	77,10	46,98
Diagonal - Ø60x2	49,59	49,87	46,66	36,09

Considerando os valores de resistência nominal a compressão dos elementos (Tabela 11.9), e a geometria da estrutura ensaiada (Figura 11.26), foram obtidas as cargas “P” atuantes em dez pontos da estrutura por decomposição vetorial. A Tabela 11.10 expõe os valores de carregamento a serem aplicados para provocar as intensidades de resistência nominal calculadas.

É fácil notar que a menor carga aplicada será a carga de colapso da estrutura. Neste caso o banzo é o elemento de barra provável a entrar em colapso. A Carga de colapso experimental observada por Souza (2003) foi de 93kN. A Figura 11.27 representa graficamente os resultados das cargas de colapso considerando as normas, a proposta e o ensaio experimental. O resultado da proposta é o valor que mais se aproxima do obtido experimentalmente. A proposta resulta em valores com maior segurança estrutural.

Tabela 11.10 – Cargas de colapso para os elementos da estrutura (kN) – TE1

ELEMENTOS	AISC-LRFD	NBR8800	EUROCODE	PROPOSTA 2
Banzo - Ø76x2	163,07	158,00	146,95	<b>89,54</b>
Diagonal - Ø60x2	<b>129,99</b>	<b>130,73</b>	<b>122,30</b>	94,61

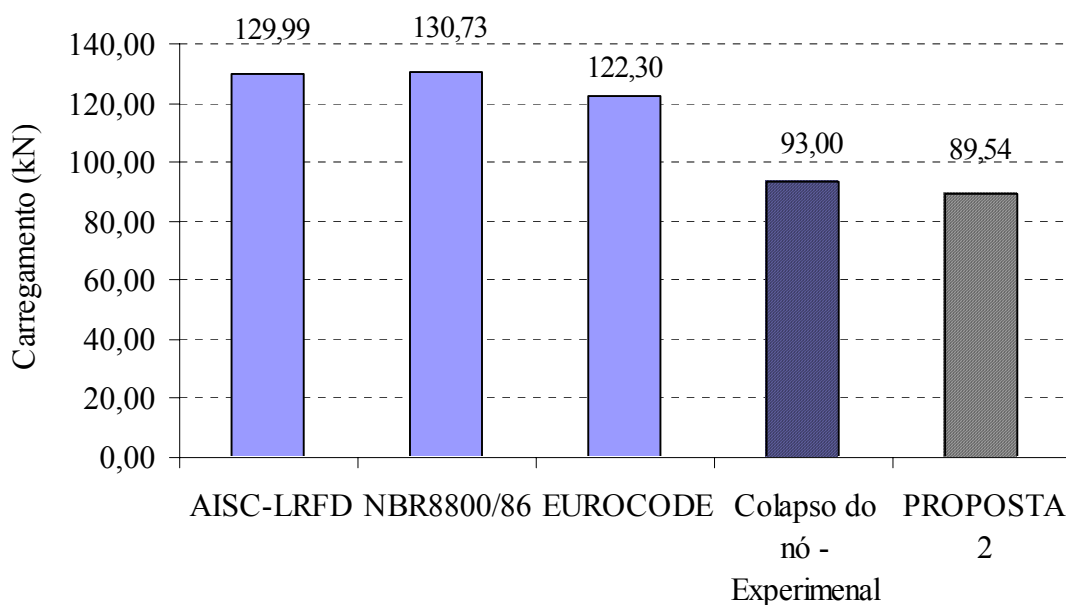


Figura 11.27 – Comparação das cargas de colapso para o protótipo 1 de Souza (2003)

#### 11.2.3.2. Estudo do protótipo 2: TE2

A Tabela 11.11 apresenta as características dos elementos de barra do protótipo 2. A geometria deste protótipo segue a exposta na Figura 11.26. A Tabela 11.12 expõe os valores de resistência nominal a compressão dos elementos que constitui a estrutura ensaiada. Para tanto foram aplicadas as normas AISC-LRFD (1991), NBR8800 (1986) e EUROCODE (1992) e a metodologia sugerida para o cálculo dos elementos comprimidos em estruturas com nó típico (PROPOSTA 2).

Tabela 11.11 – Elementos de barra do protótipo 2 – TE2

ELEMENTOS	Lb (mm)	$\lambda$	$f_y$ (kN/cm <sup>2</sup> )
Banzo - Ø76x2	2500	96	39,10
Diagonal - Ø60x2	2318	113	42,90
Diagonal de apoio – Ø88x2,65	2318	77	36,80

Tabela 11.12 – Resistência nominal a compressão (kN) – TE2

ELEMENTOS	AISC-LRFD	NBR8800	EUROCODE	PROPOSTA 2
Banzo - Ø76x2	85,56	82,90	77,10	46,98
Diagonal - Ø60x2	49,59	49,87	46,66	36,09
Diag. de apoio – Ø88x2,65	165,33	167,35	155,46	122,81

Considerando os valores de resistência nominal a compressão dos elementos (Tabela 11.12), e a geometria da estrutura ensaiada (Figura 11.26), foram obtidas as cargas “P” atuantes em dez pontos da estrutura por decomposição vetorial. A Tabela 11.13 expõe os valores de carregamento a serem aplicados para provocar as intensidades de resistência nominal calculadas. A Carga de colapso experimental observada por Souza (2003) foi de 93kN. A Figura 11.28 representa graficamente os resultados das cargas de colapso considerando as normas, a proposta e o ensaio experimental.

Tabela 11.13 – Cargas de colapso para os elementos da estrutura (kN) – TE1

ELEMENTOS	AISC-LRFD	NBR8800	EUROCODE	PROPOSTA 2
Banzo - Ø76x2	<b>163,34</b>	<b>158,26</b>	<b>147,20</b>	<b>89,69</b>
Diagonal - Ø60x2	273,97	275,53	257,77	199,41
Diag. de apoio – Ø88x2,65	433,78	439,07	407,89	322,21

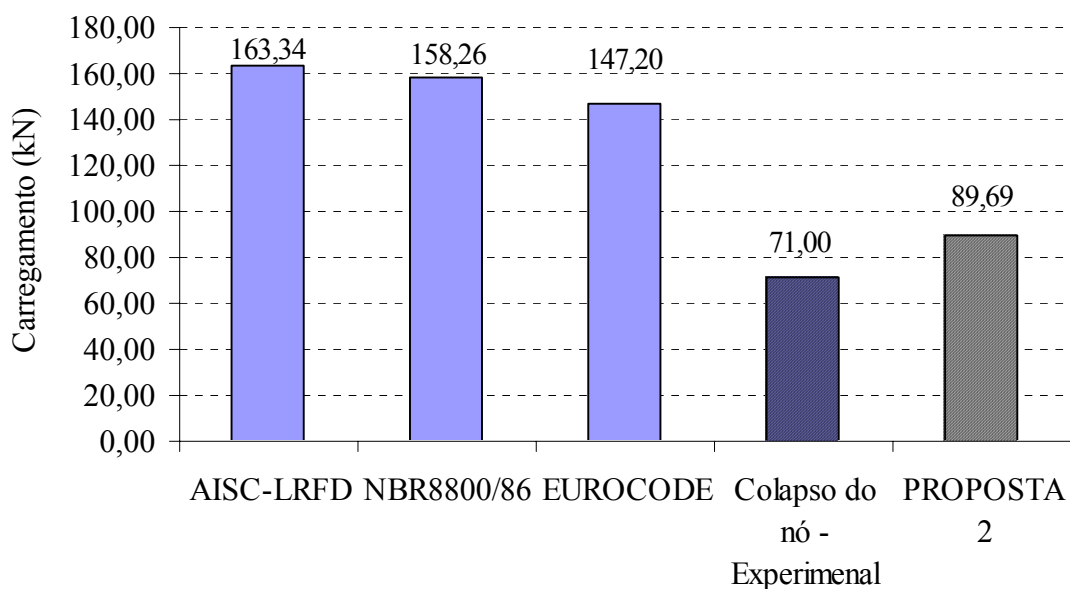


Figura 11.28 – Comparação das cargas de colapso para o protótipo 2 de Souza (2003)

## **12. CONCLUSÕES E SUGESTÕES**

Este capítulo apresenta um resumo das conclusões deste trabalho e também sugestões para trabalhos futuros com o intuito de dar continuidade a esta pesquisa. As conclusões estão organizadas em três itens (a) abordando o estudo do reforço do nó típico (proposta-1); (b) o estudo da metodologia para o cálculo e verificação de estruturas com nó típico sem reforço (proposta-2); e (c) conclusão de caráter geral sobre esta pesquisa (Freitas, 2008).

### **12.1. CONCLUSÕES DO REFORÇO DO NÓ TÍPICO – PROPOSTA 1**

#### **12.1.1. Conclusões do estudo preliminar computacional**

A partir do estudo preliminar computacional, realizado no Capítulo 4, podemos listar algumas importantes observações. Lembrando que neste estudo foram analisados estruturas com três configurações de ligações: Ligação ideal “LI”, Ligação típica “LT” e Ligação típica com distanciador “LTD”.

- As forças axiais nos elementos das treliças apresentaram a mesma intensidade para os três modelos. Não tiveram variação maior que 2,8%, podemos assim considerar invariável;
- A estrutura treliçada composta com ligação típica “LT” apresentou um aumento de até 93%, no momento fletor, em relação à estrutura com ligação ideal “LI”;
- A estrutura treliçada composta com nó típico e distanciador “LTD” apresentou uma diminuição de até 62%, no momento fletor, em relação à estrutura com nó típico “LT”;
- Os deslocamentos verticais no nó central da estrutura com ligação ideal “LI”, ligação típica “LT” e ligação típica com distanciador “LTD”, foram respectivamente de 2,39mm, 11,26mm e 3,39mm.

Foi observado que a solução proposta neste trabalho (ligação típica com distanciador - LTD) satisfaz as previsões de melhoria da ligação típica. Pois ficou constatada uma diminuição do momento fletor na ligação, além da diminuição do deslocamento vertical da estrutura. Logo este estudo preliminar, de investigação do reforço, respaldou a necessidade de estudos experimentais na ligação da estrutura espacial.

### 12.1.2. Conclusões do estudo experimental estático

Inicialmente estava previsto um estudo comparativo entre a estrutura espacial com nó típico “LT” e a estrutura com nó típico com distanciador “LTD”. Entretanto durante os ensaios experimentais estáticos (Capítulo 5) observou-se o colapso das estruturas nas extremidades amassadas dos elementos. Logo foi proposto o reforço da região amassada com chapas cobrejunta. Portanto, no estudo experimental estático foram analisadas estruturas com três configurações de ligação: Ligação típica “LT” com três protótipos LTE1, LTE2 e LTE3; Ligação típica com distanciador “LTD” com três protótipos LTDE1, LTDE2 e LTDE3; Ligação típica com distanciador e chapa cobrejunta “LTDC” com três protótipos LTDCE1, LTDCE2 e LTDCE3. Após os ensaios foram feitas médias aritméticas com os resultados dos três ensaios de cada modelo. Dessa forma podem-se salientar as seguintes conclusões.

- Os protótipos de estruturas espaciais com nós típicos (LTE1, LTE2 e LTE3) apresentaram dois modos de colapso. O colapso local da ligação com uma carga de 25kN no nó 9 (central), caracterizado por um excesso de deformação no nó. E o colapso global da estrutura com uma carga de 35,60kN no nó 9 (central), caracterizado pela flambagem dos elementos comprimidos, será considerado o ponto do colapso da estrutura o colapso local da ligação;
- Os protótipos de estruturas espaciais com nós típicos e distanciador (LTDE1, LTDE2 e LTDE3) apresentaram colapso abrupto na ligação na região amassada da barra com uma carga média de 38kN, no nó 9 (central);
- Os protótipos de estruturas espaciais com nós típicos, distanciador e chapa cobrejunta (LTDCE1, LTDCE2 e LTDCE3) apresentaram colapso por flambagem da barra com uma carga média de 42,6kN, no nó 9 (central);
- Quanto à carga de colapso a estrutura com ligação típica e distanciador “LTD” e Ligação típica com distanciador e chapa cobrejunta “LTDC” obtiveram um aumento de resistência respectivamente de 52% e 70%, em relação à ligação típica “LT”, considerando o colapso da ligação;
- Os deslocamentos médios verticais no nó central da estrutura, para uma carga de 25kN, com ligação típica “LT”, ligação típica e distanciador “LTD” e Ligação típica com distanciador e chapa cobrejunta “LTDC”, foram respectivamente de 21,45mm, 18,90mm e 13,25mm;



- Quanto ao deslocamento vertical, no nó central, as estrutura com ligação típica e distanciador “LTD” e Ligação típica com distanciador e chapa cobrejunta “LTDC” obtiveram uma redução de flecha, respectivamente de 12% e 38%, em relação à ligação típica;

Ao final do estudo experimental estático, a ligação típica com distanciador e chapa cobrejunta “LTDC” sagrou-se como produto final para o reforço do nó típico (PROPOSTA 1). Foi observado que este reforço propicia um aumento na resistência da estrutura, evidenciado por uma maior carga de colapso para um menor deslocamento vertical. Este reforço garantiu a integridade da ligação até o ponto de colapso da estrutura por flambagem do elemento comprimido.

O aumento da rigidez da estrutura é constatado por menores deslocamentos para maiores carregamentos aplicados. 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.

### **12.1.3. Conclusões do estudo experimental dinâmico**

Estudos anteriores indicaram a ligação típica com distanciador e chapa cobrejunta “LTDC” como o produto final da “proposta 1” desta tese. Foi evidenciado um aumento da rigidez estrutural neste tipo de estrutura. Portanto foram realizados estudos experimentais dinâmicos para verificar se este aumento de rigidez diminui a vida útil da estrutura devido a carregamentos cíclicos. Foram estudados oito protótipos de estruturas, sendo: quatro protótipos com ligação típica “LT” (LTD1, LTD2, LTD3 e LTD4); e quatro protótipos com ligação típica com distanciador e chapa cobrejunta “LTDC” (LTDCD1, LTDCD2, LTDCD3 e LTDCD4). Após os ensaios dinâmicos (Capítulo 6) foi possível constatar:

- Os protótipos de estruturas espaciais com nós típicos, distanciador e chapa cobrejunta (LTDCD) apresentaram um acréscimo de 51% na sua resistência à 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;

#### **12.1.4. Conclusões do estudo computacional**

O estudo experimental dinâmico evidenciou a ruptura das estruturas nas extremidades das diagonais. Desta forma um estudo computacional em elementos finitos de placa (Capítulo 7) foi desenvolvido para analisar as tensões nos componentes das estruturas. Foram aplicadas cargas que provocassem o deslocamento da amplitude dos ensaios dinâmicos e assim traçar a “curva S-N” para as estruturas. Foram estudados protótipos com ligação típica “LT” e protótipos com ligação típica com distanciador e chapa sobrejunta “LTDC”. Após os ensaios foi possível constatar:

- 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 sobrejunta apresentaram menores tensões que os modelos com ligação típica;

### **12.2. CONCLUSÃO DO ESTUDO DA METODOLOGIA PARA O CÁLCULO DE ESTRUTURAS COM NÓ TÍPICO SEM REFORÇO – PROPOSTA 2**

#### **12.2.1. Conclusões do estudo de validação da proposta de cálculo do momento fletor teórico**

No Capítulo 4 foi realizado um estudo para validação da proposta 2, que trata do cálculo do momento fletor máximo em uma estrutura espacial com nó típico, a partir do estudo dos esforços axiais em uma estrutura com nós ideais. Tal momento fletor é calculado, segundo a proposta, pelo produto do esforço axial máximo em uma estrutura com nó típico por uma excentricidade calculada. O cálculo desta excentricidade também é proposto no Capítulo 3. Para validação do cálculo do momento fletor foram estudados doze (12) modelos de estruturas espaciais. Desta forma têm-se as seguintes conclusões.

- Os momentos fletores não são proporcionais às forças axiais em cada elemento separadamente;
- Os esforços axiais em modelos com nós típicos são similares aos esforços axiais em modelos com nós ideais. Porém, os momentos fletores em estruturas com nós ideais podem ser desprezados, diferentemente dos momentos fletores em estruturas com nós típicos;

- Os momentos fletores teóricos, calculados pela formulação proposta, têm valores próximos aos momentos das estruturas com nó típico.

### **12.2.2. Conclusões do estudo de aplicação da metodologia proposta no modelo ensaiado experimentalmente**

No Capítulo 8 foi realizada a aplicação da proposta 2 para o cálculo da carga de colapso da estrutura espacial ensaiada experimentalmente. Pode-se concluir que:

- Foi observado que a metodologia de cálculo proposta gerou um valor de carga de colapso menor que o valor observado experimentalmente;
- Os demais métodos apresentaram valores superiores à metodologia proposta;
- A metodologia proposta garante maior segurança à estrutura.

### **12.2.3. Conclusões do estudo de aplicação da metodologia proposta no modelo ensaiado por outros autores**

No Capítulo 8 foi realizada a aplicação da proposta 2 para o cálculo da carga de colapso da estrutura espacial ensaiada experimentalmente por outros autores. Pode-se concluir que:

- Foi observado que a metodologia de cálculo proposta gerou um valor de carga de colapso menor que o valor observado experimentalmente;
- Os demais métodos apresentaram valores superiores à metodologia proposta;
- A metodologia proposta garante maior segurança à estrutura.

## **12.3. CONCLUSÃO FINAL DO TRABALHO**

Com base nos estudos realizados podemos concluir que:

- O reforço do nó típico utilizando distanciador e chapa cobrejunta (Proposta 1), atende aos critérios de segurança das normas AISC-LRFD (1991), 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.

- Quanto da utilização de ligações com nó típico sem reforço é aconselhável à consideração do momento fletor intrínseco do nó típico (proposta 2). Pois esta metodologia proposta assegurou maior segurança.

#### **12.4. SUSGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS**

Temas de estudo sobre estruturas treliçadas tridimensionais com nó típico são de suma importância para o desenvolvimento da construção no Brasil. Principalmente para possibilitar uma aplicação mais econômica e segura deste tipo de estrutura tão utilizada. Portanto, no sentido de contribuir com a criação de novos estudos e conseqüentemente com novas linhas de pesquisas, tem-se algumas sugestões.

- Realização de estudos experimentais comparando ligações com nó típico e ligações com nó típico distanciador e chapa cobrejunta, com outras configurações de vão. Possivelmente considerando os ensaios experimentais realizados por outros autores em estruturas com ligação típica. E realização dos ensaios em ligações típicas com distanciador e chapa cobrejunta para as configurações já ensaiadas.
- Um estudo para possíveis materiais para o distanciador também é um tema a ser abordado, pois nesta tese foi considerado apenas o uso do aço.
- A realização de estudos dinâmicos nas estruturas espaciais também carece de maior atenção. Neste trabalho foi dada apenas uma pequena contribuição e muito pode ainda ser estudado.
- Considerando, no entanto, as dificuldades financeiras para realização de ensaios experimentais, sugere-se o estudo da aplicação da formulação proposta em projetos já consagrados e a verificação da segurança da aplicação desta.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agerskov, H. (1986). “Optimum geometry design of double-layer space structure”, Journal of Structural Engineering, v.112, n.6
- Aguiar, L.L.(2002). Projeto e dimensionamento automático de treliças espaciais metálicas, Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, UnB
- American Association of State Highway and Transportation Officials (1994). AASHTO – LRFD Bridge Design Specification. EUA
- American Institute of Steel Construction (1999). AISC – LRFD, “Manual of steel construction”. Chicago
- American Society for Testing Materials (1977). ASTM A-370, “Standard methods and definitions for mechanical testing of steel products”. Chicago
- American Society of Mechanical Engineers (1998). ASME – Boiler and Pressure V. Code
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1986). NBR 8800, “Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios: método dos estados limites”. Rio de Janeiro
- Batista, R.C. ; Batista, E.M. (1997). Determinação experimental dos mecanismos de colapso de uma junta típica de estruturas metálicas reticuladas espaciais. In: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 28., São Carlos, Brasil, 01-05 Setembro 1997. Estruturas e fundações. v.3, p.665-674
- Beer, F.P.; Johnston, E.R. (1988). “Resistência dos Materiais”, Editora McGraw-hill Ltda, São Paulo
- Bellei, I. H (1998). “Edifícios industriais em aço”, Editora Pini, São Paulo

- Cood, E. T.(1984). Low technology space frames. INTERNATIONAL CONFERENCE ON SPACE STRUCTURES, 3., Guildford, UK, sept. 1984. Proceedings. London, Elsevier Applied, p.955-960
- Cuenca, L. S. (2002). “The stainless steel structures of a sport stadium in quart.”, In: International Conference on Space Structures, 5., Guildford, UK, aug. 2002. Proceedings. London, Thomas Telford. V.1, p.547-556
- Cuoco, D. A. (1997). “Guidelines for the design of double-layer grids”, Prepared by the task committee on double-layer grids, ASCE, New York
- Daddi, I. (1969). Strutture reticolari spaziali per coperture piane. Costruzioni Metalliche, n.6, p.502-509
- D’Este, A. V. (1998). Comportamento de estruturas espaciais tubulares padronizadas, Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, RJ
- Dias, L.A.M. (1993). “Edificações de aço no Brasil”, Editora Zigurate, São Paulo
- Dowling, N.E. (1993). Structural Mechanical Behavior of Materials, Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall Inc.
- El-Sheikh, A. (1996). “Development of a new space truss system”. Journal of Constructional Steel Research, V. 37, p. 205-227.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (1992). Eurocode 3. Design of steel structures. Part.1.1. General rules and rules for buildings
- Furtado, E.P. (2002). Avaliação de fadiga através da análise termo-elástica bidimensional no método dos elementos de contorno, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ
- Freitas, C.A.S.; Bezerra, L.M.; Nagato, Y. (2008). Increasing load capacity of steel space trusses with staking end-flattened connections. Journal of constructional steel research – Elsevier. (SUBMETIDO)

- Freitas, C.A.S.; Bezerra, L.M.; Nagato, Y.; Matias, W. T. (2008). Increasing Fatigue capacity of steel space trusses with staking end-flattened connections. Journal of constructional steel research – Elsevier. (SUBMETIDO)
- Galambos, T. V. (1996). “Basic steel design with LRFD”, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey
- Gerrits, J.M. (1984). Space structures in the Netherlands since 1975. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SPACE STRUCTURES, 3., Guildford, UK, Sept. 1984. Proceedings. London, New York, Elsevier Applied Science.p.28-32
- Gonçalves, R.M. ; FAKURY, R.H. ; MAGALHÃES, J.R.M. (1996). Performance of tubular steel sections subjected to compression: theoretical and experimental analysis. In: INTERNATIONAL COLOQUIUM ON STRUCTURAL STABILITY, 5, Rio de Janeiro, August 5-7, 1996. Stability problems in designing, construction and rehabilitation of metal structures: Proceedings. COPPE-UFRJ. p.439-449
- Iffland, J. (1982). “Preliminary planning of steel roof space trusses”, Journal of the Structural Division, v.108, n.11
- Kulak, G. L; Fisher, J. W.; Struik, J.H.A. (2001). “Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted joints”, American Institute of Steel Construction, Chicago
- Lan, T.T. e Qian, R. (1986). “A study on the optimum design of space trusses, Optimal geometrical configuration and selection of type”, IASS, Symposium of shell, members and space frames. Osaka, Japão
- Liu, X. (1993). Recent applications and developments of steel space space structures with welded hollow spherical joints in China. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SPACE STRUCTURES, 4., Guildford, UK, Sept. 1993. Proceedings. London, Thomas Telford. v.1
- Madi, U.R. e Al-Tayem, A. (1991). “On the effective length of compression members in double-layer grids”, International Journal of Space Structures, v.6, n.1

- Magalhães, J. R. M. (1996). Sobre o projeto e a construção de estruturas metálicas espaciais, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, EESC/USP
- Makowski, Z. S. (1968). Estructuras espaciales de acero. Barcelona, Gustavo Gili
- Makowski, Z. S. (1981). “Review of development of various types of double-layers”, Applied Science. p1-55
- Malite, M. et al. (1997). “Barras de aço comprimidas de seção tubular com extremidades estampadas – Análise teórica e experimental”, Jornadas Sul Americanas de Engenharia Estrutural. São Carlos, Brasil
- Maiola, C.H.(1999). Análise teórica e experimental de treliças espaciais constituídas por barras com extremidades estampadas. São Carlos. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo
- Malla, R.B. ; Serrette, R.L. (1996). Double-layer grids: review of static and thermal analysis methods. Journal of Structural Engineering, v.122, n.8, p.873-881, Aug.
- Marsh, C. (2000). Some observations on designing double layer grids. International Journal of Space Structures, v.15, p.225 –231
- Morini, F. (1976). Coperture spaziale. Costruzione Metalliche, n.6, p.328-332
- Norton, R.L. (1998). Machine Design an Integrated Approach, 2º ed., Estados Unidos
- Pfeil, W.,(2000). “Estruturas Metálicas: Dimensionamento prático”, Livros Técnicos Científicos, 7ª edição, Editora LTC, Rio de Janeiro
- Queiroz, G. (1993). “Elementos de estruturas de aço”, Belo Horizonte
- Silva, K. C. (1999). Análise teórico-experimental de barras comprimidas em estruturas metálicas espaciais. Ouro Preto. Dissertação (Mestrado), Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto



- Souza, A. N. (2002). Análise da concepção de projeto de estruturas metálicas espaciais: ênfase em coberturas, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, EESC/USP
- Souza, A. S. C. (1998). Contribuição ao estudo das estruturas metálicas espaciais, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, EESC/USP
- Souza, A. S. C. (2003). Análise teórica e experimental de treliças espaciais, Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, EESC/USP
- Student Manual for strain Gage Technology (1983). Bulletin 309B, Measurements group, inc. North Carolina, USA
- Suresh, S. (1994). Fatigue of Materials, 2 ed, Cambridge, Cambridge University Press
- Vazquez, E. G. (2002). Análise teórica e experimental da instabilidade torcional de perfis formados a frio sob compressão centrada, Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ
- Vendrame, A. M. (1999). Contribuição ao estudo das cúpulas treliçadas utilizando elementos tubulares em aço. São Carlos. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo
- Walker, H.B. (1986). “The design and construction of double-layer space frame grids”, Applied Science. p331-354
- Willems, N., Easley, J.T., Rolfe, S.T. (1983). Resistência dos Materiais, São Paulo, McGraw-Hill do Brasil
- Zignoli, V. (1981). “Construcciones Metalicas”, Editora Dossat, Madri

## A. RESULTADOS NUMÉRICOS DO ESTUDO PRELIMINAR DO REFORÇO DO NÓ TÍPICO – PROPOSTA 1

Neste apêndice constam os resultados obtidos no estudo numérico preliminar para verificação do reforço do nó típico. Análises, comparações e conclusões preliminares podem ser apreciadas no Capítulo 4.

### A.1. RESULTADO DO ESFORÇO NORMAL E MOMENTO FLETOR

Na Tabela A.1, constam os resultados numéricos de esforço normal e momento fletor para as estruturas estudadas. Considere na tabelas a seguir, “Ligação ideal” as estruturas treliçadas tridimensionais constituídas com ligações das barras perfeitamente centradas no nó, “Ligação típica” as estruturas constituídas com ligação das barras excêntricas ao nó e extremidades amassadas, e “Ligação típica c/ distanciador” as estruturas constituídas por elementos barras com extremidades amassadas e distanciador, para correção de excentricidade.

Tabela A.1 – Resultados do esforço normal (kN) e momento fletor (kN.cm).

BARRA	Ligação ideal - LI		Ligação típica - LT		Ligação típica c/ distanciador - LTD	
	Normal (kN)	Momento (kN.cm)	Normal (kN)	Momento (kN.cm)	Normal (kN)	Momento (kN.cm)
1	-13,00	-0,75	-12,82	-18,29	-12,64	-6,80
2	-0,03	0,34	0,00	-0,01	0,00	-0,05
3	13,05	0,75	12,83	18,30	12,65	6,81
4	-0,03	0,34	0,00	-0,01	0,00	-0,05
5	-0,03	0,34	0,00	-0,01	0,00	-0,05
6	-13,00	-0,75	-12,82	-18,29	-12,64	-6,80
7	-0,03	0,34	0,00	-0,01	0,00	-0,05
8	13,05	0,75	12,83	18,30	12,65	6,81
9	-0,03	0,34	0,00	-0,01	0,00	-0,05
10	13,05	0,75	12,83	18,30	12,65	6,81
11	-0,03	0,34	0,00	-0,01	0,00	-0,05
12	-13,00	-0,75	-12,82	-18,29	-12,64	4,82
13	13,05	0,75	12,83	18,30	12,65	6,81
14	-0,03	0,34	0,00	-0,01	0,00	-0,05
15	-13,00	-0,75	-12,82	-18,29	-12,64	-6,80
16	-0,03	0,34	0,00	-0,01	0,00	-0,05
17	0,00	1,18	0,00	0,30	0,10	-0,21
18	0,04	0,95	0,15	-0,32	0,06	-0,24
19	0,00	1,18	0,00	0,30	0,10	-0,21
20	0,00	1,18	0,00	0,30	0,10	-0,21

Continuação da Tabela A.1.

BARRA	Ligação ideal - LI		Ligação típica - LT		Ligação típica c/ distanciador - LTD	
	Normal (kN)	Momento (kN.cm)	Normal (kN)	Momento (kN.cm)	Normal (kN)	Momento (kN.cm)
21	0,04	0,95	0,15	-0,32	0,06	-0,24
22	0,00	1,18	0,00	0,30	0,10	-0,21
23	0,00	1,18	0,00	0,30	0,10	-0,21
24	0,00	1,18	0,00	0,30	0,10	-0,21
25	0,04	0,95	0,15	-0,32	0,06	-0,24
26	0,04	0,95	0,15	-0,32	0,06	-0,24
27	0,00	1,18	0,00	0,30	0,10	-0,21
28	0,00	1,18	0,00	0,30	0,10	-0,21
29	-13,02	0,26	-12,74	3,52	-12,25	1,37
30	-13,02	0,26	-12,74	3,52	-12,25	1,37
31	-13,02	0,26	-12,74	3,52	-12,25	1,37
32	-13,02	0,26	-12,74	3,52	-12,25	1,37

## A.2. RESULTADO DO DESLOCAMENTO VERTICAL NODAL

Na Tabela A.2, constam os resultados numéricos dos deslocamentos verticais nodais para as estruturas estudadas. Considere na tabelas a seguir, “Ligação ideal” as estruturas treliçadas tridimensionais constituídas com ligações das barras perfeitamente centradas no nó, “Ligação típica” as estruturas constituídas com ligação das barras excêntricas ao nó e extremidades amassadas, e “Ligação típica com distanciador” as estruturas constituídas por elementos barras com extremidades amassadas e distanciador..

Tabela A.2 – Resultados dos deslocamentos verticais nodais das estruturas.

NÓ	Ligação ideal-LI (mm)	Ligação típica-LT (mm)	Ligação típica c/ dist.-LTD (mm)
1	-1,19	-5,62	-1,61
2	-1,19	-5,62	-1,61
3	-1,19	-5,62	-1,61
4	-1,19	-5,62	-1,61
5	-1,19	-5,62	-1,61
6	-1,19	-5,62	-1,61
7	-1,19	-5,62	-1,61
8	-1,19	-5,62	-1,61
9	-2,39	-11,26	-3,39
10	0,00	0,00	0,00
11	0,00	0,00	0,00
12	0,00	0,00	0,00
13	0,00	0,00	0,00

## B. RESULTADOS NUMÉRICOS DO ESTUDO PARA VALIDAÇÃO DA FORMULAÇÃO DE CÁLCULO – PROPOSTA 2

Neste apêndice constam os resultados obtidos no estudo numérico computacional para validação da formulação proposta. Análises, comparações e conclusões preliminares podem ser apreciadas no Capítulo 4.

### B.1. RESULTADO DO ESFORÇO NORMAL E MOMENTO FLETOR

Nas Tabelas B.1 a B.6 constam os resultados numéricos do esforço normal e momento fletor para as estruturas M1-4x4, M2-6x4, M3-8x4, M4-6x6, M5-8x6 e M6-8x8, respectivamente. Foram selecionados apenas os elementos submetidos ao esforço axial de compressão de um quarto (1/4) dos modelos. Considerando desta forma a simetria das estruturas em planta. Considere na tabelas a seguir, “Ligação ideal” as estruturas treliçadas tridimensionais constituídas com ligações das barras perfeitamente centradas no nó, “Ligação típica” as estruturas constituídas com ligação das barras excêntricas ao nó e extremidades amassadas.

Tabela B.1 – Resultados do esforço normal e momento fletor – Protótipo M1-4x4.

BARRA	Ligação ideal-LI		Ligação típica-LT	
	Normal (kN)	Momento (kN.cm)	Normal (kN)	Momento (kN.cm)
1	14,05	1,20	13,88	18,09
2	10,08	0,13	10,91	0,13
3	9,57	0,31	10,20	2,63
4	9,57	0,31	10,20	2,63
5	4,52	0,16	3,69	4,75
6	4,52	0,16	3,69	4,75
7	4,51	0,43	3,67	1,15
8	4,51	0,43	3,67	1,15
9	4,02	0,06	3,07	0,13
10	2,25	1,52	1,83	0,98
11	2,25	1,52	1,83	0,98
12	0,50	0,11	0,65	0,92
13	0,50	0,11	0,65	0,92
14	0,00	0,09	0,00	0,31

Tabela B.2 – Resultados do esforço normal e momento fletor – Protótipo M2-6x4.

BARRA	Ligação ideal-LI		Ligação típica-LT	
	Normal (kN)	Momento (kN.cm)	Normal (kN)	Momento (kN.cm)
1	21,07	2,22	23,05	0,86
2	20,80	0,31	20,83	26,85
3	17,45	0,36	19,50	0,97
4	14,45	0,25	15,01	3,86
5	14,42	0,20	14,14	3,61
6	8,42	0,74	8,54	0,75
7	6,65	3,09	6,74	8,67
8	5,28	0,19	5,86	7,65
9	4,98	0,07	5,85	1,79
10	3,72	2,04	5,31	1,88
11	3,14	0,09	4,16	1,31
12	3,14	0,29	2,91	1,58
13	2,29	0,27	2,55	3,78
14	1,74	0,01	2,51	0,75
15	1,71	0,18	1,98	2,74
16	1,56	0,55	1,93	2,69
17	1,41	0,16	1,46	2,33
18	0,33	0,27	1,04	1,41
19	0,22	0,15	0,75	2,40
20	0,00	0,28	0,01	0,07
21	0,00	0,23	0,00	0,20

Tabela B.3 – Resultados do esforço normal e momento fletor – Protótipo M3-8x4.

BARRA	Ligação ideal-LI		Ligação típica-LT	
	Normal (kN)	Momento (kN.cm)	Normal (kN)	Momento (kN.cm)
1	31,38	0,55	34,58	1,60
2	31,06	0,43	34,48	0,03
3	28,07	3,70	27,78	35,56
4	25,33	0,41	27,76	1,76
5	25,04	0,56	21,56	1,67
6	25,00	0,54	19,72	5,06
7	17,84	0,55	17,75	4,52
8	17,48	0,25	14,34	1,57
9	17,22	0,50	10,63	2,88
10	14,90	0,47	10,11	13,00
11	13,99	5,53	8,13	10,68
12	13,28	1,14	8,13	2,46
13	10,26	0,43	5,08	7,00
14	10,24	0,53	5,00	1,59
15	6,80	0,10	4,06	5,45
16	6,64	0,45	4,03	2,23
17	6,63	0,26	3,21	4,44

Continuação da Tabela A.5.

BARRA	Ligação ideal-LI		Ligação típica-LT	
	Normal (kN)	Momento (kN.cm)	Normal (kN)	Momento (kN.cm)
18	5,12	2,27	3,18	4,71
19	5,04	0,44	2,98	5,39
20	4,37	0,71	2,76	0,82
21	3,77	0,11	2,27	2,96
22	2,88	0,47	2,24	0,64
23	2,87	0,07	1,77	2,42
24	2,74	0,26	1,77	2,59
25	2,62	0,02	0,60	3,42
26	2,58	0,24	0,28	0,04
27	1,58	0,29	0,14	0,31
28	1,30	0,01	0,04	0,07
29	0,73	0,60	0,00	0,08
30	0,65	0,07	0,00	0,27

Tabela B.4 – Resultados do esforço normal e momento fletor – Protótipo M4-6x6.

BARRA	Ligação ideal-LI		Ligação típica-LT	
	Normal (kN)	Momento (kN.cm)	Normal (kN)	Momento (kN.cm)
1	31,58	3,85	32,42	1,02
2	28,38	0,42	31,25	39,88
3	24,27	0,52	28,13	1,54
4	24,27	0,52	28,13	1,54
5	17,96	0,58	20,89	5,32
6	17,96	0,58	20,89	5,32
7	15,22	0,25	12,98	0,82
8	13,68	0,99	10,44	13,40
9	13,68	0,99	10,44	13,40
10	11,64	0,29	9,53	0,76
11	11,64	0,29	9,53	0,76
12	10,88	4,25	8,19	2,91
13	10,88	4,25	8,19	2,91
14	9,27	0,15	7,12	0,66
15	8,39	0,34	6,56	2,02
16	8,39	0,34	6,56	2,02
17	6,38	0,16	4,40	0,62
18	6,38	0,16	4,40	0,62
19	5,32	0,20	3,86	5,52
20	5,32	0,20	3,86	5,52
21	5,30	0,50	3,83	1,13
22	5,30	0,50	3,83	1,13
23	5,03	0,87	3,32	5,95
24	3,99	0,46	3,21	4,49

Continuação da Tabela A.6.

BARRA	Ligação ideal-LI		Ligação típica-LT	
	Normal (kN)	Momento (kN.cm)	Normal (kN)	Momento (kN.cm)
25	3,99	0,46	3,21	4,49
26	2,26	0,29	1,99	3,00
27	0,64	0,19	0,76	1,06
28	0,64	0,19	0,76	1,06
29	0,01	0,40	0,45	0,56
30	0,01	0,40	0,45	0,56

Tabela B.5 – Resultados do esforço normal e momento fletor – Protótipo M5-8x6.

BARRA	Ligação ideal-LI		Ligação típica-LT	
	Normal (kN)	Momento (kN.cm)	Normal (kN)	Momento (kN.cm)
1	42,08	5,98	45,95	0,07
2	39,15	0,67	45,92	1,79
3	38,84	0,53	41,67	52,87
4	36,91	0,55	38,25	2,41
5	32,25	0,73	37,68	2,30
6	31,70	0,71	27,09	6,89
7	26,05	0,40	26,90	6,83
8	25,86	0,54	22,84	1,67
9	22,70	0,69	16,39	0,94
10	22,29	0,72	15,62	1,56
11	20,57	7,19	15,44	1,44
12	19,91	1,48	15,18	4,21
13	19,72	0,33	14,90	19,13
14	19,59	0,45	14,71	18,89
15	19,44	1,15	12,45	1,00
16	19,13	0,31	11,59	4,16
17	18,40	0,50	9,27	1,37
18	15,60	5,28	9,08	2,76
19	15,08	0,37	8,08	2,49
20	12,77	0,39	6,81	9,18
21	11,52	0,47	6,43	10,10
22	10,50	0,44	5,62	7,87
23	9,41	0,72	5,60	1,62
24	9,39	0,15	5,47	7,42
25	9,28	1,18	5,18	7,17
26	7,96	0,34	4,39	0,60
27	7,94	0,70	3,99	1,18
28	7,35	0,74	3,80	5,42
29	6,62	0,66	3,53	0,48
30	6,61	0,15	2,79	3,63
31	5,65	0,21	2,76	0,80
32	5,08	0,07	2,39	3,29

Continuação da Tabela A.7.

BARRA	Ligação ideal-LI		Ligação típica-LT	
	Normal (kN)	Momento (kN.cm)	Normal (kN)	Momento (kN.cm)
33	4,61	0,47	1,90	2,67
34	3,78	0,11	1,76	2,94
35	3,78	0,66	1,57	0,47
36	3,00	0,04	1,49	0,14
37	2,21	0,29	1,34	1,78
38	2,20	0,37	0,89	1,37
39	0,84	0,05	0,40	4,96
40	0,68	0,79	0,17	0,06
41	0,67	0,22	0,10	0,11
42	0,60	0,09	0,09	0,45
43	0,31	0,45	0,08	0,45
44	0,12	0,30	0,03	0,07
45	0,10	0,12	0,01	0,57
46	0,01	0,52	0,01	0,11
47	0,01	0,45	0,00	0,03

Tabela B.6 – Resultados do esforço normal e momento fletor – Protótipo M6-8x8.

BARRA	Ligação ideal-LI		Ligação típica-LT	
	Normal (kN)	Momento (kN.cm)	Normal (kN)	Momento (kN.cm)
1	56,07	9,07	61,72	0,26
2	51,52	0,71	60,97	2,33
3	51,01	0,90	60,97	2,33
4	51,01	0,90	55,56	70,09
5	41,60	0,99	50,87	3,45
6	41,60	0,99	50,87	3,45
7	31,10	0,47	34,84	8,84
8	30,68	0,62	34,84	8,84
9	30,68	0,62	28,24	0,15
10	29,81	9,10	27,77	1,90
11	29,81	9,10	27,77	1,90
12	28,33	1,79	21,43	5,97
13	28,33	1,79	21,43	5,97
14	27,86	0,83	20,90	26,78
15	27,86	0,83	20,90	26,78
16	22,47	0,59	19,52	1,91
17	22,47	0,59	19,52	1,91
18	18,45	0,20	14,50	1,32
19	18,45	0,39	14,50	1,32
20	18,22	0,28	14,23	0,04
21	14,86	1,68	11,10	3,38
22	14,18	1,06	11,10	3,38
23	14,18	1,06	10,43	15,39



Continuação da Tabela A.8.

BARRA	Ligação ideal-LI		Ligação típica-LT	
	Normal (kN)	Momento (kN.cm)	Normal (kN)	Momento (kN.cm)
24	14,16	0,58	9,80	12,99
25	14,16	0,58	9,80	12,99
26	12,67	0,27	9,04	0,98
27	12,67	0,27	9,04	0,98
28	12,46	0,34	8,88	1,26
29	12,46	0,34	8,88	1,26
30	11,99	0,18	8,29	0,16
31	10,89	1,10	7,86	10,65
32	10,89	1,10	7,86	10,65
33	8,27	0,34	5,70	1,67
34	8,27	0,34	5,70	1,67
35	8,03	0,21	5,46	7,67
36	8,03	0,21	4,93	0,95
37	7,08	0,78	4,93	0,95
38	5,95	0,23	4,06	5,28
39	5,95	0,23	4,06	5,28
40	5,94	0,93	4,04	1,15
41	5,94	0,93	4,04	1,15
42	3,69	0,56	3,01	4,24
43	3,69	0,56	3,01	4,24
44	1,54	0,94	1,12	1,92
45	1,54	0,94	1,12	1,92
46	1,49	1,22	0,80	1,12
47	1,49	1,22	0,80	1,12
48	0,93	0,35	0,71	6,89
49	0,93	0,35	0,71	6,89
50	0,69	0,29	0,70	1,01
51	0,69	0,29	0,70	1,01
52	0,53	0,49	0,40	1,23
53	0,53	0,49	0,40	1,23
54	0,44	1,24	0,35	0,77
55	0,44	1,24	0,35	0,77
56	0,16	1,37	0,30	0,30
57	0,01	0,62	0,30	0,30
58	0,01	0,62	0,18	1,34
59	0,00	0,27	0,18	1,34

## C. ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Neste apêndice constam os valores obtidos nos ensaios de caracterização do material do tubo. O procedimento utilizado foi à realização de três ensaios, cada ensaio com duas medições por material. O resultado de cada ensaio é obtido com a média das duas medições. A partir dos valores dos ensaios foram traçados gráficos de tensão por deformação. Com os gráficos foi obtido o módulo de elasticidade e a resistência ao escoamento do material, para cada ensaio. Finalmente foi concluída a caracterização do material com uma média dos resultados. A tensão de escoamento foi adotada de  $30,0\text{kN/cm}^2$ . O módulo de elasticidade foi adotado de  $20500,0\text{kN/cm}^2$ .

### C.1. CARACTERIZAÇÃO DAS CHAPAS

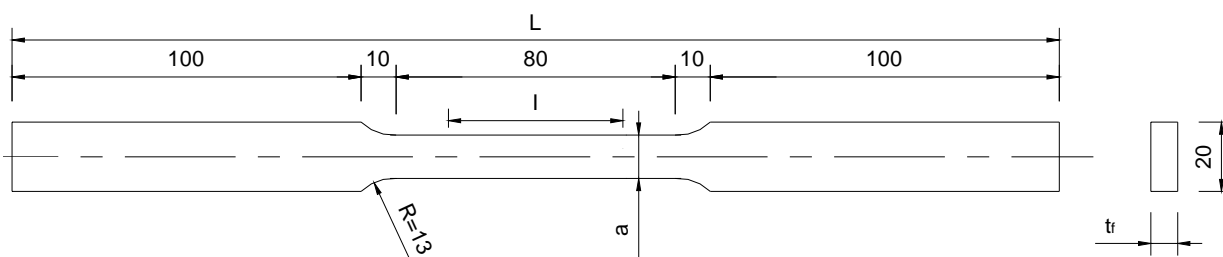


Figura C.1 – Geometria dos corpos-de-prova.

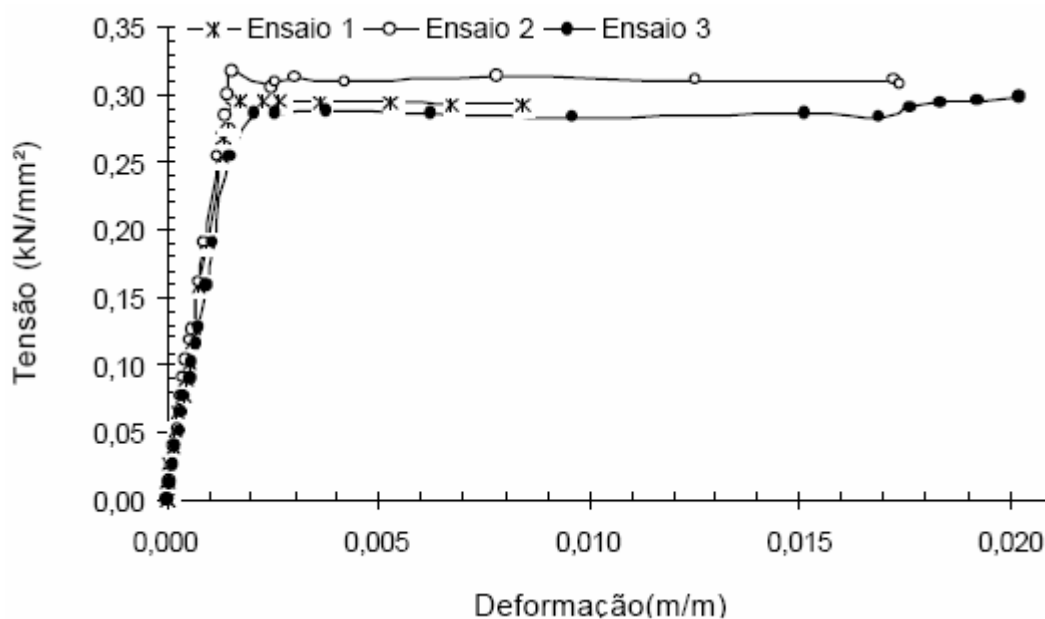


Figura C.2 – Resultado da caracterização do material.

## D. RESULTADOS DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS ESTÁTICOS

### D.1. RESULTADO DOS DESLOCAMENTOS VERTICAIS NODAIS

#### D.1.1. Ensaio das estruturas com ligações típicas – LTE

Tabela D.1 – Ligação típica, protótipo 1 – LTE1.

Carga (kN)	Deslocamento vertical nodal (mm)								
	Nó 1	Nó 2	Nó 3	Nó 4	Nó 5	Nó 6	Nó 7	Nó 8	Nó 9
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,07	0	0,04	0,09	0,09	0,06	0,08	0,03	0,16
2	0,17	0,05	0,13	0,19	0,19	0,15	0,16	0,13	0,36
3	0,26	0,14	0,22	0,29	0,3	0,25	0,26	0,22	0,54
4	0,37	0,24	0,33	0,4	0,41	0,37	0,35	0,32	0,77
5	0,49	0,35	0,46	0,52	0,54	0,49	0,47	0,44	1,03
6	0,61	0,46	0,61	0,65	0,68	0,62	0,58	0,55	1,31
7	0,71	0,57	0,75	0,77	0,8	0,73	0,68	0,64	1,58
8	0,81	0,68	0,89	0,88	0,94	0,86	0,79	0,76	1,88
9	0,92	0,81	1,09	1,04	1,09	1,01	0,92	0,9	2,26
10	1,02	0,94	1,29	1,2	1,25	1,16	1,05	1,06	2,64
11	1,23	1,1	1,65	1,65	1,57	1,37	1,42	1,45	2,7
12	1,23	1,21	1,86	1,76	1,72	1,54	1,42	2,58	2,82
13	1,27	1,38	2,13	1,92	1,89	1,72	1,54	2,76	4,4
14	1,36	1,55	2,46	2,13	2,09	1,92	1,68	1,96	5,09
15	1,53	1,72	2,8	2,42	2,38	2,19	1,87	2,19	5,97
16	1,63	1,91	3,19	2,72	2,64	2,43	2,06	2,43	6,9
17	1,76	2,1	3,6	3,06	2,95	2,7	2,28	2,66	7,84
18	1,95	2,32	4,09	3,51	3,34	2,95	2,56	2,96	8,84
19	2,22	2,54	4,64	4,06	3,79	3,29	2,88	3,39	9,84
20	2,64	2,79	6,05	5,67	4,71	3,74	3,59	4,77	11,45
21	4,47	3,13	7,16	8,34	7,13	4,76	4,37	6,38	14,7
22	5,19	3,74	7,88	9,1	7,94	5,41	5,03	6,95	15,3
23	5,62	4,04	8,33	9,6	8,4	5,8	5,4	7,27	16,32
24	6,15	4,54	9	10,24	9,02	6,32	5,98	7,66	17,64
25	6,8	5,28	9,92	11	9,78	6,99	6,81	8,14	19,2
26	7,73	7,52	11,91	11,81	10,92	8,32	8,99	9,16	21,75
27	8,23	7,87	12,62	11,82	11,57	8,8	9,47	9,54	23
28	8,93	8,3	13,47	13,62	12,38	9,42	10,08	9,97	25,43
29	9,67	8,82	14,09	14,37	13,15	10	10,6	10,37	25,75
30	10,55	9,5	14,9	15,3	14,04	10,76	11,33	10,88	27,3
31	11,48	10,1	15,73	16,28	14,94	11,49	11,98	11,19	28,85
32	12,55	11,18	16,92	17,6	16,22	12,6	13,08	12,1	31,04
33	13,99	11,97	18,02	19,18	17,56	13,67	14	12,84	33,13
34	15,5	13,07	19,07	20,64	18,92	14,9	14,99	13,61	34,16
35	23,73	21,73	18,36	19,19	21,79	30,62	18,22	14,11	38,2

Tabela D.2 – Ligação típica, protótipo 2 – LTE2.

Carga (kN)	Deslocamento vertical nodal (mm)								
	Nó 1	Nó 2	Nó 3	Nó 4	Nó 5	Nó 6	Nó 7	Nó 8	Nó 9
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,12	0,09	0,08	0,1	0,12	0,12	0,1	0,1	0,17
2	0,21	0,17	0,15	0,18	0,26	0,2	0,17	0,17	0,33
3	0,32	0,26	0,24	0,29	0,35	0,31	0,25	0,26	0,54
4	0,44	0,36	0,32	0,39	0,49	0,42	0,35	0,36	0,77
5	0,58	0,48	0,42	0,51	0,63	0,55	0,45	0,45	0,93
6	0,73	0,6	0,53	0,64	0,74	0,68	0,55	0,57	1,16
7	0,87	0,73	0,66	0,76	0,89	0,82	0,65	0,69	1,37
8	1,03	0,86	0,8	0,92	1,08	0,97	0,8	0,82	1,67
9	1,2	0,99	0,94	1,07	1,23	1,14	0,92	0,95	1,99
10	1,59	1,42	1,06	1,24	1,48	1,46	1,15	1,09	2,65
11	1,77	1,43	1,21	1,5	1,71	1,64	1,28	1,26	3,11
12	2	1,51	1,4	1,77	1,91	1,85	1,44	1,42	3,66
13	2,22	2,41	1,64	2,04	2,15	2,18	1,75	1,63	4,58
14	2,41	1,9	1,9	2,38	2,39	2,41	1,89	1,81	5,24
15	2,62	1,97	2,2	2,7	2,64	2,68	2,08	2,02	5,95
16	2,89	2,1	2,52	3,13	2,96	3,02	2,32	2,27	6,84
17	3,3	2,35	2,87	3,51	3,31	3,46	2,6	2,56	7,91
18	4,16	3,1	3,27	3,91	3,91	4,44	3,06	2,94	9,16
19	5,52	4,32	3,75	4,4	4,81	5,87	3,74	3,4	10,95
20	6,12	4,68	4,17	4,97	5,45	6,35	4,06	3,86	12,16
21	7,69	5,12	4,59	6,39	7,06	7,23	4,52	4,7	13,97
22	9,15	5,62	5,07	7,65	8,58	8,12	5,01	5,52	15,73
23	9,78	6,14	5,61	8,16	9,27	8,67	5,45	6,06	17,16
24	10,45	6,69	6,19	8,76	10,01	9,26	5,93	6,67	18,56
25	11,16	7,15	6,69	9,32	10,67	9,76	6,36	7,22	19,88
26	11,99	7,69	7,25	9,97	11,43	10,34	6,86	7,85	21,49
27	12,83	8,21	7,79	10,62	12,29	10,9	7,36	8,46	22,91
28	13,99	8,86	8,47	11,51	13,29	11,62	7,98	9,25	24,73
29	15,12	9,43	9,07	12,39	14,25	12,28	8,56	10,05	26,31
30	16,76	10,19	9,76	13,5	15,58	13,2	9,28	10,97	28,26
31	18,61	11,09	10,29	14,54	16,91	14,2	10,02	11,74	30,21
32	20,71	12,07	10,9	15,69	18,31	15,3	10,88	12,63	32,26
33	23,39	13,33	11,76	17,14	20,21	16,72	12,11	14,8	34,81
34	26,99	14,97	12,97	19,18	22,26	18,57	13,56	15,34	37,06
35	30,31	17,4	14,89	21,1	24,14	20,56	15,79	17,12	41,43
35,9	28,86	22,19	14,21	10,85	25,31	29,44	25,29	18,58	47,21

Tabela D.3 – Ligação típica, protótipo 3 – LTE3.

Carga (kN)	Deslocamento vertical nodal (mm)								
	Nó 1	Nó 2	Nó 3	Nó 4	Nó 5	Nó 6	Nó 7	Nó 8	Nó 9
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	-0,05	0,2	0	0,24	0	0,23	0,36
2	0	0	0,03	0,27	0	0,28	0	0,32	0,47
3	0	0	0,18	0,39	0	0,42	0,04	0,45	0,71
4	0,09	0	0,35	0,53	0	0,57	0,16	0,62	1,02
5	0,34	0	0,47	0,79	0	0,76	0,27	0,83	1,41
6	0,8	0	0,56	1,39	0,22	1,03	0,4	1,11	1,97
7	0,88	0	0,8	1,4	0,38	1,19	0,54	1,3	2,38
8	1,07	0,18	1,04	1,59	0,55	1,4	0,7	1,5	2,85
9	1,62	0,77	1,24	1,76	0,8	1,76	0,95	1,73	3,57
10	1,62	0,86	1,69	2	1,04	2,02	1,24	2,01	4,2
11	1,77	0,99	1,97	2,34	1,33	2,26	1,43	2,3	4,86
12	2,19	1,14	2,26	2,84	1,83	2,59	1,67	2,65	5,74
13	2,3	1,38	2,69	3,11	2	2,84	1,9	2,96	6,54
14	2,43	1,64	3,21	3,42	2,25	3,11	2,17	3,31	7,41
15	2,59	1,85	3,81	3,87	2,56	3,4	2,49	3,76	8,4
16	2,72	2,05	4,87	4,75	3,04	3,74	2,99	4,7	9,6
17	3	2,3	7,24	7,03	4,22	4,28	4,17	7,08	11,34
18	3,59	2,87	8	7,67	4,9	4,85	4,77	7,72	12,94
19	5,52	3,68	8,94	9,57	6,95	6,06	5,72	9	15,03
20	6,09	5,79	11,11	10,14	7,58	7,31	7,95	10,25	17,04
21	6,79	6,34	11,82	10,87	8,21	7,99	8,52	10,95	18,54
22	7,5	6,8	12,46	11,59	8,8	8,64	9,08	11,66	19,99
23	8,19	7,36	13,28	12,28	9,33	9,35	9,74	12,49	21,53
24	9,07	8,07	14,21	13,02	9,95	10,23	10,54	13,5	23,16
25	10,33	9,07	15,55	14,24	10,8	11,49	11,67	14,97	25,27
26	12,38	10,63	17,7	16,04	12,13	13,54	13,43	17,2	28,17
27	15,15	12,93	19,22	17,27	13,48	16,14	15,27	18,84	31,14
28	16,65	13,76	20,65	18,75	14,44	17,31	16,39	20,38	33,31
29	18,04	14,57	22	20,09	15,37	18,37	17,47	21,8	35,24
30	19,82	15,8	23,48	21,51	16,4	19,79	18,82	23,35	37,74
31	21,63	17,19	25,05	22,93	17,55	21,4	20,27	24,91	40,01
32	23,58	18,65	26,83	24,55	18,79	23,09	21,9	26,62	42,48
33	25,39	20,19	28,93	26,23	20,1	24,82	23,68	28,45	45,02
34	27,15	21,63	29,56	28,99	21,89	26,75	25,81	31,13	48,22
35	29,84	23,16	29,56	35,99	25,45	29,69	29	35,94	49,32
35,9	-1,33	-0,98	-0,74	-2,39	-2,2	-0,36	-2,83	-0,75	-4,06

## D.1.2. Ensaio das estruturas com ligações típicas com distanciador - LTDE

Tabela D.4 – Ligação típica com distanciador, protótipo 1 – LTDE1.

Carga (kN)	Deslocamento vertical nodal (mm)								
	Nó 1	Nó 2	Nó 3	Nó 4	Nó 5	Nó 6	Nó 7	Nó 8	Nó 9
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,05	0,08	0,09	0,12	-3	0,12	0,14	0,13	0,12
2	0,13	0,15	0,16	0,22	-3,68	0,2	0,19	0,23	0,29
3	0,23	0,24	0,26	0,36	-3,58	0,33	0,29	0,36	0,46
4	0,35	0,33	0,37	0,5	-3,47	0,45	0,4	0,49	0,64
5	0,45	0,39	0,46	0,62	-3,38	0,55	0,48	0,6	0,78
6	0,56	0,48	0,54	0,75	-3,26	0,67	0,58	0,71	0,97
7	0,69	0,56	0,63	0,89	-3,14	0,79	0,7	0,85	1,26
8	0,79	0,65	0,72	1,03	-3,01	0,92	0,8	0,97	1,49
9	0,93	0,73	0,81	1,19	-2,89	1,04	0,91	1,1	1,82
10	1,07	0,79	0,91	1,37	-2,77	1,18	1,03	1,25	2,21
11	1,21	0,84	1,02	1,58	-2,63	1,32	1,17	1,42	2,67
12	1,35	0,89	1,14	1,77	-2,46	1,44	1,28	1,58	3,17
13	1,48	0,92	1,28	2	-2,36	1,59	1,41	1,75	3,7
14	1,57	0,94	1,45	2,25	-2,22	1,74	1,55	1,92	4,26
15	1,74	0,95	1,7	2,66	-2,02	1,95	1,75	2,16	5,03
16	1,83	0,95	2,03	3,05	-1,8	2,15	1,97	2,45	5,82
17	1,97	0,99	2,52	3,61	-1,52	2,39	2,24	2,89	6,73
18	2,07	1,08	3,91	5,06	-0,88	2,74	2,89	4,34	8,11
19	2,19	1,2	5,71	6,94	0,03	3,11	3,76	6,21	9,77
20	2,73	1,64	5,92	7,26	0,45	3,69	4,07	6,46	10,83
21	5,06	3,58	6,17	8,01	1,92	6,08	5,04	6,98	12,94
22	6,92	3,96	6,38	9,7	3,82	7,04	5,4	7,84	14,75
23	7,12	4,23	6,61	9,92	4,08	7,31	5,59	8,05	15,68
24	7,48	4,49	6,82	10,25	4,41	7,61	5,82	8,34	16,74
25	7,76	4,87	7,1	10,52	4,73	7,96	6,08	8,61	17,82
26	8,16	5,19	7,31	10,86	5,07	8,31	6,31	8,9	18,83
27	8,46	5,61	7,53	11,03	5,33	8,66	6,59	9,13	19,76
28	8,83	6,1	7,74	11,21	5,61	9,06	6,9	9,39	20,7
29	9,32	6,71	7,99	11,42	5,96	9,57	7,28	9,7	21,75
30	9,83	7,3	8,2	11,65	6,32	10,08	7,63	9,99	22,77
31	10,4	8,99	8,42	11,91	6,71	10,66	8,04	10,32	23,84
32	11,02	8,81	8,71	12,21	7,14	11,36	8,51	10,71	24,92
33	11,67	9,57	9	12,52	7,61	12,07	8,97	11,08	26,01
34	12,35	10,4	9,33	12,91	8,08	12,81	9,48	11,51	27,18
35	12,93	11,19	9,7	13,3	8,54	13,49	10	11,95	28,3
36	13,84	12,46	10,29	13,84	9,2	14,66	10,86	12,61	29,73
37	14,94	14,14	11,04	14,44	10,01	16,2	11,94	13,39	31,54
38	15,62	16,05	12,49	15,69	11	17,69	13,46	14,73	34,18
37,6	14,59	8,49	11,32	23,34	16,84	16,87	12,58	20,9	38,85

Tabela D.5 – Ligação típica com distanciador, protótipo 2 – LTDE2.

Carga (kN)	Deslocamento vertical nodal (mm)								
	Nó 1	Nó 2	Nó 3	Nó 4	Nó 5	Nó 6	Nó 7	Nó 8	Nó 9
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,1	0,14	0,13	0,13	0,13	0,13	0,14	0,13	0,26
2	0,16	0,2	0,19	0,18	0,21	0,19	0,21	0,19	0,39
3	0,23	0,28	0,27	0,25	0,28	0,27	0,3	0,27	0,55
4	0,33	0,39	0,37	0,35	0,4	0,39	0,41	0,38	0,77
5	0,45	0,51	0,47	0,46	0,52	0,51	0,53	0,49	1,01
6	0,56	0,62	0,56	0,57	0,63	0,65	0,64	0,6	1,27
7	0,68	0,76	0,66	0,68	0,76	0,78	0,77	0,74	1,55
8	0,79	0,87	0,74	0,79	0,87	0,89	0,88	0,83	1,85
9	0,94	1,01	0,82	0,91	0,99	1,03	1	0,97	2,18
10	1,12	1,14	0,9	1,06	1,1	1,19	1,12	1,1	2,57
11	1,29	1,27	0,97	1,2	1,22	1,35	1,35	1,24	2,99
12	1,48	1,38	1,02	1,35	1,36	1,54	1,37	1,39	3,45
13	1,73	1,63	1,26	1,52	1,49	1,75	1,63	1,58	4,05
14	1,94	1,73	1,26	1,69	1,61	1,95	1,76	1,73	4,72
15	2,22	1,89	1,26	1,88	1,76	2,16	1,92	1,91	5,4
16	2,51	2,07	1,3	2,08	1,92	2,39	2,08	2,08	6,14
17	2,83	2,3	1,33	2,25	2,09	2,65	2,29	2,27	6,94
18	3,25	2,67	1,46	2,48	2,35	3,05	2,56	2,48	7,91
19	5,65	5,13	1,81	2,78	3,53	5,7	3,81	3	10,13
20	5,92	5,46	2,07	2,99	3,74	5,94	4,2	3,28	10,97
21	6,25	7,24	3,88	3,31	4,2	6,83	6,21	4,19	12,85
22	6,68	7,43	4,09	3,83	4,63	7,1	6,42	4,49	13,81
23	9,26	7,68	4,34	6,53	7,58	8,35	6,95	5,73	16,05
24	9,38	7,93	4,58	6,69	7,76	8,55	7,05	5,95	16,91
25	9,43	8,1	4,84	6,86	7,91	8,71	7,25	6,14	17,65
26	9,48	8,35	5,16	7,12	8,09	8,89	7,49	6,36	18,5
27	9,54	8,61	5,47	7,21	8,28	9,08	7,76	6,59	19,37
28	9,63	8,91	5,84	7,43	8,5	9,3	8,06	6,87	20,29
29	9,75	9,24	6,22	7,65	8,7	9,53	8,38	7,13	21,2
30	9,87	9,58	6,58	7,87	8,92	9,76	8,69	7,39	22,04
31	10,01	9,96	6,94	8,1	9,15	10,03	9,04	7,68	22,97
32	10,18	10,41	7,38	8,37	9,43	10,33	9,46	8,02	23,96
33	10,38	10,85	7,84	8,67	9,72	10,65	9,88	8,38	24,91
34	10,59	11,46	8,76	9,33	10,2	11,05	10,57	9,21	26,25
35	10,88	13,18	10,42	10,63	10,93	11,58	11,65	10,79	27,86
36	11,08	13,04	11,98	11,67	11,57	12,1	12,73	12,18	29,39
37	11,31	14,05	13,56	12,62	12,18	12,69	14	13,46	30,98
38	11,53	14,63	14,5	13,35	12,68	13,1	14,73	14,33	32,15
39	11,82	15,02	15,06	14,03	13,16	13,5	15,23	14,91	33,43
40	-2	-2,68	-1,64	-0,82	-6,42	-0,25	-1,52	-3,62	-3,15

Tabela D.6 – Ligação típica com distanciador, protótipo 3 – LTDE3.

Carga (kN)	Deslocamento vertical nodal (mm)								
	Nó 1	Nó 2	Nó 3	Nó 4	Nó 5	Nó 6	Nó 7	Nó 8	Nó 9
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,08	0,17	0,18	0,17	0,17	0,17	0,13	0	0,32
2	0,14	0,23	0,25	0,22	0,2	0,22	0,18	0	0,42
3	0,23	0,34	0,37	0,33	0,31	0,33	0,28	0,12	0,62
4	0,32	0,46	0,47	0,44	0,39	0,45	0,38	0,23	0,86
5	0,43	0,57	0,61	0,55	0,48	0,57	0,49	0,35	1,11
6	0,6	0,72	0,8	0,68	0,61	0,78	0,63	0,49	1,42
7	0,68	0,83	0,9	0,81	0,68	0,84	0,73	0,61	1,69
8	0,8	0,96	1,03	0,95	0,8	0,98	0,84	0,74	2,03
9	1,43	1,28	1,16	1,06	1,04	1,3	1,04	0,89	2,58
10	1,47	1,54	1,35	1,16	1,19	1,53	1,17	1,05	3,12
11	1,61	1,71	1,67	1,45	1,41	1,76	1,37	1,27	3,72
12	1,73	1,88	1,87	1,66	1,56	1,99	1,5	1,43	4,36
13	1,91	2,02	2,19	1,99	1,73	2,24	1,7	1,66	5,12
14	2,17	2,27	2,58	2,32	1,97	2,59	1,97	1,93	6,05
15	2,39	2,44	2,95	2,69	2,2	2,9	2,21	2,27	7,02
16	2,67	2,91	3,48	3,02	2,5	3,4	2,59	2,53	8,23
17	3,22	3,43	3,94	3,43	2,9	4,08	3,06	3	9,54
18	3,76	4,14	5,41	4,74	3,7	5,02	3,97	4,3	11,33
19	6,11	5,67	7,6	7,82	6,25	6,25	5,65	6,89	14,43
20	6,97	6,3	8,02	8,49	7,16	7,97	6,09	7,45	15,89
21	7,31	6,5	8,26	8,88	7,45	8,27	6,2	7,67	17,01
22	7,55	6,7	8,46	9,1	7,63	8,51	6,26	7,8	18,05
23	7,74	6,99	8,73	9,28	7,82	8,78	6,42	7,98	19,14
24	7,97	7,27	8,96	9,43	7,99	9,03	6,59	8,14	20,14
25	8,36	7,65	9,22	9,66	8,28	9,35	6,83	8,36	21,22
26	8,68	7,96	9,45	9,83	8,49	9,62	7,02	8,52	22,21
27	8,99	8,35	9,7	9,98	8,69	9,92	7,26	8,7	23,17
28	9,38	8,99	10,26	10,14	9,07	10,35	7,93	9,08	24,16
29	9,73	9,55	10,56	10,33	9,36	10,8	8,14	9,3	25,31
30	10,14	10,03	10,88	10,49	9,65	11,19	8,42	9,5	26,24
31	10,66	10,68	11,31	10,67	10,01	11,74	8,78	9,76	27,37
32	11,16	11,27	11,69	10,86	10,33	12,27	9,11	10,01	28,32
33	11,96	12,67	12,79	11,13	10,96	13,26	10,11	10,62	29,94
34	12,58	13,54	13,53	11,33	11,43	13,96	10,62	11,01	31,21
35	13,32	14,61	14,53	11,47	11,91	14,86	11,17	11,47	32,76
36	-6,26	-5,29	-3,33	10,51	11,15	-1	-7,59	20,75	40,02
37	-6,26	-5,29	-3,33	-5,97	-3,43	-1	-7,59	-4,38	-1,48
38	-6,26	-5,29	-3,33	-5,97	-3,43	-1	-7,59	-4,38	-1,48
39	-6,26	-5,29	-3,33	-5,97	-3,43	-1	-7,59	-4,38	-1,48
40	-6,26	-5,29	-3,33	-5,97	-3,43	-1	-7,59	-4,38	-1,48



### D.1.3. Ensaio com ligações típicas com distanciador e cobrejunta - LTDCE

Tabela D.7 – Ligação típica com distanciador e cobrejunta, protótipo 1 – LTDCE1.

Carga (kN)	Deslocamento vertical nodal (mm)								
	Nó 1	Nó 2	Nó 3	Nó 4	Nó 5	Nó 6	Nó 7	Nó 8	Nó 9
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,09	0,16	0,13	0	0,12	0,21	0,18	0,06	0,05
2	0,12	0,16	0,13	0	0,12	0,21	0,18	0,07	0,07
3	0,18	0,21	0,21	0	0,15	0,25	0,2	0,12	0,12
4	0,27	0,3	0,29	0,06	0,22	0,33	0,232	0,19	0,18
5	0,32	0,4	0,4	0,15	0,31	0,45	0,39	0,28	0,4
6	0,38	0,5	0,52	0,24	0,4	0,56	0,48	0,39	0,6
7	0,46	0,62	0,64	0,35	0,52	0,68	0,59	0,49	0,83
8	0,51	0,71	0,75	0,43	0,61	0,78	0,68	0,6	1,02
9	0,61	0,84	0,88	0,53	0,72	0,9	0,79	0,77	1,26
10	0,7	0,96	1,01	0,63	0,84	1,05	0,92	0,86	1,51
11	0,79	1,1	1,05	0,74	0,97	1,18	1,04	0,97	1,8
12	0,93	1,29	1,37	0,85	1,1	1,31	1,21	1,16	2,1
13	1	1,43	1,53	0,96	1,23	1,46	1,32	1,29	2,39
14	1,12	1,64	1,75	1,08	1,38	1,65	1,51	1,41	2,75
15	1,21	1,93	1,94	1,21	1,53	1,84	1,66	1,57	3,12
16	1,38	2,15	2,22	1,33	1,72	2,11	1,9	1,83	3,6
17	1,58	2,54	2,52	1,47	1,94	2,43	2,17	2,06	4,14
18	1,91	3,02	2,8	1,64	2,24	2,9	2,47	2,28	4,74
19	3,68	4,9	3,3	2,07	3,28	4,93	3,48	2,78	6,3
20	4,21	5,35	3,81	2,71	4,04	5,41	3,92	3,26	7,25
21	6,17	5,91	4,32	4,66	6,34	6,54	4,44	4,28	9,01
22	6,28	7,58	5,99	4,78	6,67	7,33	6,04	5,06	10,45
23	6,33	7,79	6,33	4,94	6,82	7,53	6,24	5,24	11,11
24	6,37	7,99	6,66	5,17	7,01	7,79	6,46	5,46	11,89
25	6,43	8,15	7	5,41	7,2	8,02	6,68	5,65	12,66
26	6,48	8,32	7,32	5,68	7,39	8,25	6,91	5,84	13,47
27	6,6	8,54	7,7	6	7,62	8,53	7,18	6,12	14,41
28	6,76	8,8	8,06	6,33	7,88	8,84	7,49	6,39	15,38
29	6,93	9,02	8,35	6,62	8,11	9,09	7,75	6,63	16,18
30	7,12	9,29	8,71	7	8,4	9,38	8,07	6,94	17,16
31	7,31	9,51	9,09	7,59	8,73	9,65	8,41	7,31	18,13
32	7,53	9,77	9,43	7,88	9,03	9,93	8,74	7,63	19,01
33	7,78	10,08	9,86	8,3	9,35	10,21	9,14	8,04	19,92
34	8	10,49	10,46	8,82	9,71	10,55	9,65	8,56	20,94
35	8,19	11,02	11,41	9,54	10,17	10,96	10,39	9,39	22,16
36	8,42	11,89	13,39	10,95	10,97	11,54	11,72	12,12	23,86
37	8,71	12,65	14,81	12,08	11,65	12,1	12,79	12,41	25,29
38	9,07	13,33	15,74	12,83	12,24	12,65	13,65	13,21	26,64
39	9,4	13,82	16,34	13,4	12,68	13,05	14,31	13,77	27,66
40	9,79	14,87	17,53	14,07	13,23	13,67	15,62	14,62	30,02
41	10,21	15,76	18,7	14,89	13,84	14,32	16,82	15,51	30,45
42	10,6	16,51	19,89	15,68	14,4	14,93	17,81	16,32	31,76

Tabela D.8 – Ligação típica com distanciador e cobrejunta, protótipo 2 – LTDCE2.

Carga (kN)	Deslocamento vertical nodal (mm)								
	Nó 1	Nó 2	Nó 3	Nó 4	Nó 5	Nó 6	Nó 7	Nó 8	Nó 9
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,05	0,06	0,07	0,08	0,07	0,08	0,05	0,04	0,18
2	0,14	0,13	0,16	0,16	0,17	0,16	0,13	0,1	0,33
3	0,21	0,21	0,24	0,25	0,24	0,24	0,21	0,18	0,48
4	0,29	0,31	0,33	0,32	0,32	0,33	0,28	0,26	0,64
5	0,37	0,38	0,42	0,41	0,41	0,43	0,37	0,34	0,81
6	0,45	0,47	0,51	0,51	0,5	0,52	0,46	0,44	0,99
7	0,54	0,56	0,61	0,62	0,6	0,62	0,55	0,54	1,2
8	0,62	0,66	0,72	0,74	0,72	0,73	0,65	0,62	1,41
9	0,69	0,75	0,82	0,88	0,82	0,83	0,74	0,71	1,6
10	0,8	0,85	0,96	1,01	0,94	0,94	0,87	0,82	1,8
11	0,9	0,96	1,09	1,14	1,06	1,06	0,97	0,95	1,99
12	1,01	1,08	1,24	1,29	1,21	1,2	1,1	1,09	2,22
13	1,16	1,21	1,41	1,47	1,37	1,34	1,24	1,3	2,47
14	1,4	1,33	1,63	1,88	1,62	1,53	1,45	1,57	2,97
15	1,52	1,52	1,84	2,07	1,82	1,73	1,62	1,62	3,24
16	1,73	1,76	2,11	2,38	2,1	1,97	1,83	1,92	3,59
17	2,23	2,35	2,43	2,74	2,5	2,52	2,23	2,32	4,37
18	4,29	4,11	2,77	3,43	3,74	4,64	3,15	3,02	6,15
19	5,94	4,42	3,87	5,9	5,91	5,58	3,82	4,8	7,81
20	6,2	4,73	4,59	6,62	6,36	5,9	4,22	5,57	8,57
21	6,52	5,05	5,15	7,14	6,77	6,24	4,57	6,18	9,27
22	6,73	5,38	5,41	7,38	7,02	6,5	4,8	6,46	9,9
23	7,04	5,95	5,72	7,52	7,31	6,87	5,24	6,73	11,52
24	7,35	6,3	5,83	7,65	7,55	7,2	5,45	6,84	12,28
25	7,78	6,77	5,94	7,8	7,86	7,6	5,71	7,03	13,2
26	8,15	7,01	6,1	8,17	8,21	7,93	5,94	7,26	14,11
27	8,42	7,32	6,29	8,35	8,42	8,22	6,17	7,42	14,89
28	8,72	7,64	6,52	8,61	8,71	8,55	6,44	7,59	15,77
29	9,05	7,91	6,66	8,87	8,95	8,86	6,67	7,78	16,49
30	9,48	8,23	6,89	9,23	9,3	9,28	6,99	7,98	17,54
31	9,89	8,6	7,09	9,53	9,61	9,72	7,3	8,16	18,41
32	10,3	8,98	7,32	9,82	9,9	10,15	7,61	8,33	19,27
33	10,71	9,42	7,54	10,09	10,22	10,64	7,91	8,49	20,09
34	11,33	10,06	7,87	10,41	10,63	11,32	8,39	8,71	21,24
35	11,56	10,39	8,14	10,66	10,88	11,63	8,65	8,87	21,98
36	11,78	10,9	8,84	11,1	11,21	12,02	9,00	9,31	23,27
37	12,02	11,29	9,12	11,37	11,41	12,37	9,58	9,5	23,97
38	13,72	13,27	9,65	11,79	12,36	14,53	10,67	9,85	25,75
39	14,52	14,29	10,08	12,13	12,89	15,59	11,33	10,12	26,89
40	15,28	15,42	10,82	12,57	13,42	16,59	12,23	10,53	28,19
41	16,19	16,39	12,3	13,17	14,16	17,12	13,98	11,37	30,14
42	16,89	18,35	13,06	13,92	14,81	19,08	14,63	11,92	31,76
42,8	-0,26	-2,1	-2,38	-2,92	-1,68	-1,07	-2,41	-0,91	-3,21

Tabela D.9 – Ligação típica com distanciador e cobrejunta, protótipo 3 – LTDCE3.

Carga (kN)	Deslocamento vertical nodal (mm)								
	Nó 1	Nó 2	Nó 3	Nó 4	Nó 5	Nó 6	Nó 7	Nó 8	Nó 9
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,08	0,11	0,1	0,08	0,09	0,12	0,07	0,11	0,19
2	0,14	0,22	0,2	0,14	0,16	0,21	0,16	0,19	0,33
3	0,21	0,33	0,3	0,21	0,24	0,3	0,25	0,28	0,5
4	0,3	0,45	0,41	0,29	0,33	0,41	0,36	0,37	0,68
5	0,39	0,57	0,52	0,37	0,44	0,52	0,47	0,48	0,88
6	0,48	0,7	0,64	0,45	0,54	0,64	0,58	0,59	1,09
7	0,59	0,85	0,77	0,54	0,66	0,76	0,7	0,7	1,29
8	0,7	1	0,91	0,63	0,75	0,89	0,82	0,82	1,54
9	0,8	1,15	1,06	0,73	0,86	1,03	0,95	0,96	1,78
10	0,91	1,32	1,21	0,84	1	1,18	1,07	1,1	2,06
11	1,04	1,5	1,39	0,95	1,13	1,34	1,22	1,25	2,26
12	1,19	1,69	1,56	1,07	1,28	1,51	1,37	1,41	2,68
13	1,6	2,16	1,71	1,12	1,56	1,84	1,64	1,58	3,21
14	1,74	2,37	1,87	1,25	1,72	2,04	1,81	1,74	3,57
15	2,06	2,73	2,12	1,41	1,93	2,41	2,05	1,95	4,08
16	2,97	3,7	2,33	1,59	2,43	3,38	2,52	2,23	4,89
17	4,06	4,77	2,61	1,83	3,03	4,63	3,09	2,56	5,7
18	4,25	4,97	3,04	2,23	3,33	4,87	3,37	2,93	6,53
19	4,74	5,19	4,41	3,88	4,38	5,32	4,03	4,49	7,82
20	6,32	5,52	5,87	6,54	5,62	6,24	4,86	6,53	9,77
21	6,57	5,85	6,16	6,58	6,83	6,5	5,08	6,73	10,4
22	6,59	6,17	6,4	6,61	6,98	6,72	5,24	6,9	11,17
23	6,73	6,54	6,69	6,64	7,16	6,96	5,46	7,08	12,03
24	6,9	6,91	7,35	6,68	7,37	7,23	5,69	7,27	12,95
25	7,16	7,36	7,35	6,68	7,58	7,52	5,95	7,46	13,9
26	7,43	7,85	7,48	6,71	7,77	7,83	6,25	7,68	14,98
27	7,76	8,3	7,64	6,74	8,02	8,14	6,53	7,85	15,92
28	8,36	9,13	8,01	6,7	8,41	8,62	7,03	8,08	17,06
29	8,64	9,6	8,22	6,76	8,66	8,95	7,34	8,27	17,93
30	8,99	10,11	8,52	6,86	8,91	9,34	7,72	8,47	18,83
31	9,49	10,78	8,9	6,97	9,28	9,9	8,2	8,73	19,87
32	9,93	11,49	9,46	7,1	9,63	10,45	8,75	9,01	20,92
33	10,27	12,11	9,91	7,28	9,95	10,97	9,27	9,29	21,83
34	10,72	12,76	10,41	7,51	10,32	11,6	9,78	9,57	22,88
35	11,32	13,58	10,93	7,74	10,74	12,36	10,4	9,87	23,93
36	12,41	14,99	11,62	8,02	11,59	13,72	11,38	10,27	25,28
37	13,81	16,85	12,69	8,39	12,26	15,54	12,74	10,84	27,04
38	14,84	18,84	14,01	8,71	12,95	17,07	14,4	11,6	28,61
39	15,96	20,8	15,38	9,18	13,73	18,68	16,04	12,37	30,39
40	16,83	22,24	16,53	9,6	14,33	19,92	17,31	13,07	31,82
41	17,66	23,65	17,81	10,19	14,98	21,18	18,62	13,88	33,42
42	18,22	24,7	19,02	10,76	15,55	22,17	19,71	14,66	34,88
42,4	-1,14	-3,35	-3,21	-7,78	-3,27	-2,22	-17,1	-5,27	-1,92

## D.2. RESULTADO DAS DEFORMAÇÕES NAS BARRAS

### D.2.1. Ensaio das estruturas com ligações típicas - LTE

Tabela D.10 – Ligação típica, deformações – LTE2 e LTE3.

Carga (Kgf)	LTE2			LTE3		
	Superior μm/m	Inferior μm/m	Diferença μm/m	Superior μm/m	Inferior μm/m	Diferença μm/m
1	-19,02	-24,45	-5,43	-16,30	-24,45	-8,15
2	-30,79	-39,85	-9,06	-28,98	-42,57	-13,58
3	-41,66	-55,24	-13,58	-41,66	-59,77	-18,11
4	-53,43	-72,45	-19,02	-53,43	-77,89	-24,45
5	-64,30	-90,57	-26,27	-67,92	-96,00	-28,08
6	-75,17	-110,49	-35,33	-82,42	-109,58	-27,17
7	-84,22	-128,61	-44,38	-94,19	-126,79	-32,60
8	-91,47	-148,53	-57,06	-106,87	-145,81	-38,94
9	-97,81	-165,74	-67,93	-115,92	-167,55	-51,62
10	-99,62	-189,29	-89,67	-123,17	-185,66	-62,49
11	-109,58	-205,59	-96,01	-134,04	-202,87	-68,83
12	-117,73	-220,99	-103,25	-145,81	-225,51	-79,70
13	-125,88	-246,34	-120,46	-155,77	-244,53	-88,75
14	-138,56	-262,65	-124,08	-163,92	-264,45	-100,53
15	-150,34	-278,95	-128,61	-172,08	-287,09	-115,02
16	-163,92	-297,97	-134,04	-180,23	-306,11	-125,89
17	-176,60	-317,89	-141,29	-190,19	-326,94	-136,75
18	-186,56	-334,19	-147,63	-199,25	-350,49	-151,25
19	-194,72	-360,46	-165,74	-207,40	-378,57	-171,17
20	-201,05	-386,72	-185,67	-207,40	-405,74	-198,34
21	-201,05	-412,08	-211,02	-208,30	-438,34	-230,04
22	-202,87	-441,06	-238,19	-210,11	-469,13	-259,02
23	-206,49	-475,48	-268,99	-212,83	-501,74	-288,91
24	-203,77	-508,08	-304,31	-211,92	-537,96	-326,04
25	-204,68	-544,31	-339,63	-207,40	-577,81	-370,42
26	-202,87	-583,25	-380,38	-203,77	-633,06	-429,28
27	-200,15	-621,29	-421,14	-211,02	-683,77	-472,75
28	-188,38	-667,48	-479,10	-234,57	-718,19	-483,62
29	-183,85	-711,85	-528,01	-251,77	-751,70	-499,92
30	-170,26	-768,91	-598,65	-280,75	-787,02	-506,26
31	-155,77	-828,68	-672,91	-307,92	-823,25	-515,32
32	-145,81	-897,51	-751,70	-337,81	-863,09	-525,28
33	-132,22	-969,06	-836,84	-366,79	-903,85	-537,06
34	-133,13	-1046,04	-912,91	-393,96	-956,38	-562,42
35	-116,83	-1121,21	-1004,38	-403,92	-1011,62	-607,70

## D.2.2. Ensaio das estruturas com ligações típicas com distanciador - LTDE

Tabela D.11 – Ligação típica com distanciador, deformações – LTDE1, LTDE2 e LTDE3.

Carga (Kgf)	LTDE1			LTDE2			LTDE3		
	Superior µm/m	Inferior µm/m	Dif. µm/m	Superior µm/m	Inferior µm/m	Dif. µm/m	Superior µm/m	Inferior µm/m	Dif. µm/m
1	-9,06	-16,30	-7,25	-20,83	-28,98	-8,15	-19,92	-28,08	-8,15
2	-20,83	-34,42	-13,58	-30,79	-43,47	-12,68	-28,98	-40,75	-11,77
3	-29,89	-52,53	-22,64	-38,94	-56,15	-17,21	-40,75	-59,77	-19,02
4	-41,66	-72,45	-30,79	-49,81	-76,08	-26,26	-51,62	-76,08	-24,45
5	-48,00	-86,94	-38,94	-63,40	-97,81	-34,42	-59,77	-91,47	-31,70
6	-57,06	-105,06	-48,00	-70,64	-113,21	-42,57	-76,08	-115,02	-38,94
7	-67,02	-125,89	-58,87	-83,32	-134,94	-51,62	-82,42	-128,60	-46,19
8	-75,17	-144,00	-68,83	-92,38	-151,25	-58,87	-95,09	-149,43	-54,34
9	-83,32	-163,02	-79,70	-102,34	-169,36	-67,02	-99,62	-170,26	-70,64
10	-91,47	-182,94	-91,47	-114,11	-190,19	-76,08	-106,87	-192,91	-86,04
11	-101,43	-204,68	-103,25	-121,36	-206,49	-85,13	-108,68	-210,11	-101,43
12	-107,77	-223,70	-115,92	-141,28	-225,51	-84,23	-117,74	-234,57	-116,83
13	-115,92	-244,53	-128,60	-151,25	-245,43	-94,19	-124,98	-257,21	-132,23
14	-124,08	-263,55	-139,47	-160,30	-268,08	-107,77	-129,51	-277,13	-147,62
15	-134,04	-288,00	-153,96	-167,55	-288,91	-121,36	-136,75	-301,58	-164,83
16	-138,57	-309,74	-171,17	-175,70	-311,55	-135,85	-144,00	-322,42	-178,42
17	-143,09	-334,19	-191,09	-181,13	-334,19	-153,06	-152,15	-333,28	-181,13
18	-145,81	-360,45	-214,64	-189,28	-360,45	-171,17	-163,92	-358,64	-194,72
19	-144,00	-390,34	-246,34	-195,62	-380,38	-184,75	-170,26	-391,25	-220,98
20	-145,81	-417,51	-271,70	-208,30	-399,40	-191,09	-173,89	-419,32	-245,43
21	-148,53	-440,15	-291,62	-228,23	-415,70	-187,47	-178,42	-446,49	-268,08
22	-165,74	-461,89	-296,15	-242,72	-437,43	-194,72	-181,13	-470,94	-289,81
23	-170,26	-485,43	-315,17	-280,75	-465,51	-184,75	-184,75	-502,64	-317,89
24	-175,70	-511,70	-336,00	-304,30	-494,49	-190,19	-188,38	-532,53	-344,15
25	-177,51	-542,49	-364,98	-312,45	-515,32	-202,87	-185,66	-561,51	-375,85
26	-177,51	-573,28	-395,77	-320,60	-535,25	-214,64	-188,38	-595,02	-406,64
27	-176,60	-606,79	-430,19	-330,57	-560,60	-230,04	-188,38	-629,43	-441,06
28	-173,89	-641,21	-467,32	-337,81	-585,06	-247,25	-179,32	-650,26	-470,94
29	-172,08	-680,15	-508,08	-346,87	-612,23	-265,36	-182,04	-698,26	-516,23
30	-168,45	-715,47	-547,02	-355,02	-640,30	-285,28	-183,85	-739,02	-555,17
31	-168,45	-751,70	-583,25	-364,08	-670,19	-306,11	-177,51	-780,68	-603,17
32	-166,64	-786,11	-619,47	-370,42	-702,79	-332,38	-172,98	-816,91	-643,92
33	-171,17	-819,62	-648,45	-374,94	-733,58	-358,64	-163,92	-870,34	-706,42
34	-171,17	-848,60	-677,43	-384,00	-771,62	-387,62	-149,43	-919,25	-769,81
35	-176,60	-882,11	-705,51	-385,81	-804,23	-418,42	-130,42	-977,21	-846,79
36	-180,23	-912,91	-732,68	-387,62	-838,64	-451,02			
37	-181,13	-943,70	-762,57	-393,96	-874,87	-480,91			
38	-183,85	-971,77	-787,92	-393,96	-902,94	-508,98			
39				-399,40	-945,51	-546,11			
40				-402,11	-995,32	-593,21			

### D.2.3. Ensaio com ligações típicas com distanciador e cobrejunta – LTDCE

Tabela D.12 – Ligação típica c/ distanc. e cobrejunta – LTDCE1, LTDCE2 e LTDCE3.

Carga (Kgf)	LTDCE1			LTDCE2			LTDCE3		
	Superior µm/m	Inferior µm/m	Dif. µm/m	Superior µm/m	Inferior µm/m	Dif. µm/m	Superior µm/m	Inferior µm/m	Dif. µm/m
1	-8,15	-26,26	-18,11	-18,11	-25,36	-7,25	-15,40	-21,74	-6,34
2	-22,64	-40,75	-18,11	-30,79	-43,47	-12,68	-29,89	-40,75	-10,87
3	-37,13	-56,15	-19,02	-43,47	-60,68	-17,21	-43,47	-60,68	-17,21
4	-50,72	-71,55	-20,83	-55,25	-78,79	-23,55	-53,43	-76,08	-22,64
5	-64,30	-86,94	-22,64	-65,21	-95,09	-29,89	-65,21	-94,19	-28,98
6	-76,08	-101,43	-25,36	-76,98	-114,11	-37,13	-76,08	-111,40	-35,32
7	-90,57	-119,55	-28,98	-87,85	-132,23	-44,38	-85,13	-127,70	-42,57
8	-100,53	-132,23	-31,70	-97,81	-150,34	-52,53	-96,00	-145,81	-49,81
9	-109,58	-144,91	-35,32	-107,77	-167,55	-59,77	-105,96	-163,02	-57,06
10	-121,36	-160,30	-38,94	-117,74	-186,57	-68,83	-118,64	-183,85	-65,21
11	-133,13	-179,32	-46,19	-126,79	-205,58	-78,79	-129,51	-202,87	-73,36
12	-144,91	-191,09	-46,19	-136,75	-225,51	-88,75	-139,47	-221,89	-82,42
13	-153,06	-206,49	-53,43	-145,81	-247,25	-101,43	-144,91	-240,00	-95,09
14	-163,92	-221,89	-57,96	-154,87	-267,17	-112,30	-155,77	-260,83	-105,06
15	-171,17	-234,57	-63,40	-162,11	-287,09	-124,98	-162,11	-278,04	-115,92
16	-172,98	-239,09	-66,11	-170,26	-308,83	-138,57	-174,79	-297,96	-123,17
17	-183,85	-254,49	-70,64	-175,70	-327,85	-152,15	-186,57	-317,89	-131,32
18	-192,91	-270,79	-77,89	-179,32	-357,74	-178,42	-203,77	-337,81	-134,04
19	-202,87	-288,00	-85,13	-187,47	-380,38	-192,91	-216,45	-355,92	-139,47
20	-212,83	-309,74	-96,91	-192,00	-410,26	-218,26	-228,23	-372,23	-144,00
21	-225,51	-320,60	-95,09	-191,09	-440,15	-249,06	-239,09	-395,77	-156,68
22	-245,43	-328,75	-83,32	-191,09	-470,04	-278,94	-248,15	-416,60	-168,45
23	-270,79	-342,34	-71,55	-191,09	-501,74	-310,64	-254,49	-433,81	-179,32
24	-290,72	-360,45	-69,74	-191,09	-530,72	-339,62	-260,83	-453,74	-192,91
25	-309,74	-379,47	-69,74	-192,00	-559,70	-367,70	-267,17	-479,09	-211,92
26	-326,94	-397,58	-70,64	-195,62	-588,68	-393,06	-270,79	-505,36	-234,57
27	-344,15	-418,42	-74,26	-199,25	-615,85	-416,60	-273,51	-530,72	-257,21
28	-361,36	-438,34	-76,98	-206,49	-650,26	-443,77	-278,04	-556,08	-278,04
29	-378,57	-463,70	-85,13	-211,02	-680,15	-469,13	-279,85	-584,15	-304,30
30	-393,06	-484,53	-91,47	-214,64	-710,94	-496,30	-281,66	-614,94	-333,28
31	-410,26	-510,79	-100,53	-217,36	-745,36	-528,00	-287,09	-644,83	-357,74
32	-424,75	-534,34	-109,58	-223,70	-782,49	-558,79	-298,87	-672,00	-373,13
33	-439,25	-559,70	-120,45	-226,42	-816,91	-590,49	-305,21	-698,26	-393,06
34	-451,92	-585,06	-133,13	-230,94	-862,19	-631,25	-314,26	-729,06	-414,79
35	-463,70	-613,13	-149,43	-241,81	-896,60	-654,79	-320,60	-762,57	-441,96
36	-476,38	-640,30	-163,92	-249,96	-930,11	-680,15	-330,57	-799,70	-469,13
37	-489,06	-670,19	-181,13	-260,83	-963,62	-702,79	-337,81	-837,74	-499,92
38	-494,49	-697,36	-202,87	-264,45	-1008,00	-743,55	-344,15	-872,15	-528,00
39	-504,45	-733,58	-229,13	-274,42	-1044,23	-769,81	-344,15	-903,85	-559,70
40	-513,51	-768,00	-254,49	-282,57	-1085,89	-803,32	-352,30	-936,45	-584,15
41	-519,85	-803,32	-283,47	-288,91	-1132,98	-844,08	-363,17	-971,77	-608,60
42	-526,19	-843,17	-316,98	-284,38	-1181,89	-897,51	-371,32	-1008,00	-636,68