

**ESTUDO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DE TRELIÇAS ESPACIAIS
FEITAS COM TUBOS DE AÇO COM PONTA AMASSADA E
ESPAÇADORES DE MADEIRA PARA CORRIGIR AS
EXCÊNTRICIDADES NOS NÓS DE LIGAÇÃO**

PABLO ANDRÉS ANDRADE CASANOVA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

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

ESTUDO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DE TRELIÇAS ESPACIAIS
FEITAS COM TUBOS DE AÇO COM PONTA AMASSADA E
ESPAÇADORES DE MADEIRA PARA CORRIGIR AS
EXCENTRICIDADES NOS NÓS DE LIGAÇÃO

PABLO ANDRÉS ANDRADE CASANOVA

ORIENTADOR: LUCIANO MENDES BEZERRA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL

PUBLICAÇÃO: E.DM-015A/15

BRASILIA / DF: JUNHO / 2015

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

**ESTUDO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DE TRELIÇAS ESPACIAIS
FEITAS COM TUBOS DE AÇO COM PONTA AMASSADA E
ESPAÇADORES DE MADEIRA PARA CORRIGIR AS
EXCENTRICIDADES NOS NÓS DE LIGAÇÃO**

PABLO ANDRÉS ANDRADE CASANOVA

DISSERTAÇÃO 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 MESTRE.

APROVADA POR:

Prof. Luciano Mendes Bezerra, PhD (UnB)
(Orientador)

Prof. Prof. Artur Antonio Portela, PhD (UnB)
(Examinador Interno)

Prof. William Taylor Matias Silva, Dr. Ing. (UnB)
(Examinador Interno)

Prof. Jorge Luiz de Almeida Ferreira, DSc (UnB)
(Examinador Externo)

BRASILIA/DF: JUNHO/2015

FICHA CATALOGRÁFICA

CASANOVA, PABLO ANDRÉS ANDRADE.

Estudo numérico-experimental de treliças espaciais feitas com tubos de aço com ponta amassada e espaçadores de madeira para corrigir as excentricidades nos nós de ligação [Distrito Federal] 2015.

xviii, 93p, 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2013).
Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- | | |
|---------------------------------|---------------------------|
| 1. Treliça Espacial | 2. Nó Típico |
| 3. Numérico-Experimental Testes | 4. Espaçadores de Madeira |
| I. ENC/FT/UnB | II. Título (Mestre) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ANDRADE, P.A.C. (2014). Estudo numérico-experimental de treliças espaciais feitas com tubos de aço com ponta amassada e espaçadores de madeira para corrigir as excentricidades nos nós de ligação. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Pablo Andrés Andrade Casanova

TÍTULO: Estudo numérico-experimental de treliças espaciais feitas com tubos de aço com ponta amassada e espaçadores de madeira para corrigir as excentricidades nos nós de ligação.

GRAU: Mestre

ANO: 2015

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.

Pablo Andrés Andrade Casanova
Carrera 3 N° 1-10
Samaniego - Nariño - Colômbia.
paac22@aluno_unb.br, paac22@hotmail.com

AGRADECIMIENTOS

A Deus por iluminar a minha mente e o meu andar.

Ao meu amigo Carlos Benavides que sem a ajuda dele talvez eu não tivesse sido possível iniciar o meu mestrado.

Ao meu Primo Wilmar Melo, pela sua ajuda incondicional.

Aos meus queridos pais, irmã e a toda a minha família pelo seu amor, carinho e apoio aos meus estudos.

Ao meu orientador, Prof. Luciano Mendes Bezerra, e aos professores do Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC) por me transmitirem seus conhecimentos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo indispensável apoio financeiro.

Aos técnicos e pessoal dos Laboratórios de Estruturas e Mecânica pela ajuda e gentilezas.

Por último, mas não menos importante, agradeço a todos os meus amigos Colombianos e Brasileiros do PECC pela amizade e companheirismo neste processo de formação.

À Adriana Lucia Torres Silva

RESUMO

ESTUDO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DE TRELIÇAS ESPACIAIS FEITAS COM TUBOS DE AÇO COM PONTA AMASSADA E ESPAÇADORES DE MADEIRA PARA CORRIGIR AS EXCENTRICIDADES NOS NÓS DE LIGAÇÃO

Autor: Pablo Andrés Andrade Casanova

Orientador: Luciano Mendes Bezerra

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, Junho 2015

As treliças espaciais feitas com tubos com pontas amassadas e conectadas por um único parafuso (conexão típica) são amplamente utilizadas no Brasil devido a sua fácil construção e economia com respeito às ligações com patente. Entretanto, a ligação típica é fraca devido à excentricidade e a diminuição da inércia no nó devido ao processo de amassamento do tubo. Em pesquisas anteriores, foi observado que ao se corrigir a excentricidade gerada pelos tubos convergentes no mesmo nó, usando espaçadores de aço, a treliça pode suportar mais carga consideravelmente. Entretanto, a utilização desses espaçadores de aço aumentava o custo e gerava carga de peso próprio adicional. Desta forma, o objetivo da presente pesquisa é substituir os espaçadores de aço por espaçadores feitos de madeira, que são mais econômicos e leves. Para se avaliar a melhoria na capacidade resistente da treliça, neste trabalho se fez um estudo numérico-experimental a fim de se examinar a viabilidade do uso da madeira como espaçador. No estudo numérico foi modelada uma treliça espacial tetraédrica tubular com base quadrada de 2m por 2m e altura de 0,7m usando-se para a análise numérica o software comercial em Elementos Finitos, ANSYS Workbench 14.5. Nas análises foi considerada uma geometria detalhada da treliça bem como o comportamento não linear físico e geométrico da treliça procurando-se desta forma se chegar a uma modelagem a mais próxima possível da realidade. No estudo experimental foram ensaiadas três treliças espaciais de secção tubular com ligação típica e com espaçadores de madeira Maçaranduba. Nestes testes, verificou-se que os espaçadores de madeira resistiram bem às cargas. Além disso, a capacidade de suporte da treliça resultou muito semelhante à capacidade das treliças anteriores usando espaçadores de aço. Os tipos de deformação (flambagem e deformações locais) que se apresentaram no modelo numérico e no ensaio experimental são bem semelhantes. Tais semelhanças nos resultados enfatiza que o modelo numérico prevê adequadamente o colapso e a deformada das treliças observadas nos ensaios experimentais. Portanto, conclui-se que os resultados mostram a viabilidade do uso de espaçadores como uma alternativa para substituir os espaçadores de aço em treliças com a vantagem de menor peso e custo.

Palavras chave: Treliça Espacial, Nó típico, Numérico-Experimental testes, Espaçadores de Madeira.

ABSTRACT

NUMERICAL-EXPERIMENTAL STUDY OF SPACE TRUSSES MADE OF STEEL TUBES WITH FLATENED ENDS AND WOOD SPACERS TO CORRECT EXCENTRICITIES IN THE CONNECTION

Author: Pablo Andrés Andrade Casanova

Advisor: Luciano Mendes Bezerra

Graduate Program in Structures and Civil Construction

Brasília, June 2015

Space trusses made of tubes with flattened ends connected with a trespassing bolt (typical connection) are widely used due to its easy construction and economy with respect to patented connections. However, the typical connection is weak due to the eccentricity and reduced momentum of inertia that exists at the nodes due to the flattening process. In previous studies, it was observed that when correcting the eccentricity generated by converging tubes at the same node, using steel spacers, the truss can support more load considerably. However, the use of such spacers made of steel increased the cost of production and generated additional dead load. Thus, the objective of the present research is to replace the steel spacers for spacers made of wood, which are more economical and lighter. To assess the improvement in the bearing capacity of the truss, this work applied a numerical and experimental approach to exam the feasibility of using wood spacer. In the numerical study, a tubular tetrahedral spatial lattice with square base 2m by 2m and 0.7m height was used. In the numerical analysis the commercial Finite Element software, ANSYS Workbench 14.5 was employed. The numerical analyses considered the detailed geometry of the truss as well as the non-linear behavior of the material and geometry trying to model the truss as close to reality as possible. In the experimental study, three trusses with typical connections and “Maçaranduba” wooden spacers were tested. In these tests, it was observed that the wood spacers withstood the loads. Moreover, the bearing capacity of the truss was very similar to bearing capacity of the previous trusses using steel spacers. The types of deformation (buckling and local deformations) shown in the numerical model and in the experimental test were very similar. This similarity in the results highlights that the numerical model adequately predicted the collapse and deformed shape of the trusses observed in the lab tests. Therefore, in conclusion: the results show that the use of wood spacers is feasible and an alternative to replace steel spacers in trusses with less weight and cost.

Key words: Space Truss, Typical Node, Numerical-Experimental Tests, Wood Spacers.

ÍNDICE

| CAPÍTULO | Página |
|---|---------------|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1. JUSTIFICATIVA | 2 |
| 1.2. OBJETIVO | 3 |
| 1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO | 3 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 4 |
| 2.1. ORÍGEM DAS ESTRUTURAS ESPACIAIS | 4 |
| 2.2. PESQUISAS REALIZADAS EM TRELIÇAS ESPACIAIS COM NÓS TÍPICOS | 10 |
| 2.2.1. Pesquisa em estruturas com ligação típica por Souza (1998)..... | 10 |
| 2.2.2. Pesquisa em estruturas com ligação típica por Vendrame (2002)..... | 15 |
| 2.2.3. Pesquisa em estruturas com ligação típica por Souza (2003)..... | 21 |
| 2.2.4. Pesquisa em estruturas com ligação típica por Freitas (2008)..... | 26 |
| 2.2.5. Pesquisa em estruturas com ligação típica por Freitas (2012)..... | 32 |
| 3. FUNDAMENTOS TEORICOS | 37 |
| 3.1. CORREÇÃO DA EXCENTRICIDADE DO NÓ TÍPICO | 37 |
| 3.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO AÇO..... | 38 |
| 3.3. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA MADEIRA | 40 |
| 4. PROGRAMA EXPERIMENTAL..... | 42 |
| 4.1. MATERIAIS UTILIZADOS NOS ENSAIOS..... | 42 |
| 4.2. GEOMETRIA DA TRELIÇA ESPACIAL..... | 43 |
| 4.3. INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA NOS ENSAIOS..... | 47 |
| 4.4. ESTRUTURAÇÃO DO ENSAIO | 48 |
| 4.5. EXECUÇÃO DOS ENSAIOS | 51 |
| 4.5.1. Primeiro Ensaio | 51 |
| 4.5.2. Segundo Ensaio | 54 |
| 4.5.3. Terceiro Ensaio..... | 58 |
| 5. ANÁLISE NUMÉRICA..... | 62 |
| 5.1. GEOMETRIA DA TRELIÇA ESPACIAL..... | 62 |
| 5.2. MODELAGEM DA TRELIÇA ESPACIAL NO ANSYS..... | 62 |
| 5.2.1. Condições de contorno | 64 |
| 5.2.2. Análise linear da treliça espacial | 66 |

| | |
|--|----|
| 5.2.3. Análise não linear utilizando modelos constitutivos não calibrados..... | 68 |
| 5.2.4. Análise não linear calibrando o modelo constitutivo dos materiais | 74 |
| 6. RESUMO DOS RESULTADOS..... | 79 |
| 6.1. RESUMO DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS..... | 79 |
| 6.2. RESUMO DAS ANÁLISES NUMÉRICAS..... | 81 |
| 7. CONCLUSÕES | 82 |
| 7.1. CONCLUSÕES DO ESTUDO EXPERIMENTAL..... | 82 |
| 7.2. CONCLUSÕES DO ESTUDO NUMÉRICO | 83 |
| 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 84 |
| A. RESULTADOS DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS..... | 87 |
| B. ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO DO AÇO..... | 93 |

LISTA DE FIGURAS

| FIGURA | Página |
|--|---------------|
| Figura 1.1 - Cobertura do aeroporto Juscelino Kubitschek, Brasília D.F | 1 |
| Figura 1.2 - Acidente no centro de Convenções de Manaus (Freitas, 2008)..... | 2 |
| Figura 2.1 - Alexander Graham Bell (Chilton, 2000)..... | 4 |
| Figura 2.2 - Max Mengerinhausen e seu sistema Mero (Borrego, 1968)..... | 5 |
| Figura 2.3 - Stephane du Chateau (1908-1999)..... | 5 |
| Figura 2.4 - Sistema Pyramitec (Hwang, 2010) | 6 |
| Figura 2.5 - sistema Tridirectionelle (Borrego, 1968)..... | 6 |
| Figura 2.6 - Sistema Unibat (Setareh M. et al, 2011)..... | 7 |
| Figura 2.7 - Sistema Tridimatec (Makowski, 2002)..... | 7 |
| Figura 2.8 - Sistema Spherobot (Warszawa, 1995)-(Makowski,2002) | 8 |
| Figura 2.9 - Sistema Unistrut (Setareh M. et al, 2011)..... | 8 |
| Figura 2.10 - Sistema Triodetic (Setareh M. et al, 2011) | 9 |
| Figura 2.11 - Sistema Nodus (Chen.W.F.; Eric M. L, 2005) - (Setareh M. et al, 2011)..... | 9 |
| Figura 2.12 - Detalhe da estrutura ensaiada (Souza, 1998)..... | 10 |
| Figura 2.13 - Detalhe do nó típico (Souza, 1998) | 11 |
| Figura 2.14 - Detalhe de ligação dos nós de aplicação de carga (nó de aço) (Souza, 1998).... | 11 |
| Figura 2.15 - Visão geral do ensaio (Souza, 1998) | 12 |
| Figura 2.16 - Configuração dos nós da estrutura após a ruína (Souza, 1998)..... | 12 |
| Figura 2.17 - Força aplicada versus deslocamentos (nó central) (Souza, 1998) | 13 |
| Figura 2.18 - Elemento finito utilizado na análise numérica (Souza, 1998) | 13 |
| Figura 2.19 - Modelo de barra adotado na análise teórica (Souza, 1998)..... | 14 |
| Figura 2.20 - Modelos constitutivos adotados na análise numérica (Souza, 1998)..... | 14 |
| Figura 2.21 Deslocamentos verticais teóricos e experimentais (Souza, 1998) | 15 |
| Figura 2.22 - Protótipo montado no laboratório (Vendrame, 2002)..... | 16 |
| Figura 2.23 - Características e dimensões do protótipo de ensaiado (Vendrame, 2002) | 17 |
| Figura 2.24 - Deslocamento teórico e experimental do nó central (Vendrame, 2002)..... | 18 |
| Figura 2.25 - Plastificação da extremidade da barra (Vendrame, 2002) | 18 |
| Figura 2.26 - Detalhe da posição do nó típico inserido na estrutura (Vendrame, 2002)..... | 19 |
| Figura 2.27 - Curva tensão-deformação do material (Vendrame, 2002)..... | 19 |
| Figura 2.28 - Tensões para várias etapas de carregamento (Vendrame, 2002)..... | 20 |

| | |
|--|----|
| Figura 2.29 - Deslocamento teórico e experimental do nó Central (Vendrame, 2002)..... | 20 |
| Figura 2.30 - Sistemas de ligações utilizados no Brasil (Souza, 2003)..... | 21 |
| Figura 2.31 - Esquema dos protótipos, cotas em m (Souza, 2003) | 22 |
| Figura 2.32 - Vista da treliça após montagem (Souza, 2003)..... | 23 |
| Figura 2.33 - Numeração de nós / modelagem do nó treliça TE1 (Souza, 2003)..... | 23 |
| Figura 2.34 - Superfícies de contato adotadas na modelagem (Souza, 2003) | 24 |
| Figura 2.35 - Modelo constitutivo para análise do nó típico (Souza, 2003) | 24 |
| Figura 2.36 - Deslocamentos verticais (cm), Força aplicada = 101 kN (Souza, 2003)..... | 25 |
| Figura 2.37 - Nó com chapa cobrejunta-TE1 (Souza, 2003)..... | 25 |
| Figura 2.38 - Deslocamentos teóricos e experimentais (TE1) (Souza, 2003) | 26 |
| Figura 2.39 - Ligação típica (LTE) (Freitas, 2008) | 26 |
| Figura 2.40 - Ligação típica e distanciador (LTDE) (Freitas, 2008)..... | 27 |
| Figura 2.41 - Ligação típica, distanciador e chapas de reforço (LTDCE) (Freitas, 2008) | 27 |
| Figura 2.42 - Protótipo da treliça espacial (Freitas, 2008) | 27 |
| Figura 2.43 - Dimensões da treliça espacial (Freitas, 2008) | 28 |
| Figura 2.44 - Diagrama carregamento versus deslocamento vertical (nó 9) (Freitas, 2008) ... | 29 |
| Figura 2.45 - Treliça espacial com ligação LTDC (Freitas, 2008)..... | 29 |
| Figura 2.46 - Detalhe da ligação com nó típico, distanciador e cobre junta (Freitas, 2008).... | 30 |
| Figura 2.47 - Comportamento físico do material tipo 1 (kN/mm ²) (Freitas, 2008)..... | 31 |
| Figura 2.48 - Comportamento físico do material tipo 2 (kN/mm ²) (Freitas, 2008)..... | 31 |
| Figura 2.49 - Deslocamento do nó central devido a carga aplicada (LTDC) (Freitas, 2008) .. | 32 |
| Figura 2.50 - Deformada da ligação para o carregamento final (LTDC) (Freitas, 2008) | 32 |
| Figura 2.51 - Esquema dos protótipos da treliça espacial (Freitas, 2012)..... | 33 |
| Figura 2.52 - Modelo da treliça espacial (Freitas, 2012)..... | 33 |
| Figura 2.53 - Detalhe da ligação típica vs. ligação típica modificada (Freitas, 2012) | 34 |
| Figura 2.54 - Deslocamentos (cm) ligação típica vs. ligação modificada (Freitas, 2012) | 34 |
| Figura 2.55 - Tensões Von Mises (kN/cm ²) ligação típica vs. modificada (Freitas, 2012)... | 35 |
| Figura 2.56 - Ligação típica vs. ligação típica modificada (Freitas, 2012) | 35 |
| Figura 2.57 - Protótipo da treliça espacial (Freitas, 2012) | 36 |
| Figura 2.58 - Colapso da ligação típica vs. ligação típica modificada (Freitas, 2012) | 36 |
| Figura 3.1 - excentricidade no nó típico (Freitas, 2008) | 37 |
| Figura 3.2 - Detalhe da ligação com tubos amassados (nó típico) (Freitas, 2008)..... | 37 |
| Figura 3.3 - Projeção vertical e horizontal do elemento da diagonal (Freitas, 2008)..... | 38 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.4 - Diagrama típico do aço, tensão vs. deformação (Souza, 1998)..... | 39 |
| Figura 3.5 - Diagrama tensão vs. deformação, elementos comprimidos (Souza, 1998) | 39 |
| Figura 4.1 - Elementos das treliças espaciais | 43 |
| Figura 4.2 - Geometria da treliça espacial | 43 |
| Figura 4.3 - Dimensões do banzo | 44 |
| Figura 4.4 - Detalhe da ponta do banzo (Planta) | 44 |
| Figura 4.5 - Detalhe da ponta do banzo (Perfil) | 44 |
| Figura 4.6 - Dimensões da diagonal | 44 |
| Figura 4.7 - Dimensões da Diagonal (Perfil)..... | 45 |
| Figura 4.8 - Detalhe da ponta da diagonal (Perfil) | 45 |
| Figura 4.9 - Dimensões do espaçador..... | 46 |
| Figura 4.10 - Dimensões chapa de reforço | 46 |
| Figura 4.11 - Dimensões do parafuso..... | 46 |
| Figura 4.12 - Sistema de aplicação do carregamento | 49 |
| Figura 4.13 - Aparelho de fixação do sistema de carregamento à treliça espacial..... | 49 |
| Figura 4.14 - Posição dos defletômetros nos nós (N) da treliça espacial | 50 |
| Figura 4.15 - Posição dos extensômetros eletrônicos no banzo superior perto do nó 6..... | 51 |
| Figura 4.16 - Colapso da diagonal entre os nós 8 e 13 (primeiro ensaio). Carga = 39,1 kN ... | 51 |
| Figura 4.17 - Deformação dos nós 8 e 13. Carga = 39,1 kN | 52 |
| Figura 4.18 - Deformação do nó 9 no primeiro ensaio. Carga = 39,1 kN..... | 52 |
| Figura 4.19 - Gráfico da carga vs. deslocamento vertical (primeiro ensaio)..... | 53 |
| Figura 4.20 - Posição dos extensômetros eletrônicos perto do nó 6 (primeiro ensaio)..... | 54 |
| Figura 4.21 - Colapso da diagonal entre os nós 8 e 13 no segundo ensaio. Carga = 39 kN..... | 54 |
| Figura 4.22 - Deformação dos nós 8 e 13 no segundo ensaio. Carga = 39 kN | 55 |
| Figura 4.23 - Deformação do nó 9 no segundo ensaio. Carga = 39 kN | 55 |
| Figura 4.24 - Gráfico da carga vs. deslocamento (segundo ensaio) | 56 |
| Figura 4.25 - Posição dos extensômetros eletrônicos perto do nó 6 (segundo ensaio) | 56 |
| Figura 4.26 - Gráfico da carga vs. deformação a 150 mm do nó 6 (segundo ensaio) | 57 |
| Figura 4.27 - Colapso da diagonal entre os nós 5 e 10 no terceiro ensaio. Carga = 38,8 kN... | 58 |
| Figura 4.28 - Nó 5, estado de carga inicial e final (terceiro ensaio)..... | 58 |
| Figura 4.29 - Nó 10, estado de carga inicial e final (terceiro ensaio)..... | 59 |
| Figura 4.30 - Gráfico da carga vs. deslocamento (terceiro ensaio) | 59 |
| Figura 4.31 - Posição dos extensômetros perto do nó 6 (terceiro ensaio) | 60 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.32 - Gráfico da carga vs. deformação a 150 mm do nó 6 (terceiro ensaio). | 61 |
| Figura 4.33 - Diagrama carga vs. deslocamento do nó 9 para os três ensaios | 61 |
| Figura 5.1 - Elementos tipo “Solid” nos membros da treliça espacial | 63 |
| Figura 5.2 - Malha com elementos finitos tipo “Solid” sub a estrutura espacial | 63 |
| Figura 5.3 - Numeração dos nós da treliça espacial | 64 |
| Figura 5.4 - Condições de contorno no nó 10 (igual condição para os nós 11, 12 3 13) | 64 |
| Figura 5.5 - Condições de contorno no nó 9 | 65 |
| Figura 5.6 - Elementos em contato no nó 9..... | 66 |
| Figura 5.7 - Deslocamentos na treliça espacial (mm). Carga = 39 kN..... | 67 |
| Figura 5.8 - Distribuição das tensões de Von-Mises (MPa). Carga = 39 kN..... | 67 |
| Figura 5.9 - Distribuição das tensões (MPa) de Von-Mises nos nós 8 e 9. Carga = 39 kN | 68 |
| Figura 5.10 - Modelo constitutivo do aço (elementos a tração)..... | 69 |
| Figura 5.11 - Modelo constitutivo do aço (elementos a compressão)..... | 70 |
| Figura 5.12 - Deslocamentos na treliça espacial (mm). Carga = 32,7 kN..... | 71 |
| Figura 5.13 - Diagrama carga vs. deslocamento do nó 9 | 71 |
| Figura 5.14 - Distribuição das tensões de Von-Mises (MPa). Carga = 32,7 kN..... | 72 |
| Figura 5.15 - Diagonal da treliça espacial entre os nós 8 e 13. Carga = 32,7 kN | 72 |
| Figura 5.16 - Tensões de Von-Mises nos nós 4, 6, 7, 8, 9 e 13 em MPa. Carga = 32,7 kN..... | 73 |
| Figura 5.17 - Ligação simplificada versus ligação real..... | 74 |
| Figura 5.18- Atribuição dos modelos constitutivos na treliça espacial | 75 |
| Figura 5.19 - Modelo constitutivo adotado para a parte amassada dos tubos | 75 |
| Figura 5.20 - Modelo constitutivo adotado para a parte não amassada dos tubos | 76 |
| Figura 5.21 - Deslocamentos verticais da treliça espacial (mm). Carga 39 KN..... | 76 |
| Figura 5.22- Diagrama carga vs. deslocamento do nó 9 | 77 |
| Figura 5.23 - Deslocamentos do nó 9 (mm). Carga = 39 kN | 77 |
| Figura 5.24 - Tensões de Von-Mises (MPa) na treliça espacial. Carga = 39 kN | 78 |
| Figura 5.25 - Distribuição das tensões de Von-Mises no nó 9 (MPa). Carga = 39 kN..... | 78 |
| Figura 6.1 - Diagrama carga vs. deslocamento do nó 9 para os três ensaios | 79 |
| Figura 6.2 - Diagrama carga vs. deslocamento do central (nó 9)..... | 80 |
| Figura 6.3 - Diagrama carga vs. deslocamento do nó 9 | 81 |
| Figura B.8.1 - Diagrama tensão vs. Deformação do aço..... | 93 |

LISTA DE TABELAS

| TABELA | Página |
|---|---------------|
| Tabela 2.1 - Seções dos elementos da treliça e resistência a compressão (Souza, 1998)..... | 11 |
| Tabela 2.2 - Elementos utilizados no protótipo de ensaio (Vendrame, 2002) | 16 |
| Tabela 2.3 - Resumo dos ensaios a serem realizados (Souza, 2003)..... | 22 |
| Tabela 3.1 - Modelos constitutivos (compressão e tração) | 40 |
| Tabela 3.2 - Características físicas da madeira em Maçaranduba (Paralelo à fibra)..... | 41 |
| Tabela 4.1 - Materiais utilizados em cada ensaio | 42 |
| Tabela 4.2 - Detalhe dos instrumentos de medição | 47 |
| Tabela 4.3 - Leituras dos extensômetros a 150 mm da ponta do nó 6 (Segundo ensaio)..... | 57 |
| Tabela 4.4 - Leituras dos extensômetros a 150 mm da ponta do nó 6 (Terceiro ensaio) | 60 |
| Tabela A.8.1 - Dados obtidos no primeiro ensaio | 87 |
| Tabela A.8.2- Dados obtidos no segundo ensaio | 88 |
| Tabela A.8.3 - Dados obtidos no terceiro ensaio..... | 89 |
| Tabela A.8.4 - Deslocamento vertical do nó 9 | 90 |
| Tabela A.8.5 - Leituras dos extensômetros a 150 mm da ponta do nó 6 (Segundo ensaio)..... | 91 |
| Tabela A.8.6 - Leituras dos extensômetros a 150 mm da ponta do nó 6 (Terceiro ensaio) | 92 |

LISTA DE SÍMBOLOS E NOMENCLATURAS

| | |
|-----------|--|
| A | Ponto de intersecção eixos dos banzos |
| A325 | Norma americana |
| A36 | Acero com tensão de escoamento de 250 MPa |
| A_g | Área secção circular |
| AISC-LRFD | Instituição americana |
| ASTM | Norma americana |
| B | Ponto de intersecção eixos das diagonais |
| BSE | Elemento finito de viga |
| C12 | Resistência de ruptura à compressão axial |
| CATMAN | Software de computador |
| d | Excentricidade |
| D | Projeção da diagonal na horizontal |
| E | Modulo de elasticidade |
| E_1 | Distância do início do amassamento até o eixo vertical do parafuso |
| E12 | Modulo de elasticidade (compressão) |
| E2 | Modulo de elasticidade |
| EESC-USP | Universidade de São Paulo |
| E_t | Modulo tangente |
| F | Força |

| | |
|----------|--|
| F12 | Resistência de ruptura à flexão estática |
| f_{ck} | Tensão de compressão paralela à fibra |
| f_{cr} | Tensão crítica de flambagem |
| f_y | Tensão de escoamento |
| H | Projeção da diagonal na vertical |
| i | Raio de giração da seção circular |
| K | Parâmetro de flambagem |
| L | Largura |
| L | Distância entre os centros dos nós consecutivos na treliça |
| LTDCE | Ligação típica, mas distanciador e chapas cobre junta |
| LTDE | Ligação típica, mas distanciador |
| LTE | Ligação típica |
| MR250 | Acero com tensão de escoamento de 250 MPa |
| MV | Massa volumétrica da madeira no estado verde |
| MV12 | Massa volumétrica a 12% de humidade |
| NBR | Norma brasileira |
| Nck | Força de compressão |
| NLG | Não linearidade geométrica |
| P | Coefficiente de retração volumétrica |
| R% | Porcentagem de retração linear radial |
| R1 | Rotação em x |

| | |
|-----------------|--|
| R2 | Rotação em y |
| R3 | Rotação em z |
| SAP2000 | Software de computador |
| t | Espessura da parede tubular |
| t1 | Espessura da parede do tubo do banzo |
| t2 | Espessura da parede do tubo da diagonal |
| T% | Porcentagem de Retração linear tangencial |
| T/R | Relação entre as Porcentagem de Retração linear e Radial |
| T12 | Resistência de ruptura à tração axial |
| TE1 | Treliça com nó típico |
| U1 | Deslocamento em x |
| U2 | Deslocamento em y |
| U3 | Deslocamento em z |
| Und | Unidade |
| USI-SAC | Acero com tensão de escoamento de 250 MPa |
| ε | Deformação |
| ε_e | Deformação máxima plástica |
| ε_u | Deformação máxima ultima |
| ε_y | Deformação máxima elástica |
| θ | Angulo |
| λ | Esbeltez |

| | |
|------------------------|--------------------------------------|
| $\overline{\lambda}_c$ | Esbeltez calculada (AISC-LRFD, 1991) |
| P | Coefficiente de diminuição |
| σ | Tensão |

1. INTRODUÇÃO

As treliças espaciais em perfis tubulares, unidas em seus nós por meio da superposição das pontas amassadas dos seus tubos e fixadas por meio de um único parafuso, ganharam espaço como estrutura predileta para o uso de coberturas, por ter um menor custo de produção e um menor tempo de construção que outros tipos de estruturas e ligações. Estas estruturas treliçadas são utilizadas em todo tipo de coberturas, tanto em pequenas coberturas, como as utilizadas em centros comerciais, ou grandes coberturas, como as de estações de metrô, estádios ou aeroportos (ver Figura 1.1).



Figura 1.1 - Cobertura do aeroporto Juscelino Kubitschek, Brasília D.F

No entanto, existem problemas na conexão ou extremidades dos tubos destas treliças espaciais, já que quando o processo de amassar é feito se diminui a inercia da seção do tubo, o que torna esta conexão mais fraca. Quando fatores como a excentricidade do nó e o enfraquecimento da ponta dos tubos não são levadas em consideração no cálculo da carga última que a treliça espacial pode suportar, existe risco de colapso da estrutura. Exemplos de estruturas espaciais colapsadas pode ser citado como o ocorrido no centro de Convenções de Manaus em 1994 (ver Figura 1.2). Por este motivo, é boa norma, implementar medidas que possam aumentar a capacidade da resistência nas conexões (com tubos de ponta amassada) destas treliças sem se perder as vantagens de preço e rapidez do tipo de conexão usado nestas treliças.



Figura 1.2 - Acidente no centro de Convenções de Manaus (Freitas, 2008)

Freitas (2008) observou que ao introduzir correções na excentricidade gerada pelos tubos amassados convergentes no mesmo nó, usando espaçadores de aço sólido na conexão, as cargas finais que podem ser impostas à estrutura aumentavam consideravelmente, entretanto a utilização desses espaçadores feitos de aço influencia negativamente parâmetros tais como: custos de produção e aumento de cargas permanentes. Tendo em vista este problema, o objetivo deste estudo foi substituir os espaçadores de aço sólido por outros mais econômicos e leves feitos de madeira. Para determinar a viabilidade desta substituição, neste trabalho são feitos ensaios experimentais sob carregamento estático e análises numéricas via elementos finitos mediante o uso do software comercial ANSYS.

1.1. JUSTIFICATIVA

As economias de países emergentes, como as da América do Sul, África, Índia, entre outras, precisam cada vez mais de projetos inovadores e alternativos em relação às tecnologias caras e patenteadas usadas na engenharia civil para treliças espaciais, tais projetos devem aproveitar mais os recursos naturais disponíveis. Segundo o Sistema Nacional de Informações Florestais (SNIF, 2014), o Brasil tem a segunda maior cobertura florestal do mundo, isto pode ser aproveitado para a conformação de estruturas mistas feitas em aço e madeira que sejam resistentes, leves e econômicas. Dessa forma, a utilização da madeira como espaçador em treliças espaciais tubulares com pontas amassadas poderá ajudar a corrigir a excentricidade da conexão e a aumentar a resistência da estrutura e a diminuir fatores como custos e cargas permanentes.

1.2. OBJETIVO

Determinar numérica e experimentalmente a viabilidade do uso da madeira como espaçador em treliças espaciais tubulares com as pontas amassadas submetidas a carregamento estático.

1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho está organizado nos seguintes capítulos:

CAPÍTULO 1: Introduz a problemática da ligação com nó típico em estruturas espaciais, justificativa e objetivo deste trabalho, além da composição do mesmo;

CAPÍTULO 2: Aborda uma breve história acerca do começo das estruturas espaciais e os diferentes tipos de ligações que tem sido desenvolvidas. Introduzem-se também as pesquisas realizadas no campo das ligações típicas.

CAPÍTULO 3: Este capítulo contém aspectos preliminares aos ensaios experimentais e as análises numéricas referentes a correção da excentricidade do nó típico de ponta amassada, modelos constitutivos dos materiais e características físicas da madeira.

CAPÍTULO 4: Apresenta o programa experimental, no qual se menciona como foram feitos os ensaios das treliças espaciais no laboratório, os materiais que se utilizaram e os resultados obtidos.

CAPÍTULO 5: Aborda o programa numérico, o qual é composto por a análise linear e pôr a análise não linear. Estas duas análises foram feitas pelo método dos elementos finitos com ajuda do programa ANSYS.

CAPÍTULO 6: Apresenta um resumo dos resultados obtidos tanto no programa experimental como no programa numérico. Estes dados foram resumidos em forma de gráficos para facilitar a sua comparação.

CAPÍTULO 7: Aborda as conclusões finais deste trabalho.

CAPÍTULO 8: Expõe a bibliografia que foi estudada para desenvolver esta pesquisa.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Várias pesquisas no campo das estruturas espaciais têm sido feitas por vários pioneiros, entre eles Graham Bell que em 1907 apresentou o modelo que está na Figura 2.1. Estes pioneiros começaram a estudar as treliças espaciais tubulares, cujos tubos eram unidos por diferentes tipos de conexões. Na continuação deste capítulo, faz-se um estudo de pesquisas desenvolvidas no campo das conexões de treliças espaciais e uma breve história da origem deste tipo de estruturas.

2.1. ORÍGEN DAS ESTRUTURAS ESPACIAIS

A primeira estrutura espacial foi desenvolvida pelo inventor do telefone, Alexander Graham Bell (1847-1922) em 1907 (Ver Figura 2.1). Ele trabalhou com unidades tetraédricas e octaédricas para criar várias formas. As estruturas da rede de Graham Bell consistiram em montagens de barras em multicamadas com o mesmo comprimento e unidos por ligações simples (Setareh M. et al, 2011).

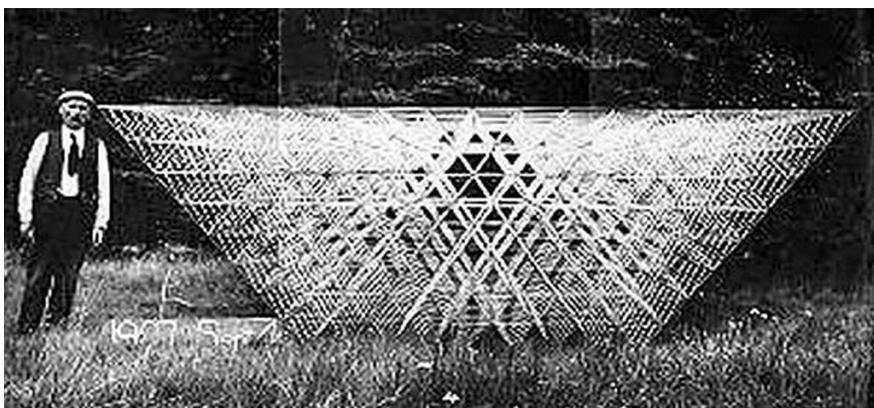


Figura 2.1 - Alexander Graham Bell (Chilton, 2000)

O primeiro uso comercial das estruturas espaciais em arquitetura foi feito pelo Dr. Max Mengerhausen (1903*-1988+), o inventor alemão do sistema Mero em 1943. Os conectores são de forma esférica e feitos de aço (ver Figura 2.2). Este sistema ainda é um dos sistemas mais utilizados, mesmo depois de 60 anos, devido a sua simplicidade, praticidade e estética (Setareh M. et al, 2011).

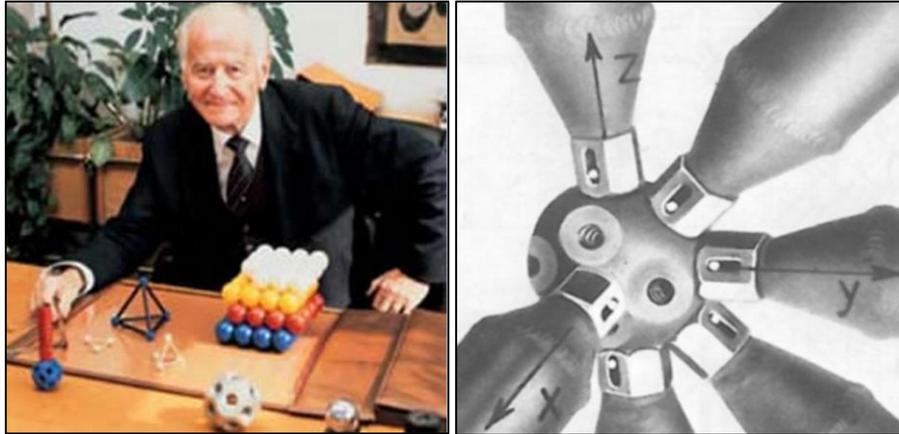


Figura 2.2 - Max Mengerhausen e seu sistema Mero (Borrego, 1968)

O designer francês Stephane du Chateau (1908*-1999+) (ver Figura 2.3) desenvolveu cinco tipos de sistemas de conexão nodal para estruturas espaciais. Estes sistemas são: Pyramitec concebido em 1940, Tridirectionelle SDC cuja origem é de 1957, Unibat foi amplamente utilizado e foi criado em 1959, Tridimatec cuja concepção se deu em 1965 e o sistema Spherobat desenvolvido em 1984.

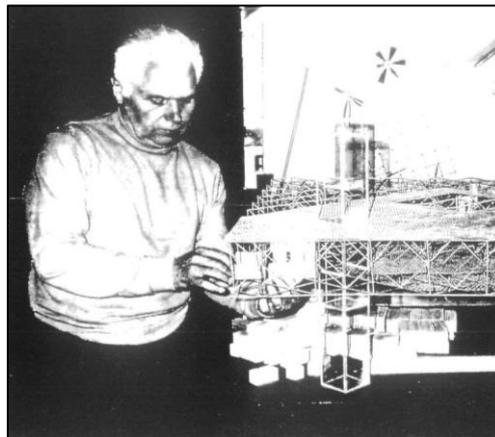


Figura 2.3 - Stephane du Chateau (1908*-1999+)

O sistema Pyramitec foi desenvolvido em 1940 e é composto por módulos de pirâmide, este sistema foi pensado para vãos e cargas maiores. As unidades pré-fabricadas eram aparafusadas com parafusos de alta resistência como se indica na Figura 2.4.

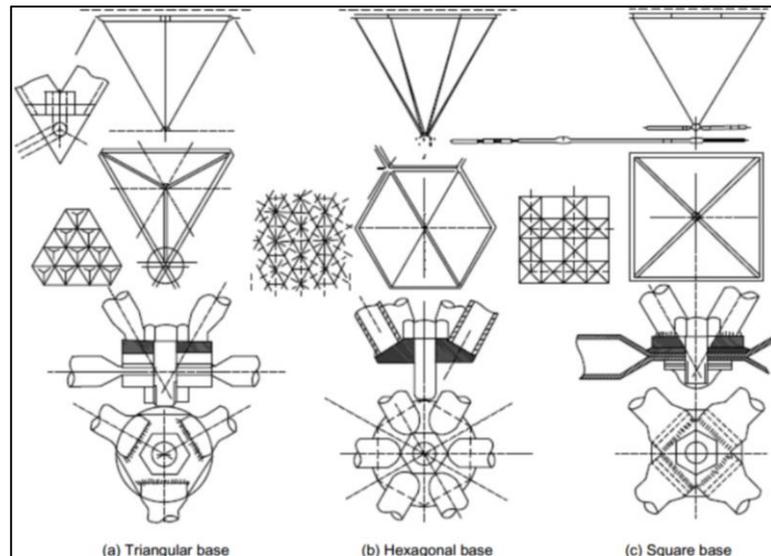


Figura 2.4 - Sistema Pyramitec (Hwang, 2010)

O sistema Tridirectionelle SDC é composto por elementos tubulares (ver Figura 2.5) que estão fixados aos nós por meio de soldas.

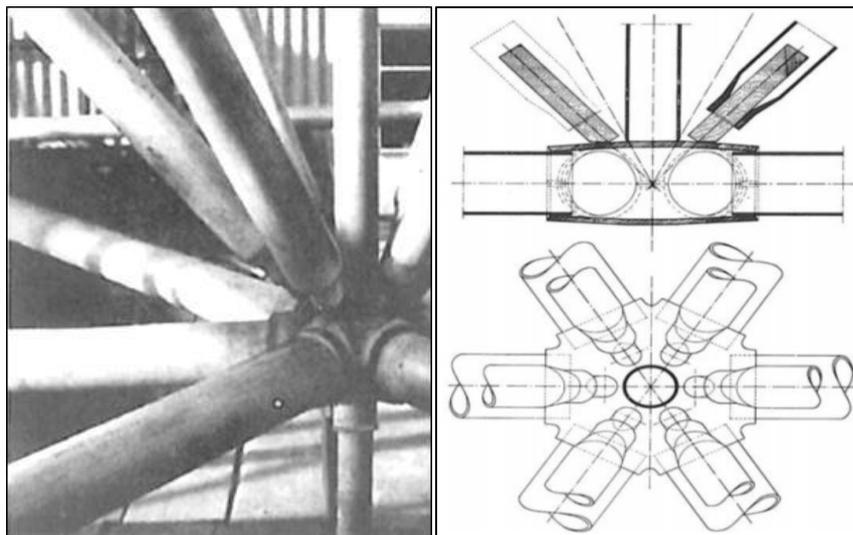


Figura 2.5 - sistema Tridirectionelle (Borrego, 1968)

O sistema Unibat idealizado em 1959, foi o de maior sucesso dos projetos de du Chateau, este sistema tem unidades de pirâmide com quadrado (ver Figura 2.6), interligadas por um único parafuso horizontal em cada canto superior e na camada inferior os elementos tubulares são ligados uns aos outros por meio de um único parafuso vertical.

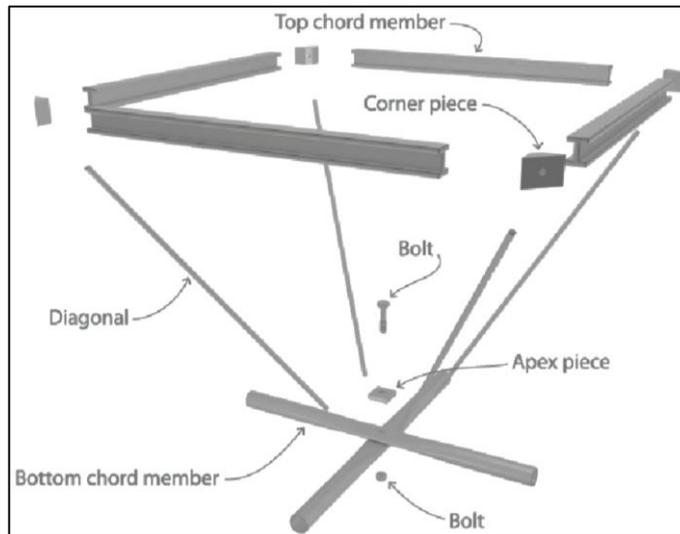


Figura 2.6 - Sistema Unibat (Setareh M. et al, 2011)

O sistema Tridimatec foi desenvolvido em 1965 e consiste de um conjunto de elementos tubulares, unidos a uma placa de aço por vários parafusos como se indica na Figura 2.7. Este sistema é econômico para cargas leves e vãos moderados.

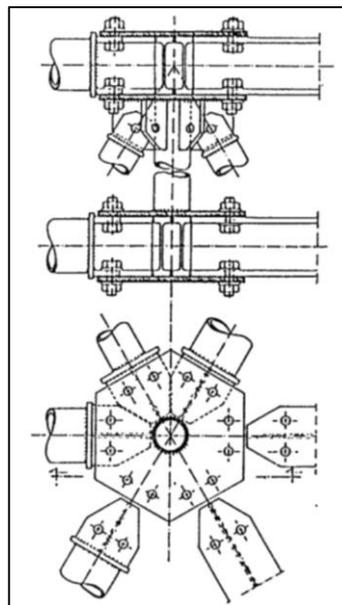


Figura 2.7 - Sistema Tridimatec (Makowski, 2002)

O último sistema idealizado por du Chateau é o Spherobat e data de 1984, composto por um nó esférico oco de duas partes, onde os elementos que chegam a ele são acoplados por meio de porcas e parafusos (ver Figura 2.8).

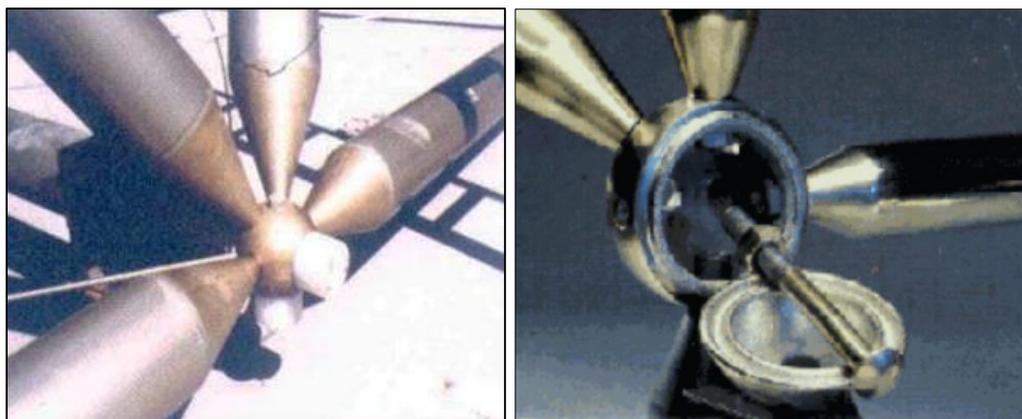


Figura 2.8 - Sistema Spherobot (Warszawa, 1995) - (Makowski, 2002)

Charles W. Attwood inventou em 1955 nos EUA o sistema Unistrutm, que foi desenvolvido no Instituto de Pesquisa de Engenharia da Universidade de Michigan e mais tarde foi renomeado como "Sistema Moduspan". Neste sistema os elementos tubulares são fixados nos nós mediante uma placa de aço através de parafusos (ver Figura 2.9).

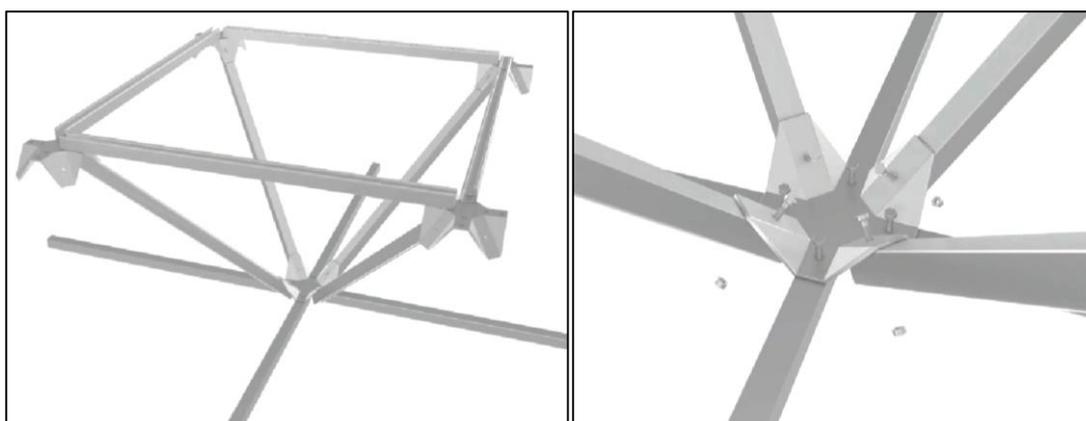


Figura 2.9 - Sistema Unistrut (Setareh M. et al, 2011)

No Canadá, a empresa Triodetic Structures Limited começou em 1953 como uma subsidiária da F. Fentiman and Sons, Ltda., localizada em Ottawa, Ontario. Eles desenvolveram o sistema Triodetic em 1955 (ver Figura 2.10). Para fazer os conectores, usaram-se cubos de alumínio sólido que foram esfruídos para formar cilíndricos com ranhuras. Para fazer os membros tubulares se utilizava aço ou alumínio com seu correspondente frisado nas extremidades. Um único parafuso passa através do centro do cilindro do nó com placas de extremidade em ambos os lados do cilindro e com o auxílio de uma porca mantém os membros da treliça espacial no seu lugar. No início, apenas as estruturas de alumínio foram construídas usando este sistema, mas em 1966 os membros de aço foram adicionados.

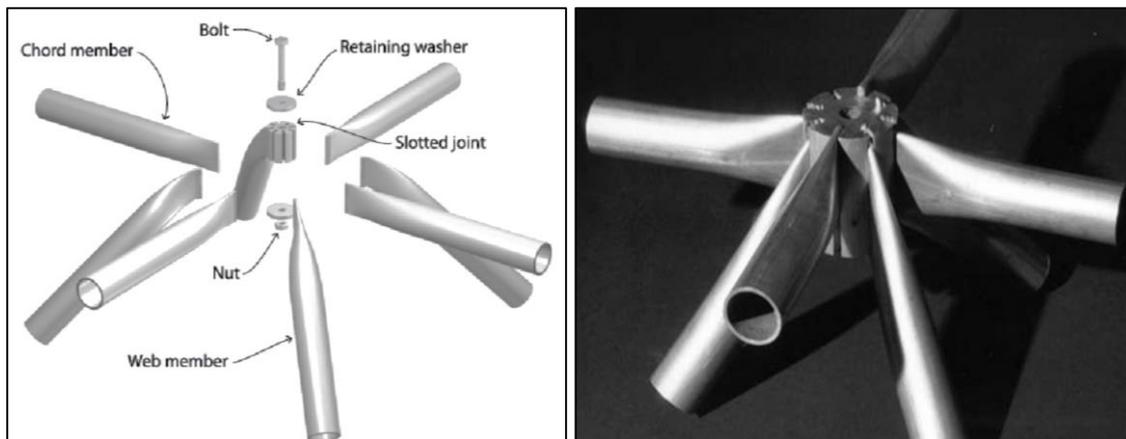


Figura 2.10 - Sistema Triodetic (Setareh M. et al, 2011)

O Sistema Nodus foi desenvolvido na Inglaterra no final dos anos 1960 e início dos anos 1970 pela British Steel Corporation. O nó é feito a partir de duas caixas de ferro fundido fixadas com um parafuso de elevada resistência (ver Figura 2.11). Quando o parafuso é apertado, os conectores terminais rosqueados das cordas são fixados entre as duas meias carcaças. Tem-se quatro chapas em forma de orelha para conectar os membros das diagonais. Um pino de aço é colocado através destes conectores.

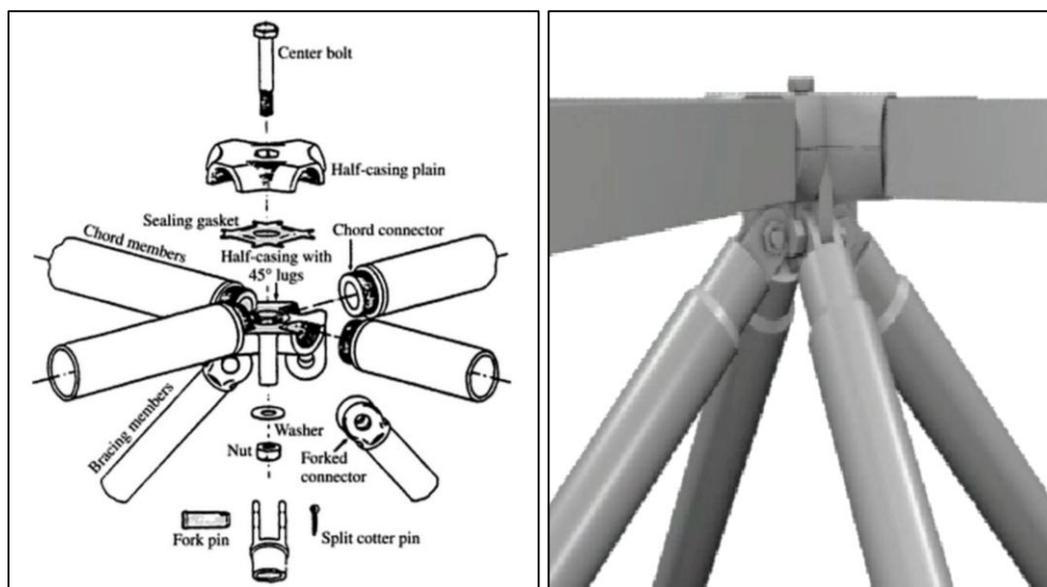


Figura 2.11 - Sistema Nodus (Chen.W.F.; Eric M. L, 2005) - (Setareh M. et al, 2011)

Em 1966 foi realizado o primeiro congresso internacional de estruturas espaciais na universidade de Suerry, Inglaterra e a American Society of Civil Engineers em 1967, criou um comitê para o estudo de estruturas reticuladas tridimensionais.

2.2. PESQUISAS REALIZADAS EM TRELIÇAS ESPACIAIS COM NÓS TÍPICOS

No Brasil existem várias pesquisas no campo das estruturas espaciais, em especial, as relacionadas com os três tipos mais comuns de conexões não patenteadas: nó típico, nó de aço e nó com ponteira. Estas pesquisas foram baseadas em ensaios experimentais e em análises numéricas como tentativa de simular os efeitos aos que estas conexões se submetem nas estruturas espaciais. A seguir, as principais pesquisas que mais contribuíram na realização desta pesquisa são lembradas, observando-se que estes trabalhos representam uma parte das pesquisas nesta área.

2.2.1. Pesquisa em estruturas com ligação típica por Souza (1998)

Souza (1998), em seu trabalho de mestrado, estudou numérica e experimentalmente o comportamento das ligações de uma treliça espacial tubular submetida a carregamento estático. Para o estudo experimental Souza (1998) elaborou uma treliça espacial com vãos de 7,50 por 7,50 m, e altura de 1,50 m, tal como apresenta a Figura 2.12.

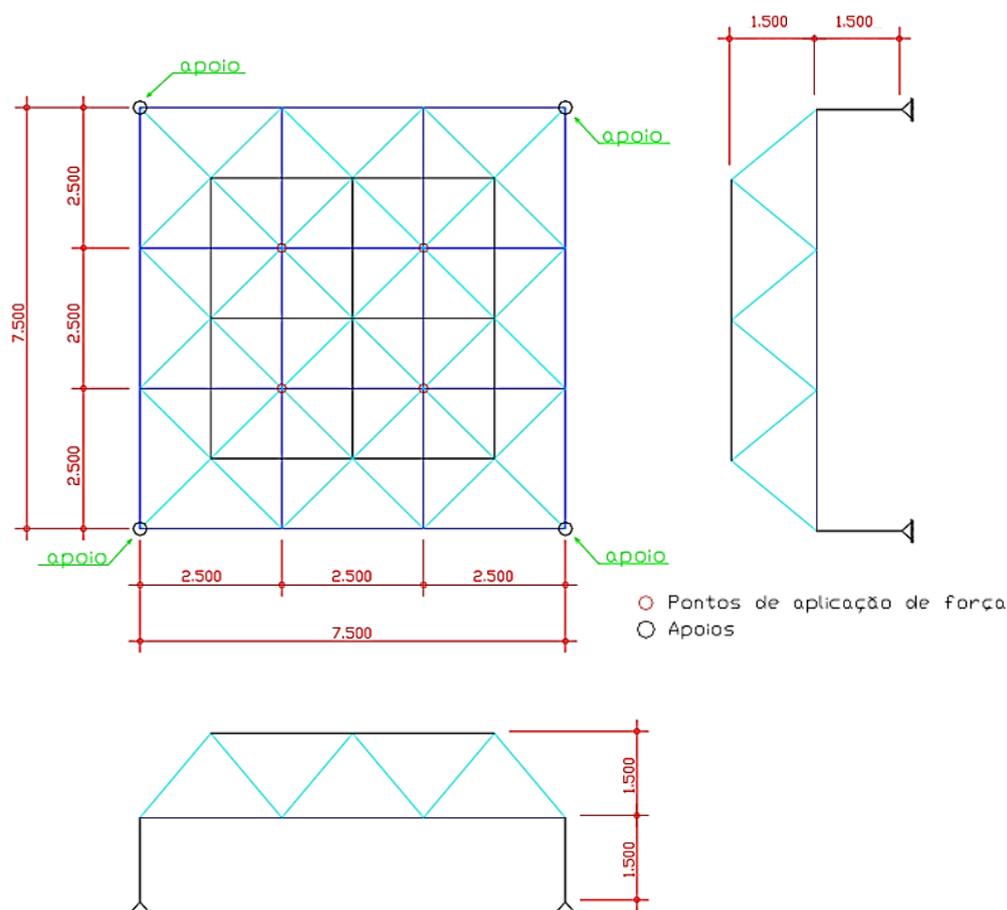


Figura 2.12 - Detalhe da estrutura ensaiada (Souza, 1998)

As seções destes elementos são apresentadas na Tabela 2.1. A resistência à compressão das barras foi calculada segundo a NBR-8800(1986).

Tabela 2.1 - Seções dos elementos da treliça e resistência a compressão (Souza, 1998)

| Tubo | Utilização | Comp. (mm) | Esbeltez | N_c (kN) | N_c^* (kN) |
|----------------|------------|------------|----------|------------|--------------|
| ϕ 60x2,0 | diagonal | 2318 | 113,0 | 41,0 | 35,3 |
| ϕ 76x2,0 | banzo | 2500 | 95,4 | 70,7 | 66,6 |
| | diagonal | 2318 | 88,5 | 65,6 | 61,5 |
| ϕ 88x2,65 | diagonal | 2318 | 77,0 | 120,5 | 112,7 |

N_c^* Força normal resistente considerando variação de inércia na barra.

O sistema de ligação que se utilizou é o denominado nó típico (ver Figura 2.13), formado pela superposição de barras com extremidades estampadas e conectadas por um único parafuso. Nos pontos de aplicação de carga foram utilizados nós de aço (ver Figura 2.14) para facilitar a montagem do atuador hidráulico. Os parafusos utilizados nos ensaios de Souza (1998), em todas as ligações, foram ASTM-A325.

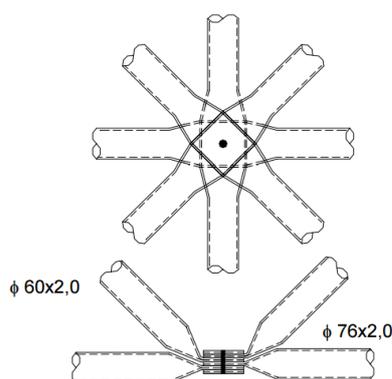


Figura 2.13 - Detalhe do nó típico (Souza, 1998)

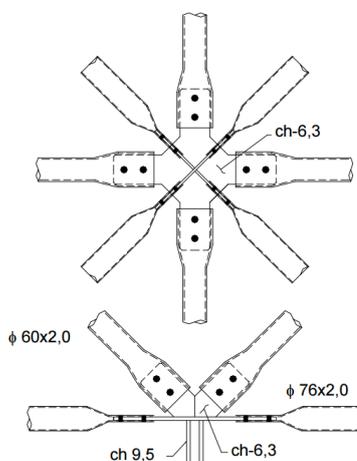


Figura 2.14 - Detalhe de ligação dos nós de aplicação de carga (nó de aço) (Souza, 1998)

As forças, na pesquisa de Souza (1998), foram aplicadas em 4 nós pertencentes os banzos inferiores (ver Figura 2.12), por meio de atuadores hidráulicos com capacidade de 300 kN. Para a medição das forças aplicadas utilizou-se células de carga com capacidade de 300 kN. A Figura 2.15 apresenta o protótipo completo da treliça espacial incluindo o sistema de aplicação de cargas.



Figura 2.15 - Visão geral do ensaio (Souza, 1998)

Os ensaios foram conduzidos com passos de carga de 5 kN, aplicados por nó até atingir o colapso da treliça espacial. A carga que provocou o colapso da estrutura foi da ordem de 40 kN por nó, sendo a ruína da estrutura caracterizada pelo colapso da ligação. Todos os nós da estrutura sofreram rotação, evidenciando o aparecimento de momentos fletores nos nós por conta de forças excêntricas agindo no nó, ocasionando por tanto, a plastificação nas seções dos banzos e diagonais na região de estampagem (ver Figura 2.16).



Figura 2.16 - Configuração dos nós da estrutura após a ruína (Souza, 1998)

Na Figura 2.17 são apresentados os resultados dos deslocamentos verticais versus a força aplicada no nó central. Neste gráfico observa-se um comportamento claramente não linear e excessivas deformações.

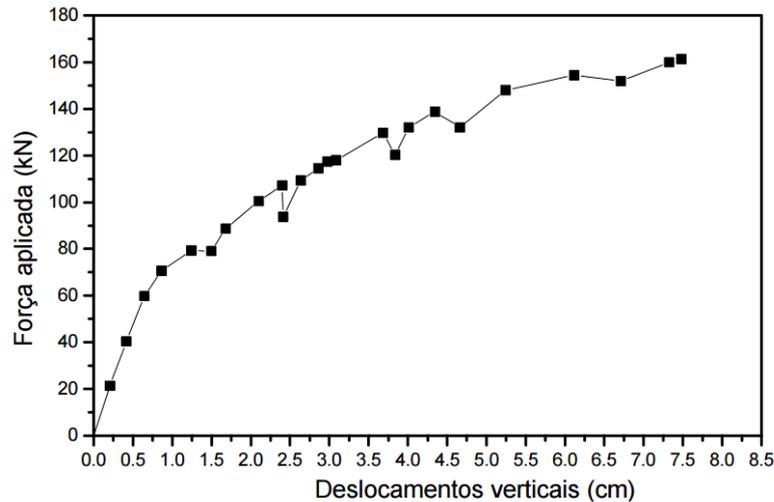


Figura 2.17 - Força aplicada versus deslocamentos (nó central) (Souza, 1998)

Na análise numérica via elementos finitos foi utilizando o programa LUSAS. O elemento finito usado nesta análise foi o BS3, que é um elemento de viga (ver Figura 2.18), com seis graus de liberdade por nó, três translações e três rotações. Souza (1998) utilizou este elemento finito BS3 com a intenção de avaliar os momentos fletores que surgem nas ligações devido a excentricidades e também para considerar a variação de inércia nas extremidades das barras.

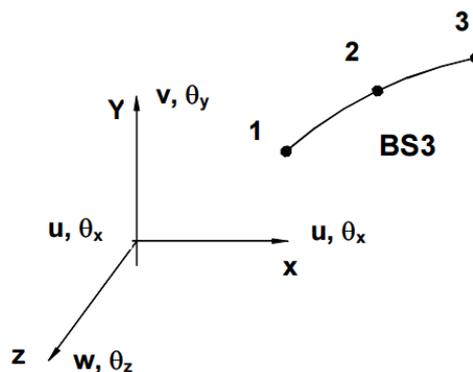


Figura 2.18 - Elemento finito utilizado na análise numérica (Souza, 1998)

Quanto à geometria da treliça espacial, no modelo em elementos finitos, foi considerada a variação de inércia nas extremidades das barras. Em cada elemento da treliça espacial foi adotado um trecho com seção constante, um trecho com seção variável e mais um outro trecho que corresponde ao nó (ver Figura 2.19). Para o caso dos nós típicos, Souza (1998) diz que não

é possível determinar com precisão a rigidez do trecho correspondente ao nó. Portanto, Souza (1998) idealizou duas situações extremas: na primeira hipótese, o nó foi formado por uma barra equivalente com largura igual ao tubo estampado e espessura igual à altura dos tubos superpostos na região da ligação; na segunda hipótese foi considerado o trecho nodal com a inércia correspondente somente a um tubo com a extremidade estampada. Entre esses dois extremos foram feitas análises intermediárias com inércia do trecho nodal, equivalendo a 5% e 10% da inércia do nó, formado por superposição dos tubos.

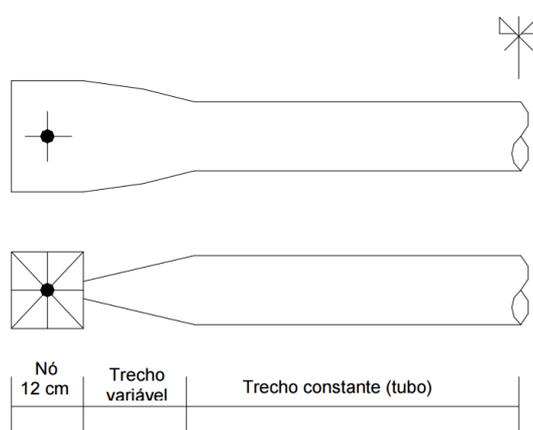


Figura 2.19 - Modelo de barra adotado na análise teórica (Souza, 1998)

Os modelos constitutivos do material utilizados por Souza (1998) são apresentados na Figura 2.20. O primeiro modelo considera o início da plastificação com um nível de tensão equivalente ao limite de escoamento do material (f_y), enquanto que no segundo modelo, a plastificação se inicia com a tensão crítica de flambagem (f_{cr}) determinada pela NBR-8800 (1986).

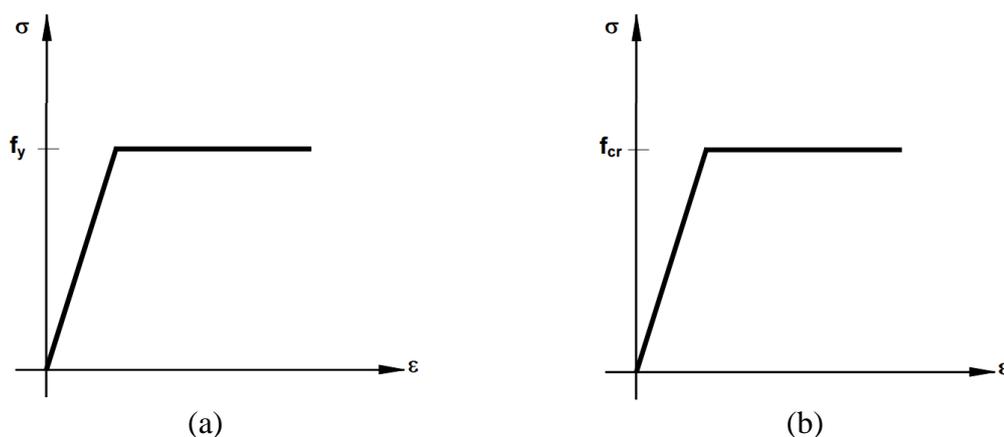


Figura 2.20 - Modelos constitutivos adotados na análise numérica (Souza, 1998)

O gráfico da Figura 2.21 apresenta os deslocamentos verticais com diferentes valores de rigidez nos nós, obtidos na análise numérica em comparação com os deslocamentos experimentais. Nestas análises a não linear geométrica e diferentes valores do momento de inércia do tubo são considerados e o comportamento dos materiais (O modelo constitutivo da Figura 2.20a foi implementado nos elementos tubulares da treliça espacial submetidos a forças de tensão e o modelo constitutivo (b) da Figura 2.20b foi implementado nos elementos tubulares submetidos a forças de compressão).

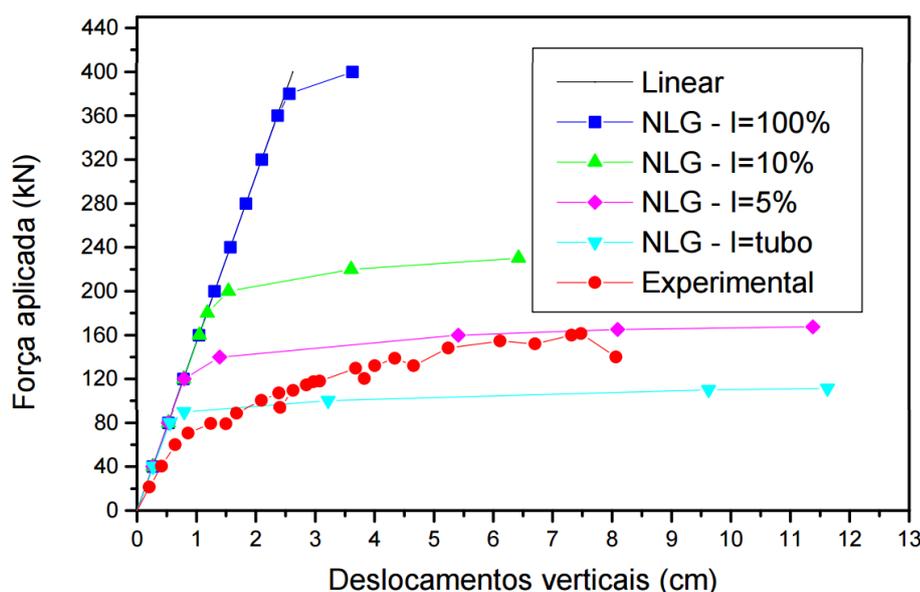


Figura 2.21 Deslocamentos verticais teóricos e experimentais (Souza, 1998)

Souza (1998) conclui que o modelo teórico comumente utilizado, ou seja, treliça ideal e análise linear, não representa o modelo físico fornecendo resultados muito discrepantes dos resultados experimentais. Quando é inserida no modelo teórico a variação de inércia nas extremidades das barras e é realizada a análise não linear geométrica, os resultados teóricos tornam-se mais próximos dos experimentais. Neste modelo os resultados são significativamente afetados pela rigidez dos trechos das barras que formam os nós.

2.2.2. Pesquisa em estruturas com ligação típica por Vendrame (2002)

Este pesquisador fez uma análise numérica e experimental da conexão (nó típico) de uma estrutura espacial constituída de extremidades estampadas. Para a parte experimental de seu trabalho, Vendrame (2002) no laboratório de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, elaborou uma treliça espacial que pode ser observada na Figura 2.22 e que é formada por elementos tubulares de seção circular em aço USI-SAC-41 e unidos com parafusos ASTM-A325.



Figura 2.22 - Protótipo montado no laboratório (Vendrame, 2002)

Eram utilizados diferentes diâmetros para os elementos que conformam a treliça espacial, denominados: diagonal, banzo e diagonal de apoio conforme Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Elementos utilizados no protótipo de ensaio (Vendrame, 2002)

| Tubo | Utilização | Área (mm ²) | Compr. (mm) | Esbeltez | N _{ck} (kN) |
|---------|----------------|-------------------------|-------------|----------|----------------------|
| Φ60x2.0 | Diagonal | 364 | 2318 | 113 | 49,0 |
| Φ76x2.0 | Banzo | 465 | 2500 | 95,4 | 83,0 |
| | Diagonal apoio | 465 | 2318 | 88,5 | 92,0 |

Observação: $N_{ck} = \rho A_g f_y^*$

$f_y^* = 350\text{MPa(ensaio)}$

A geometria da treliça espacial é apresentada na Figura 2.23, a qual tem vãos de 7,50x7,50m e módulos piramidais de 2,50x2,50m com 1,50m de altura. A estrutura se encontra apoiada nos quatro vértices externos e a carga é aplicada nos quatro nós centrais por meio de atuadores hidráulicos. Foram dispostos defletômetros e extensômetros eletrônicos para medir os deslocamentos e as deformações.

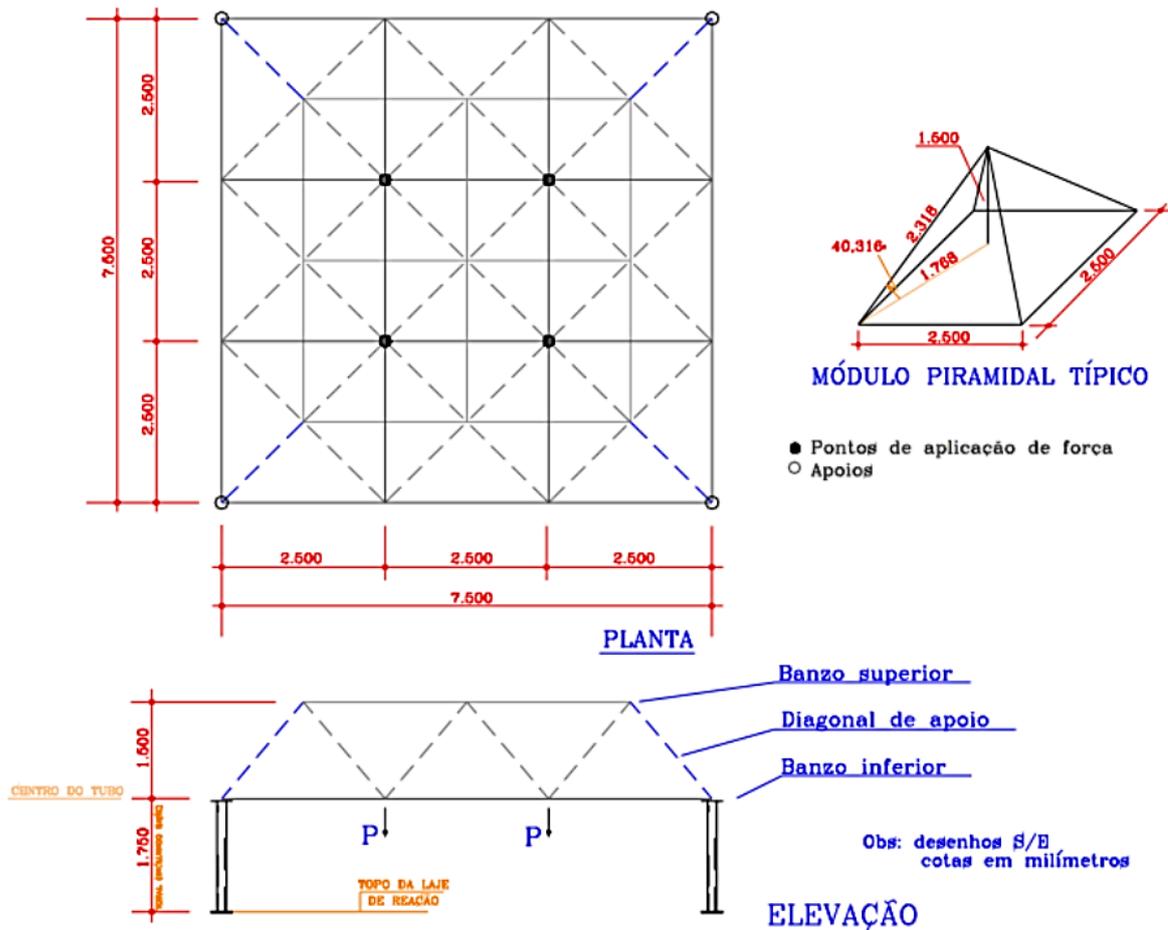


Figura 2.23 - Características e dimensões do protótipo de ensaiado (Vendrame, 2002)

Apresenta-se a seguir alguns dos resultados obtidos por Vendrame (2002), nos quais se compara o deslocamento do nó central obtido experimentalmente e o obtido através de uma simulação numérica, admitida a treliça espacial ideal com comportamento linear. Estes resultados diferem um do outro (ver Figura 2.24), concluindo-se pela análise dos resultados experimentais, que as hipóteses assumidas em projetos, ou seja, treliça ideal com comportamento elástico linear não representa o comportamento da estrutura que utiliza o sistema de ligação denominado nó típico. A força crítica experimental foi de 40 kN por atuador hidráulico.

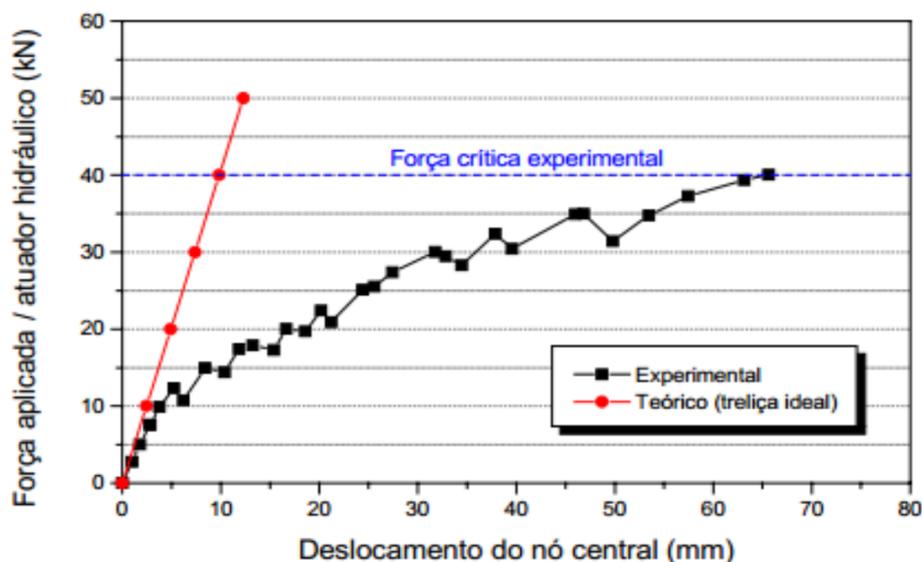


Figura 2.24 - Deslocamento teórico e experimental do nó central (Vendrame, 2002)

A Figura 2.25 apresenta a ruína do protótipo provocado pela plastificação da extremidade da barra associada à deformação excessiva da chapa que constitui a arruela, enfatizando o giro excessivo do parafuso. Este fato justifica-se pelo deslizamento dos elementos na região nodal e a rotação dos nós, devido principalmente a presença de um único parafuso e à excentricidade dos elementos que chegam ao nó.



Figura 2.25 - Plastificação da extremidade da barra (Vendrame, 2002)

Na parte numérica, Vendrame (2002) utilizou o software ANSYS para fazer uma modelagem da treliça espacial, utiliza elementos finitos de casca (Shell) para modelar as conexões e utiliza elementos de viga (Beam) para modelar os membros tubulares (ver Figura 2.26). Vendrame (2002) fez no ANSYS uma acoplagem entre os dois tipos de elementos (Shell e Beam) para que as forças impostas na treliça espacial possam ser transmitidas entre os membros tubulares.

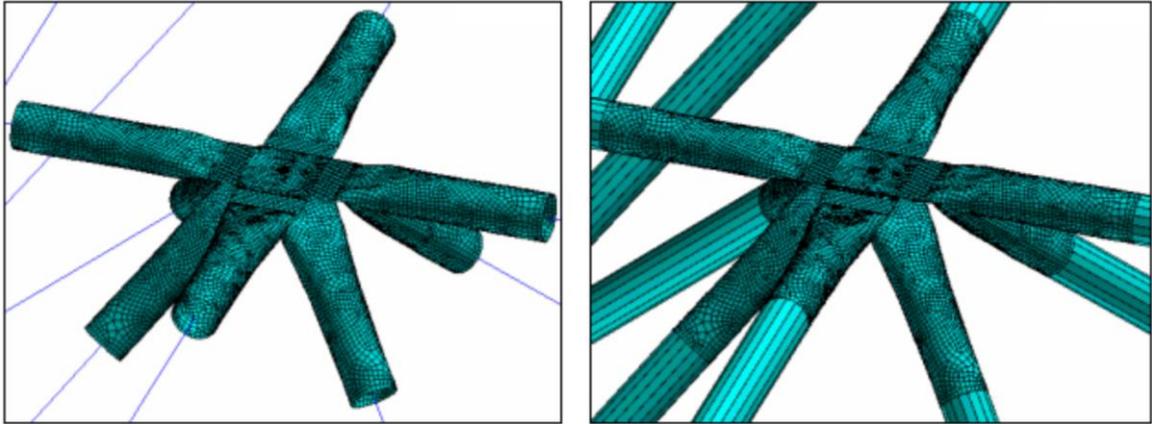


Figura 2.26 - Detalhe da posição do nó típico inserido na estrutura (Vendrame, 2002)

Vendrame (2002) adotou um modelo constitutivo bilinear para representar a curva tensão-deformação do material, tanto na tração como na compressão. Este modelo constitutivo é definido por dois segmentos de retas, onde o primeiro, de inclinação maior, representa o comportamento elástico e o segundo, com inclinação menor, representa o comportamento plástico. As constantes requeridas são a tensão de escoamento (f_y), o módulo de elasticidade (E) definido para material isotrópico, e o módulo tangente (E_t). A Figura 2.27 apresenta um exemplo da curva bilinear utilizada para representar o material utilizado na análise numérica.

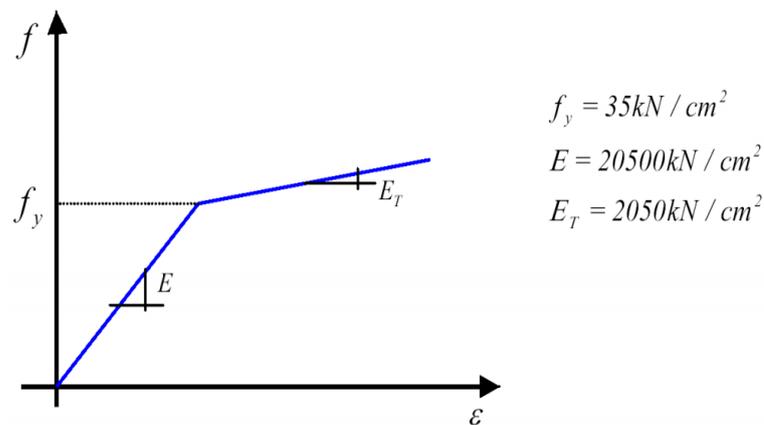


Figura 2.27 - Curva tensão-deformação do material (Vendrame, 2002)

O pesquisador menciona que devido as limitações da versão do programa ANSYS, existente no seu departamento de engenharia de estruturas, introduziu-se apenas um nó completo, modelado com elemento de casca em três pontos da treliça espacial (de cada um por vez), sendo o restante das ligações da estrutura modeladas com o elemento de barra. Quanto ao comportamento do material foi introduzida uma curva bilinear. Na Figura 2.28 se apresenta a distribuição das tensões no nó central quando é aplicada uma força total de 262 kN.

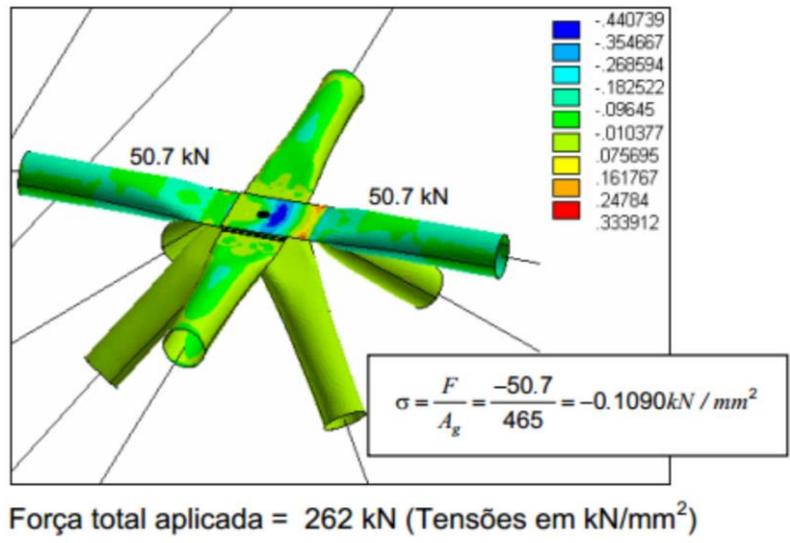


Figura 2.28 - Tensões para várias etapas de carregamento (Vendrame, 2002)

O parafuso não foi considerado na análise numérica, nem o efeito da pressão que tem este sobre o nó. Outra simplificação adotada foi o deslizamento relativo entre as extremidades e, conseqüentemente, o atrito entre as superfícies em contato. Para que o nó permaneça unido, a malha é gerada de tal forma que os nós dela coincidam entre cada elemento e possam transferir forças. Na Figura 2.29 se faz uma comparação do deslocamento obtido com resultados experimentais e resultados numéricos.

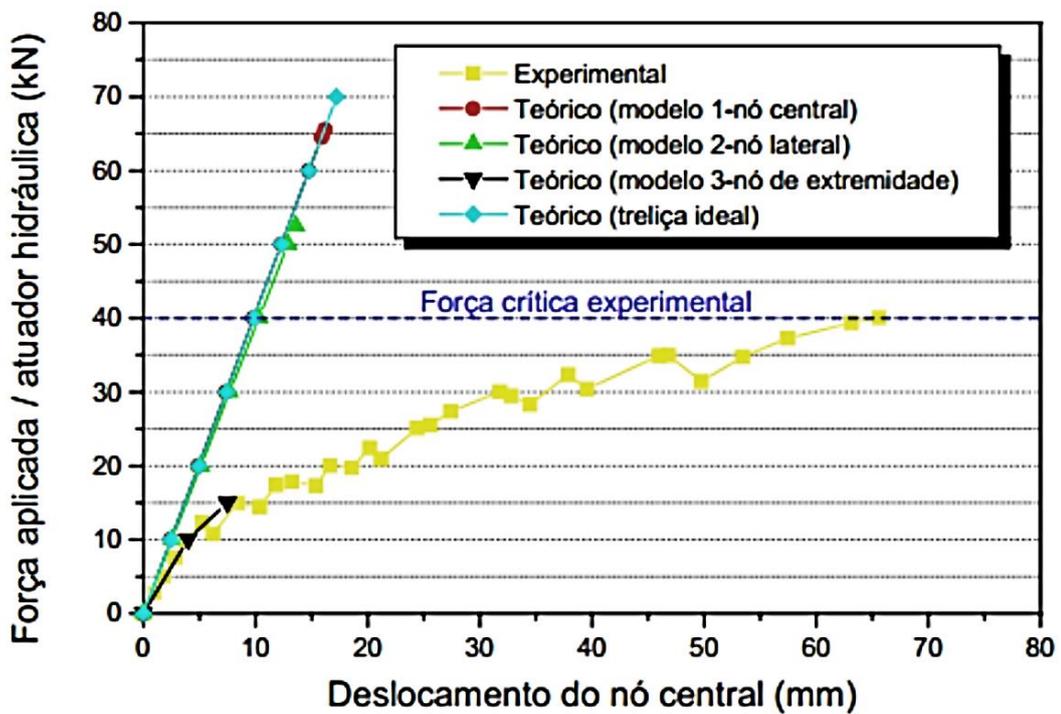


Figura 2.29 - Deslocamento teórico e experimental do nó Central (Vendrame, 2002)

Observa-se na Figura 2.29 que os resultados experimentais não coincidem com os resultados numéricos. Em relação ao tipo de conexão estudada (nó típico), o autor conclui que a rigidez do nó tem influência fundamental na distribuição dos esforços nos elementos e que os modelos teóricos convencionais não são capazes de reproduzir o modo de colapso observado, caracterizado pela rotação excessiva dos nós e plastificação na região amassada dos tubos.

2.2.3. Pesquisa em estruturas com ligação típica por Souza (2003)

Souza (2003), em sua tese de doutorado, estudou numérica e experimentalmente o efeito que tem os tipos de ligação entre os elementos de uma treliça espacial tubular, comparando assim, os três tipos de ligação mais comuns no Brasil: nó típico, nó de aço e nó com ponteira (ver Figura 2.30).

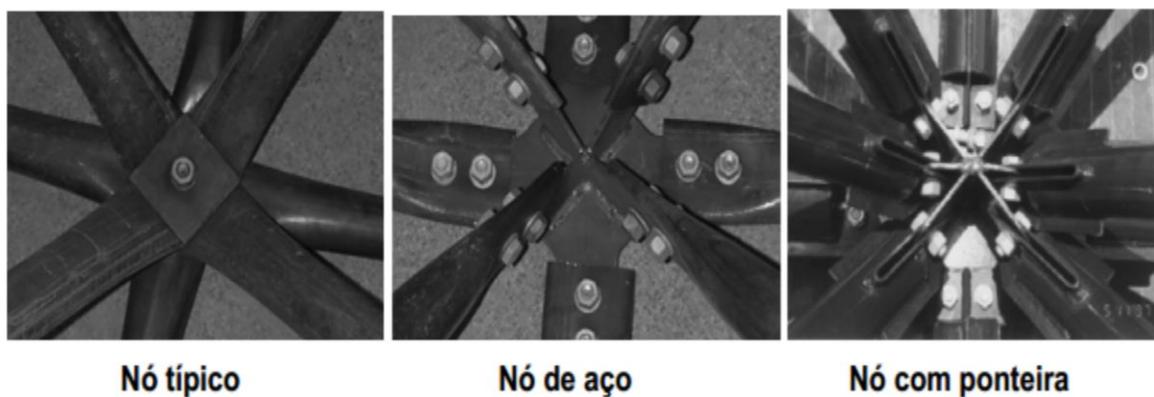


Figura 2.30 - Sistemas de ligações utilizados no Brasil (Souza, 2003)

Na parte experimental, Souza (2003), elaborou sete protótipos de treliças espaciais com vãos de 7,50x15,0m e módulos piramidais de 2,50x2,50m e 1,50m de altura, tal como indica a Figura 2.31. Foram utilizados tubos em aço tipo ASTM A570; chapas de reforço nos nós e parafusos do tipo ASTM A325. O carregamento foi aplicado nos dez nós centrais da camada inferior por meio de atuadores hidráulicos.

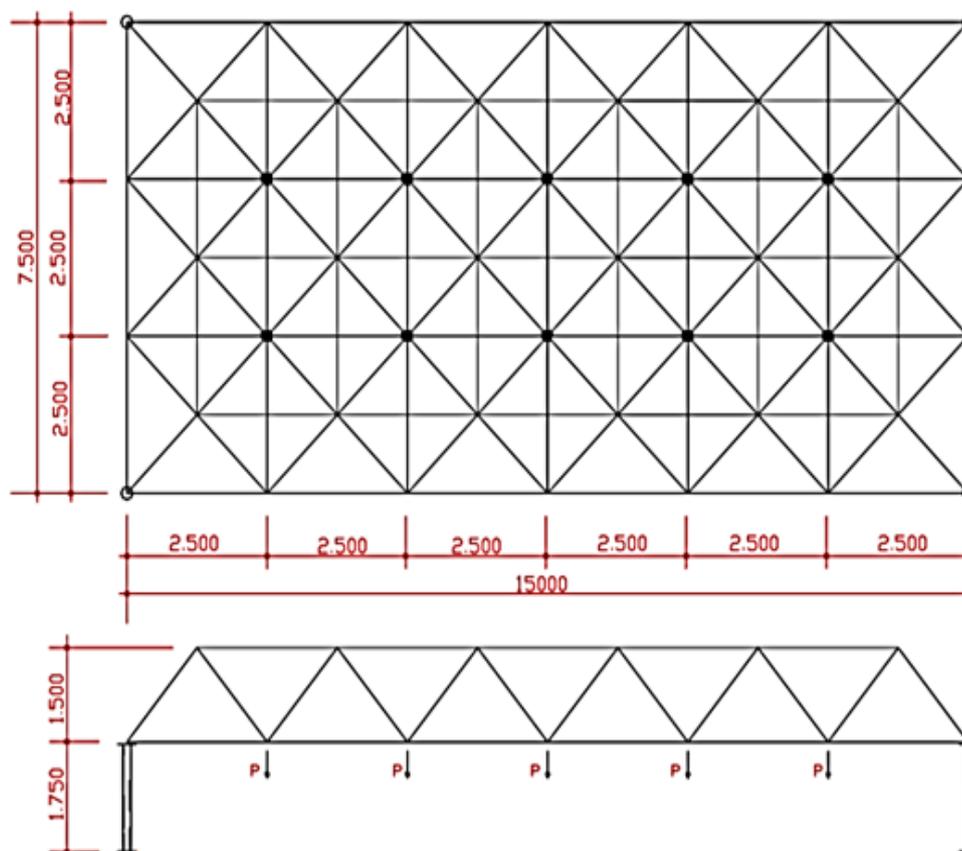


Figura 2.31 - Esquema dos protótipos, cotas em m (Souza, 2003)

As treliças espaciais são diferenciadas pelo tipo de ligação entre barras, seção das diagonais de apoio e a existência ou não de reforço no nó típico. Para todos os protótipos foram utilizados tubos de seção circular $\phi 76 \times 2,0 \text{ mm}$ nos banzos e $\phi 60 \times 2,0 \text{ mm}$ ou $\phi 88 \times 2,65 \text{ mm}$ nas diagonais. Um resumo dos ensaios realizados é apresentado na seguinte tabela.

Tabela 2.3 - Resumo dos ensaios a serem realizados (Souza, 2003)

| MODELO | LIGAÇÃO | DIAG. APOIO | Observação |
|--------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| TE1 | Nó típico | $\phi 60 \times 2,0$ | |
| TE2 | Nó típico | $\phi 88 \times 2,65$ | |
| TE3 | Nó típico | $\phi 88 \times 2,65$ | Nós de aço nas diagonais de apoio |
| TE3-1 | Nó típico | $\phi 88 \times 2,65$ | Nós de aço nas diagonais de apoio |
| TE4 | Nó de aço | $\phi 88 \times 2,65$ | |
| TE4-1 | Nó de aço | $\phi 88 \times 2,65$ | |
| TE5 | Nó aço Chapa de ponteira | $\phi 88 \times 2,65$ | |

O protótipo da treliça espacial já montado é apresentado na Figura 2.32, o qual se encontra apoiado em seus 4 cantos em colunas rígidas de aço. A configuração desta treliça foi igual para os sete protótipos, diferenciando-se entre si pelo tipo de ligação.

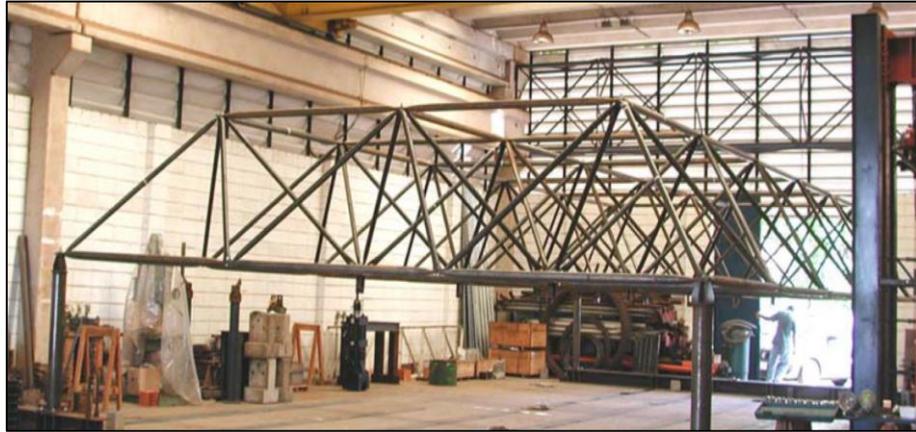


Figura 2.32 - Vista da treliça após montagem (Souza, 2003)

No estudo numérico, Souza (2003) utilizou elementos de casa (Shell) e de barra (Beam) para modelar os elementos da treliça espacial no software ANSYS. As extremidades amassadas dos tubos que compõem o nó típico foram modeladas com elementos de casca e somente foi incluído um destes nós na treliça espacial no nó 25 (ver Figura 2.33) os demais elementos e ligações foram modelados com elementos tipo barra.

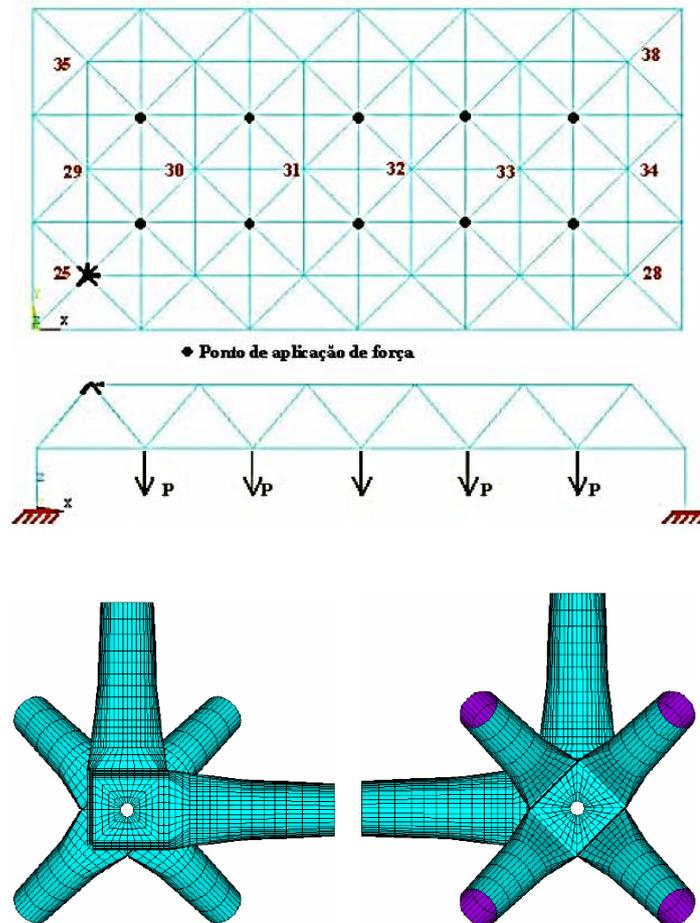


Figura 2.33 - Numeração de nós / modelagem do nó treliça TE1 (Souza, 2003)

Com a finalidade de simular de modo mais realista o comportamento do nó típico, foram incluídos elementos de contato entre as três extremidades amassadas superiores (ver Figura 2.34).

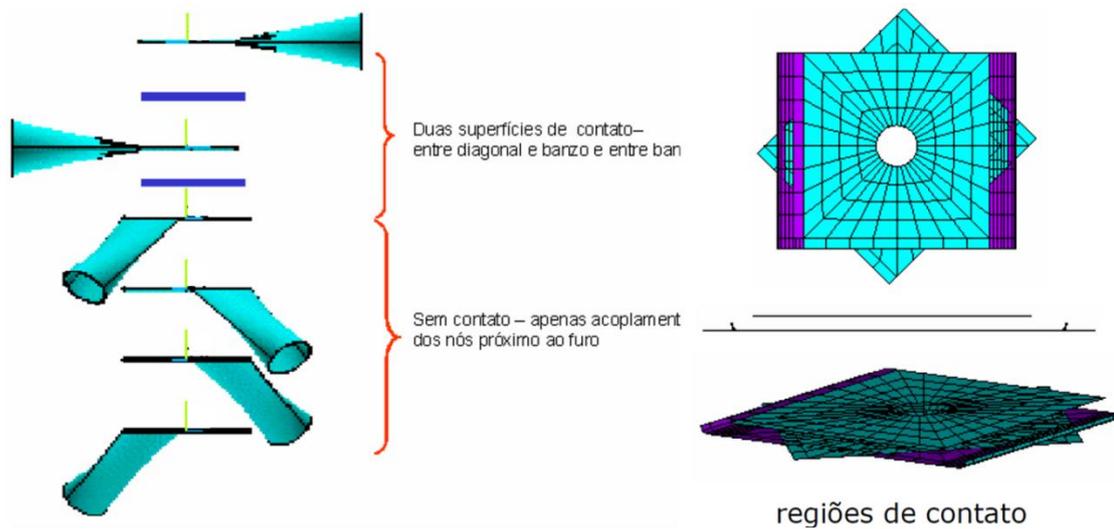


Figura 2.34 - Superfícies de contato adotadas na modelagem (Souza, 2003)

O modelo constitutivo adotado para o material foi um multilinear (ver Figura 2.35) com encruamento positivo e resistência ao escoamento equivalente aos valores médios obtidos em ensaios de caracterização do material.

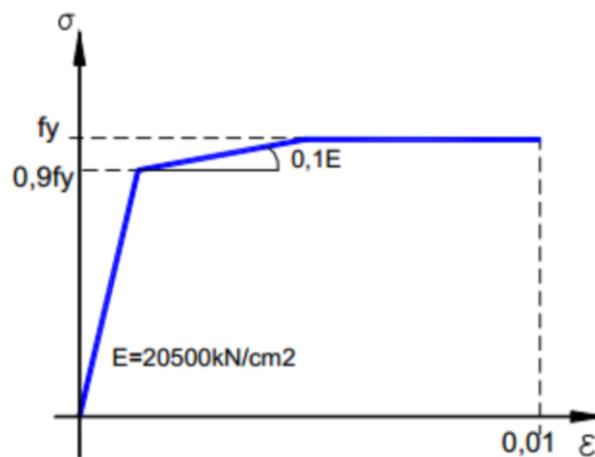


Figura 2.35 - Modelo constitutivo para análise do nó típico (Souza, 2003)

Na Figura 2.36 apresenta-se a distribuição dos deslocamentos verticais para uma força de 101 kN sub a treliça TE1, onde se observa maiores deslocamentos perto do nó onde foi inserido o nó típico. Os resultados dos deslocamentos obtidos numérica e experimentalmente chegam a diferir em quase um 50%, que pode ser atribuída ao fato de se ter modelado apenas um nó.

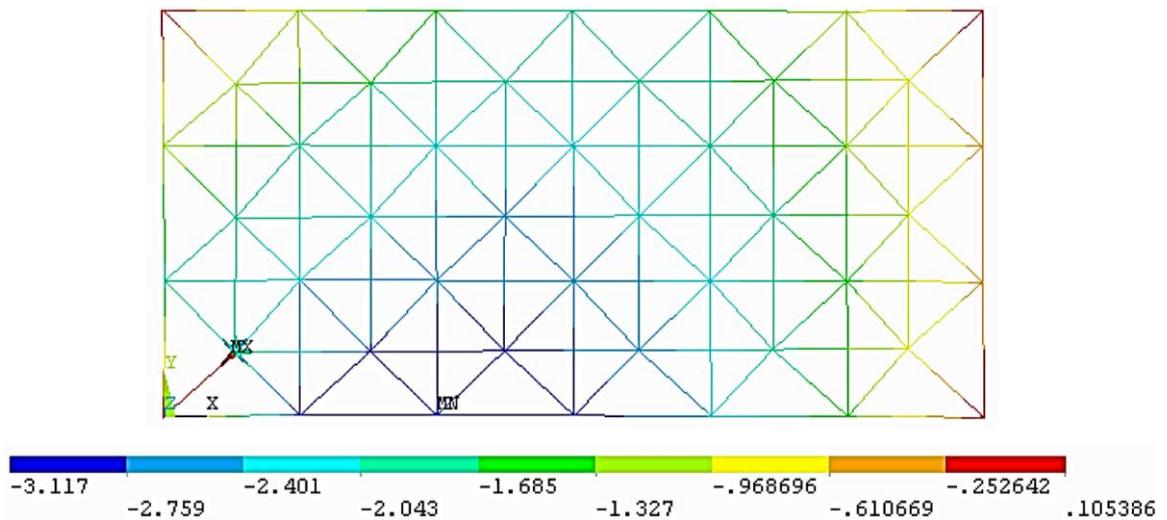


Figura 2.36 - Deslocamentos verticais (cm), Força aplicada = 101 kN (Souza, 2003)

Devido aos deslocamentos (e deformações) excessivos observados no ensaio experimental para a treliça espacial com nó típico (TE1), Souza (2003) fez mais uma análise numérica e desta vez incluindo chapas de reforço no nó típico (ver Figura 2.37).

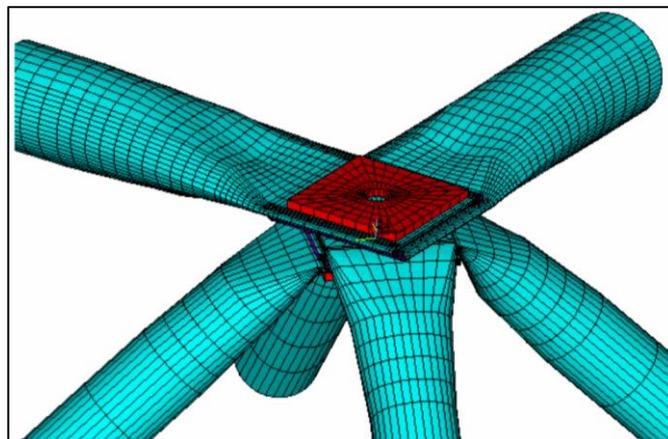


Figura 2.37 - Nó com chapa cobrejuta-TE1 (Souza, 2003)

Os resultados apresentam-se em forma gráfica na Figura 2.38, onde se relaciona a força versus o deslocamento vertical para o ensaio experimental, análise teórica sem chapas de reforço e análise teórica com chapa de reforço para protótipo da treliça espacial TE1.

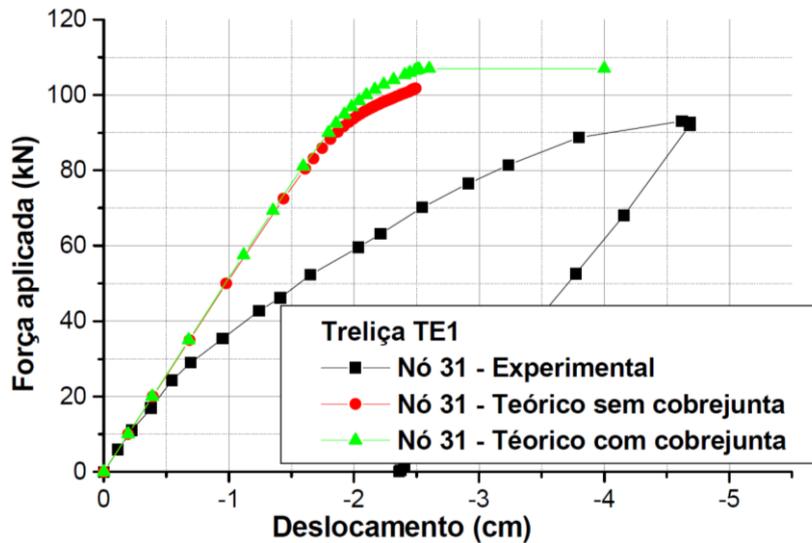


Figura 2.38 - Deslocamentos teóricos e experimentais (TE1) (Souza, 2003)

Nas conclusões feitas por Sousa (2003) sugere-se fazer novos estudos para melhorar a configuração do nó típico com a intenção de aumentar a capacidade das estruturas já existentes dimensionadas com este sistema, mas para estruturas novas Souza (2003) recomenda optar por outro sistema de ligação como o nó de aço ou o nó com chapa de ponteira.

2.2.4. Pesquisa em estruturas com ligação típica por Freitas (2008)

Freitas (2008), em sua tese de doutorado desenvolvida na universidade de Brasília, estudou numérica e experimentalmente o efeito que tem a correção da excentricidade, nas conexões das treliças espaciais tubulares com extremidades amassadas sob carregamento estático e cíclico, comparando assim, três tipos de treliças espaciais com a seguinte configuração na conexão: ligação típica (ver Figura 2.39); ligação típica com distanciador (ver Figura 2.40) e ligação típica com distanciador e chapas de reforço (ver Figura 2.41).



Figura 2.39 - Ligação típica (LTE) (Freitas, 2008)



Figura 2.40 - Ligação típica e distanciador (LTDE) (Freitas, 2008)



Figura 2.41 - Ligação típica, distanciador e chapas de reforço (LTDCE) (Freitas, 2008)

Para determinar experimentalmente o desempenho das ligações anteriores (LTE, LTDE, LTDCE), Freitas (2008) elaborou três protótipos de treliças espaciais para cada ligação, tal como indica a Figura 2.42. Estas treliças espaciais estão compostas por tubos de aço A36 de seção circular, além disso, dependendo do tipo de ligação, também fazem parte do protótipo espaçadores de aço e chapas de reforço nos nós da estrutura.



Figura 2.42 - Protótipo da treliça espacial (Freitas, 2008)

A treliça espacial está apoiada em suas quatro esquinas e o carregamento foi aplicado no nó central, por meio de um atuador hidráulico em sucessivos passos de carga. As dimensões e o tipo de tubos utilizados para todos os protótipos das treliças espaciais se mostram na Figura 2.43.

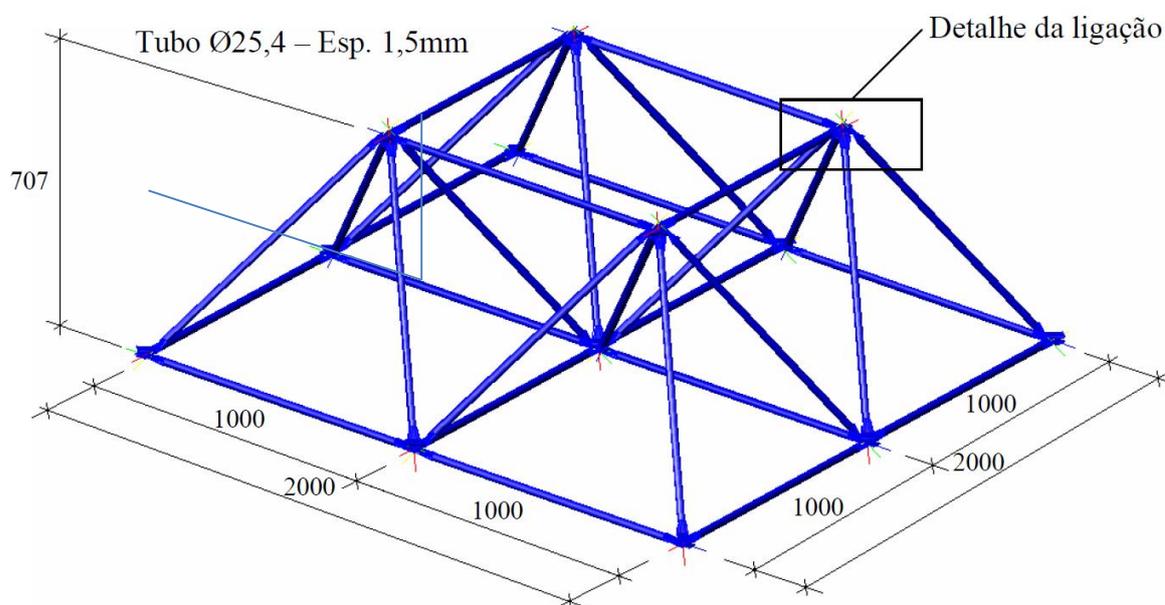


Figura 2.43 - Dimensões da treliça espacial (Freitas, 2008)

Os resultados experimentais dos deslocamentos verticais do nó central são apresentados na Figura 2.44. Nesta figura se mostra as medias dos resultados para cada um dos três tipos de ligações estudadas por Freitas (2008). Claramente se observa que a ligação LTDCE apresenta menores deslocamentos e suporta mais carregamento (ponto 3 da figura – carga de 42kN) que as ligações LTDE e LTE, que atingem respectivamente 38kN e 36kN (pontos 2 e 1 da figura). Freitas (2008) nota ainda que o ponto 4 (carga de 25kN) da curva correspondente a ligação LTE apresenta deformações excessivas podendo ser considerado o ponto de carga máxima que a estrutura com LTE pode suportar. Freitas (2008) conclui que devido à correção da excentricidade (mediante um espaçador de aço) junto com um reforço do nó (em chapas de aço, ligação LTDCE), a carga a ser aplicada na treliça (42kN) pode ser até 68% maior em relação a carga de colapso da treliça (25kN) sem a chapa de reforço e sem espaçador (ligação LTE) – $100 \times (42 - 25) / 25 = 68\%$.

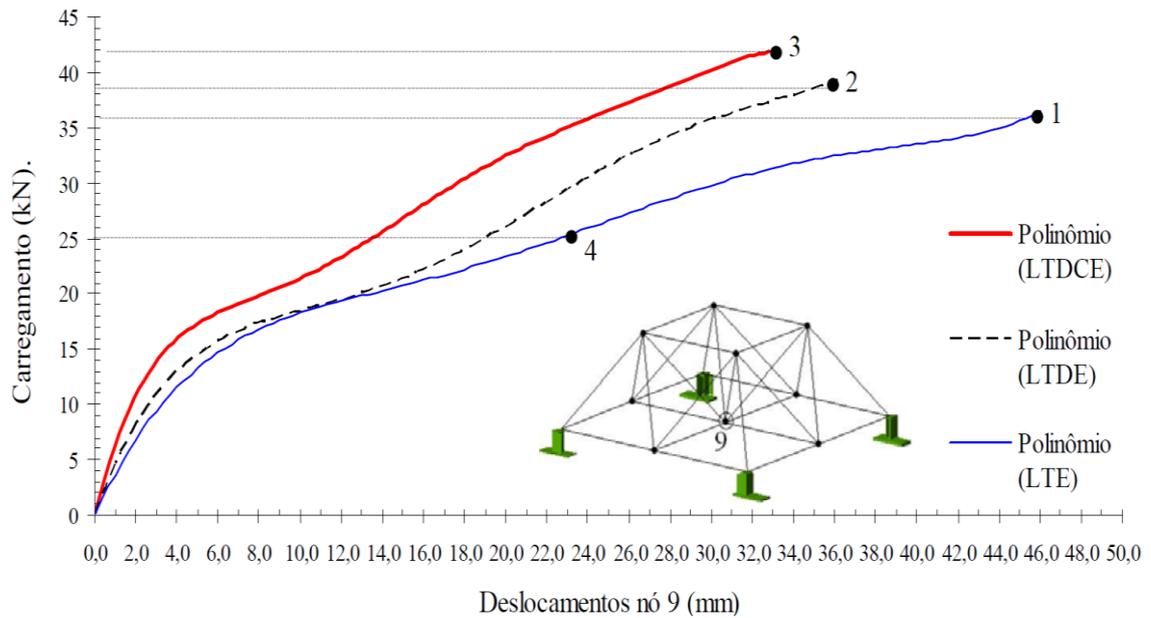


Figura 2.44 - Diagrama carregamento versus deslocamento vertical (nó 9) (Freitas, 2008)

No estudo numérico, Freitas (2008) utilizou o software ANSYS para fazer análises numéricas no regime plástico, utilizando assim, elementos tipo casca (Shell) em todos os membros que compõem a treliça (ver Figura 2.45).

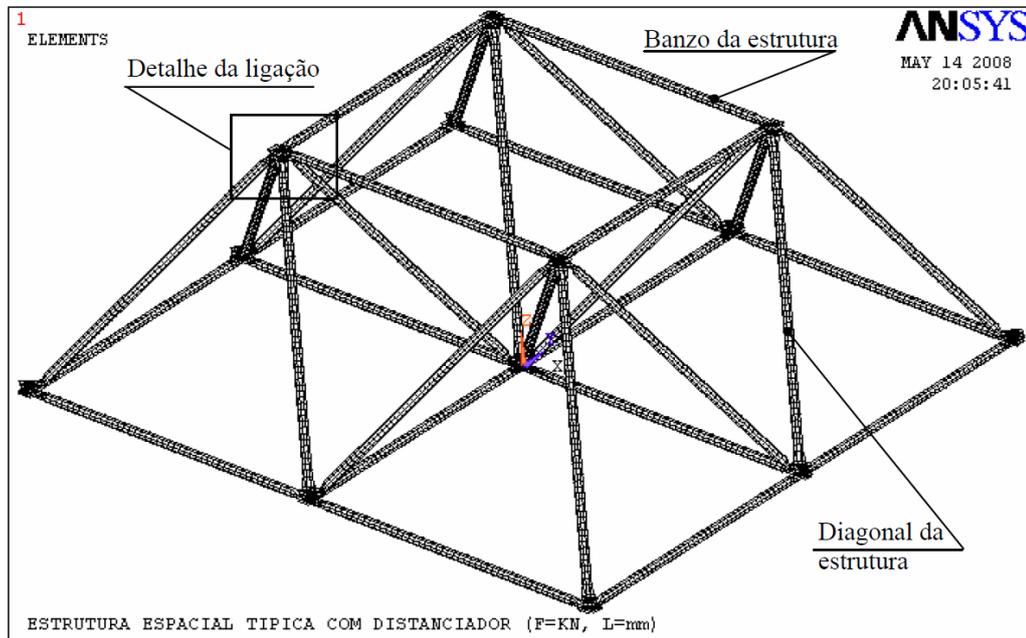


Figura 2.45 - Treliza espacial com ligação LTDC (Freitas, 2008)

Um detalhe da ligação é apresentado na Figura 2.46, onde se observa o tipo de malha utilizada e o tipo de material que foi atribuído a cada elemento.

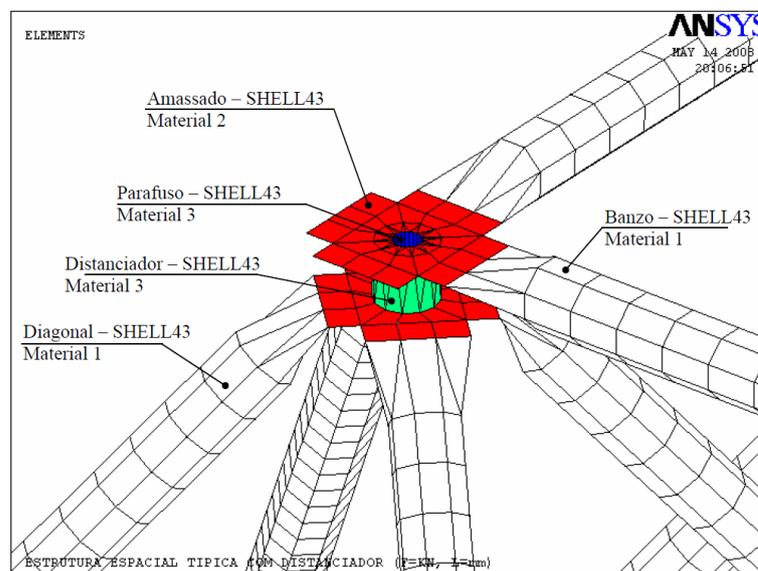


Figura 2.46 - Detalhe da ligação com nó típico, distanciador e cobre junta (Freitas, 2008)

Para os parafusos e distanciadores Freitas (2008) adotou um material elástico com módulo de elasticidade de 205000MPa e coeficiente de Poisson de 0,3, argumentando o fato de que estes não apresentaram deformações significativas nos ensaios experimentais. Para os elementos dos banzos e diagonais foram adotados os resultados do ensaio de caracterização do material (material tipo 1) que apresenta o módulo de elasticidade do aço de 205000MPa, tensão de escoamento de 300 MPa e coeficiente de Poisson de 0,3. Freitas (2008) para obter resultados condizentes com os valores experimentais fez diversas calibrações nos diagramas tensão vs deformação (ver Figura 2.47). Para determinar o comportamento do material das extremidades amassadas dos banzos e diagonais (material tipo 2), Freitas (2008) calibrou várias vezes o gráfico da Figura 2.48 até que o resultado do deslocamento da estrutura com nó típico computacional convergisse para o resultado experimental.

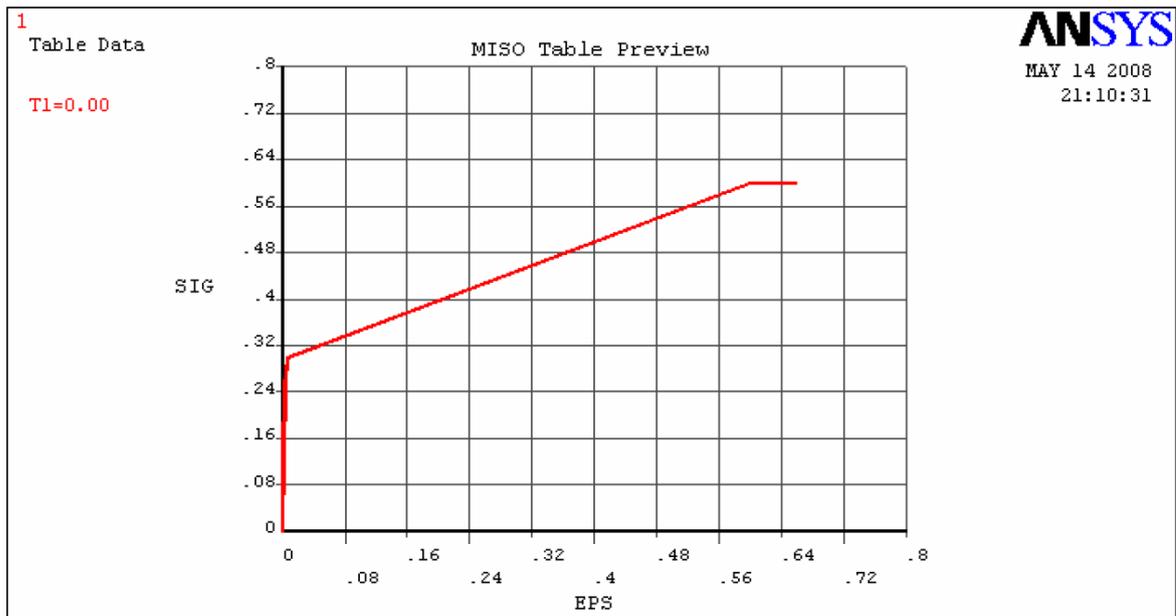


Figura 2.47 - Comportamento físico do material tipo 1 (kN/mm^2) vs deformação (EPS) (Freitas, 2008)

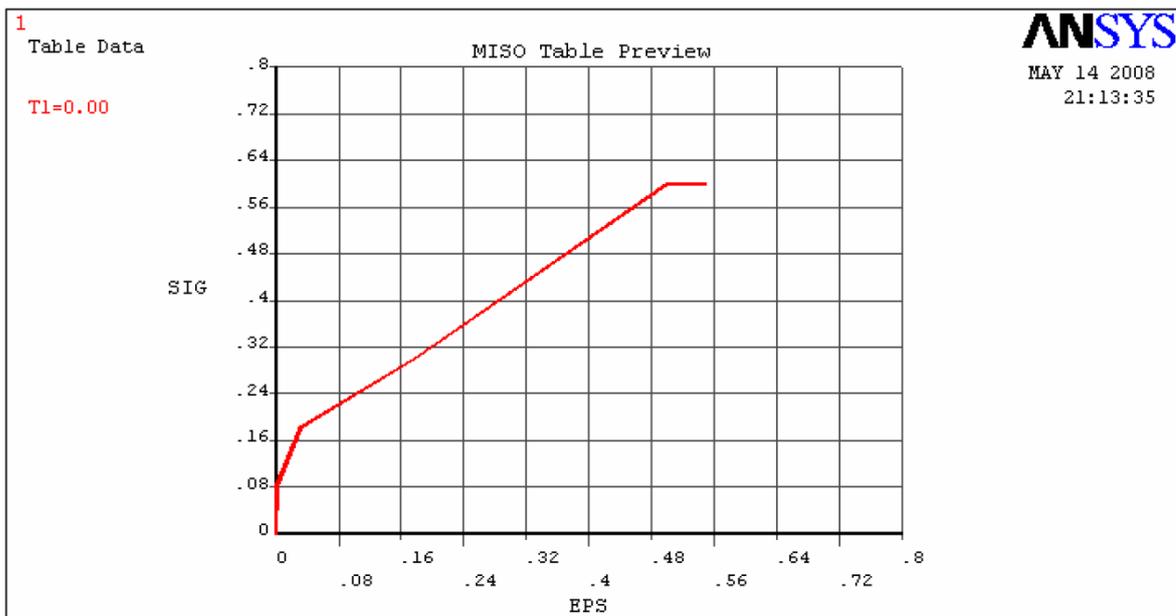


Figura 2.48 - Comportamento físico do material tipo 2 (kN/mm^2) vs deformação (EPS) (Freitas, 2008)

Os resultados da análise numérica são apresentados na Figura 2.49, onde estão indicados os diagramas do carregamento versus deslocamento do modelo experimental e numérico. Na Figura 2.50 se apresenta a deformada da ligação para o carregamento final para esta análise numérica.

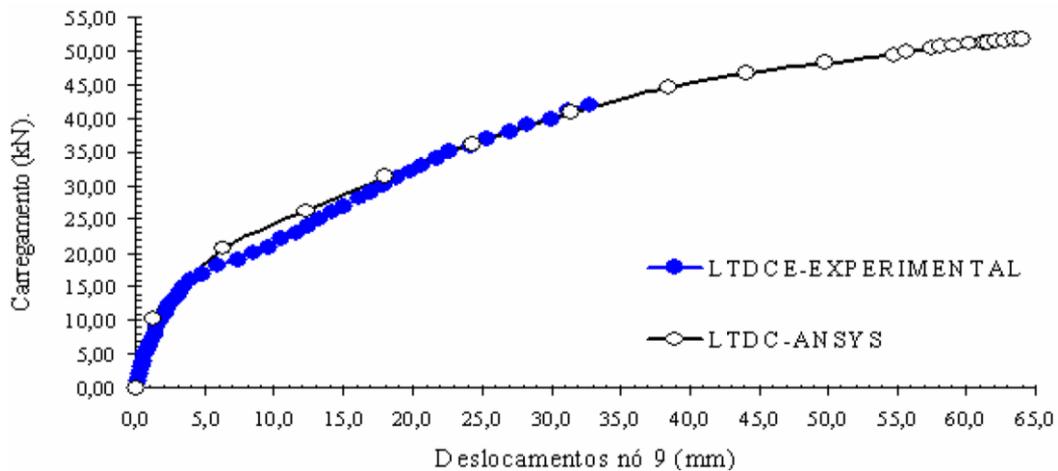


Figura 2.49 - Deslocamento do nó central devido a carga aplicada (LTDC) (Freitas, 2008)

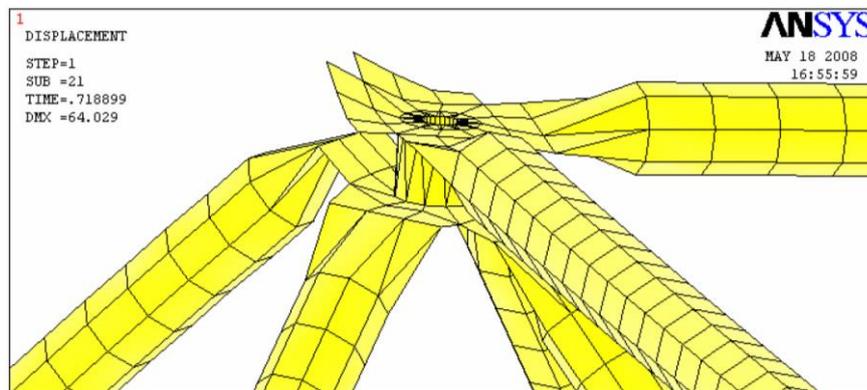


Figura 2.50 - Deformada da ligação para o carregamento final (LTDC) (Freitas, 2008)

Atendendo uma das sugestões de Freitas (2008) de fazer um estudo com espaçadores de material distinto ao aço, neste presente trabalho de dissertação de mestrado foram construídos protótipos de treliças espaciais iguais às que Freitas (2008) utilizou, mudando unicamente o material dos espaçadores de aço para madeira, isto com o fim de ter um referencial para a comparação do comportamento da treliça espacial com diferentes matérias para a confecção dos espaçadores (distanciador).

2.2.5. Pesquisa em estruturas com ligação típica por Freitas (2012)

Freitas em 2012 publicou um artigo na ICSR com seus resultados mais recentes, onde elaborou um protótipo de treliça espacial maior (ver Figura 2.51) que constitui um protótipo ampliado em relação ao protótipo elaborado em sua tese de doutorado, mencionado no item anterior. Isto com o fim de ratificar a eficiência da ligação que Freitas propôs no 2008 (ligação típica com espaçador e chapas de reforço). O atual estudo feito por Freitas (2012) contém uma análise numérica e ensaios experimentais de uma treliça espacial tubular com vãos de 6,0x9,0m, altura

de 0,94 m e uma inclinação de 45° nas diagonais. Todos os membros tubulares da treliça espacial têm um diâmetro de 38 mm com 1,20 mm de espessura de parede. Os tubos são de aço MR250 com as seguintes propriedades: tensão de escoamento, 250 MPa; tensão última, 400MPa; módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson 205000 MPa e 0,3 respectivamente. A altura calculada dos espaçadores foi de 28 mm e as placas de reforço nas conexões têm uma espessura de 4,76 mm.

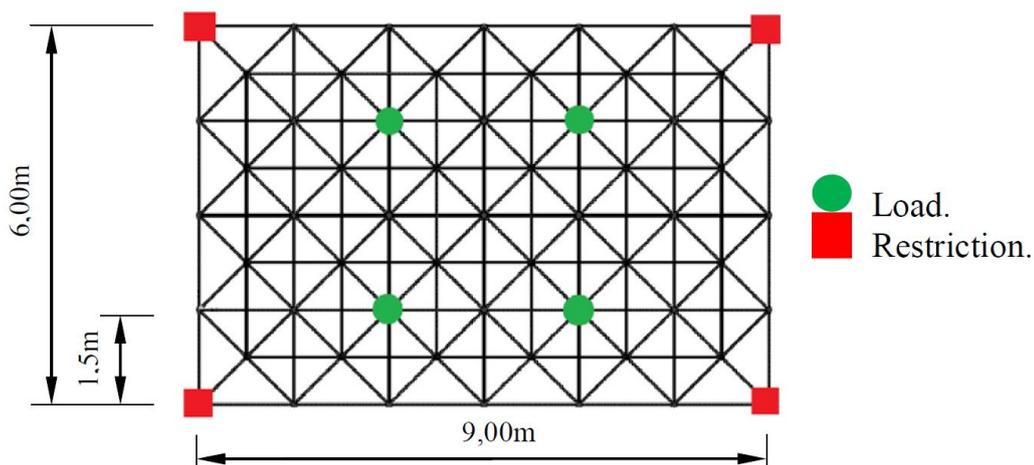


Figura 2.51 - Esquema dos protótipos da treliça espacial (Freitas, 2012)

Para a análise numérica foi utilizado o programa de análise estrutural SAP2000 (referência), onde foi modelada a treliça espacial (ver Figura 2.52). Dois tipos de elementos finitos da biblioteca do programa SAP2000 foram usados para a modelagem numérica; o elemento “Frame” e o elemento “Shell”.

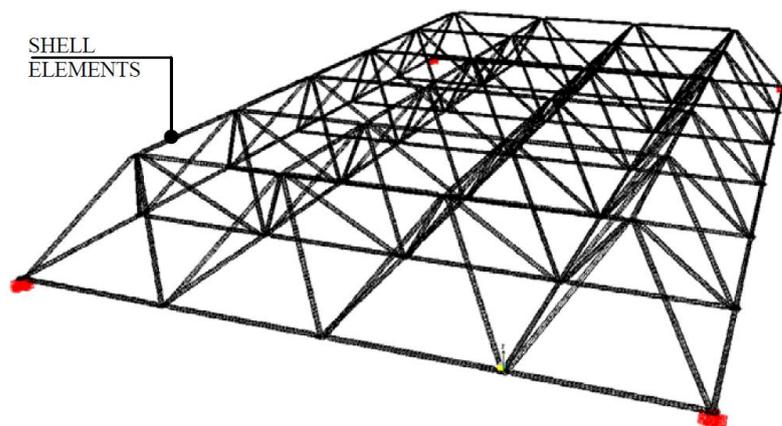


Figura 2.52 - Modelo da treliça espacial (Freitas, 2012)

Os elementos “Shell” foram usados para modelar as conexões e a geometria dos tubos. Os elementos “Frame” foram usados para modelar os parafusos e os espaçadores. Duas análises

numéricas foram feitas; a primeira foi usando a ligação típica e a segunda usando a ligação típica com modificações (ver Figura 2.53).

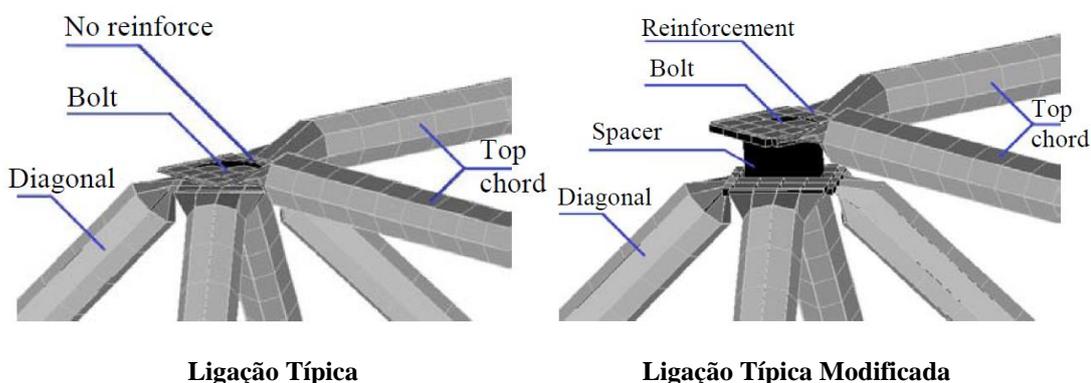


Figura 2.53 - Detalhe da ligação típica vs. ligação típica modificada (Freitas, 2012)

A carga total aplicada na treliça espacial foi de 27 kN, que dividida entre os quatro pontos de aplicação da carga resultaria em 6,75 kN por nó. A Figura 2.54 mostra o deslocamento no centro da treliça espacial. Para o modelo com ligação típica o deslocamento vertical foi de 3,38 cm e para o modelo com ligação típica com modificações (espaçador e chapas de reforço) foi de 1,21 cm, obtendo assim, uma redução de 68% no deslocamento vertical na análise numérica da treliça espacial com espaçador comparada com a treliça espacial com ligação típica.

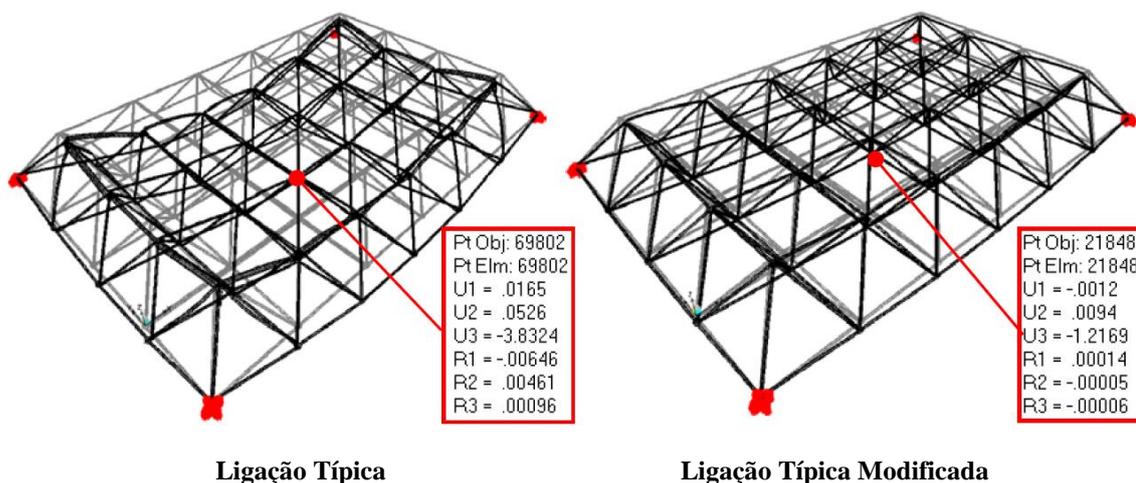


Figura 2.54 - Deslocamentos (cm) ligação típica vs. ligação modificada (Freitas, 2012)

A Figura 2.55 mostra as distribuições das tensões de Von Mises para cada ligação (ligação típica e ligação típica modificada) na qual é possível observar que na ligação típica existe uma maior concentração de tensões que na ligação típica modificada.

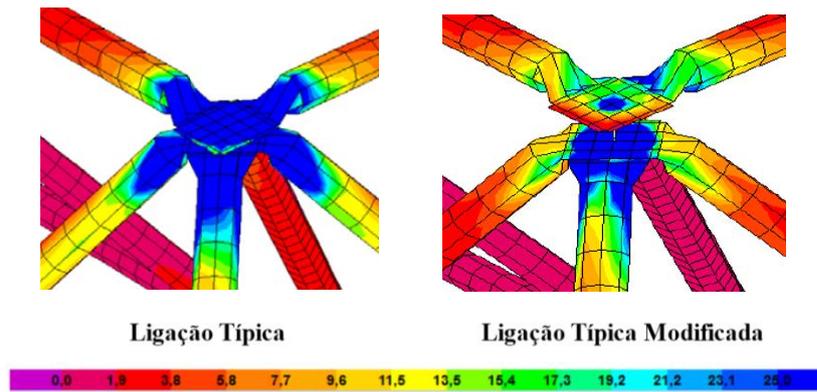


Figura 2.55 - Tensões Von Mises (kN/cm^2) ligação típica vs. modificada (Freitas, 2012)

Freitas (2012), na parte experimental de sua pesquisa, elaborou dos protótipos de treliça espacial; o primeiro protótipo foi usando ligação típica e o segundo usando ligação típica modificada (ver Figura 2.56). Cada protótipo tem uma base retangular de $6,0 \times 9,0\text{m}$ e $0,94\text{m}$ de altura tal como se indicou na Figura 2.51. As dimensões e propriedades do material foram especificadas anteriormente.

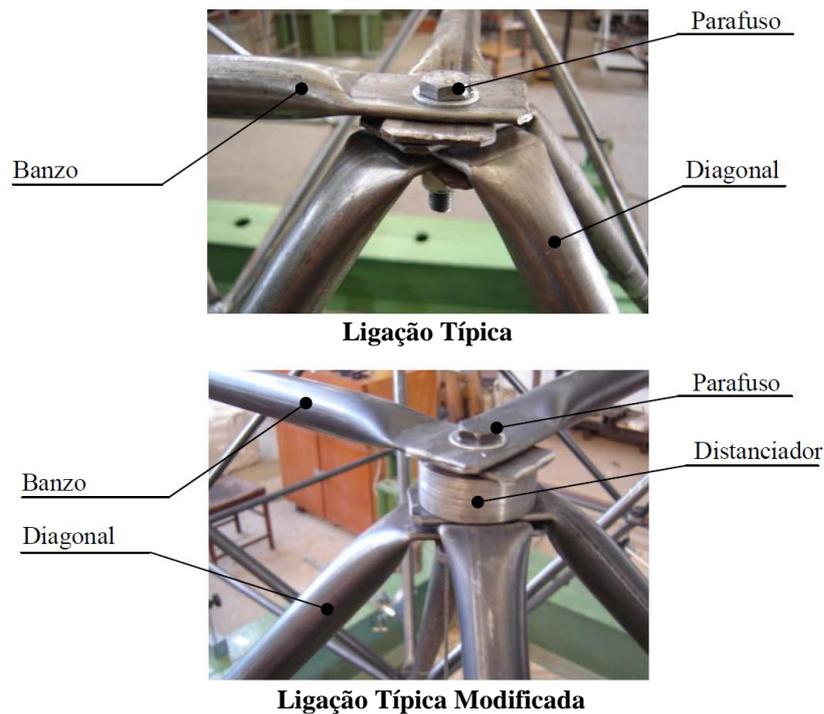


Figura 2.56 - Ligação típica vs. ligação típica modificada (Freitas, 2012)

Os protótipos foram ensaiados no laboratório de estruturas da Universidade Federal do Ceará. A treliça espacial se encontra apoiada em seus quatro cantos sobre colunas rígidas de aço (ver Figura 2.57). O carregamento (estático) foi aplicado usando atuadores hidráulicos com incrementos de carga de 1 kN por vez.

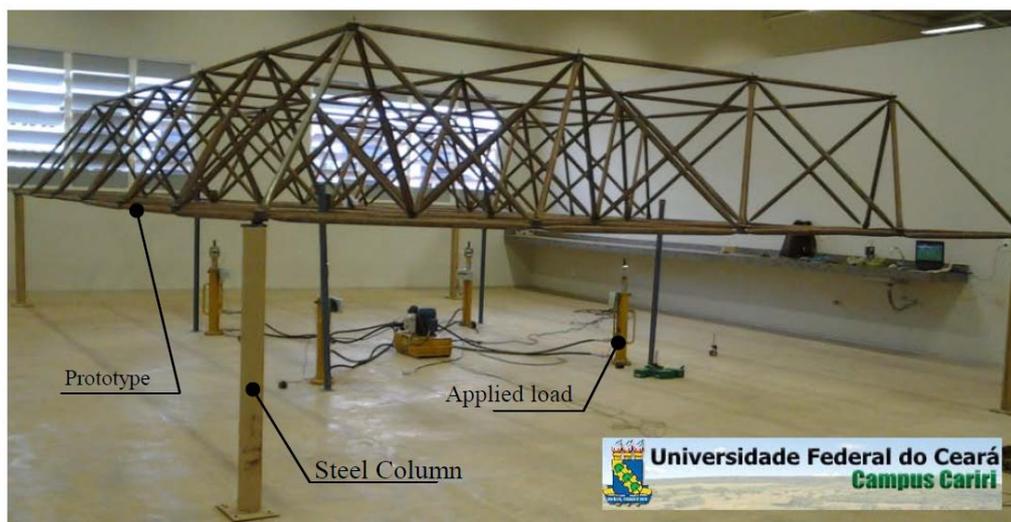


Figura 2.57 - Protótipo da treliça espacial (Freitas, 2012)

Nos resultados dos ensaios o protótipo de treliça espacial com ligação típica colapsa localmente com uma carga de 6 kN por nó (24 kN em total). Este colapso foi caracterizado pela excessiva deformação das conexões. No protótipo de treliça espacial com ligação típica modificada, o colapso foi caracterizado pela flambagem dos membros tubulares (ver Figura 2.58) com uma carga de 9,5 kN por nó (38 kN no total), ou seja, que o protótipo com ligação típica modificada resistiu um 56% mais de carga que o protótipo com ligação típica, concluindo assim a maior eficácia da ligação com as modificações propostas.



Ligação Típica
Carga de colapso = 24 kN



Ligação Típica Modificada
Carga de Colapso = 38 kN

Figura 2.58 - Colapso da ligação típica vs. ligação típica modificada (Freitas, 2012)

3. FUNDAMENTOS TEORICOS

Neste capítulo aborda-se aspectos preliminares para o início das análises numéricas e ensaios experimentais. Se faz uma revisão do estudo da excentricidade presente no nó típico, também, são apresentados diferentes modelos constitutivos que idealizam o comportamento dos elementos tubulares da treliça espacial quando estes são sometidos a forças de tração e a forças de compressão. As propriedades físicas da madeira utilizada também são apresentadas neste capítulo.

3.1. CORREÇÃO DA EXCENTRICIDADE DO NÓ TÍPICO

A correção da excentricidade da ligação típica foi estudada por Freitas (2008), na qual provou que ao corrigir a excentricidade no nó típico, aumenta consideravelmente a carga que pode ser imposta na estrutura. Esta correção faz coincidir os eixos centrais dos tubos das diagonais com os eixos centrais dos tubos dos banzos em um só ponto, tal como indica a Figura 3.1.

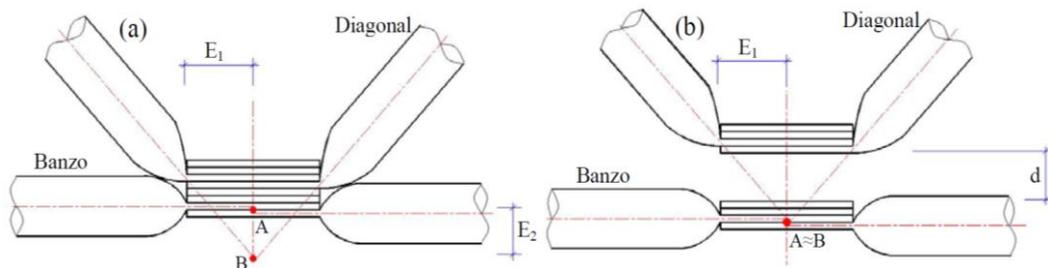


Figura 3.1 - excentricidade no nó típico (Freitas, 2008)

Na Figura 3.1 a excentricidade que deve ser corrigida é denominada “d” e o seu cálculo se faz utilizando trigonometria. Neste cálculo influenciam parâmetros como a espessura da ponta amassada do tubo (t_1 e t_2), que depende da espessura da parede do tubo, e a distância do início do amassamento até o eixo vertical do parafuso (E_1), como indica na Figura 3.2.

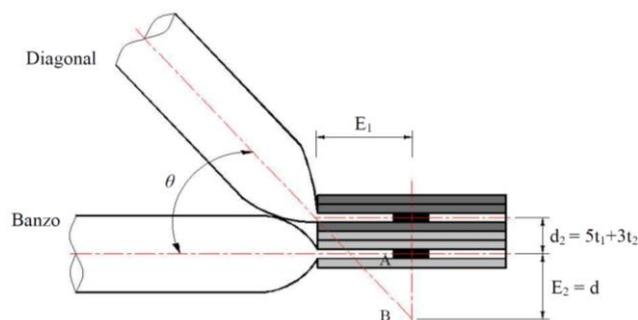


Figura 3.2 - Detalhe da ligação com tubos amassados (nó típico) (Freitas, 2008)

Além dos parâmetros anteriores, a altura (H) e o comprimento dos banzos (l), nos módulos piramidais da treliça espacial (ver Figura 3.3), também influenciam na excentricidade do nó típico.

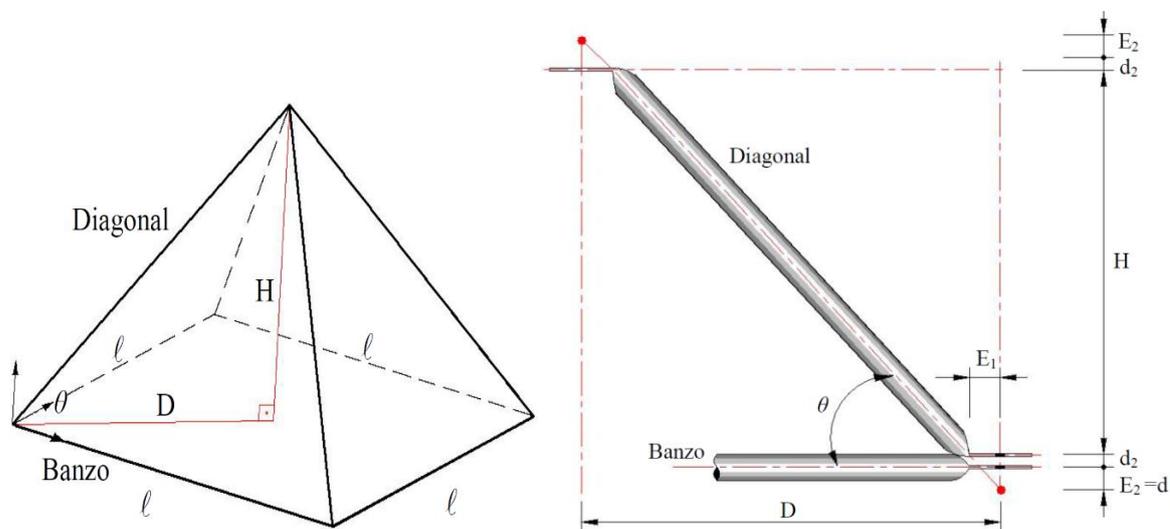


Figura 3.3 - Projeção vertical e horizontal do elemento da diagonal (Freitas, 2008)

Todos os parâmetros anteriores fazem parte da Equação 3.1, com a qual é calculada trigonometricamente a distância excêntrica que deve ser corrigida. A espessura do espaçador deve ser igual a esta distância para garantir a correção da excentricidade do nó. O processo de obtenção desta equação e maiores detalhes podem ser encontrados no trabalho de Freitas (2008).

$$d = \frac{2HE_1}{l\sqrt{2} - 4E_1} - 8t \quad (3.1)$$

3.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO AÇO

Os materiais que compõem a treliça espacial, nesta pesquisa, foram o aço para os tubos da treliça e a madeira para os espaçadores. Nas análises numéricas será necessário ter em conta não linearidades (física e geométrica), para representar melhor o comportamento dos elementos a tração e compressão da treliça espacial. O diagrama de tensão vs. deformação do aço é obtido facilmente mediante um ensaio de tração. Na Figura 3.4 se apresenta um comportamento típico do aço quando este é submetido a forças de tração.

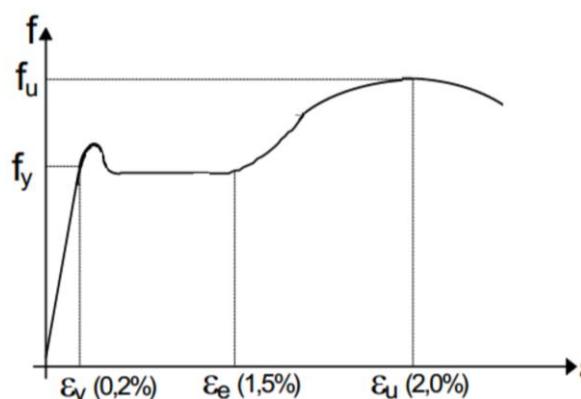


Figura 3.4 - Diagrama típico do aço, tensão vs. deformação (Souza, 1998)

Entretanto, segundo Souza (1998), para elementos submetidos a forças de compressão é um pouco mais complexo equacionar o comportamento das tensões vs. as deformações, pois dependendo da esbeltez e das condições de apoio do elemento comprimido, este pode até não atingir a tensão de escoamento (f_y) tornando-se instável por flambagem em uma tensão menor que (f_y) denominada tensão crítica (f_{cr}). A Figura 3.5 mostra o comportamento da tensão versus deformação para elementos comprimidos variando com a esbeltez.

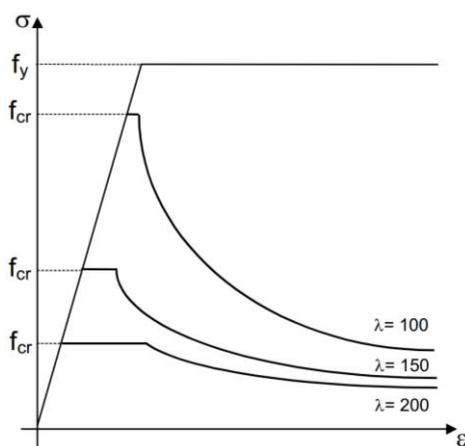
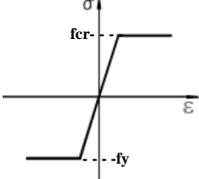
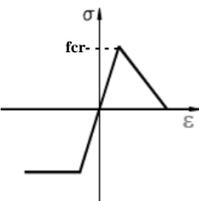
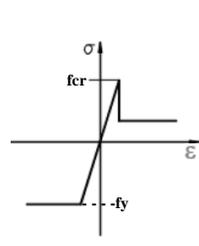
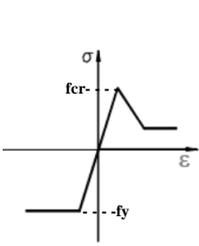


Figura 3.5 - Diagrama tensão vs. deformação, elementos comprimidos (Souza, 1998)

Outros pesquisadores como Supple-Collins (1981) e Madi (1984) apresentaram modelos constitutivos do material utilizados em análises não lineares de treliças espaciais em aço. Estes modelos constitutivos representam idealizações ou aproximações do comportamento real da relação tensão vs. deformação dos membros tubulares da treliça espacial, quando estes estão submetidos a forças de tração e a forças de compressão. Na Tabela 3.1 se faz um resumo de alguns dos modelos constitutivos propostos pelos autores mencionados anteriormente, onde o gráfico do primeiro quadrante corresponde a tensões de compressão e o gráfico do terceiro quadrante corresponde a tensões de tração.

Tabela 3.1 - Modelos constitutivos (compressão e tração)

| Modelo Constitutivo | Comportamento da relação tensão vs. deformação para elementos a compressão | Comportamento da relação tensão vs. deformação para elementos a tração |
|---|---|---|
|  | <p>Igual idealização para os elementos a tração, somente substitui-se a tensão de escoamento (f_y) pela tensão crítica de flambagem (f_{cr}).</p> | <p>A idealização é feita por meio de uma curva (terceiro quadrante) com duas etapas; a primeira é uma etapa onde as tensões se comportam linearmente com respeito as deformações, sendo o módulo de elasticidade (E) a inclinação da reta e a tensão de escoamento (f_y) o ponto final. a máxima tensão, a segunda etapa é uma reta com comportamento perfeitamente plástico.</p> |
|  | <p>As tensões se comportam linearmente com respeito as deformações com o módulo de elasticidade (E) como inclinação e até chegar a tensão crítica (f_{cr}) de flambagem para logo descer linearmente até um valor de tensão nula.</p> | |
|  | <p>A idealização é feita em três etapas; a primeira é uma etapa linear com inclinação “E” e ponto máximo “f_{cr}”, logo tem-se uma caída abrupta das tensões sem aumento das deformações e por último, tem-se um comportamento perfeitamente plástico.</p> | |
|  | <p>Diagrama multilinear de três etapas faz parte desta idealização, onde a primeira é uma face linear com inclinação “E” e ponto máximo “f_{cr}”, depois tem-se uma caída linear das tensões com respeito às deformações e finalmente apresentasse um comportamento perfeitamente plástico.</p> | |

3.3. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA MADEIRA

A madeira foi escolhida como o material alternativo ao aço, para fazer os espaçadores, por ser mais leve e ter um menor custo de produção e fabricação. Isto em grandes coberturas treliçadas pode ser de grande economia, já que estas grandes coberturas dependendo das dimensões e camadas poderiam ter centenas de espaçadores. Nos ensaios experimentais se utilizou madeira Maçaranduba, que é aproximadamente, sete vezes mais leve que o aço e a sua resistência à compressão e cisalhamento são bem altas. Na Tabela 3.2, encontram-se descritas as propriedades físicas para este tipo de madeira.

Tabela 3.2 - Características físicas da madeira em Maçaranduba (Paralelo à fibra)

| | | | |
|---|---------------------------|--|-------------------|
| Massa Volumétrica: No estado verde A 12% de humidade | MV verde MV12 Média | 1250 - 1300 1050 - 1200 1100 | Kg/m ³ |
| Retração linear: Tangencial Radial | (T%) (R%) | 9,5 - 11,2 7,0 - 7,5 | % |
| Retração volumétrica | (V%) | 20,5 | % |
| Coefficiente de retração volumétrica | P/ 1% humidade | -- | % |
| Anisotropia | (T/R) | 1,4 | -- |
| Resistências de ruptura: à compressão axial à tração axial à flexão estática | C12 T12 F12 | 88,0 - 105,0 135,0-145,0 190,0 - 246,0 | N/mm ² |
| Módulo de elasticidade (compressão) | E12 | 25000-30000 | N/mm ² |

4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O objetivo do programa experimental é determinar a viabilidade do uso dos espaçadores de madeira; tendo em conta isto foram ensaiadas três treliças espaciais, feitas de perfis tubulares de aço com as pontas dos tubos amassadas e espaçadores de madeira Maçaranduba. Além disto, nos nós da treliça espacial, utilizaram-se pequenas placas de aço para dar uma maior rigidez à conexão. O tipo de carregamento sob a treliça espacial foi estático com acréscimo em passos de cargas (a ser descritos mais a frente) até chegar ao colapso global. As dimensões e os materiais dos elementos que compõem as treliças espaciais neste trabalho são iguais aos elementos utilizados por Freitas (2008) diferenciando-se unicamente no material do espaçador, isto com o fim de se ter o mesmo referencial para comparações entre os espaçadores de aço utilizados por Freitas (2008) e os espaçadores de madeira estudados neste trabalho.

4.1. MATERIAIS UTILIZADOS NOS ENSAIOS

Os materiais utilizados nos ensaios se encontram definidos na Tabela 4.1. A geometria e as propriedades mecânicas de cada um destes elementos são definidas no seguinte item.

Tabela 4.1 - Materiais utilizados em cada ensaio

| Elemento | Dimensões (mm) | Primeiro Ensaio (und) | Segundo Ensaio (und) | Terceiro Ensaio (und) | Total (und) |
|--------------------|---------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|------------------------|
| Banzo | Ø25,4x1060 | 16 | 16 | 16 | 48 |
| Diagonal | Ø25,4x1076 | 16 | 16 | 16 | 48 |
| Espaçador | Ø50x20 | 13 | 13 | 13 | 39 |
| Parafuso Sextavado | Ø9,76x80 | 12 | 12 | 12 | 12* |
| Parafuso Sextavado | Ø9,76x120 | 1 | 1 | 1 | 3 |
| Porca | Ø10 | 26 | 26 | 26 | 26* |
| Chapas | 50*50*4,76 | 26 | 26 | 26 | 78 |
| Arruela | Ø10 | 26 | 26 | 26 | 26* |

*Elementos como os parafusos, porcas e arruelas foram reutilizados já que eles são elementos rígidos que não apresentaram deformação durante os ensaios.



Figura 4.1 - Elementos das treliças espaciais

4.2. GEOMETRIA DA TRELIÇA ESPACIAL

A geometria da treliça espacial se mostra na Figura 4.2, esta estrutura é composta por 32 tubos de aço A36 (MR 250), com 25,4 mm de diâmetro externo e uma espessura de parede de 1,50 mm. Dos 32 tubos, 16 são diagonais e 16 são banzos (12 inferiores e 4 superiores), além disto, fazem parte da estrutura: 13 espaçadores em madeira Maçaranduba, 26 chapas de reforço em aço ASTM A36 e 13 parafusos de aço ASTM A325. As dimensões da treliça espacial são: 2000 mm de largura por 2000 mm de comprimento com 707 mm de altura e um ângulo de $47,4^\circ$ entre os eixos das pontas amassadas das diagonais.

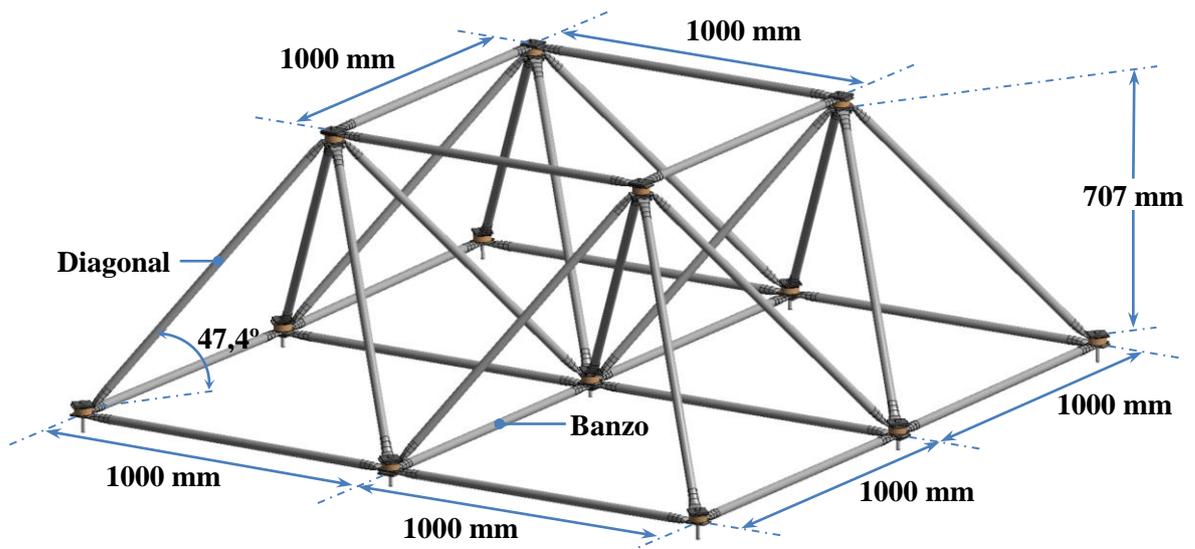


Figura 4.2 - Geometria da treliça espacial

A geometria de cada elemento que conformam a treliça espacial pode ser observada com maior detalhe nas seguintes figuras. O banzo tem um comprimento total de 1060 mm e um comprimento de 1000 mm entre os eixos dos furos de cada ponta, conforme mostra a Figura 4.3.

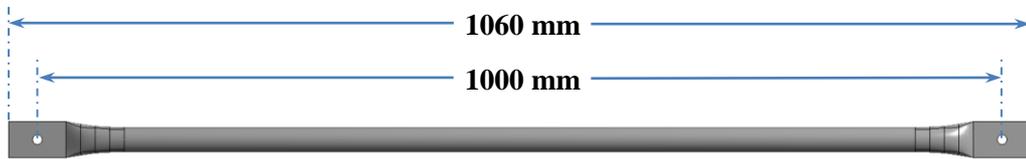


Figura 4.3 - Dimensões do banzo

A ponta amassada do tubo tem uma secção retangular, com 60 mm de comprimento por 37 mm de largura, uma espessura de 3 mm e um furo de 10 mm no centroide da secção, tal como indicam a Figura 4.4 e Figura 4.5.

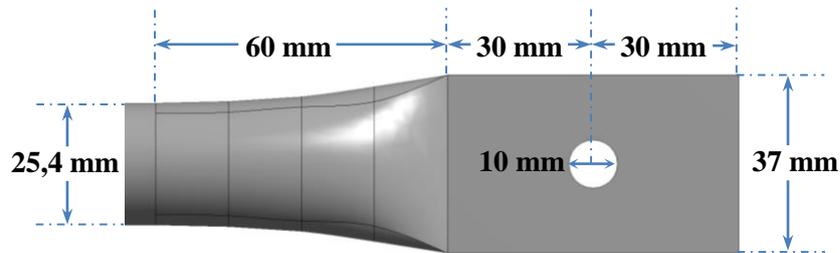


Figura 4.4 - Detalhe da ponta do banzo (Planta)

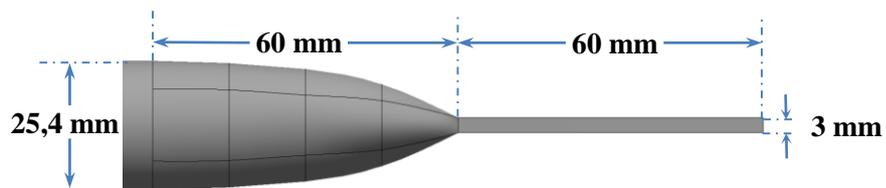


Figura 4.5 - Detalhe da ponta do banzo (Perfil)

A diagonal tem 1076 mm de comprimento de fora-fora incluindo as pontas dobradas, e 1016 mm de comprimento entre os eixos dos furos de cada ponta (ver Figura 4.6).

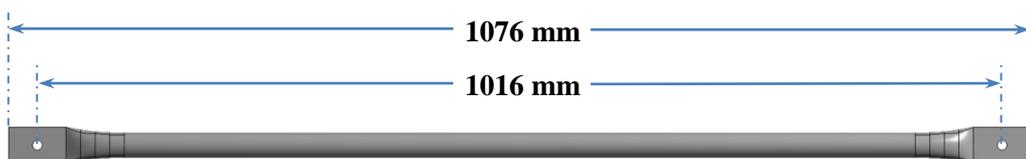


Figura 4.6 - Dimensões da diagonal

A dobra da ponta da diagonal tem um ângulo de $47,4^\circ$ medido desde o eixo da secção transversal da ponta amassada até o eixo do tubo, como indicam a Figura 4.7 e Figura 4.8.

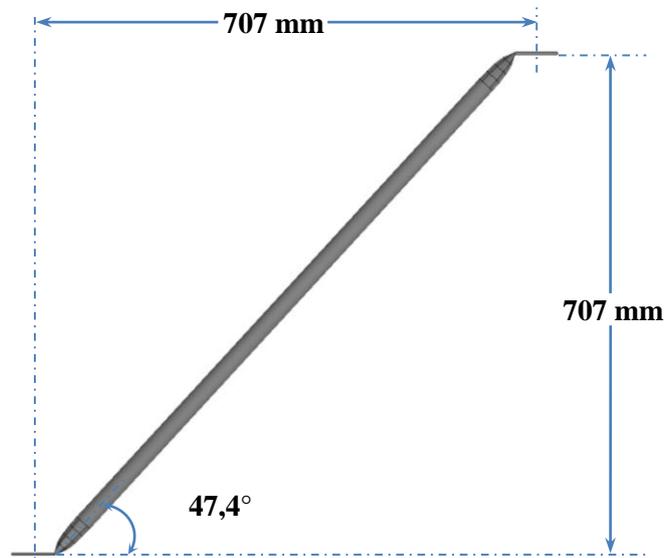


Figura 4.7 - Dimensões da Diagonal (Perfil)

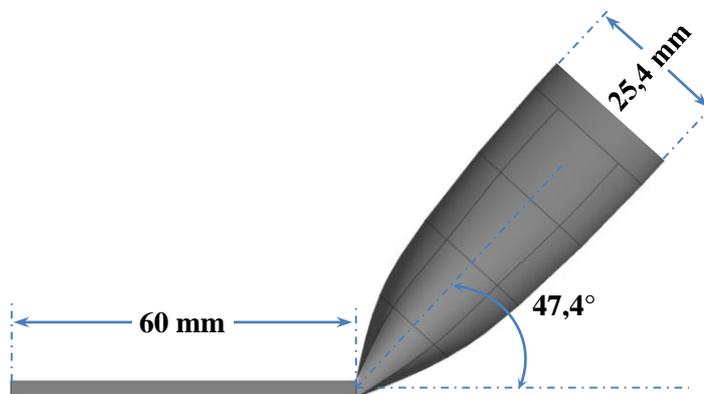


Figura 4.8 - Detalhe da ponta da diagonal (Perfil)

O espaçador é um cilindro de 50 mm de diâmetro por 20 mm de altura, com um furo de 10 mm no centro do espaçador (ver Figura 4.9). A altura do espaçador foi calculada usando a Equação 3.1 que foi descrita no capítulo anterior. Os parâmetros que fazem parte desta equação são: altura da treliça (H), espessura de parede do tubo (t), comprimento do banzo (l) e o valor da metade do comprimento da ponta amassada (E_1).

$$d = \frac{2HE_1}{\ell\sqrt{2} - 4E_1} - 8t = \frac{2 \times 707 \times 30}{1000 \times \sqrt{2} - 4 \times 30} - 8 \times 1,5 \Rightarrow d \cong 20\text{mm} \quad (4.1)$$

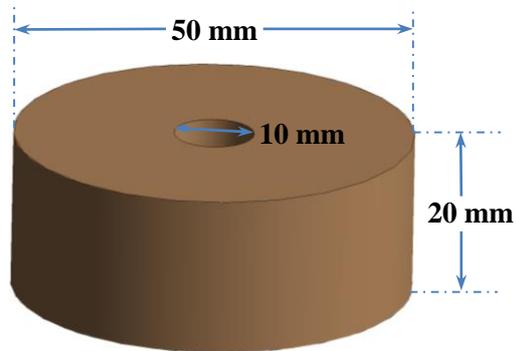


Figura 4.9 - Dimensões do espaçador

As chapas de reforço têm uma seção quadrada de 50x50 mm de lado e uma espessura de 4,76 mm (Ch# 3/16”) com um furo de 10 mm no centro da seção (ver Figura 4.10).

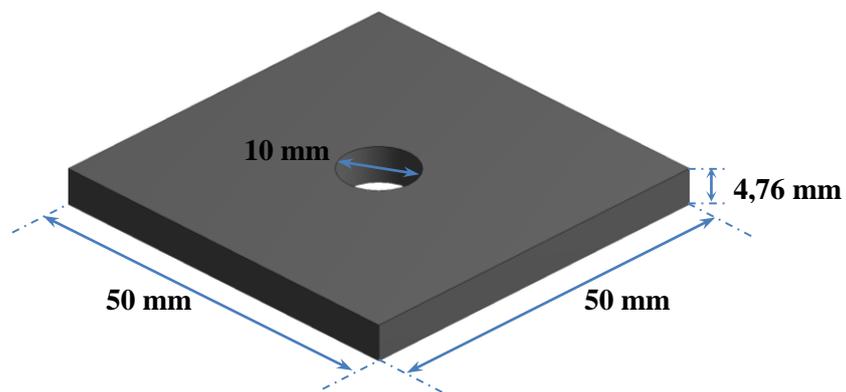


Figura 4.10 - Dimensões chapa de reforço

Os Parafusos são sextavados com 9,76 mm de diâmetro e 80 mm de comprimento. A ponta dele é um hexágono de 8 mm de lado com 6 mm de espessura como se mostra na Figura 4.11.

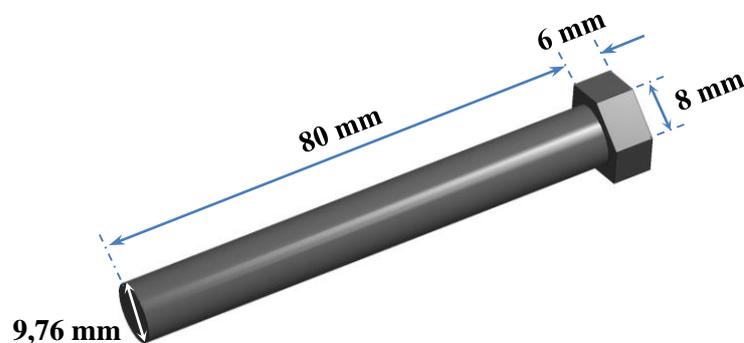


Figura 4.11 - Dimensões do parafuso

4.3. INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA NOS ENSAIOS

Foram utilizados instrumentos de medida de precisão para obter os deslocamentos nos nós, e deformações no banzo superior da treliça espacial. O carregamento foi aplicado por meio de um atuador hidráulico que é acionado por uma bomba hidráulica. Os sinais destes equipamentos são processados por módulos de aquisição de dados (Spider 8) para logo serem visualizados no software CATMAN. Na Tabela 4.2 se encontra uma descrição maior de cada um destes instrumentos de medida e no seguinte item uma descrição detalhada do procedimento dos ensaios.

Tabela 4.2 - Detalhe dos instrumentos de medição

| NOME | FUNÇÃO | EQUIPAMENTO |
|----------------------|--|---|
| Atuador Hidráulico | <ul style="list-style-type: none">- Através de fluídos que passam por um canal de alívio e outro de ação, a sua função é transmitir uma força puxando o cabo de protensão.- Capacidade máxima 300 kN. |  |
| Célula de Carga | <ul style="list-style-type: none">- Mede a força com que o macaco hidráulico puxa o cabo de protensão.- Sensibilidade de 0,01kN.- Capacidade máxima 500 kN. |  |
| Defletômetros (LVDT) | <ul style="list-style-type: none">- Medem o deslocamento no nó.- Sensibilidade de 0,01 mm.- Medida máxima 50 mm. |  |

Tabela 4.2 (Continuação) - Detalhe dos instrumentos de medição

| NOME | FUNÇÃO | EQUIPAMENTO |
|---|---|---|
| Extensômetro Elétrico de Resistência (Strain Gages) | Este instrumento mede as deformações no aço. |  |
| Painel de Leitura | <ul style="list-style-type: none"> - Proporciona a leitura em um painel digital, da força que está recebendo a célula de carga. - Sensibilidade de 10 Kg. - Capacidade máxima 500 kN |  |
| Sistema de Aquisição de Sinais (Spider 8) | Processa o sinal proveniente dos extensômetros eletrônicos e dos defletômetros. |  |
| Bomba Hidráulica | Aciona o atuador hidráulico |  |

4.4. ESTRUTURAÇÃO DO ENSAIO

O esquema da montagem do ensaio é apresentado na Figura 4.12. Este ensaio é composto por três estruturas (a treliça espacial, a base rígida de aço e a base de reação em concreto) e um sistema de aplicação do carregamento formado por: um atuador hidráulico, uma célula de carga, um cabo de protensão e placas de aço, além de uma bomba hidráulica para ativar o sistema de carga.

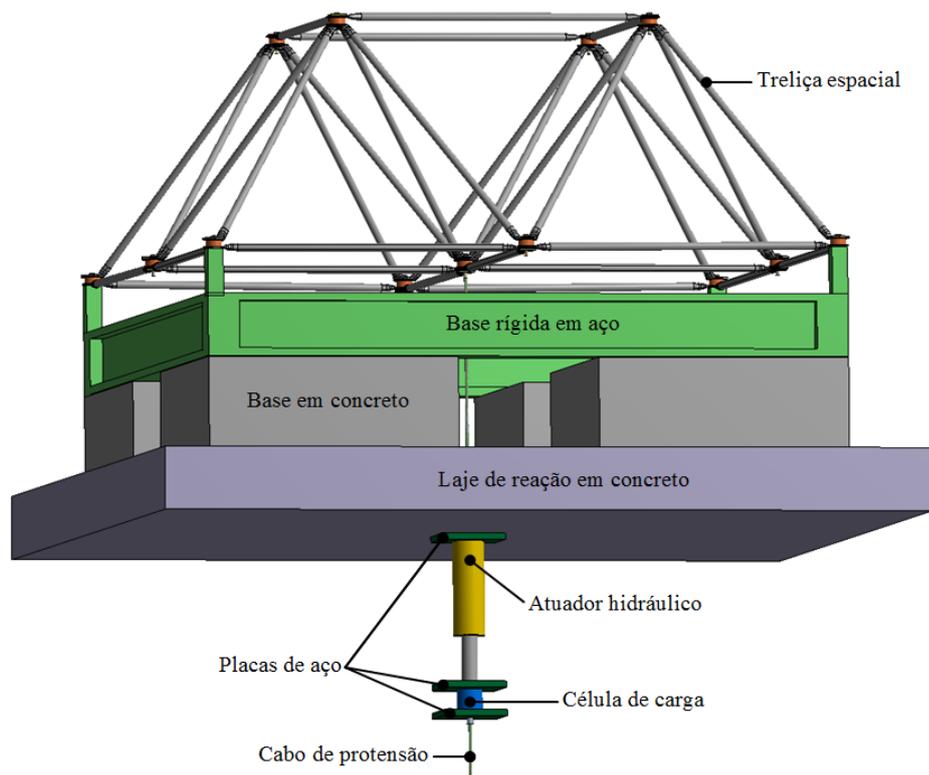


Figura 4.12 - Sistema de aplicação do carregamento

A treliça espacial está fixa na base rígida de aço por meio de parafusos e a base rígida de aço, por sua vez, está apoiada numa base de reação de concreto. O sistema de aplicação de carga se encontra embaixo da laje de reação de concreto suspenso por dois cabos de aço. A ponta do cabo de protensão está fixo ao nó 9 por meio de um aparelho de fixação composto por chapas metálicas soldadas como indica a Figura 4.13.



Figura 4.13 - Aparelho de fixação do sistema de carregamento à treliça espacial

O cabo de protensão passa por um furo na laje de reação até chegar ao final do sistema de carga, para logo ser puxado por o atuador hidráulico que aciona a bomba hidráulica e assim carregar a treliça espacial. Como já foi referido, o carregamento é aplicado no nó 9 da treliça espacial por meio de passos de carga de 1 kN por vez, até que a estrutura não tenha capacidade de suportar mais incrementos de carga e colapse globalmente. Para medir os deslocamentos se utilizaram defletômetros nos nós 1 ao 9 da treliça espacial conforme é apresentado na Figura 4.14.



Figura 4.14 - Posição dos defletômetros nos nós (N) da treliça espacial

Para medir a deformação, foram utilizados extensômetros elétricos de resistência (Strain Gages) na parte de cima e embaixo, localizados paralelamente a 150 mm da ponta do banzo superior que sai do nó 6 (ver Figura 4.15). A diferença dos valores das leituras ($EERa - EERb$) do extensômetro superior ($EERa$) e do extensômetro inferior ($EERb$) são proporcionais ao momento fletor. Teoricamente se esta diferença de leituras é zero significa que não existe momento fletor no banzo e que as forças dominantes no tubo da treliça espacial são tensões essencialmente axiais.

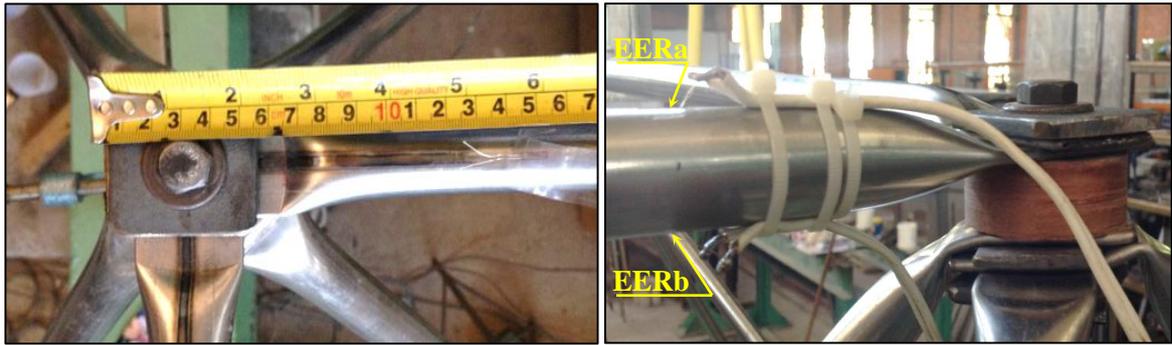


Figura 4.15 - Posição dos extensômetros eletrônicos no banzo superior perto do nó 6

4.5. EXECUÇÃO DOS ENSAIOS

Como se mencionou anteriormente foram ensaiadas três treliças espaciais com tubos de aço de ponta amassada, espaçadores de madeira e placas de reforço em aço. Isto com a finalidade de obter uma média dos dados. Os resultados de cada um destes testes se encontram detalhados nas seções a seguir.

4.5.1. Primeiro Ensaio

No primeiro ensaio o carregamento máximo suportado pela treliça espacial, antes de atingir ao colapso global, foi de 39,1 kN. O colapso global foi caracterizado pelo flambagem abrupto para fora da diagonal entre os nós 8 e 13 (ver Figura 4.16). Depois disto, a treliça espacial não apresentou mais capacidade de resistir a nenhuns incrementos de carga.



Figura 4.16 - Colapso da diagonal entre os nós 8 e 13 (primeiro ensaio). Carga = 39,1 kN

Os nós da diagonal que flambaram, além dos outros nós da treliça espacial, apresentaram grandes deformações locais na parte do amassamento dos tubos ao atingir a carga de colapso (ver Figura 4.17). Elementos como os parafusos, as placas de reforço e as arruelas, não apresentaram deformações visíveis com a carga de colapso (39,1 kN). Os espaçadores de madeira, os quais são o objeto de estudo deste trabalho, não apresentaram grandes deformações nem trincas visíveis em seu contorno.



Figura 4.17 - Deformação dos nós 8 e 13. Carga = 39,1 kN

O maior deslocamento vertical, como era previsto, foi no nó 9 com uma magnitude de 32,18 mm. A Figura 4.18 apresenta a deformação do nó 9, onde se observa grandes deformações das pontas amassadas das diagonais que chegam a este nó.

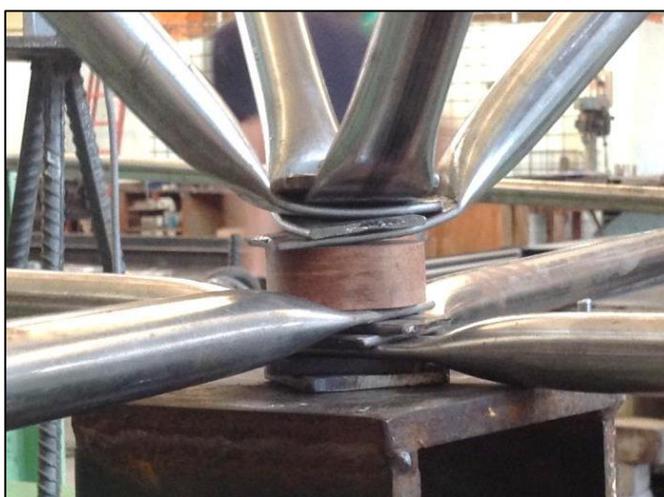


Figura 4.18 - Deformação do nó 9 no primeiro ensaio. Carga = 39,1 kN

Os deslocamentos de todos os nós são apresentados na Figura 4.19, a qual relaciona o passo de carga aplicado versus o deslocamento em cada nó da treliça espacial, onde se observa que o nó

que sofre maior deslocamento vertical com cada passo de carga é o nó 9, além disto, observa-se um comportamento linear deste nó até os 11 kN de carga, para passos de carga superiores a relação carga-deslocamento é claramente não linear. Observa-se também nesta figura que os deslocamentos dos nós 5, 6, 7 e 8 não são iguais, isto devido à treliça espacial não ser totalmente simétrica, já que pela superposição das pontas amassadas dos tubos o nível ou altura destes nós pode variar em alguns milímetros.

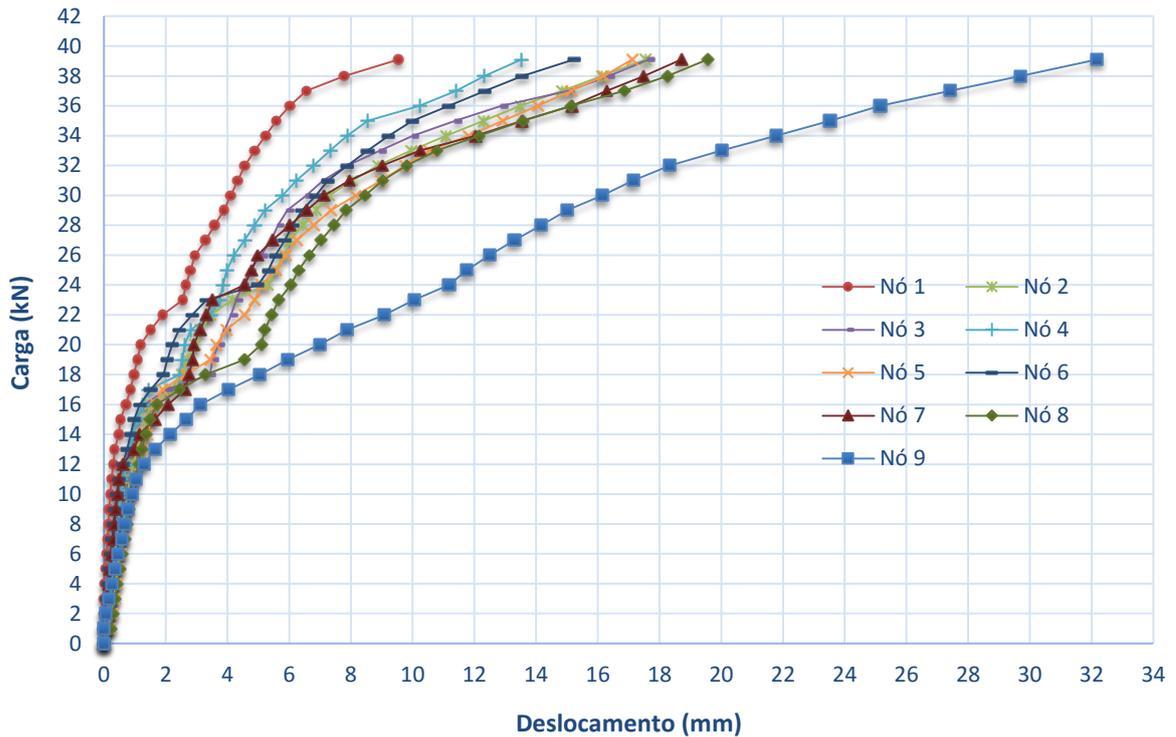


Figura 4.19 - Gráfico da carga vs. deslocamento vertical (primeiro ensaio)

Os extensômetros eletrônicos que estão indicados na Figura 4.20 estão posicionados paralelamente a uma distância de 150 mm da ponta amassada do banzo, eles medem as deformações nestes pontos e indiretamente indicam a presença do momento fletor no banzo pela diferença de leituras dos extensômetros eletrônicos na parte superior e inferior, na medida em que esta diferença é proporcional ao momento fletor.



Figura 4.20 - Posição dos extensômetros eletrônicos perto do nó 6 (primeiro ensaio)

Neste primeiro ensaio não se registrou dados dos extensômetros devido a um problema de sobrecarga elétrica durante o ensaio, no entanto no segundo e terceiro ensaio conseguiu-se obter dados em todos os passos de carga.

4.5.2. Segundo Ensaio

O segundo ensaio foi caracterizado pelo colapso abrupto da diagonal entre os nós 8 e 13, flambando para dentro da treliça espacial (ver Figura 4.21). Além disso, apresentaram-se grandes deformações locais na parte do amassamento dos tubos em todos os nós da treliça espacial. O colapso global ocorreu com uma carga de 39 kN com um deslocamento vertical máximo de 31.45 mm no nó 9.



Figura 4.21 - Colapso da diagonal entre os nós 8 e 13 no segundo ensaio. Carga = 39 kN

Novamente, como indica a Figura 2.22, os espaçadores feitos de madeira em Maçaranduba na treliça espacial suportaram todos os passos de carga sem apresentar falha por compressão nem falha por esforço cortante, além disso, não apresentam trincas visíveis na superfície do espaçador e só se observou pequenas deformações na parte superior do espaçador no nó 13.



Figura 4.22 - Deformação dos nós 8 e 13 no segundo ensaio. Carga = 39 kN

A Figura 4.23 apresenta a deformação que sofre o nó 9 depois do colapso da diagonal na treliça espacial (carga de colapso 39 kN).

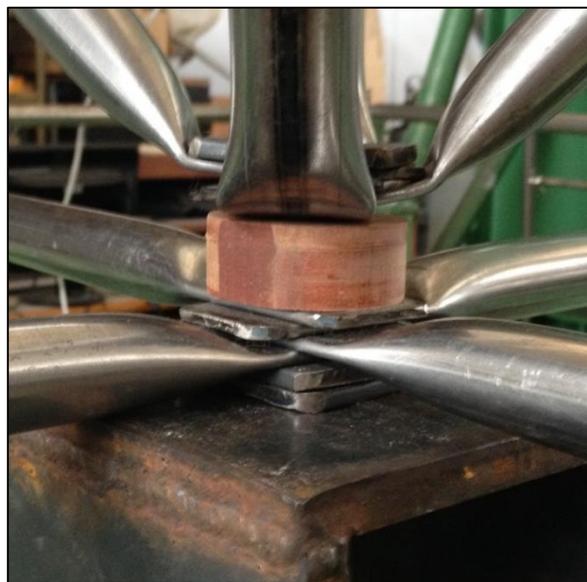


Figura 4.23 - Deformação do nó 9 no segundo ensaio. Carga = 39 kN

Os dados dos deslocamentos verticais dos nós no segundo ensaio se mostram na Figura 4.24, esses dados são semelhantes e tem a mesma tendência aos obtidos no primeiro ensaio. O nó que apresenta maior deslocamento com os incrementos de carga é o nó 9.

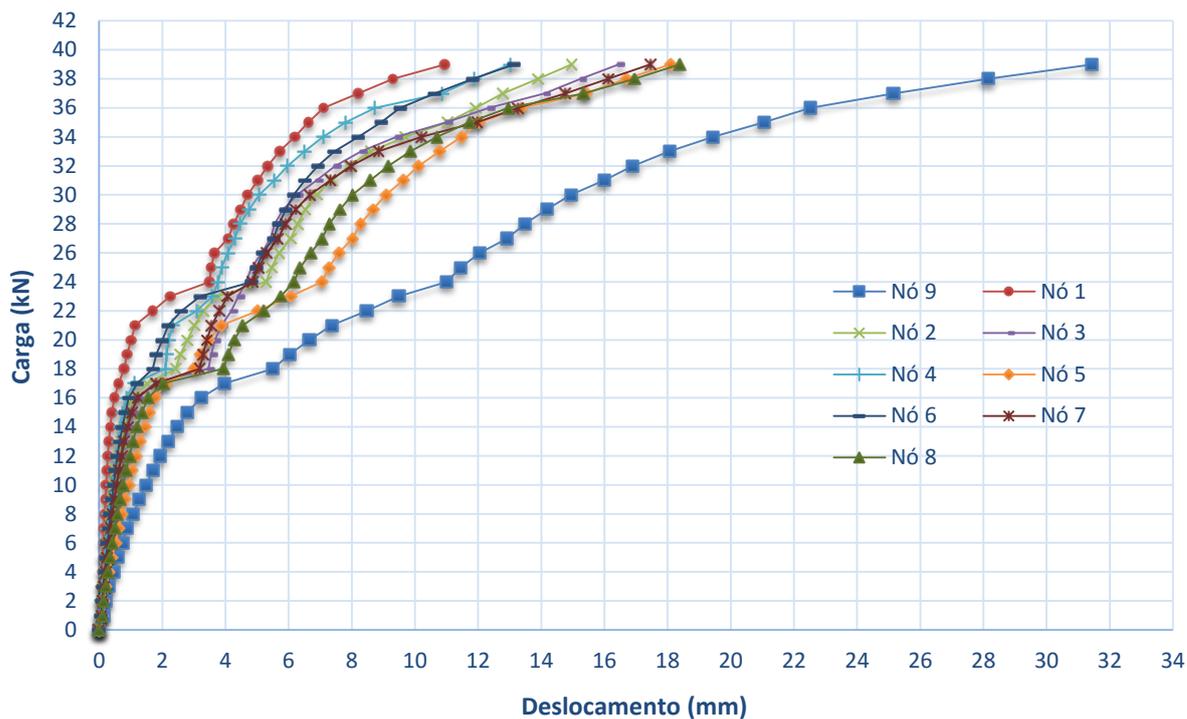


Figura 4.24 - Gráfico da carga vs. deslocamento (segundo ensaio)

No segundo ensaio foi possível obter os dados da deformação do banzo superior por meio dos extensômetros elétricos de resistência posicionados perto do nó 6 (ver Figura 4.25).



Figura 4.25 - Posição dos extensômetros eletrônicos perto do nó 6 (segundo ensaio)

Esses dados revelam que a diferença das leituras das deformações dos extensômetros no ponto de medição são pequenas, deduzindo assim, que o momento fletor no banzo é pequeno. Na Tabela 4.3 são apresentados os dados das leituras registradas pelos extensômetros para vários passos de carga.

Tabela 4.3 - Leituras dos extensômetros a 150 mm da ponta do nó 6 (Segundo ensaio)

| | Leitura ext. superior | Leitura ext. inferior | Diferença | Média das leituras | Porcentagem da diferença de leituras |
|------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------------|---|--|
| Carga (kN) | EERa ($\mu\text{m/m}$) | EERb ($\mu\text{m/m}$) | EERa - EERb ($\mu\text{m/m}$) | $(\text{EERa} + \text{EERb})/2$ ($\mu\text{m/m}$) | $\frac{\text{EERa} - \text{EERb}}{(\text{EERa} + \text{EERb})/2} \times 100$ (%) |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | -78,55 | -78,32 | -0,23 | -78,44 | 0,3 |
| 10 | -155,02 | -149,51 | -5,51 | -152,27 | 3,6 |
| 15 | -235,64 | -224,38 | -11,26 | -230,01 | 4,9 |
| 20 | -316,02 | -301,09 | -14,93 | -308,56 | 4,8 |
| 25 | -400,08 | -391,35 | -8,73 | -395,72 | 2,2 |
| 30 | -494,93 | -473,8 | -21,13 | -484,37 | 4,4 |
| 35 | -581,51 | -559,46 | -22,05 | -570,49 | 3,9 |
| 39 | -646,31 | -625,55 | -20,76 | -635,93 | 3,3 |

Na Figura 4.26 estão representadas graficamente as leituras do extensômetro superior (EERa) e inferior (EERb). A maior momento as duas curvas devem separasse e a menor momento as curvas devem unisse. Nesta figura observa-se um comportamento linear da relação carga vs deformação.

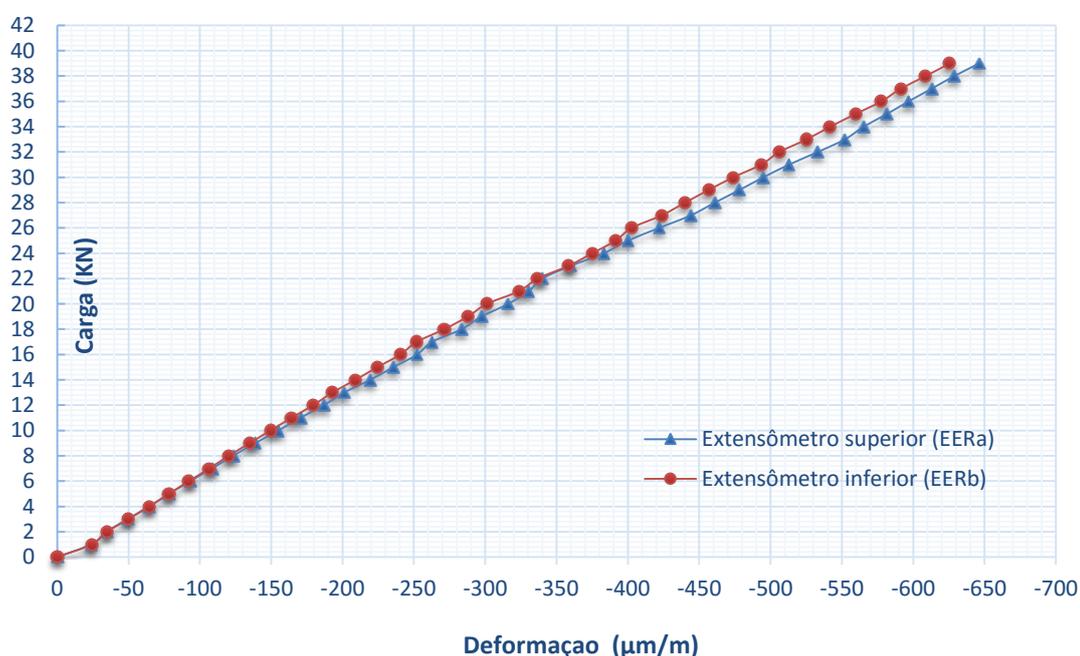


Figura 4.26 - Gráfico da carga vs. deformação a 150 mm do nó 6 (segundo ensaio)

4.5.3. Terceiro Ensaio

Neste último ensaio o colapso global da treliça espacial também ocorreu pelo flambagem abrupto de uma de a suas diagonais, mais esta vez foi a diagonal entre os nós 10 e 5 (ver Figura 4.27). A carga de colapso foi de 38.8 kN com 32.91 mm de deslocamento vertical no nó central (nó 9).



Figura 4.27 - Colapso da diagonal entre os nós 5 e 10 no terceiro ensaio. Carga = 38,8 kN

As deformações locais apresentadas nos nós foram maiores nas pontas amassadas dos tubos. A Figura 4.28 e Figura 4.29 mostram os nós 5 e 10 respectivamente ao início e final do processo de carregamento da treliça espacial.



Figura 4.28 - Nó 5, estado de carga inicial e final (terceiro ensaio)

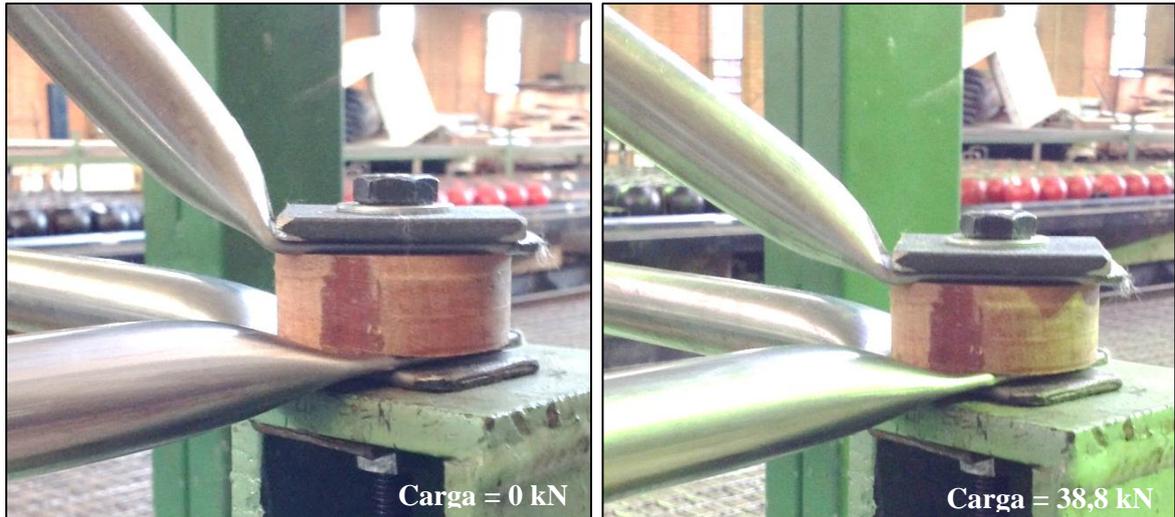


Figura 4.29 - Nó 10, estado de carga inicial e final (terceiro ensaio)

Neste terceiro ensaio as curvas de carga versus deslocamento vertical continuam a tendência dos dois ensaios anteriores (ver Figura 4.30) exceto o nó 1, que tem um comportamento diferente ao final do carregamento devido a um defeito no defletômetro que registrava a leitura. Novamente o nó 9 foi o nó de maior deslocamento com os incrementos de carga na treliça espacial.

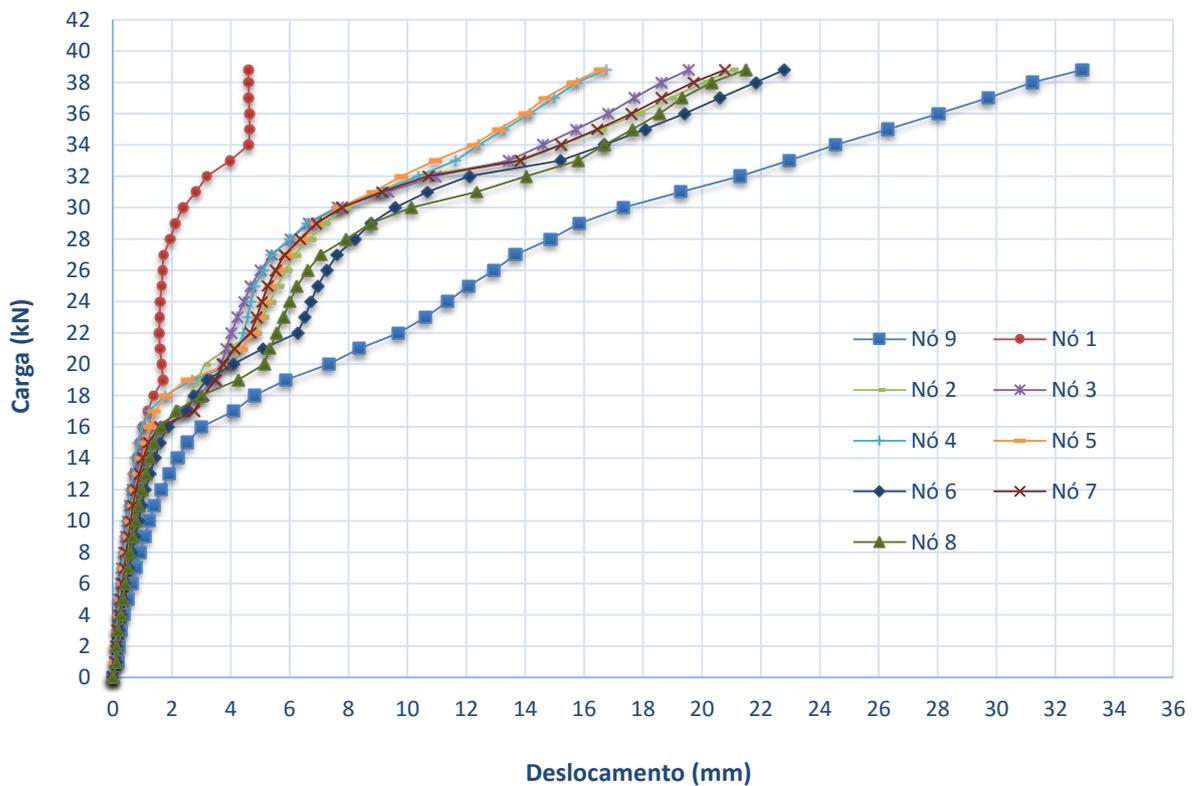


Figura 4.30 - Gráfico da carga vs. deslocamento (terceiro ensaio)

No terceiro ensaio também se conseguiu obter os dados das leituras dos extensômetros elétricos de resistência (ver Figura 4.31). Estes dados são apresentados na Tabela 4.4, onde são registrados os valores das leituras dos extensômetros superior (EERa) e inferior (EERb) para passos de carga de 5kN.



Figura 4.31 - Posição dos extensômetros perto do nó 6 (terceiro ensaio)

Tabela 4.4 - Leituras dos extensômetros a 150 mm da ponta do nó 6 (Terceiro ensaio)

| | Leitura ext. superior | Leitura ext. inferior | Diferença | Média das leituras | Porcentagem da diferença de leituras |
|------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------------|---|--|
| Carga (kN) | EERa ($\mu\text{m/m}$) | EERb ($\mu\text{m/m}$) | EERa - EERb ($\mu\text{m/m}$) | $(\text{EERa} + \text{EERb})/2$ ($\mu\text{m/m}$) | $\frac{\text{EERa} - \text{EERb}}{(\text{EERa} + \text{EERb})/2} \times 100$ (%) |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | -79,46 | -100,1 | 20,67 | -89,80 | -23,0 |
| 10 | -145,6 | -187 | 41,34 | -166,28 | -24,9 |
| 15 | -216,3 | -274,9 | 58,57 | -245,63 | -23,8 |
| 20 | -288,7 | -374,4 | 85,66 | -331,52 | -25,8 |
| 25 | -361,7 | -471,5 | 109,78 | -416,61 | -26,4 |
| 30 | -439,6 | -573,2 | 133,66 | -506,41 | -26,4 |
| 35 | -498,8 | -694,1 | 195,22 | -596,44 | -32,7 |
| 38,8 | -531,3 | -807,7 | 276,41 | -669,46 | -41,3 |

A Figura 4.32 apresenta as curvas de carga versus deformação no ponto de medição. Estas duas estão mais separadas uma da outra, o que indica um incremento do momento fletor no banzo com respeito ao primeiro ensaio, no qual o momento era mais reduzido.

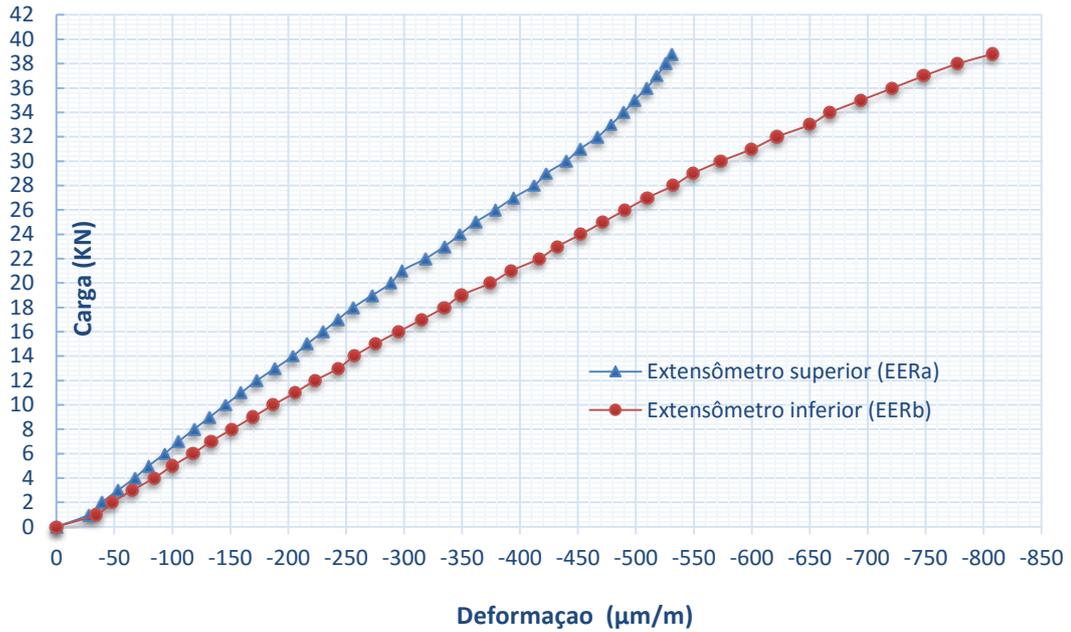


Figura 4.32 - Gráfico da carga vs. deformação a 150 mm do nó 6 (terceiro ensaio).

Na Figura 4.33 é apresentado um resumo dos três ensaios experimentais da treliça espacial com membros tubulares com pontas amassadas e espaçadores de madeira. Nesta figura, são mostrados os gráficos dos deslocamentos versus a carga aplicada do nó 9 (nó de maior deslocamento). Estes três gráficos têm a mesma tendência razão pela qual os dados obtidos são considerados aceitáveis.

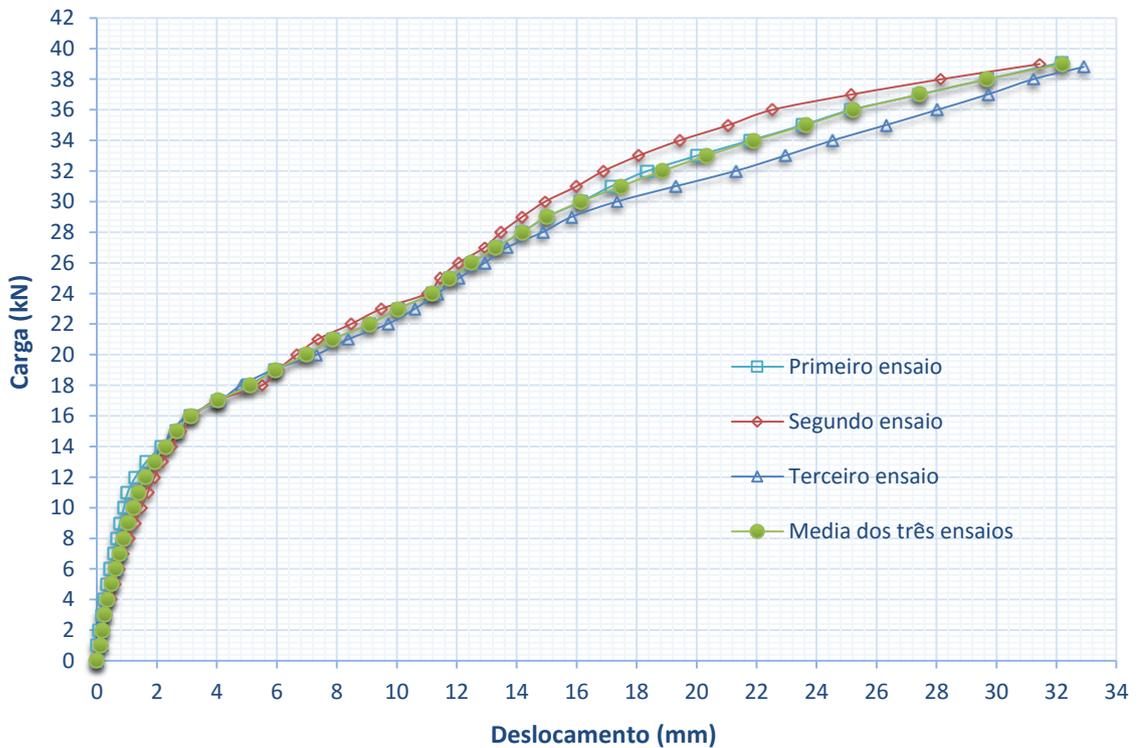


Figura 4.33 - Diagrama carga vs. deslocamento do nó 9 para os três ensaios

5. ANÁLISE NUMÉRICA

A análise numérica neste trabalho tem como objetivo prever o comportamento da treliça espacial quando esta é submetida a carga estática, para isto, se utilizou a versão Workbench 14.5 do software comercial ANSYS, que é baseado no método dos elementos finitos. Os resultados numéricos obtidos neste software serão comparados com os resultados obtidos nos ensaios experimentais que foram descritos no anterior capítulo. Na continuação, se faz uma descrição da geometria, materiais e metodologia utilizada na análise numérica da treliça espacial.

5.1. GEOMETRIA DA TRELIÇA ESPACIAL

A geometria e dimensões de cada uma das peças pertencentes à treliça espacial foram referidas no item 4.2 do anterior capítulo. Esta geometria foi desenhada no módulo Design Modeler do ANSYS, e cada uma delas tem uma similitude de quase 100% com as peças que foram utilizadas realmente nos ensaios experimentais. As dimensões dos elementos utilizados para conformar a treliça espacial são iguais os que utilizou Freitas (2008), com o fim de se ter o mesmo referencial para comparações entre os espaçadores de aço utilizados por Freitas (2008) e os espaçadores de madeira estudados neste trabalho.

5.2. MODELAGEM DA TRELIÇA ESPACIAL NO ANSYS

Todos os elementos que fazem parte da treliça espacial são compostos por uma malha de elementos finitos com elementos “Solid 185” de 6 graus de liberdade por nó. Estes elementos podem ser hexaedros com 8 nós ou tetraedros com 6 nós dependendo da complexidade da geometria. Na biblioteca de ANSYS se pode constatar que o elemento “Solid 185” tem propriedades de plasticidade, hiperelasticidade, enrijecimento por estresse, fluência e grandes capacidades de deformação. O elemento “Solid 185” utiliza a formulação Lagrangeana Total e o processo iterativo que o programa utiliza para a solução do sistema de equações de equilíbrio é o Newton-Raphson. Na Figura 5.1 apresenta-se um corte de um banzo e de um espaçador onde se pode observar como pequenos elementos finitos compõem estes membros.

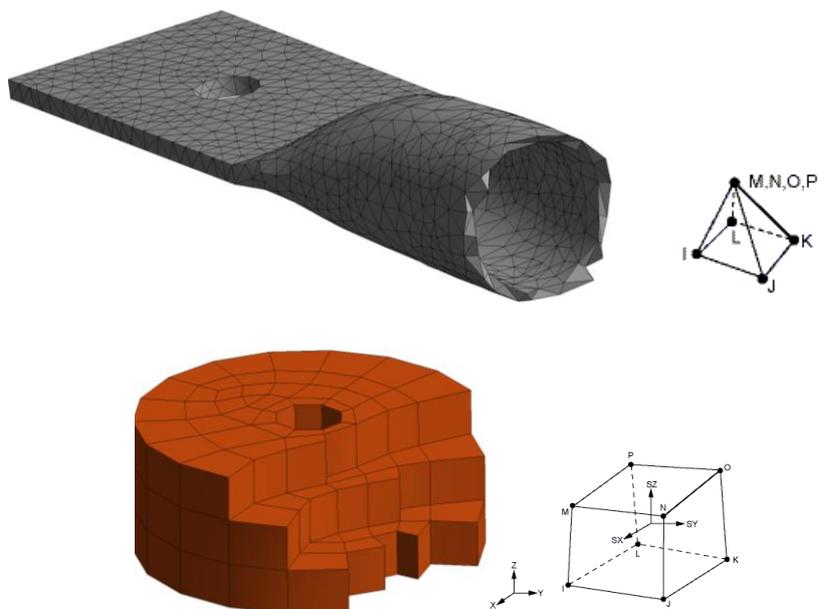


Figura 5.1 - Elementos tipo “Solid” nos membros da treliça espacial

O modelo da treliça espacial no ANSYS é composto de uma malha de elementos finitos com um total de 325933 elementos “Solid 185” com 290693 nós e comprimentos de mínimo 1,5 mm e máximo 5 mm, conforme mostrado na Figura 5.2.

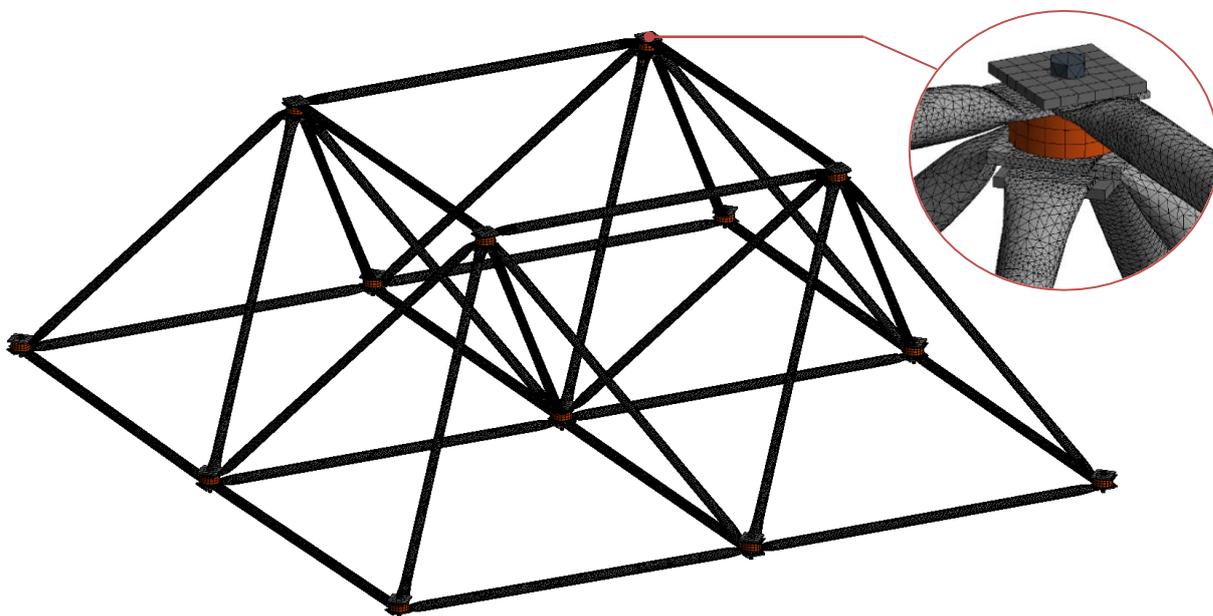


Figura 5.2 - Malha com elementos finitos tipo “Solid” sub a estrutura espacial

5.2.1. Condições de contorno

A treliça espacial é composta por 13 nós (ver Figura 5.3.). A treliça espacial está apoiada nos nós 10, 11, 12 e 13. Uma carga vertical no sentido gravitacional é aplicada no nó central (nó 9).

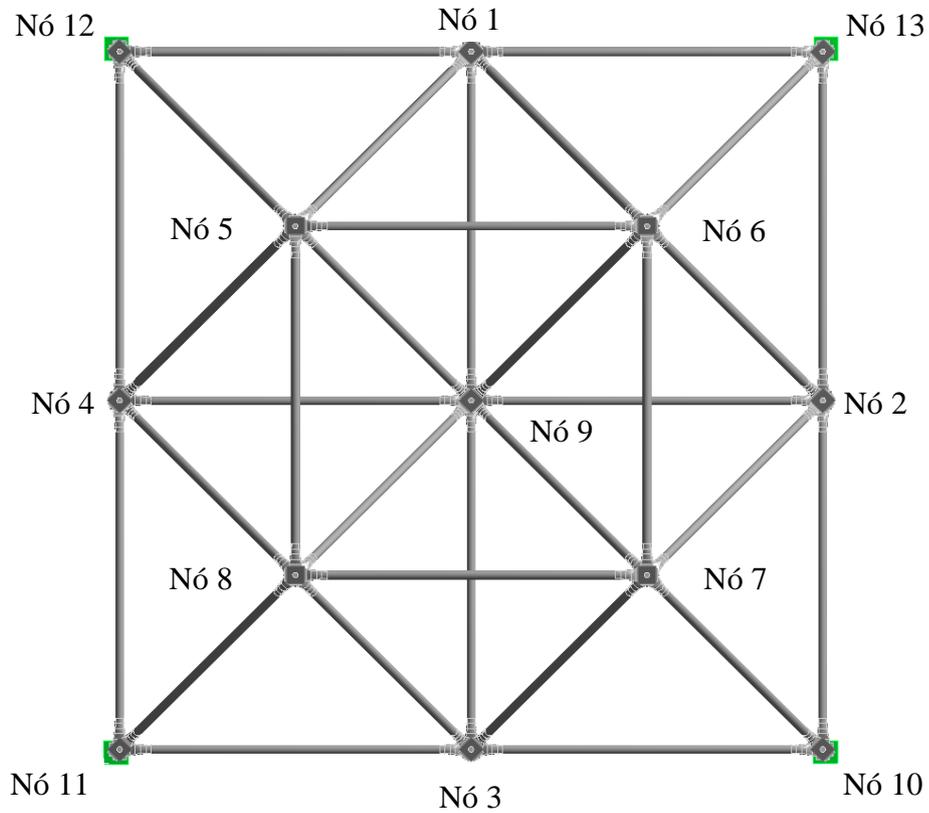


Figura 5.3 - Numeração dos nós da treliça espacial

Para simular os apoios, os graus de liberdade X, Y e Z da malha na faixa azul (ver Figura 5.4) são iguais a zero, ou seja, um apoio fixo.

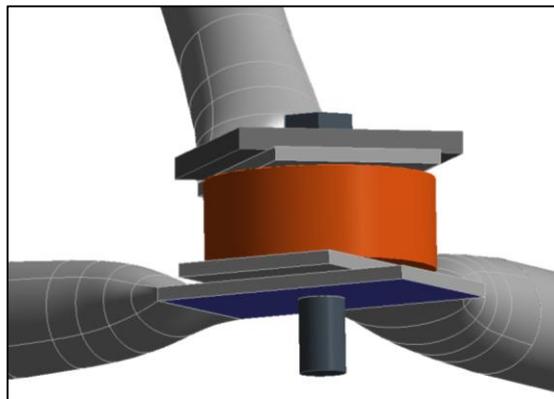


Figura 5.4 - Condições de contorno no nó 10 (igual condição para os nós 11, 12 e 13)

O carregamento (ver Figura 5.5) é aplicado no contorno do parafuso do nó 9 (cilindro vermelho inferior na Figura 5.5b). Os graus de liberdade X e Z na ponta deste parafuso (cilindro amarelo na Figura 5.5a) são fixados para permitir deslocamentos apenas no sentido Y (para baixo) do nó 9. Isto foi feito com o intuito de garantir que o carregamento permaneça vertical quando a estrutura se deforma. Nos ensaios experimentais um cabo de protensão puxa deste parafuso, por este motivo são consideradas as condições de contorno anteriores.

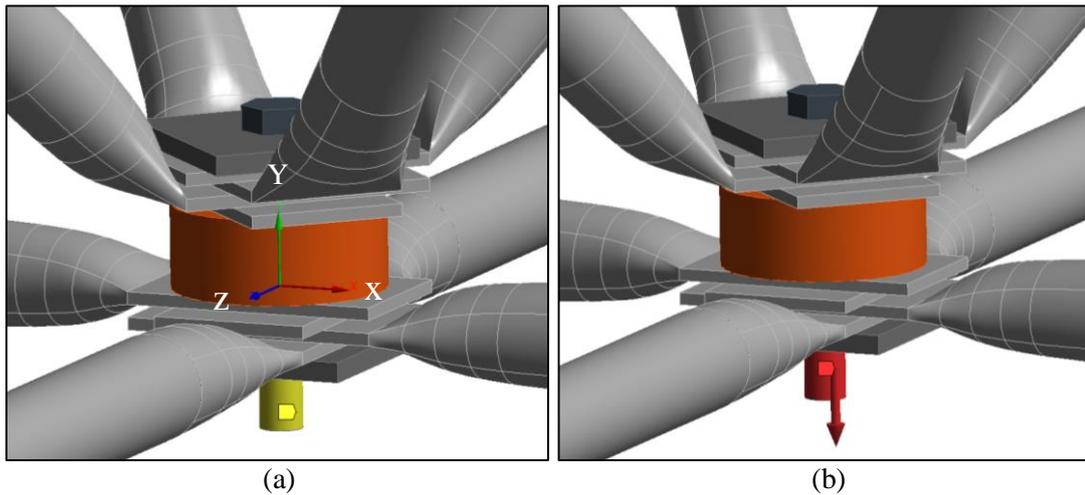


Figura 5.5 - Condições de contorno no nó 9

Para fixar os elementos que compõem a treliça espacial e assim simular o efeito que tem o aperto do parafuso, se utilizaram elementos de contato “Bonded” nos 13 nós da treliça espacial. Este tipo de elemento de contato é linear e não permite deslizamentos no sentido transversal nem normal entre as faces em contato. A utilização de elementos de contato “Bonded” é uma aproximação, já que na realidade existem deslizamentos relativamente pequenos entre algumas faces em contato, mas para o caso em estudo a utilização de elementos de contato “Bonded” é uma aproximação aceitável. A força externa que é aplicada no nó central é transmitida aos demais membros da estrutura por meio destes elementos de contato. Na Figura 5.6 observasse-se as faces em contato do nó 9, estas faces em contato estão representadas por as cores vermelho e azul.

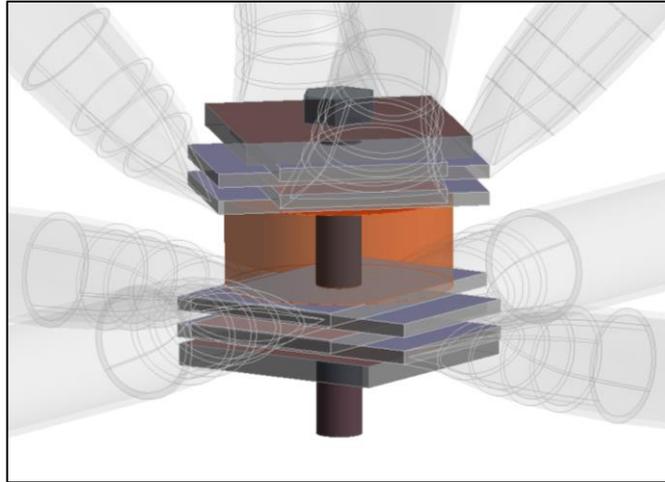


Figura 5.6 - Elementos em contato no nó 9

5.2.2. Análise linear da treliça espacial

Para se ter uma primeira ideia do comportamento estrutural da treliça espacial se fez uma análise linear, utilizando a geometria, malha e as condições de contorno definidas nos itens anteriores deste capítulo. As características físicas dos materiais utilizados na análise linear da treliça espacial foram atribuídas da seguinte forma: para os banzos e diagonais, módulo de elasticidade (E), 205000 MPa; tensão de escoamento(f_y), 300MPa; coeficiente de Poisson, 0,3; para as placas e parafusos, módulo de elasticidade (E), 205000 MPa; tensão de escoamento(f_y), 250MPa; coeficiente de Poisson, 0,3; para os espaçadores de madeira, módulo de elasticidade (E) de 27000 MPa com uma tensão de compressão paralela ao fibra (f_{ck}), 90 MPa.

Uma força de 39 kN foi aplicada no nó central da treliça espacial; esta força provocou o colapso global da treliça espacial nos ensaios experimentais, logo, a magnitude desta força é tomada como referencial para a análise linear. Os deslocamentos obtidos se mostram na Figura 5.7, na qual se observa que o nó central apresentou o maior deslocamento (2,64 mm) para a força aplicada.

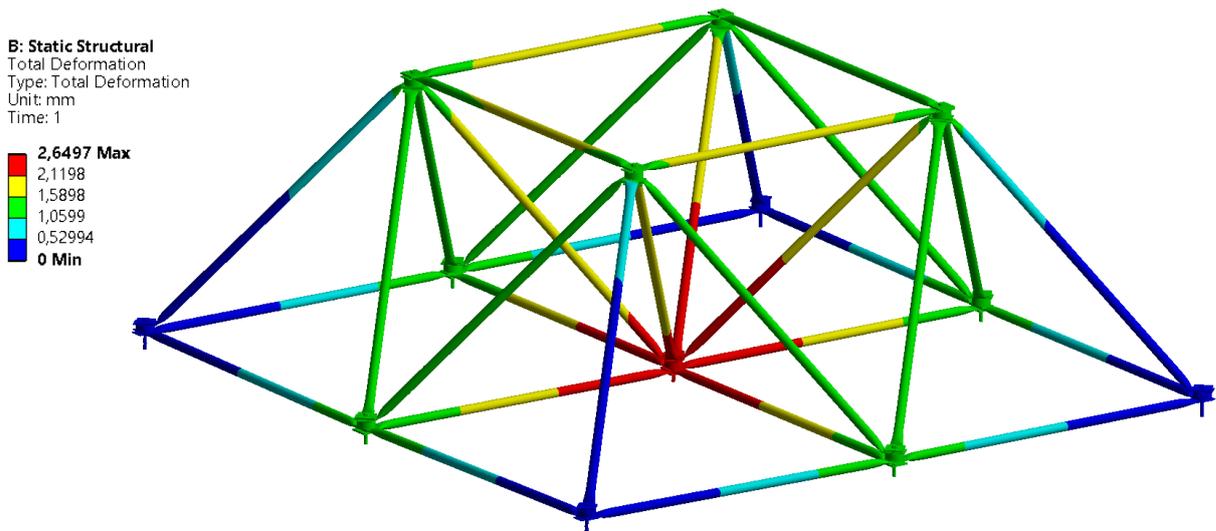


Figura 5.7 - Deslocamentos na treliça espacial (mm). Carga = 39 kN

A distribuição das tensões de Von-Mises na treliça espacial se mostra na Figura 5.8. Os elementos tubulares em cor azul aparentam uma baixa tensão, permanecendo assim no regime elástico, no entanto, os elementos tubulares em cor verde claro têm uma maior concentração de tensão que poderia superar os limites elásticos do material.

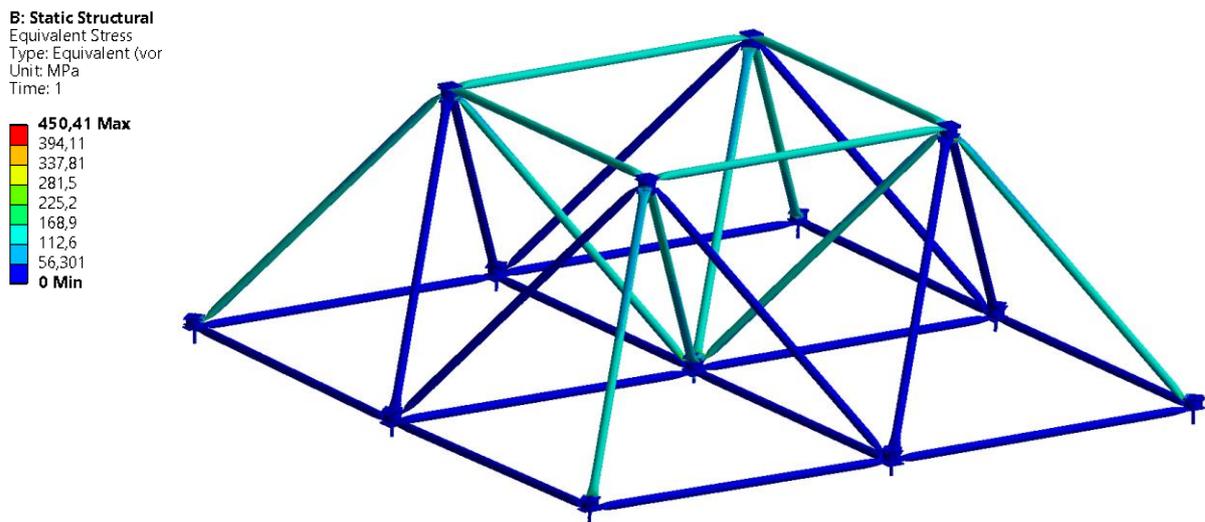


Figura 5.8 - Distribuição das tensões de Von-Mises (MPa). Carga = 39 kN

Um detalhe dos nós 8 e 9 são apresentados na seguinte figura, onde observa-se uma grande concentração de tensões nas pontas amassadas dos tubos como era previsto. Os parafusos e espaçadores tem uma baixa concentração de tensões.

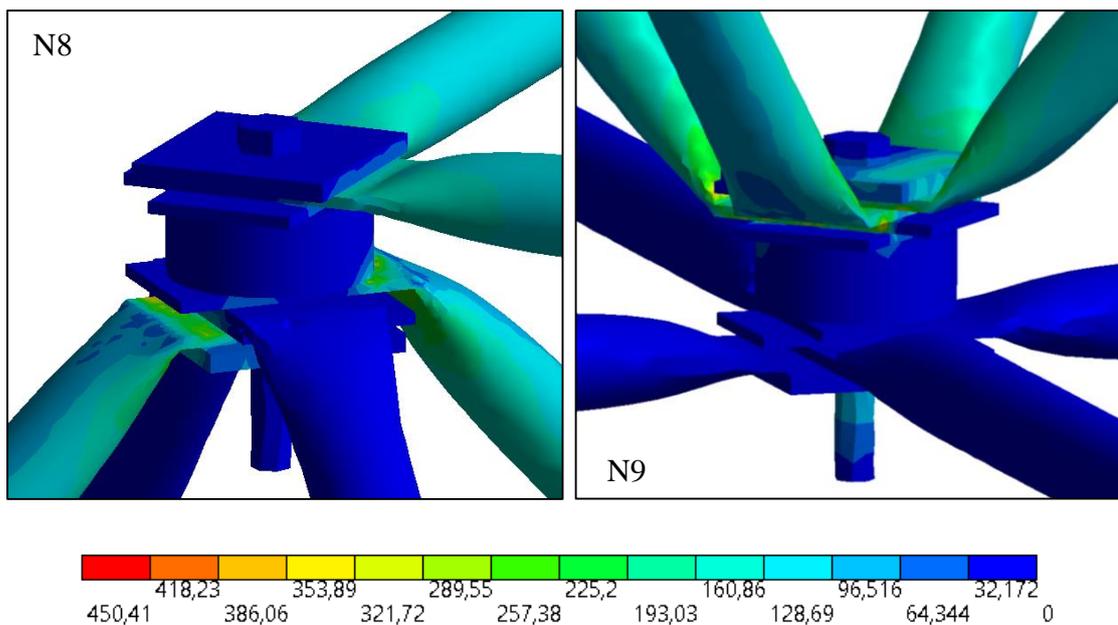


Figura 5.9 - Distribuição das tensões (MPa) de Von-Mises nos nós 8 e 9. Carga = 39 kN

5.2.3. Análise não linear utilizando modelos constitutivos não calibrados

A análise não linear se fez com a finalidade de obter uma melhor representação do comportamento da treliça espacial e assim poder prever o que acontece na realidade. As não linearidades consideradas foram a física, que diz respeito ao comportamento não linear da relação tensão-deformação do material, e a geométrica que está associada ao equilíbrio de um sistema estrutural na posição deformada e a sua utilização é necessária quando a configuração deformada da estrutura é significativamente diferente da configuração inicial (grandes deslocamentos). A treliça espacial tem membros tubulares submetidos a forças de tração e compressão. Para determinar o modelo constitutivo dos elementos tubulares submetidos a forças de tração, se fez um ensaio de caracterização do aço (ver Apêndice B), onde se obteve um módulo de elasticidade (E) de 205000 MPa e uma tensão de escoamento (f_y) de 300 MPa. Para esta análise foi assumido e um módulo tangente (E_t) de 500 MPa. Estes dados foram utilizados para se poder utilizar um diagrama bilinear com a hipótese de endurecimento isotrópico no programa ANSYS (ver Figura 5.10).

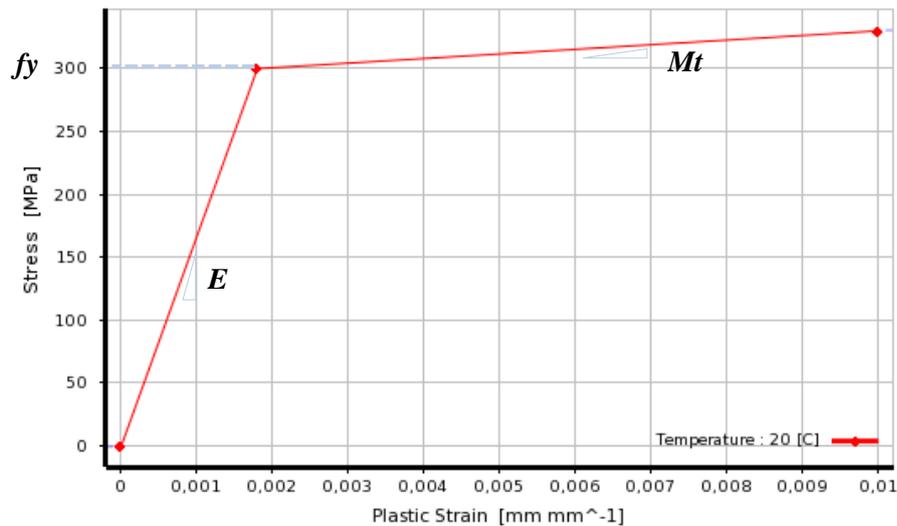


Figura 5.10 - Modelo constitutivo do aço (elementos a tração)

Para os elementos tubulares submetidos a forças de compressão, foi calculada a tensão crítica de flambagem (f_{cr}) usando o método da AISC-LRFD (1991) – ver Figura 2.20. O cálculo da esbeltez ($\bar{\lambda}_c$) se fez com a equação 4.2 usando um parâmetro de flambagem (K) igual a 1, comprimento de flambagem (L) de 1000 mm, raio de giração da seção circular (i) de 8,467 mm, tensão de escoamento de 300 MPa e um módulo de elasticidade (E) de 205000 MPa.

$$\bar{\lambda}_c = \frac{1}{\pi} \times \frac{KL}{i} \times \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{1}{3,1416} \times \frac{1 \times 1000}{0,8467} \times \sqrt{\frac{300}{205000}} = 1,414 \quad (4.2)$$

Como o valor da esbeltez ($\bar{\lambda}_c$) calculada é menor que 1,5, para calcular o valor da tensão crítica de flambagem (f_{cr}) tem-se que escolher a equação 4.3.

$$a). \bar{\lambda}_c \leq 1,5 \rightarrow f_{cr} = (0,658^{\lambda_c^2}) f_y \quad (4.3)$$

$$b). \bar{\lambda}_c \geq 1,5 \rightarrow f_{cr} = \left(\frac{0,877}{\lambda_c^2} \right) f_y \quad (4.4)$$

O valor da tensão crítica de flambagem (f_{cr}) é de 125.5 MPa o qual será utilizado como referencial para o modelo constitutivo.

$$f_{cr} = (0,658^{\lambda_c^2}) f_y = (0,658^{1,414^2}) \times 300 = 125,5 \text{ MPa} \quad (4.5)$$

Estes dados foram levados em conta para fazer um diagrama de endurecimento isotrópico bilinear no ANSYS (ver Figura 5.11), onde foi adotado um módulo de elasticidade (E) de 205000 MPa, uma tensão crítica de flambagem (f_{cr}) de 130 MPa e um comportamento

perfeitamente plástica depois desta tensão. Este diagrama é uma aproximação do que ocorre na realidade e existem várias formas de representar o comportamento dos membros a compressão, conforme comentado no Capítulo 2 (Figura 2.20) e no Capítulo 3 (Tabela 3.1).

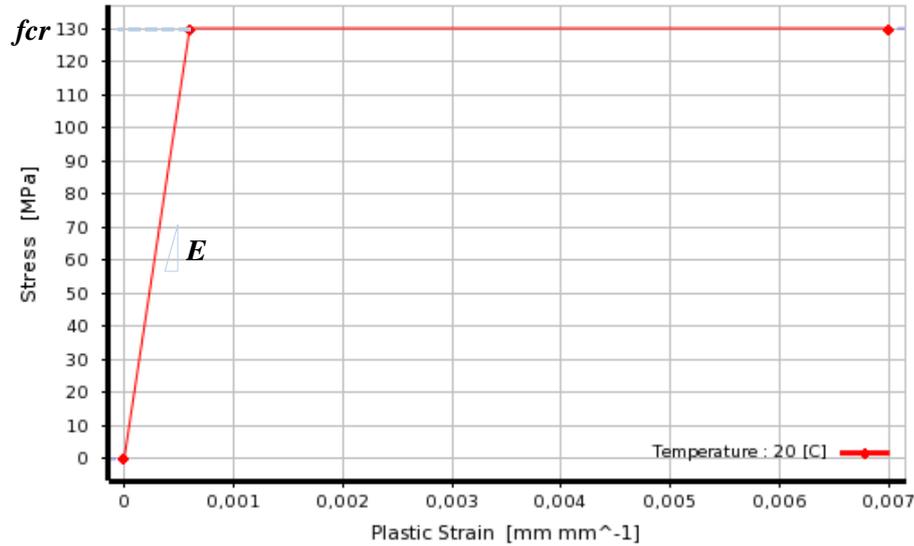


Figura 5.11 - Modelo constitutivo do aço (elementos a compressão)

Para as placas e parafusos foram atribuídos os seguintes dados: módulo de elasticidade (E), 205000 MPa; tensão de escoamento (f_y), 250MPa; coeficiente de Poisson, 0,3 e para os espaçadores de madeira, módulo de elasticidade (E) de 27000 MPa com uma tensão de compressão paralela à fibra (f_{ck}), 90 MPa. A força foi aplicada no nó 9 da treliça espacial em sucessivos passos de carga até o colapso global por excessivas deformações. Esta força iniciou em zero e se aumentou a carga até atingir à força de 32,7 kN que foi a força que finalmente provocou o colapso global da treliça espacial por flambagem de uma de suas diagonais. Os deslocamentos obtidos apresentam-se na Figura 5.12, na qual se observa que de todos os nós, o nó 9 foi o que apresentou maior deslocamento (32,1 mm) para a força de colapso global.

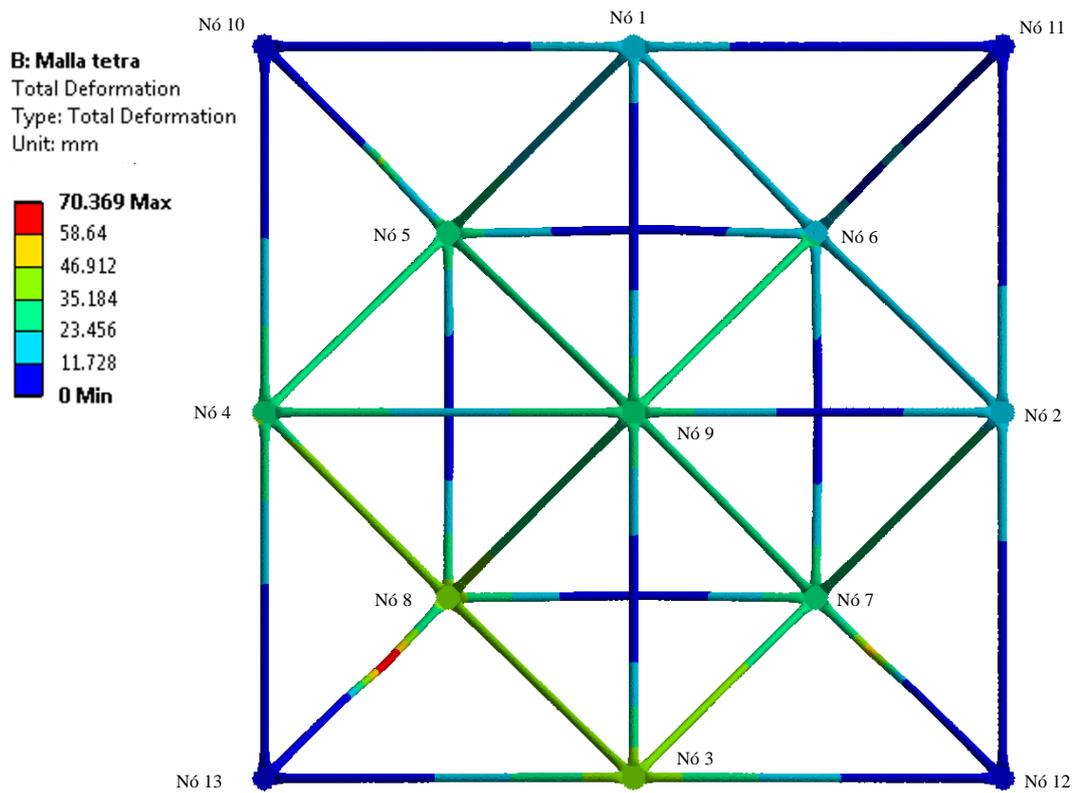


Figura 5.12 - Deslocamentos na treliça espacial (mm). Carga = 32,7 kN

Na Figura 5.13 apresenta-se o diagrama da carga vs. deslocamento para o nó 9, onde se tem um comportamento lineal até aproximadamente 30 kN, depois claramente se observa o comportamento não linear da treliça espacial.

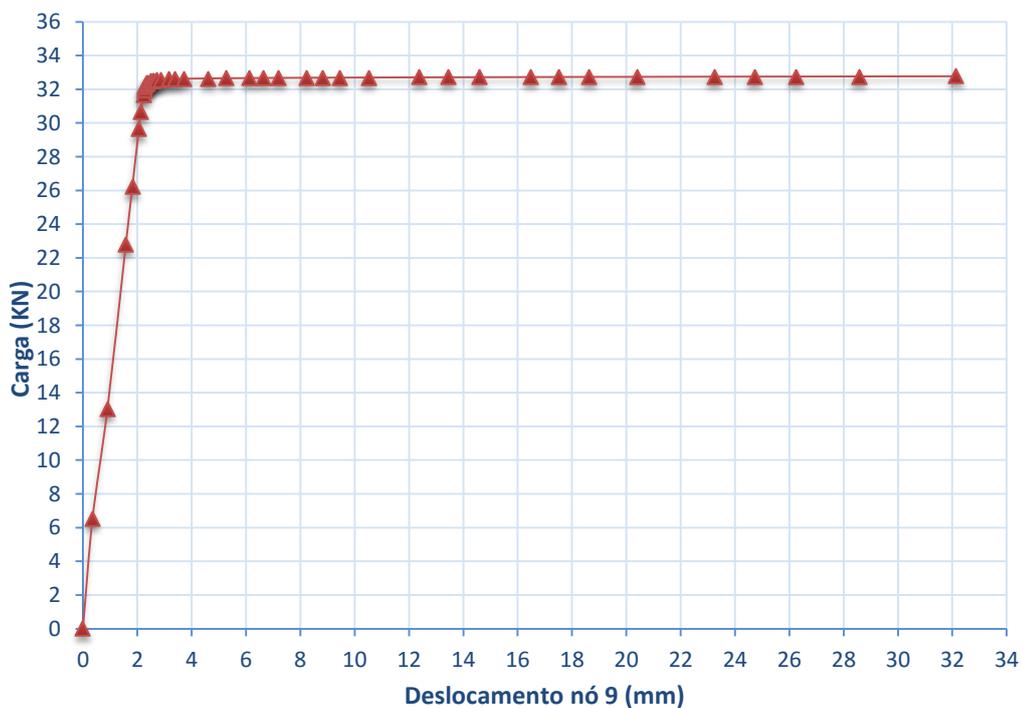


Figura 5.13 - Diagrama carga vs. deslocamento do nó 9

As distribuições das tensões de Von-Mises na treliça espacial são apresentadas na Figura 5.14. Onde se observa como a diagonal entre os nós 8 e 13 excede a tensão crítica de flambagem (130 MPa), ocasionando o colapso global da treliça espacial pela flambagem desta diagonal. Os elementos tubulares em cor azul aparentam uma baixa tensão, permanecendo assim no regime elástico.

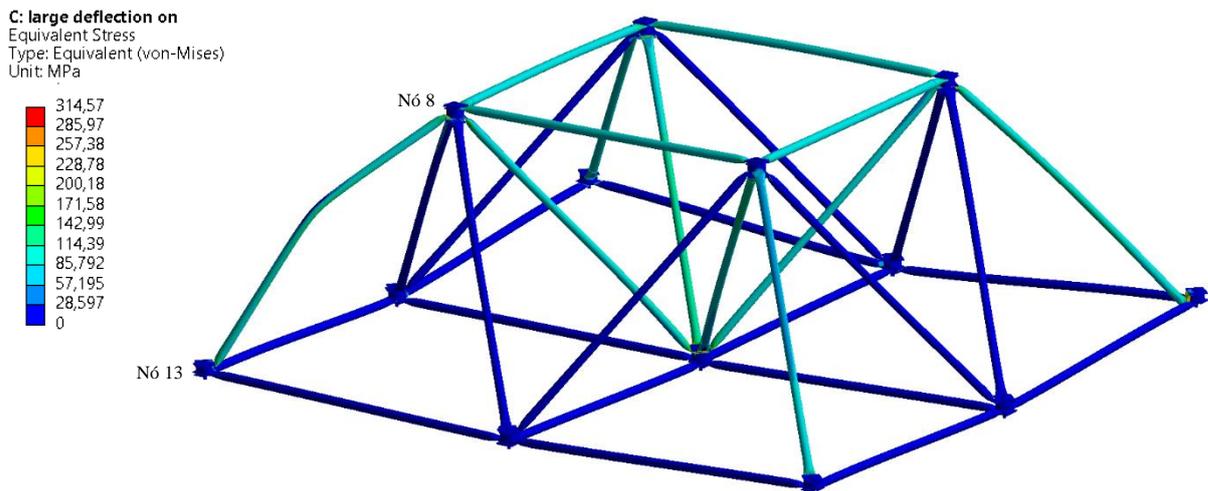


Figura 5.14 - Distribuição das tensões de Von-Mises (MPa). Carga = 32,7 kN

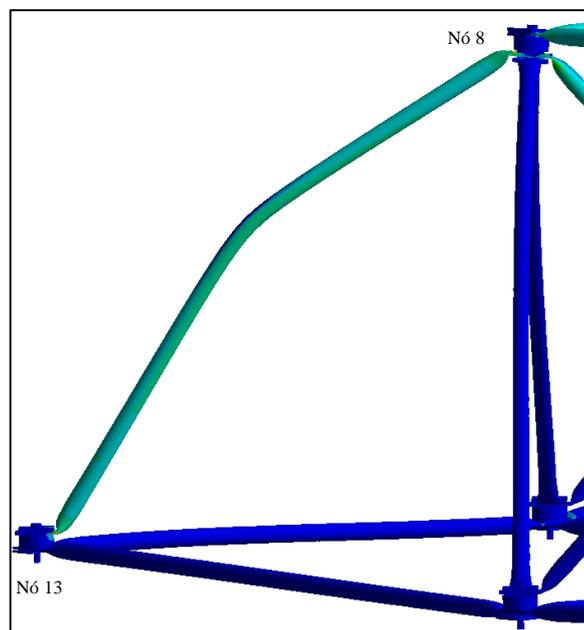


Figura 5.15 - Diagonal da treliça espacial entre os nós 8 e 13. Carga = 32,7 kN

Um detalhe dos nós 4, 6, 7, 8, 9 e 13 são apresentados na Figura 5.16, onde se observa maiores deformações que na análise linear e em alguns nós a concentração de tensões nas pontas amassadas dos tubos excedem o limite elástico a tração (300 MPa). Os parafusos, as chapas de reforço e os espaçadores tem baixa concentração de tensões.

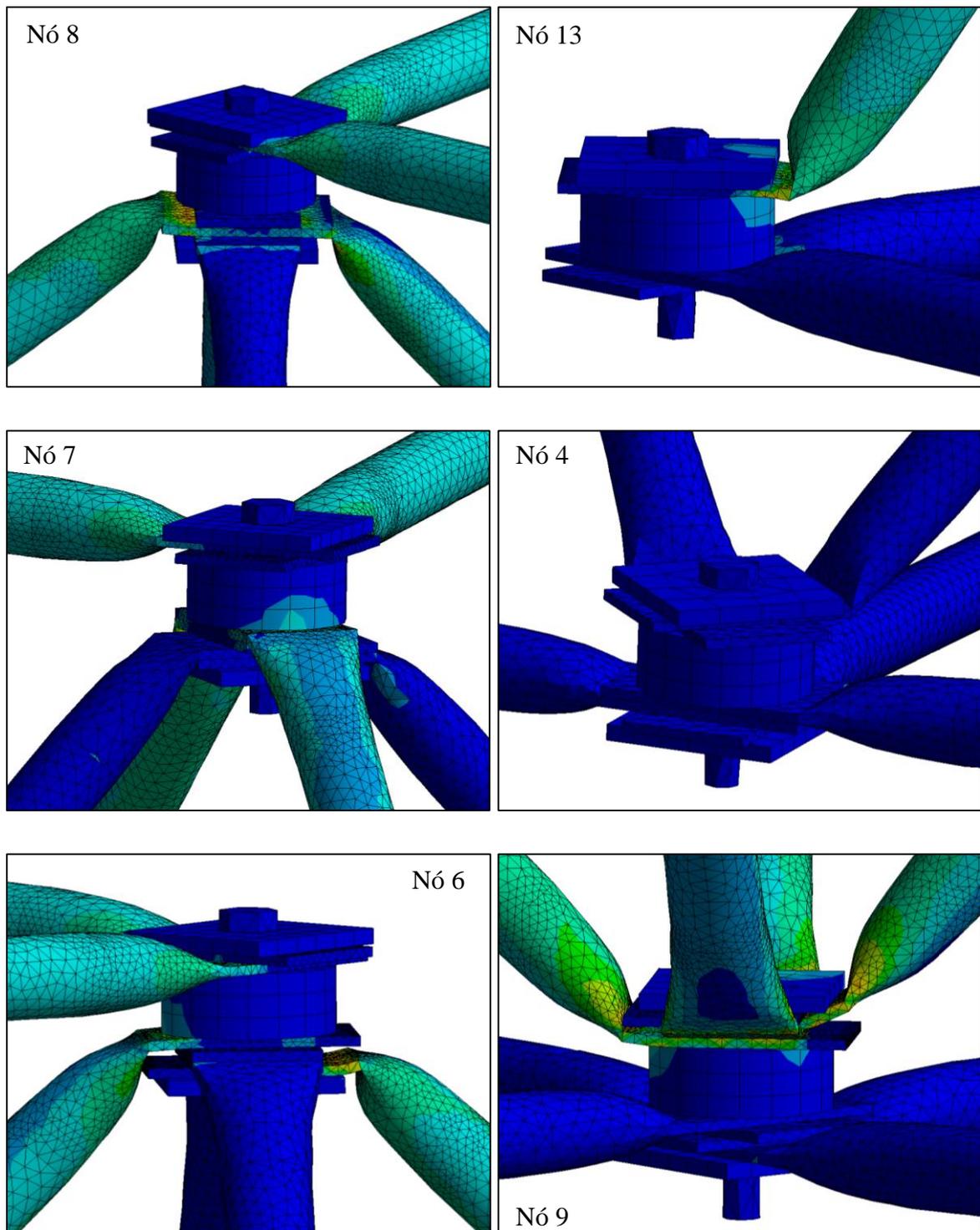


Figura 5.16 - Tensões de Von-Mises nos nós 4, 6, 7, 8, 9 e 13 em MPa. Carga = 32,7 kN

Nesta Análise os resultados dos deslocamentos e das tensões de Von Mises não foram simétricos, isto porque a treliça espacial não é totalmente simétrica. De fato, a treliça espacial foi modelada com uma ligação semelhante a real (ver Figura 5.17), isto é; a ligação apresenta

superposição das pontas amassadas das diagonais e dos banzos (Figura 5.17b). Isto gera nós em níveis diferentes e uma pequeníssima diferença nas forças axiais que chegam no banzo e na diagonal. Isto faz com que alguns elementos tubulares estejam submetidos a forças axiais minimamente maiores ou menores. Na Figura 5.15, a diagonal que flambou e provocou o primeiro colapso local foi a diagonal entre os nós 8 e 13. Para ter resultados simétricos se teria que simular uma ligação ideal (como na Figura 5.17a, onde as extremidades das barras, sob a chapa enrijecedora, coincidem). Entretanto, tal ligação ideal não corresponde à realidade.

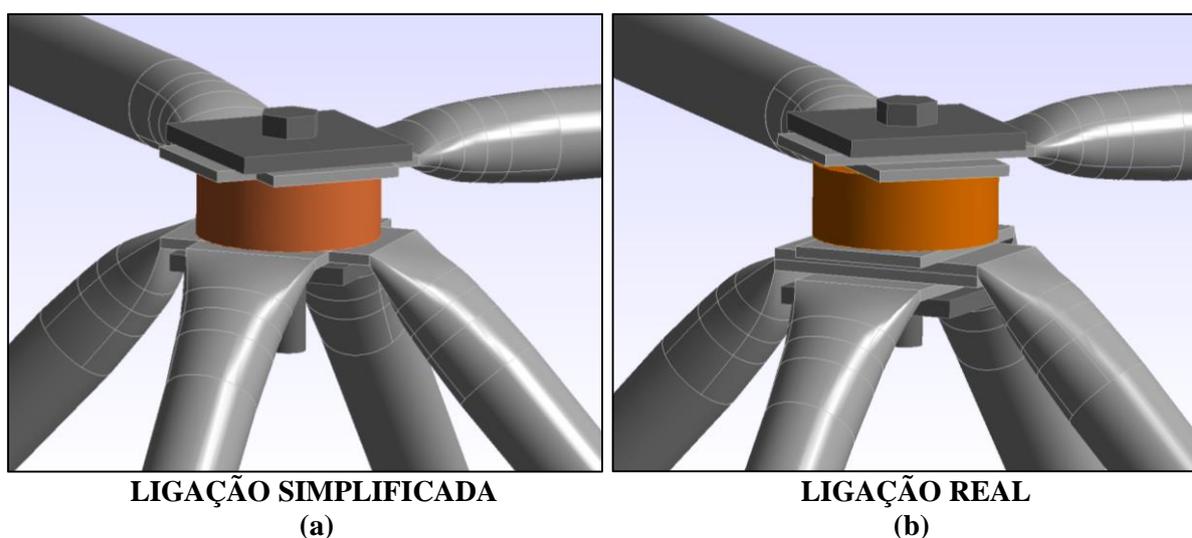


Figura 5.17 - Ligação simplificada versus ligação real

5.2.4. Análise não linear calibrando o modelo constitutivo dos materiais

Por conta dos resultados irrealistas obtidos na análise não linear anterior, foi feita outra análise não linear, mas desta vez o modelo constitutivo do aço foi calibrado para se ter uma análise numérica que se aproximasse mais dos resultados obtidos nos ensaios experimentais das treliças espaciais. A calibração feita foi em diversas partes da treliça criando-se dois modelos constitutivos para os elementos tubulares da treliça espacial. O primeiro modelo constitutivo (tensão vs deformação) foi estabelecido para as pontas amassadas, pontas estas representadas pela cor vermelha na Figura 5.18. O diagrama de tensão vs deformação (ver Figura 5.19) foi calibrado várias vezes até que os resultados dos deslocamentos verticais na análise numérica se aproximassem bem dos resultados experimentais. Esta hipótese foi considerada tendo em vista a complexidade dos processos de amassamento do tubo e da consequente modificação do diagrama tensão vs deformação daí resultante por conta da ação de tensões residuais no escoamento precoce da peça.

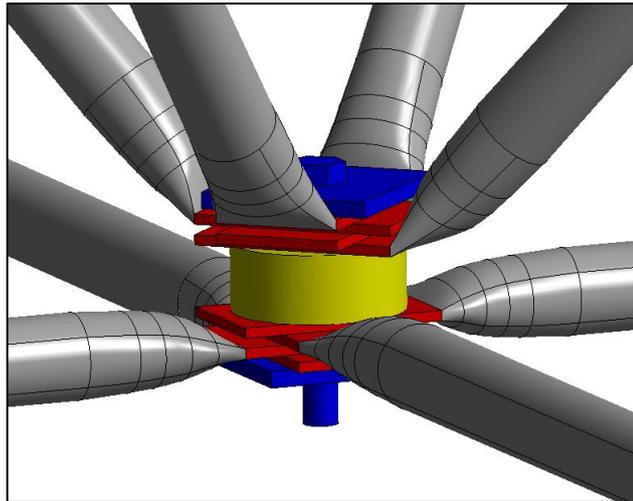


Figura 5.18- Atribuição dos modelos constitutivos na treliça espacial

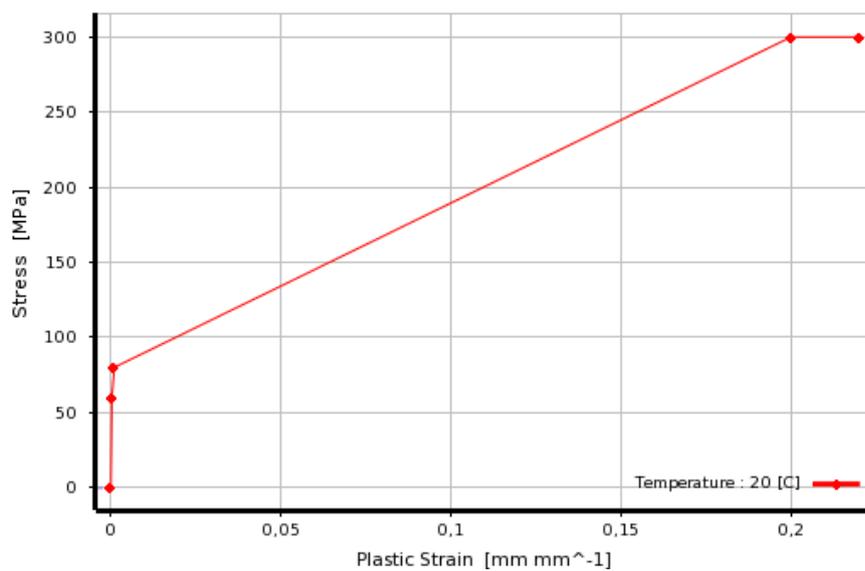


Figura 5.19 - Modelo constitutivo adotado para a parte amassada dos tubos

O segundo modelo constitutivo de tensão vs deformação (também calibrado) foi para a parte não amassada dos tubos (ver cor cinza na Figura 5.18), no qual foram adotados os seguintes resultados de caracterização do material (ver Apêndice B): módulo de elasticidade (E), 205000 MPa; tensão de escoamento (f_y), 300MPa; tensão última de ruptura de 450MPa, coeficiente de Poisson, 0,3. Estes dados do modelo constitutivo são apresentados graficamente na Figura 5.20.

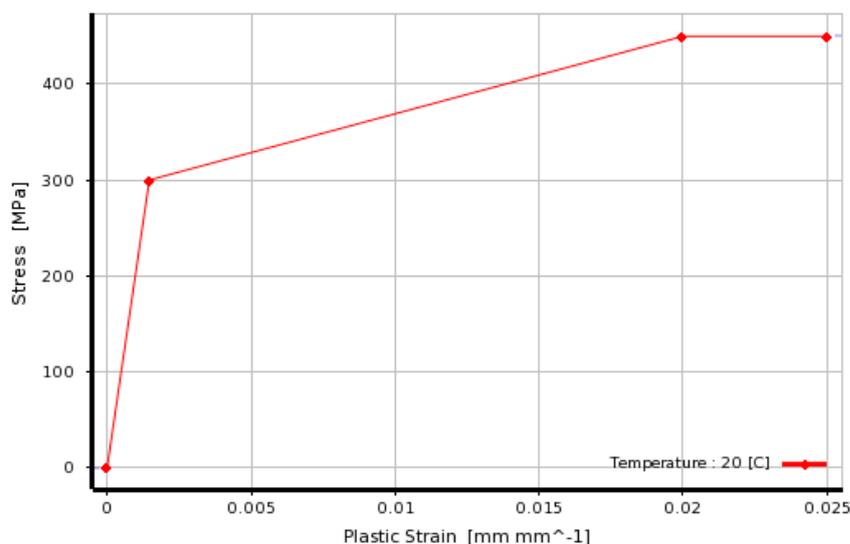


Figura 5.20 - Modelo constitutivo adotado para a parte não amassada dos tubos

Para as placas e parafusos foi adotado um material linear com módulo de elasticidade (E), 205000 MPa; tensão de escoamento (f_y), 300MPa e coeficiente de Poisson, 0,3. Para os espaçadores de madeira foi adotado um módulo de elasticidade de 27000 MPa com uma tensão de compressão paralela à fibra de 90 MPa. A geometria, a malha de elementos finitos e as condições de contorno empregadas para esta nova análise numérica foram iguais às utilizadas para a análise não linear anterior e que foram definidas no item 5.2.1 deste capítulo. Os resultados dos deslocamentos verticais da treliça espacial, obtidos para esta análise numérica com as calibrações de material descritas anteriormente, estão apresentados na Figura 5.21. A força aplicada no nó central (nó 9) foi gradualmente aumentada até se chegar ao valor de 39 kN, que coincide com a força que provocou o colapso global nos ensaios experimentais.

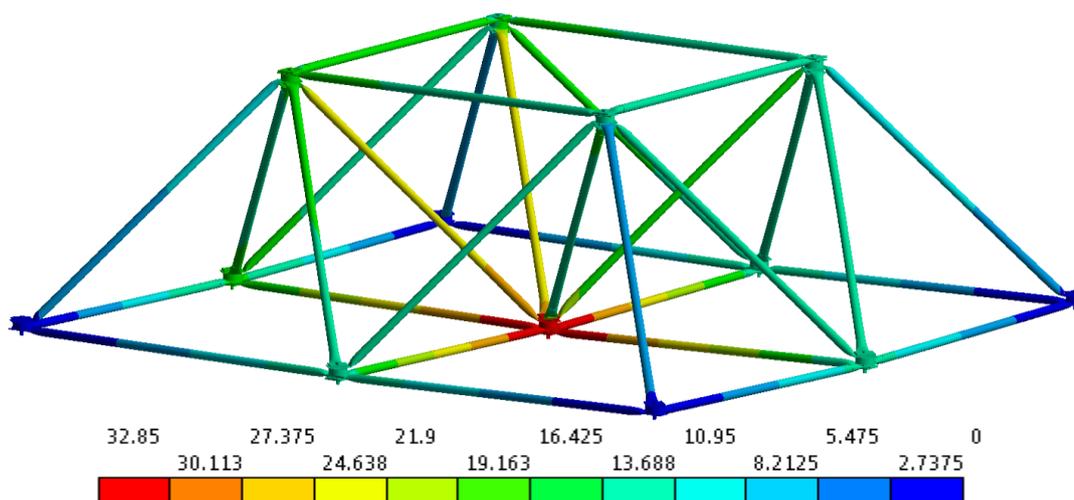


Figura 5.21 - Deslocamentos verticais da treliça espacial (mm). Carga 39 kN

Na Figura 5.22 são apresentados graficamente os dados dos deslocamentos verticais do nó 9 da treliça espacial, que foi o nó que apresentou maior deslocamento.

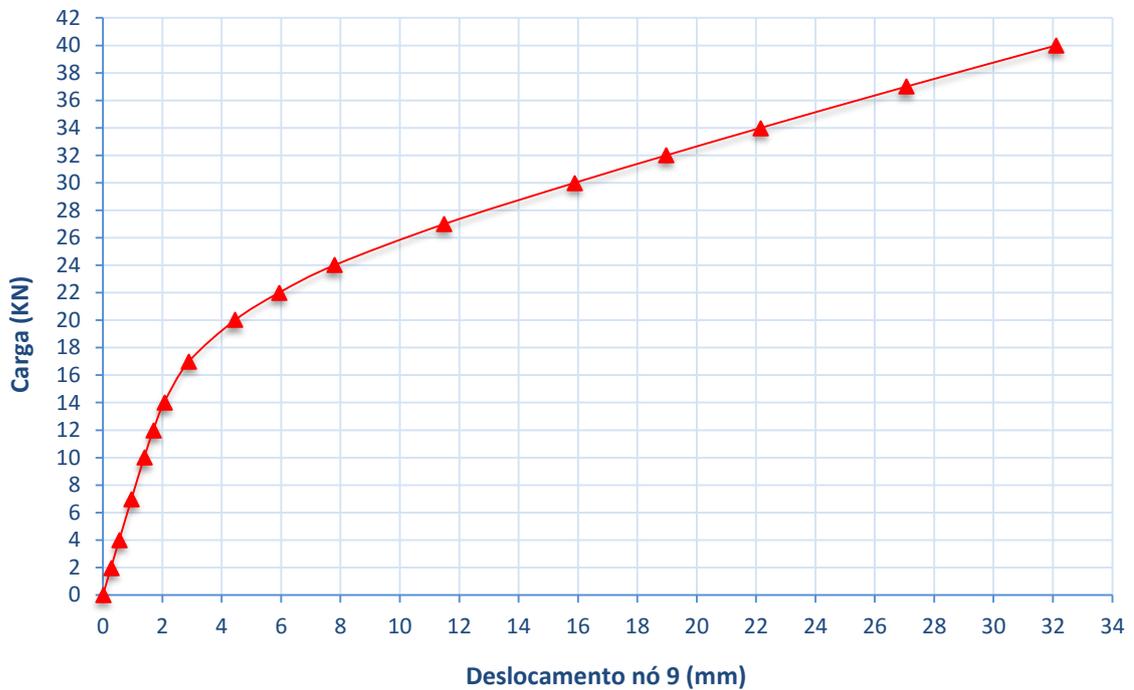


Figura 5.22- Diagrama carga vs. deslocamento do nó 9

Um detalhe do deslocamento do nó 9 é apresentado na Figura 5.23. Nesta figura é possível observar a deformação das pontas amassadas das diagonais para uma força de 39 kN sob a treliça espacial.

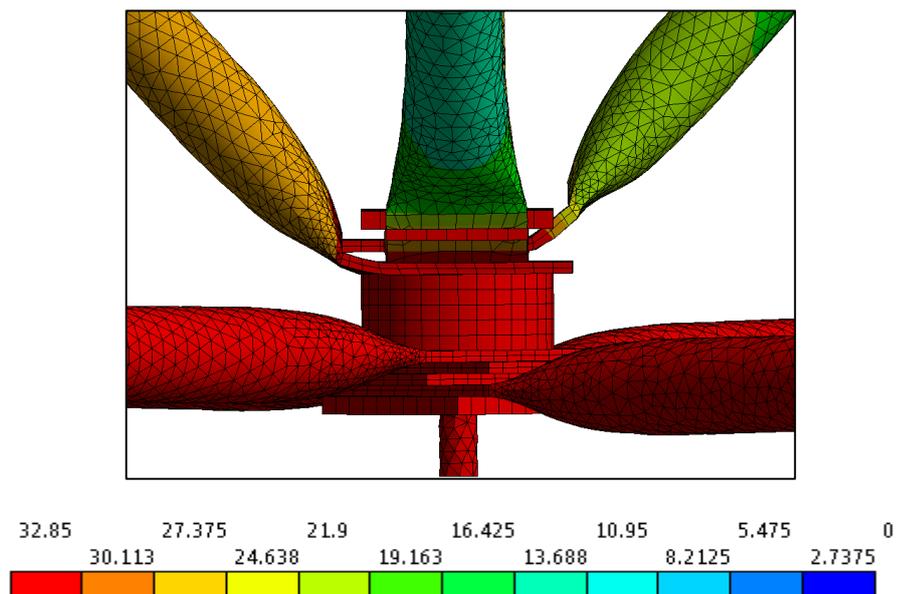


Figura 5.23 - Deslocamentos do nó 9 (mm). Carga = 39 kN

A distribuição das tensões de Von Mises na treliça espacial, para uma carga de 39 kN, são apresentados na Figura 5.24. Nesta figura é possível observar que alguns membros da treliça espacial têm maior concentração de tensões que outros. Isto leva-nos a pensar que só alguns membros tubulares da treliça espacial resistem o carregamento e que outros membros tubulares só servem como conexão ou para dar estabilidade à estrutura.

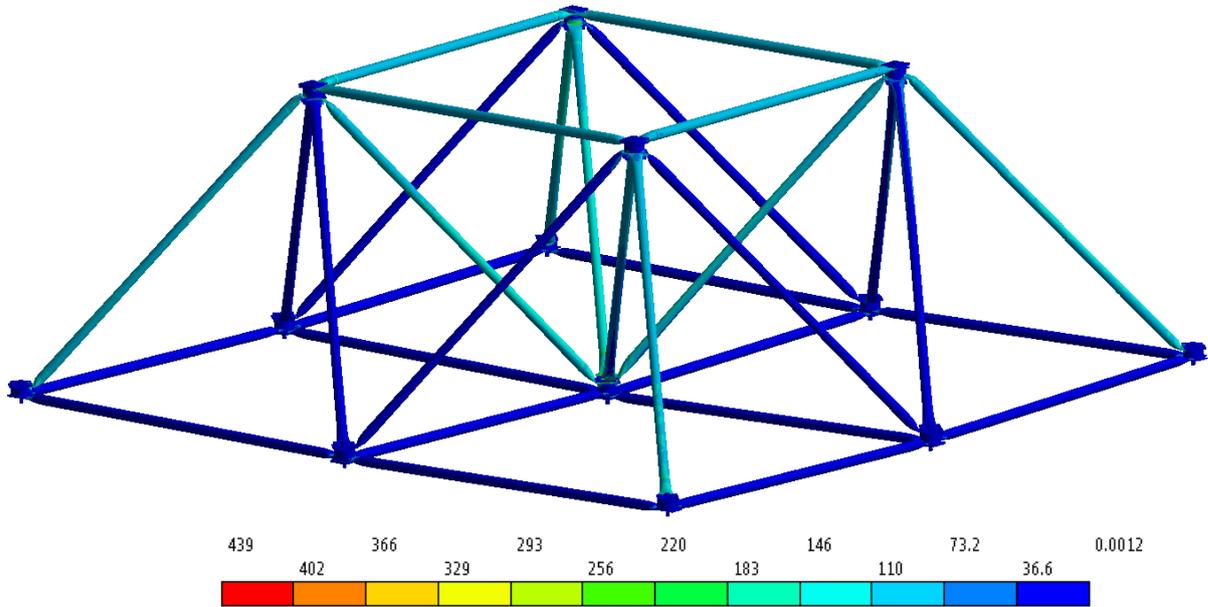


Figura 5.24 - Tensões de Von-Mises (MPa) na treliça espacial. Carga = 39 kN

A Figura 5.25 apresenta a distribuição das tensões de Von Mises para o nó 9 da treliça espacial, onde observa-se uma alta concentração de tensões na pontas amassadas das diagonais.

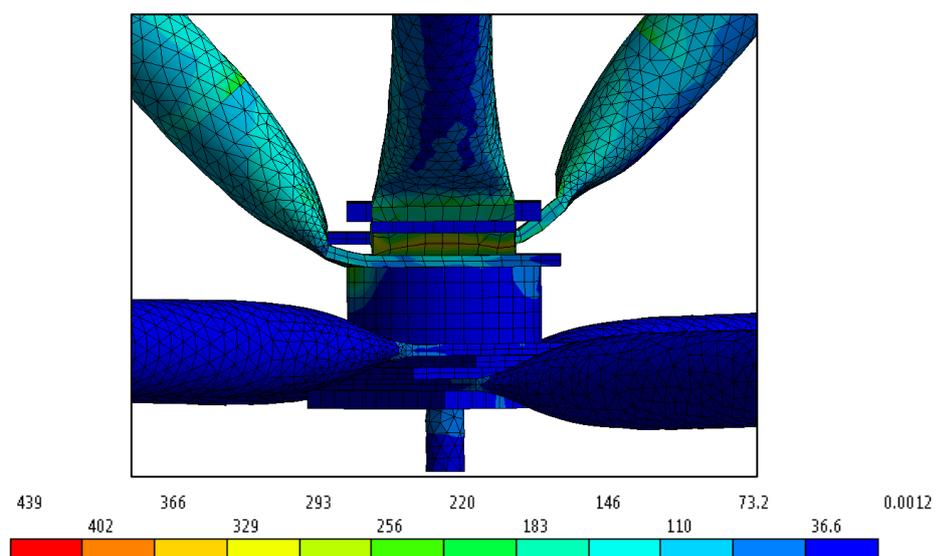


Figura 5.25 - Distribuição das tensões de Von-Mises no nó 9 (MPa). Carga = 39 kN

6. RESUMO DOS RESULTADOS

Neste capítulo se faz um resumo dos dados obtidos nas análises numéricas e nos ensaios experimentais, assim como uma comparação dos resultados experimentais obtidos nesta pesquisa com os resultados também experimentais obtidos em pesquisas anteriores (Freitas, 2008).

6.1. RESUMO DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Os dados obtidos nos três ensaios das treliças espaciais têm a mesma tendência e têm pouca variabilidade entre eles, razão pela qual se pode dizer que estes dados são confiáveis. Na Figura 6.1 apresenta-se um resumo dos diagramas da carga vs. deslocamento para o nó de maior deslocamento (nó 9) nos três ensaios das treliças espaciais com espaçadores de madeira.

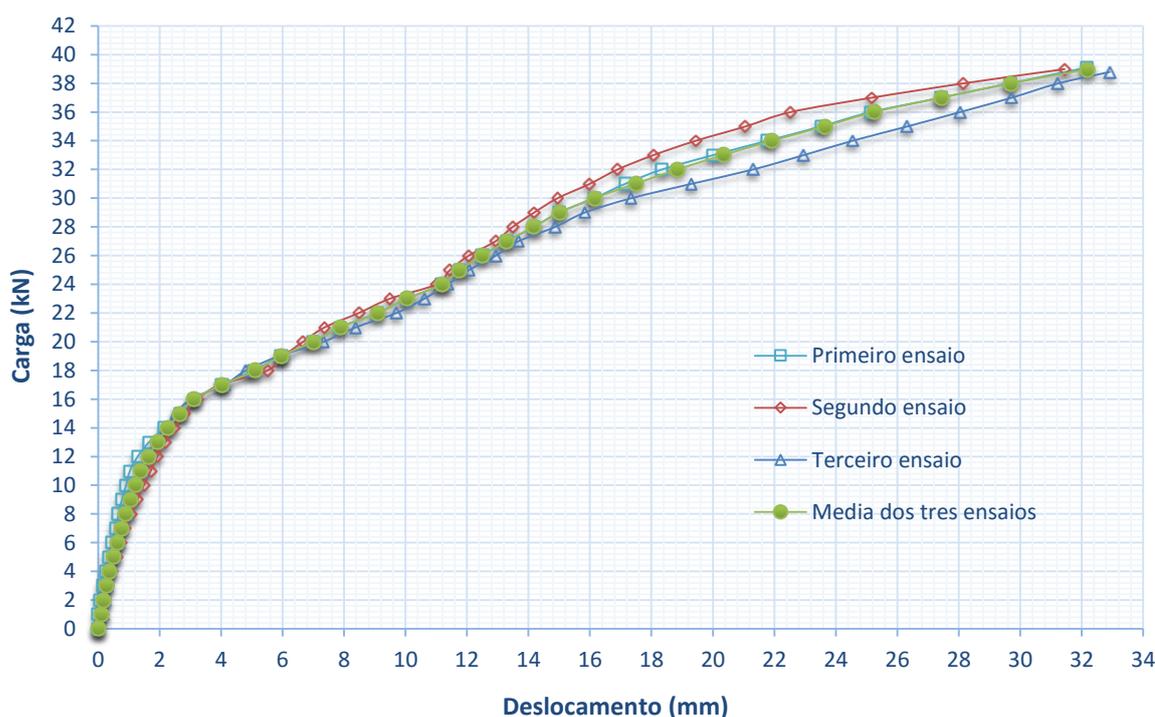


Figura 6.1 - Diagrama carga vs. deslocamento do nó 9 para os três ensaios

A média dos diagramas da carga vs. deslocamento do nó central dos ensaios das treliças espaciais com espaçadores de madeira obtida neste trabalho, foi comparada com a média deste diagrama obtida para as treliças espaciais com espaçadores de aço no trabalho de Freitas (2008) tal e como se indica na Figura 6.2. Esta comparação é possível porque nos dois trabalhos se utilizou a mesma geometria, materiais e o mesmo procedimento de carga, e a única diferença

é o material dos espaçadores. Também nesta mesma figura foram incluídos os dados de carga vs. deslocamento do nó central obtidos por Freitas (2008) para uma treliça espacial sem espaçador com o fim de observar a melhora na capacidade de suportar mais carga e diminuir os deslocamentos que se obtém com a incorporação do espaçador seja ele de madeira ou aço.

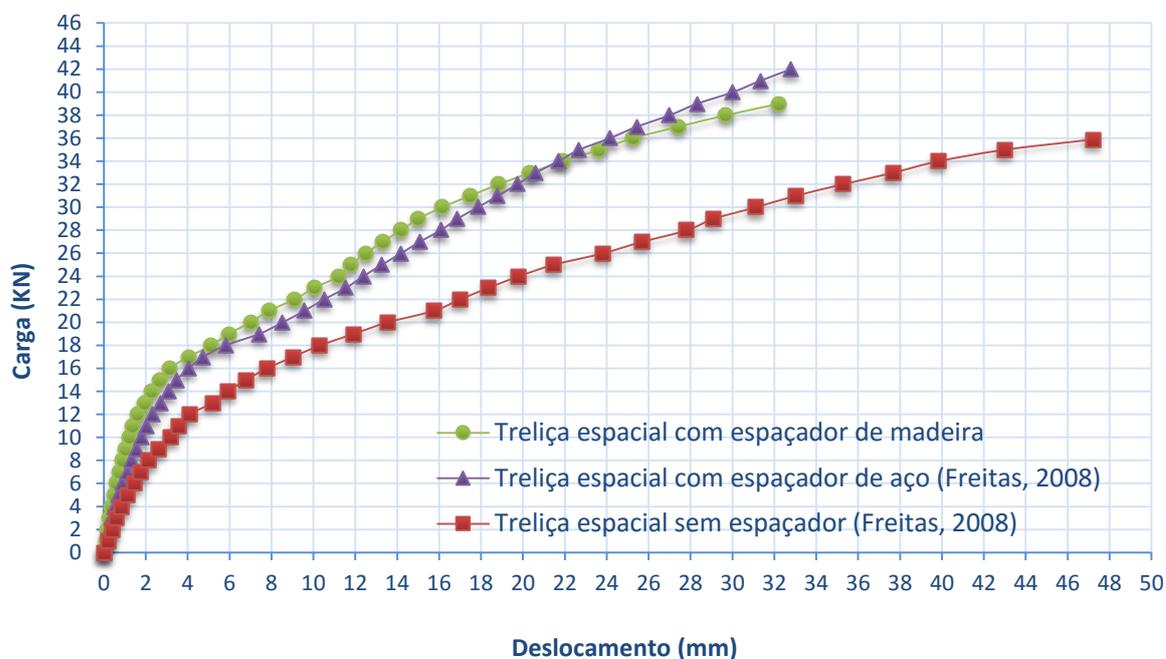


Figura 6.2 - Diagrama carga vs. deslocamento do central (nó 9)

Observando-se na Figura 6.2 os valores médios das curvas carga vs deformação, nota-se, a partir dos resultados obtidos por Freitas (2008), que: (a) a treliça espacial sem espaçadores colapsou com 35,9kN e deformação de 47,2mm e (b) a treliça espacial com espaçadores de aço e chapas enrijecedoras colapsou com 42kN e deformação de 32,80mm. Já os ensaios de treliça espacial neste trabalho, com espaçadores de madeira e chapas enrijecedoras, mostram que o colapso se deu a 39kN com deformação de 32,18mm. Portanto, nesta pesquisa a porcentagem do ganho de capacidade de carga de ruptura das treliças espaciais com espaçadores de madeira e chapas enrijecedoras com respeito a uma treliça espacial sem espaçadores é de aproximadamente 10% ($100 \times (39 - 35,9) / 35,9$). Ainda nesta comparação, a porcentagem de ganho de rigidez, i.e. menor deslocamento vertical apresentado, é de aproximadamente 32% ($100 \times (47,2 - 32,18) / 47,2$). Em relação à treliça espacial ensaiada por Freitas (2008) com espaçadores de aço e chapas enrijecedoras, as treliças aqui ensaiadas mostraram-se de capacidade portante bem parecidas; de fato as cargas de colapso foram, respectivamente, de 42kN e 39kN, ou seja, apenas 7% inferior em relação as treliças de Freitas (2008). Levando-se em conta que Freitas (2008) observou que a 25kN a treliça espacial sem espaçadores apresenta

deformações bastante excessivas podendo ser considerado o ponto de carga máxima. Nas treliças com enrijecedores (de aço ou de madeira) o ganho de carga em relação a 25kN corresponde a $(100 \times (42 - 25) / 25) = 68\%$ e $(100 \times (39 - 25) / 25) = 56\%$, respectivamente.

6.2. RESUMO DAS ANÁLISES NUMÉRICAS

Na Figura 6.3 são apresentados os diagramas da carga vs. deslocamento do nó 9 (nó de maior deslocamento) da treliça espacial para os ensaios experimentais, análise linear, análise não linear com modelos constitutivos não calibrados e análise não linear com modelos constitutivos calibrados.

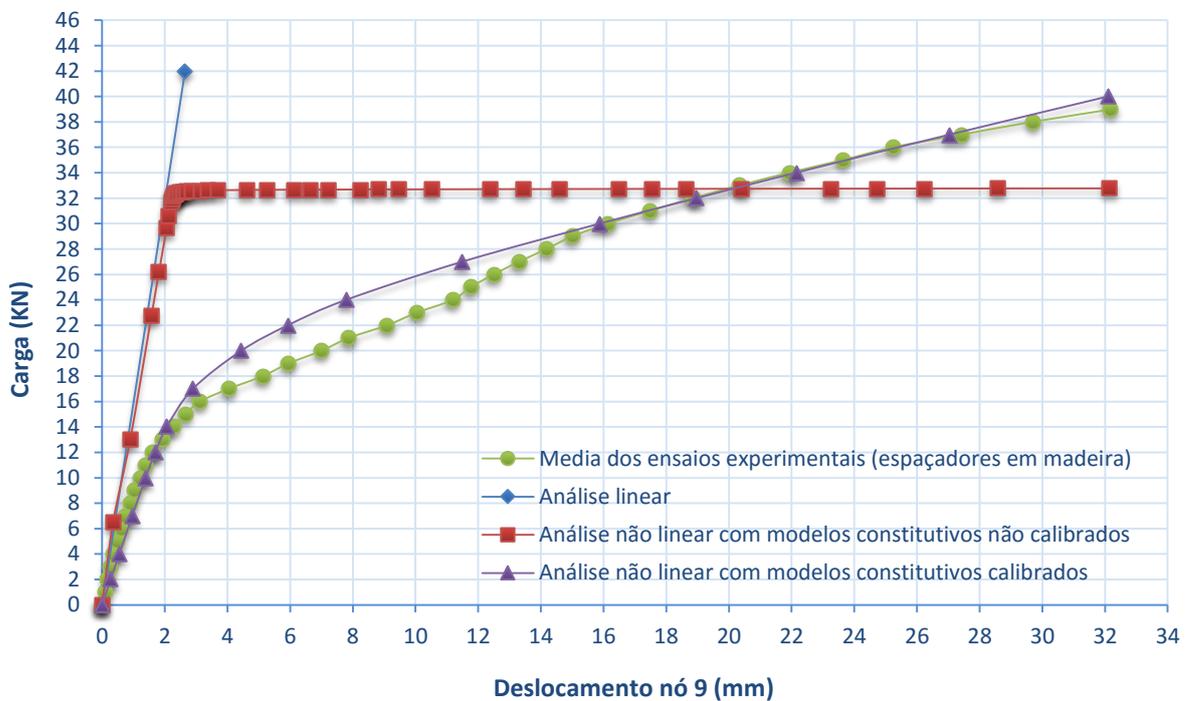


Figura 6.3 - Diagrama carga vs. deslocamento do nó 9

7. CONCLUSÕES

Apresentam-se neste capítulo as conclusões desta pesquisa subdividida em conclusões relativas ao estudo experimental e conclusões relativas ao estudo numérico. Em termos gerais os resultados obtidos foram satisfatórios, logrando assim, o objetivo deste trabalho que foi a determinação da viabilidade do uso dos espaçadores feitos de madeira para substituir espaçadores feitos em aço. O escopo do uso de espaçadores é dar maior capacidade de carga as treliças espaciais feitas com tubos de ponta amassadas nos nós típicos, pois sabe-se que por tais nós típicos apresentam excentricidades e pontas com momento de inércia, i.e. rigidez reduzida. Com o uso de espaçadores, seja de aço ou de madeira (como se propõe neste trabalho) as excentricidades da treliça espacial em tubos com ponta amassada são corrigidas e a treliça ganha maior capacidade de carga, respectivamente, 68% e 56% para espaçadores de madeira e espaçadores de aço, ambas as treliças também com chapas enrijecedoras. Pode-se ainda dizer uma das vantagens dos espaçadores de madeira é o peso e o custo mais reduzidos em comparação com os espaçadores de aço propostos por Freitas (2008).

7.1. CONCLUSÕES DO ESTUDO EXPERIMENTAL

A madeira Maçaranduba que foi utilizada para a confecção dos espaçadores resistiu ao carregamento imposto na treliça espacial até o colapso da treliça, sem apresentar trincas nem deformações excessivas. Isto mostra ser viável o uso deste tipo de material (e de outras madeiras com características similares) como elemento de correção da excentricidade sempre presente nos tubos de treliça com ponta amassada. Neste aspecto estes espaçadores podem substituir os espaçadores metálicos (em aço) anteriormente utilizados por Freitas (2008). Recomenda-se ainda que no espaçador de madeira (a fim de se ter mais garantia de se evitar futura fissura da madeira devido a variação da umidade), seja colocado um cintamento em arame recozido.

Comparando o desempenho dos espaçadores feitos em madeira e o desempenho dos espaçadores em aço (Freitas, 2008), observa-se que não houve diferença no desempenho estrutural da treliça espacial. Isto pode ser constatado tendo em vista que a carga global de colapso e os deslocamentos máximos na treliça espacial com espaçadores de madeira foram bem semelhantes aos obtidos com os espaçadores de aço.

7.2. CONCLUSÕES DO ESTUDO NUMÉRICO

Comparando o diagrama da carga vs. deslocamento do nó central da treliça espacial obtido nos ensaios experimentais com este mesmo diagrama obtido na análise linear observou-se claramente que uma análise linear não representa de maneira satisfatória o comportamento real da treliça espacial observado nos ensaios experimentais.

Na análise não linear com modelos constitutivos não calibrados se obteve uma melhora na representação do comportamento real da treliça espacial. Neste caso os resultados dos diagramas da carga vs. deslocamento da análise não linear com modelos constitutivos não calibrados comparados com os resultados dos ensaios experimentais das treliças espaciais não foram satisfatórios. Entretanto, nesta análise já se consegue capturar a forma da deformada no colapso da barra com grande semelhança ao que se apresentava nos ensaios experimentais, isto é; barras colapsando por flambagem em forma sinusoidal (como esperado), por exemplo, a barra da diagonal da treliça espacial apresentou tal deformação. Também nos modelos numéricos (com elementos finitos de casca e viga) se pode capturar bem as deformações locais nos nós presentes nos ensaios experimentais. Finalmente, com a análise não linear cujo modelo constitutivo utilizou uma calibração do diagrama de tensão vs deformação do aço dos tubos da treliça espacial, usando-se diagramas de tensão vs deformação bilinear modificados se conseguiu uma boa representação numérica dos deslocamentos verticais, bastante próximos aos valores observados nos ensaios experimentais.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Institute of Steel Construction (1999). AISC – LRFD, “Manual of steel construction”. Chicago

ANSYS (2012). Workbench User Guide. ANSYS, Inc., Canonsburg, PA, USA

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1986). NBR 8800, “Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios”. Rio de Janeiro

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1997). NBR 7190, “Projeto de estruturas de madeira”. Rio de Janeiro

Borrego, J. (1968), Space Grid Structures; Skeletal Frameworks and Stressed-Skin Systems, The Massachusetts Institute of Technology Cambridge, Massachusetts, and London, England.

Chen, W.-F.; Eric M. L. (2005). Structural Engineering, Handbook, Second Edition, U.S, 2005, pp. 24.46.

Chilton, J. (2000). Space Grid Structures, design and construction, Oxford, 2000, pp. 2

Hwang, K. J. (2010). Advanced Investigations of Grid Spatial Structures Considering Various Connection Systems, Stuttgart, April 2010.

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.

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.

Freitas, C., Bezerra, L., Araujo, R., and Araújo, G. (2012). Experimental and Numerical Investigation of Space-Trusses with the Reinforcement of Stamped Connections. ICSDEC 2012: pp. 423-430.

- Lee, H.-H (2011). Finite Element Simulation with ANSYS Workbench 13. P.O. Box 1334, Mission KS 66222: Setephen Schroff.
- Madi, U. R (1984). Idealising the members behaviour in the analysis of pin-jointed spatial structures. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SPACE STRUCTURES, 3. Guildford, UK, Sept. 1984. Proceedings. London/New York, Elsevier Applied Science. P. 462-467.
- 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.
- Makowski, Z. S. (2002), Development of Jointing Systems for Modular Pre-fabricated Steel Space Structures, Proceedings of the International Symposium for Light weight Structures in Civil Engineering (LSCE), June 2002, Warsaw, Poland.
- 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.
- Rêgo, E. M. F. D. (2013). Modelagem de conexão e parafuso em ponte ferroviária para análise de fadiga. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, UnB, Brasília.
- Setareh, M. et al (2011). Website, Structure And Form Analysis System, Polytechnic Institute and State University, Virginia.
- SNIF (2014). Sistema Nacional de Informações Florestais, Produção Florestal, Cadeia Produtiva, Brasília D.F.
- 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.

Supple, W. J.; Collins, I. (1981). Limit state analysis of double-layer grids In: MAKOWSKI, Z.S., ed. Analysis, design and construction of doublelayer grids. London, Applied Science Publishers. p.93-117.

Vendrame, A. M (2002). Análise numérica e experimental de estruturas espaciais constituídas de barras de extremidades estampadas: estudo dos nós. Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, n. 20, p. 75-103

A. RESULTADOS DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Tabela A.8.1 - Dados obtidos no primeiro ensaio

| Carga (kN) | Deslocamento vertical (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 | 0,00 | 0,19 | 0,14 | 0,12 | 0,20 | 0,01 | 0,03 | 0,22 | 0,00 |
| 2,0 | 0,00 | 0,25 | 0,18 | 0,17 | 0,27 | 0,05 | 0,07 | 0,29 | 0,07 |
| 3,0 | 0,00 | 0,31 | 0,23 | 0,21 | 0,34 | 0,09 | 0,11 | 0,36 | 0,16 |
| 4,0 | 0,02 | 0,37 | 0,27 | 0,26 | 0,41 | 0,12 | 0,16 | 0,43 | 0,25 |
| 5,0 | 0,05 | 0,43 | 0,32 | 0,30 | 0,49 | 0,17 | 0,20 | 0,51 | 0,35 |
| 6,0 | 0,08 | 0,50 | 0,37 | 0,35 | 0,57 | 0,22 | 0,25 | 0,58 | 0,46 |
| 7,0 | 0,11 | 0,57 | 0,43 | 0,41 | 0,66 | 0,27 | 0,30 | 0,66 | 0,57 |
| 8,0 | 0,14 | 0,62 | 0,47 | 0,46 | 0,73 | 0,31 | 0,34 | 0,73 | 0,67 |
| 9,0 | 0,17 | 0,69 | 0,52 | 0,50 | 0,81 | 0,36 | 0,38 | 0,80 | 0,77 |
| 10,0 | 0,21 | 0,76 | 0,59 | 0,57 | 0,91 | 0,43 | 0,44 | 0,90 | 0,91 |
| 11,0 | 0,24 | 0,84 | 0,66 | 0,65 | 1,01 | 0,49 | 0,49 | 1,01 | 1,03 |
| 12,0 | 0,32 | 0,95 | 0,69 | 0,75 | 1,15 | 0,61 | 0,61 | 1,12 | 1,29 |
| 13,0 | 0,35 | 1,08 | 0,81 | 0,82 | 1,25 | 0,75 | 0,97 | 1,23 | 1,65 |
| 14,0 | 0,48 | 1,21 | 0,93 | 0,95 | 1,39 | 0,86 | 1,15 | 1,36 | 2,15 |
| 15,0 | 0,53 | 1,39 | 1,05 | 1,08 | 1,55 | 0,98 | 1,65 | 1,49 | 2,66 |
| 16,0 | 0,71 | 1,49 | 1,30 | 1,25 | 1,68 | 1,15 | 2,08 | 1,71 | 3,12 |
| 17,0 | 0,85 | 2,14 | 2,03 | 1,45 | 1,90 | 1,51 | 2,62 | 2,45 | 4,04 |
| 18,0 | 0,97 | 2,53 | 3,43 | 2,45 | 2,65 | 1,93 | 2,75 | 3,29 | 5,05 |
| 19,0 | 1,08 | 2,69 | 3,52 | 2,53 | 3,45 | 2,05 | 2,88 | 4,55 | 5,95 |
| 20,0 | 1,19 | 2,96 | 3,70 | 2,61 | 3,65 | 2,21 | 2,91 | 5,10 | 7,00 |
| 21,0 | 1,51 | 3,11 | 3,91 | 2,81 | 3,97 | 2,43 | 3,11 | 5,22 | 7,87 |
| 22,0 | 1,89 | 3,45 | 4,12 | 3,45 | 4,55 | 2,85 | 3,32 | 5,43 | 9,09 |
| 23,0 | 2,55 | 4,15 | 4,28 | 3,75 | 4,89 | 3,32 | 3,52 | 5,67 | 10,05 |
| 24,0 | 2,66 | 5,30 | 4,50 | 3,85 | 5,12 | 4,99 | 4,55 | 6,05 | 11,19 |
| 25,0 | 2,80 | 5,55 | 4,72 | 3,98 | 5,58 | 5,32 | 4,78 | 6,30 | 11,76 |
| 26,0 | 2,95 | 5,86 | 5,10 | 4,21 | 5,88 | 5,55 | 4,98 | 6,65 | 12,50 |
| 27,0 | 3,29 | 6,01 | 5,42 | 4,55 | 6,25 | 5,86 | 5,45 | 7,03 | 13,30 |
| 28,0 | 3,58 | 6,45 | 5,64 | 4,88 | 6,79 | 6,12 | 6,02 | 7,45 | 14,18 |
| 29,0 | 3,89 | 6,88 | 5,94 | 5,21 | 7,36 | 6,42 | 6,58 | 7,85 | 15,01 |
| 30,0 | 4,10 | 7,30 | 6,55 | 5,78 | 8,15 | 6,87 | 7,13 | 8,45 | 16,14 |
| 31,0 | 4,33 | 8,03 | 7,10 | 6,23 | 8,98 | 7,25 | 7,95 | 9,03 | 17,15 |
| 32,0 | 4,56 | 8,88 | 7,89 | 6,79 | 9,76 | 7,89 | 9,01 | 9,81 | 18,35 |
| 33,0 | 4,89 | 9,95 | 8,95 | 7,33 | 10,55 | 8,55 | 10,25 | 10,79 | 20,01 |
| 34,0 | 5,23 | 11,08 | 10,01 | 7,88 | 11,81 | 9,22 | 12,04 | 12,15 | 21,78 |
| 35,0 | 5,59 | 12,30 | 11,38 | 8,55 | 12,92 | 9,99 | 13,55 | 13,58 | 23,53 |
| 36,0 | 6,02 | 13,49 | 12,88 | 10,22 | 14,05 | 11,17 | 15,16 | 15,15 | 25,15 |
| 37,0 | 6,55 | 14,85 | 15,05 | 11,41 | 15,15 | 12,35 | 16,29 | 16,85 | 27,43 |
| 38,0 | 7,79 | 16,12 | 16,35 | 12,32 | 16,19 | 13,55 | 17,49 | 18,25 | 29,69 |
| 39,1 | 9,55 | 17,55 | 17,65 | 13,53 | 17,12 | 15,23 | 18,71 | 19,55 | 32,18 |

Tabela A.8.2- Dados obtidos no segundo ensaio

| Carga (kN) | Deslocamento vertical (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 | 0,03 | 0,06 | 0,07 | 0,06 | 0,10 | 0,06 | 0,07 | 0,10 | 0,16 |
| 2 | 0,05 | 0,09 | 0,09 | 0,08 | 0,14 | 0,09 | 0,10 | 0,14 | 0,22 |
| 3 | 0,08 | 0,13 | 0,13 | 0,11 | 0,23 | 0,13 | 0,15 | 0,21 | 0,31 |
| 4 | 0,11 | 0,18 | 0,18 | 0,15 | 0,33 | 0,18 | 0,20 | 0,28 | 0,46 |
| 5 | 0,13 | 0,22 | 0,23 | 0,18 | 0,41 | 0,22 | 0,25 | 0,35 | 0,60 |
| 6 | 0,15 | 0,27 | 0,29 | 0,22 | 0,52 | 0,27 | 0,31 | 0,42 | 0,74 |
| 7 | 0,16 | 0,32 | 0,35 | 0,26 | 0,62 | 0,31 | 0,36 | 0,50 | 0,88 |
| 8 | 0,19 | 0,37 | 0,41 | 0,31 | 0,72 | 0,36 | 0,42 | 0,58 | 1,08 |
| 9 | 0,20 | 0,42 | 0,48 | 0,37 | 0,83 | 0,42 | 0,49 | 0,67 | 1,28 |
| 10 | 0,23 | 0,48 | 0,55 | 0,42 | 0,94 | 0,47 | 0,56 | 0,76 | 1,49 |
| 11 | 0,25 | 0,54 | 0,63 | 0,48 | 1,05 | 0,52 | 0,63 | 0,86 | 1,71 |
| 12 | 0,28 | 0,62 | 0,72 | 0,54 | 1,18 | 0,58 | 0,71 | 0,97 | 1,93 |
| 13 | 0,31 | 0,69 | 0,80 | 0,61 | 1,30 | 0,65 | 0,79 | 1,07 | 2,18 |
| 14 | 0,35 | 0,79 | 0,91 | 0,68 | 1,45 | 0,74 | 0,91 | 1,21 | 2,48 |
| 15 | 0,41 | 0,91 | 1,03 | 0,76 | 1,60 | 0,83 | 1,03 | 1,36 | 2,80 |
| 16 | 0,49 | 1,08 | 1,21 | 0,86 | 1,78 | 0,94 | 1,22 | 1,56 | 3,23 |
| 17 | 0,62 | 1,53 | 1,75 | 1,11 | 2,12 | 1,21 | 1,80 | 2,02 | 3,97 |
| 18 | 0,79 | 2,42 | 3,46 | 2,10 | 2,99 | 1,70 | 3,19 | 3,93 | 5,51 |
| 19 | 0,88 | 2,58 | 3,56 | 2,14 | 3,21 | 1,81 | 3,29 | 4,09 | 6,03 |
| 20 | 1,02 | 2,80 | 3,67 | 2,20 | 3,48 | 2,00 | 3,41 | 4,28 | 6,67 |
| 21 | 1,14 | 3,02 | 3,88 | 2,35 | 3,87 | 2,19 | 3,57 | 4,55 | 7,37 |
| 22 | 1,70 | 3,30 | 4,18 | 3,09 | 5,03 | 2,61 | 3,81 | 5,22 | 8,48 |
| 23 | 2,25 | 3,75 | 4,41 | 3,58 | 6,06 | 3,21 | 4,08 | 5,75 | 9,49 |
| 24 | 3,50 | 5,29 | 4,66 | 3,77 | 7,06 | 4,84 | 4,87 | 6,18 | 11,01 |
| 25 | 3,55 | 5,46 | 4,83 | 3,88 | 7,28 | 4,99 | 5,04 | 6,37 | 11,45 |
| 26 | 3,66 | 5,70 | 5,15 | 4,08 | 7,59 | 5,18 | 5,32 | 6,71 | 12,06 |
| 27 | 4,08 | 6,07 | 5,43 | 4,30 | 8,03 | 5,52 | 5,67 | 7,06 | 12,93 |
| 28 | 4,27 | 6,29 | 5,56 | 4,48 | 8,28 | 5,70 | 5,91 | 7,30 | 13,49 |
| 29 | 4,48 | 6,53 | 5,84 | 4,76 | 8,67 | 5,92 | 6,23 | 7,63 | 14,18 |
| 30 | 4,71 | 6,88 | 6,27 | 5,08 | 9,08 | 6,16 | 6,68 | 8,03 | 14,95 |
| 31 | 5,04 | 7,38 | 6,89 | 5,55 | 9,63 | 6,52 | 7,33 | 8,59 | 15,99 |
| 32 | 5,34 | 7,91 | 7,48 | 5,97 | 10,11 | 6,93 | 7,97 | 9,16 | 16,90 |
| 33 | 5,71 | 8,60 | 8,30 | 6,51 | 10,79 | 7,46 | 8,85 | 9,86 | 18,06 |
| 34 | 6,20 | 9,70 | 9,41 | 7,09 | 11,47 | 8,21 | 10,19 | 10,69 | 19,44 |
| 35 | 6,63 | 11,03 | 11,00 | 7,82 | 12,03 | 8,93 | 11,97 | 11,72 | 21,06 |
| 36 | 7,11 | 11,93 | 12,35 | 8,74 | 13,37 | 9,54 | 13,26 | 12,96 | 22,52 |
| 37 | 8,20 | 12,79 | 14,10 | 10,85 | 15,41 | 10,63 | 14,76 | 15,34 | 25,15 |
| 38 | 9,31 | 13,89 | 15,25 | 11,89 | 16,68 | 11,83 | 16,11 | 16,95 | 28,14 |
| 39 | 10,95 | 14,96 | 16,45 | 13,01 | 18,09 | 13,15 | 17,45 | 18,39 | 31,45 |

Tabela A.8.3 - Dados obtidos no terceiro ensaio

| Carga (kN) | Deslocamento vertical (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 | 0,08 | 0,08 | 0,07 | 0,06 | 0,10 | 0,15 | 0,09 | 0,12 | 0,16 |
| 2,0 | 0,08 | 0,11 | 0,09 | 0,09 | 0,12 | 0,14 | 0,12 | 0,12 | 0,21 |
| 3,0 | 0,13 | 0,15 | 0,13 | 0,13 | 0,18 | 0,20 | 0,17 | 0,19 | 0,28 |
| 4,0 | 0,17 | 0,20 | 0,18 | 0,18 | 0,24 | 0,28 | 0,22 | 0,27 | 0,38 |
| 5,0 | 0,23 | 0,25 | 0,22 | 0,22 | 0,30 | 0,35 | 0,28 | 0,34 | 0,50 |
| 6,0 | 0,29 | 0,31 | 0,27 | 0,27 | 0,37 | 0,42 | 0,34 | 0,42 | 0,67 |
| 7,0 | 0,33 | 0,37 | 0,32 | 0,32 | 0,43 | 0,56 | 0,39 | 0,50 | 0,79 |
| 8,0 | 0,39 | 0,43 | 0,37 | 0,37 | 0,48 | 0,64 | 0,46 | 0,58 | 0,92 |
| 9,0 | 0,45 | 0,50 | 0,44 | 0,43 | 0,55 | 0,77 | 0,53 | 0,68 | 1,08 |
| 10,0 | 0,51 | 0,57 | 0,50 | 0,49 | 0,62 | 0,88 | 0,61 | 0,77 | 1,24 |
| 11,0 | 0,58 | 0,65 | 0,58 | 0,55 | 0,70 | 0,98 | 0,69 | 0,88 | 1,41 |
| 12,0 | 0,65 | 0,75 | 0,68 | 0,61 | 0,79 | 1,10 | 0,79 | 0,99 | 1,65 |
| 13,0 | 0,73 | 0,87 | 0,79 | 0,69 | 0,91 | 1,26 | 0,90 | 1,12 | 1,92 |
| 14,0 | 0,80 | 1,02 | 0,94 | 0,76 | 1,01 | 1,43 | 1,04 | 1,25 | 2,21 |
| 15,0 | 0,91 | 1,17 | 1,09 | 0,86 | 1,14 | 1,60 | 1,21 | 1,40 | 2,53 |
| 16,0 | 1,02 | 1,49 | 1,43 | 0,99 | 1,28 | 1,87 | 1,59 | 1,63 | 3,02 |
| 17,0 | 1,19 | 2,44 | 2,39 | 1,23 | 1,41 | 2,50 | 2,76 | 2,16 | 4,10 |
| 18,0 | 1,39 | 2,61 | 2,87 | 1,78 | 1,82 | 2,77 | 3,06 | 2,99 | 4,81 |
| 19,0 | 1,70 | 2,87 | 3,51 | 2,70 | 2,52 | 3,20 | 3,49 | 4,26 | 5,88 |
| 20,0 | 1,66 | 3,12 | 3,70 | 4,13 | 3,94 | 4,09 | 3,75 | 5,14 | 7,33 |
| 21,0 | 1,61 | 3,90 | 3,84 | 4,25 | 4,37 | 5,10 | 4,14 | 5,33 | 8,38 |
| 22,0 | 1,57 | 4,84 | 4,03 | 4,43 | 4,81 | 6,28 | 4,67 | 5,56 | 9,70 |
| 23,0 | 1,59 | 5,10 | 4,23 | 4,58 | 4,99 | 6,52 | 4,88 | 5,79 | 10,61 |
| 24,0 | 1,60 | 5,34 | 4,46 | 4,70 | 5,17 | 6,73 | 5,07 | 6,01 | 11,37 |
| 25,0 | 1,66 | 5,59 | 4,69 | 4,82 | 5,37 | 6,95 | 5,26 | 6,25 | 12,07 |
| 26,0 | 1,69 | 5,86 | 5,02 | 5,11 | 5,65 | 7,26 | 5,52 | 6,62 | 12,94 |
| 27,0 | 1,72 | 6,17 | 5,39 | 5,40 | 5,94 | 7,62 | 5,83 | 7,06 | 13,68 |
| 28,0 | 1,95 | 6,68 | 6,02 | 6,01 | 6,46 | 8,21 | 6,36 | 7,93 | 14,87 |
| 29,0 | 2,12 | 7,18 | 6,65 | 6,58 | 6,93 | 8,76 | 6,91 | 8,75 | 15,83 |
| 30,0 | 2,39 | 7,90 | 7,63 | 7,61 | 7,68 | 9,60 | 7,77 | 10,14 | 17,34 |
| 31,0 | 2,83 | 8,93 | 9,34 | 9,15 | 8,85 | 10,69 | 9,14 | 12,36 | 19,30 |
| 32,0 | 3,19 | 10,35 | 10,94 | 10,38 | 9,80 | 12,10 | 10,70 | 14,04 | 21,30 |
| 33,0 | 3,98 | 13,68 | 13,45 | 11,64 | 10,95 | 15,20 | 13,83 | 15,80 | 22,95 |
| 34,0 | 4,61 | 15,23 | 14,61 | 12,42 | 12,24 | 16,70 | 15,22 | 16,70 | 24,54 |
| 35,0 | 4,65 | 16,57 | 15,73 | 13,29 | 13,11 | 18,08 | 16,46 | 17,65 | 26,32 |
| 36,0 | 4,64 | 17,84 | 16,81 | 14,16 | 14,01 | 19,42 | 17,61 | 18,56 | 28,04 |
| 37,0 | 4,62 | 18,92 | 17,70 | 14,97 | 14,67 | 20,61 | 18,63 | 19,33 | 29,71 |
| 38,0 | 4,61 | 20,06 | 18,64 | 15,76 | 15,63 | 21,83 | 19,71 | 20,35 | 31,23 |
| 38,8 | 4,60 | 21,02 | 19,55 | 16,75 | 16,55 | 22,80 | 20,78 | 21,49 | 32,91 |

Tabela A.8.4 - Deslocamento vertical do nó 9

| Primeiro Ensaio | | Segundo Ensaio | | Terceiro Ensaio | | Media dos Ensaios | |
|------------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|------------------------|-------------------|--------------------------|-------------------|
| Carga (kN) | Deslocamento (mm) | Carga (kN) | Deslocamento (mm) | Carga (kN) | Deslocamento (mm) | Carga (kN) | Deslocamento (mm) |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1,0 | 0,00 | 1,0 | 0,16 | 1,0 | 0,16 | 1,0 | 0,11 |
| 2,0 | 0,07 | 2,0 | 0,22 | 2,0 | 0,21 | 2,0 | 0,17 |
| 3,0 | 0,16 | 3,0 | 0,31 | 3,0 | 0,28 | 3,0 | 0,25 |
| 4,0 | 0,25 | 4,0 | 0,46 | 4,0 | 0,38 | 4,0 | 0,36 |
| 5,0 | 0,35 | 5,0 | 0,60 | 5,0 | 0,50 | 5,0 | 0,48 |
| 6,0 | 0,46 | 6,0 | 0,74 | 6,0 | 0,67 | 6,0 | 0,62 |
| 7,0 | 0,57 | 7,0 | 0,88 | 7,0 | 0,79 | 7,0 | 0,74 |
| 8,0 | 0,67 | 8,0 | 1,08 | 8,0 | 0,92 | 8,0 | 0,89 |
| 9,0 | 0,77 | 9,0 | 1,28 | 9,0 | 1,08 | 9,0 | 1,04 |
| 10,0 | 0,91 | 10,0 | 1,49 | 10,0 | 1,24 | 10,0 | 1,21 |
| 11,0 | 1,03 | 11,0 | 1,71 | 11,0 | 1,41 | 11,0 | 1,38 |
| 12,0 | 1,29 | 12,0 | 1,93 | 12,0 | 1,65 | 12,0 | 1,62 |
| 13,0 | 1,65 | 13,0 | 2,18 | 13,0 | 1,92 | 13,0 | 1,92 |
| 14,0 | 2,15 | 14,0 | 2,48 | 14,0 | 2,21 | 14,0 | 2,28 |
| 15,0 | 2,66 | 15,0 | 2,80 | 15,0 | 2,53 | 15,0 | 2,66 |
| 16,0 | 3,12 | 16,0 | 3,23 | 16,0 | 3,02 | 16,0 | 3,12 |
| 17,0 | 4,04 | 17,0 | 3,97 | 17,0 | 4,10 | 17,0 | 4,04 |
| 18,0 | 5,05 | 18,0 | 5,51 | 18,0 | 4,81 | 18,0 | 5,12 |
| 19,0 | 5,95 | 19,0 | 6,03 | 19,0 | 5,88 | 19,0 | 5,95 |
| 20,0 | 7,00 | 20,0 | 6,67 | 20,0 | 7,33 | 20,0 | 7,00 |
| 21,0 | 7,87 | 21,0 | 7,37 | 21,0 | 8,38 | 21,0 | 7,87 |
| 22,0 | 9,09 | 22,0 | 8,48 | 22,0 | 9,70 | 22,0 | 9,09 |
| 23,0 | 10,05 | 23,0 | 9,49 | 23,0 | 10,61 | 23,0 | 10,05 |
| 24,0 | 11,19 | 24,0 | 11,01 | 24,0 | 11,37 | 24,0 | 11,19 |
| 25,0 | 11,76 | 25,0 | 11,45 | 25,0 | 12,07 | 25,0 | 11,76 |
| 26,0 | 12,50 | 26,0 | 12,06 | 26,0 | 12,94 | 26,0 | 12,50 |
| 27,0 | 13,30 | 27,0 | 12,93 | 27,0 | 13,68 | 27,0 | 13,30 |
| 28,0 | 14,18 | 28,0 | 13,49 | 28,0 | 14,87 | 28,0 | 14,18 |
| 29,0 | 15,01 | 29,0 | 14,18 | 29,0 | 15,83 | 29,0 | 15,01 |
| 30,0 | 16,14 | 30,0 | 14,95 | 30,0 | 17,34 | 30,0 | 16,14 |
| 31,0 | 17,15 | 31,0 | 15,99 | 31,0 | 19,30 | 31,0 | 17,48 |
| 32,0 | 18,35 | 32,0 | 16,90 | 32,0 | 21,30 | 32,0 | 18,85 |
| 33,0 | 20,01 | 33,0 | 18,06 | 33,0 | 22,95 | 33,0 | 20,34 |
| 34,0 | 21,78 | 34,0 | 19,44 | 34,0 | 24,54 | 34,0 | 21,92 |
| 35,0 | 23,53 | 35,0 | 21,06 | 35,0 | 26,32 | 35,0 | 23,64 |
| 36,0 | 25,15 | 36,0 | 22,52 | 36,0 | 28,04 | 36,0 | 25,24 |
| 37,0 | 27,43 | 37,0 | 25,15 | 37,0 | 29,71 | 37,0 | 27,43 |
| 38,0 | 29,69 | 38,0 | 28,14 | 38,0 | 31,23 | 38,0 | 29,69 |
| 39,1 | 32,18 | 39,0 | 31,45 | 38,8 | 32,91 | 38,97 | 32,18 |

Tabela A.8.5 - Leituras dos extensômetros a 150 mm da ponta do nó 6 (Segundo ensaio)

| | Leitura ext. superior | Leitura ext. inferior | Diferença | Média das leituras | Porcentagem da diferença de leituras |
|------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------------|---|--|
| Carga (kN) | EERa ($\mu\text{m/m}$) | EERb ($\mu\text{m/m}$) | EERa - EERb ($\mu\text{m/m}$) | $(\text{EERa} + \text{EERb})/2$ ($\mu\text{m/m}$) | $\frac{\text{EERa} - \text{EERb}}{(\text{EERa} + \text{EERb})/2} \times 100$ (%) |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | -23,89 | -24,11 | 0,22 | -24,00 | -0,9 |
| 2 | -34,68 | -34,91 | 0,23 | -34,80 | -0,7 |
| 3 | -49,38 | -49,84 | 0,46 | -49,61 | -0,9 |
| 4 | -64,54 | -64,54 | 0 | -64,54 | 0,0 |
| 5 | -78,55 | -78,32 | -0,23 | -78,44 | 0,3 |
| 6 | -93,24 | -92,33 | -0,91 | -92,79 | 1,0 |
| 7 | -108,63 | -106,56 | -2,07 | -107,60 | 1,9 |
| 8 | -123,33 | -120,34 | -2,99 | -121,84 | 2,5 |
| 9 | -138,72 | -134,81 | -3,91 | -136,77 | 2,9 |
| 10 | -155,02 | -149,51 | -5,51 | -152,27 | 3,6 |
| 11 | -170,41 | -164,21 | -6,2 | -167,31 | 3,7 |
| 12 | -186,95 | -179,37 | -7,58 | -183,16 | 4,1 |
| 13 | -201,19 | -192,92 | -8,27 | -197,06 | 4,2 |
| 14 | -219,33 | -209 | -10,33 | -214,17 | 4,8 |
| 15 | -235,64 | -224,38 | -11,26 | -230,01 | 4,9 |
| 16 | -252,17 | -240,46 | -11,71 | -246,32 | 4,8 |
| 17 | -262,74 | -251,94 | -10,8 | -257,34 | 4,2 |
| 18 | -283,41 | -271,23 | -12,18 | -277,32 | 4,4 |
| 19 | -297,42 | -287,77 | -9,65 | -292,60 | 3,3 |
| 20 | -316,02 | -301,09 | -14,93 | -308,56 | 4,8 |
| 21 | -330,49 | -323,6 | -6,89 | -327,05 | 2,1 |
| 22 | -339,9 | -336,69 | -3,21 | -338,30 | 0,9 |
| 23 | -359,89 | -358,28 | -1,61 | -359,09 | 0,4 |
| 24 | -383,08 | -375,04 | -8,04 | -379,06 | 2,1 |
| 25 | -400,08 | -391,35 | -8,73 | -395,72 | 2,2 |
| 26 | -421,89 | -402,6 | -19,29 | -412,25 | 4,7 |
| 27 | -444,17 | -423,73 | -20,44 | -433,95 | 4,7 |
| 28 | -460,94 | -440,04 | -20,9 | -450,49 | 4,6 |
| 29 | -478,16 | -456,57 | -21,59 | -467,37 | 4,6 |
| 30 | -494,93 | -473,8 | -21,13 | -484,37 | 4,4 |
| 31 | -512,84 | -493,32 | -19,52 | -503,08 | 3,9 |
| 32 | -533,05 | -506,18 | -26,87 | -519,62 | 5,2 |
| 33 | -552,11 | -525,24 | -26,87 | -538,68 | 5,0 |
| 34 | -565,21 | -541,78 | -23,43 | -553,50 | 4,2 |
| 35 | -581,51 | -559,46 | -22,05 | -570,49 | 3,9 |
| 36 | -596,67 | -577,61 | -19,06 | -587,14 | 3,2 |
| 37 | -612,89 | -591,26 | -21,63 | -602,08 | 3,6 |
| 38 | -628,73 | -608,7 | -20,03 | -618,72 | 3,2 |
| 39 | -646,31 | -625,55 | -20,76 | -635,93 | 3,3 |

Tabela A.8.6 - Leituras dos extensômetros a 150 mm da ponta do nó 6 (Terceiro ensaio)

| | Leitura ext. superior | Leitura ext. inferior | Diferença | Média das leituras | Porcentagem da diferença de leituras |
|------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|--|
| Carga (kN) | EERa ($\mu\text{m/m}$) | EERb ($\mu\text{m/m}$) | EERa - EERb ($\mu\text{m/m}$) | (EERa + EERb)/2 ($\mu\text{m/m}$) | $\frac{\text{EERa} - \text{EERb}}{(\text{EERa} + \text{EERb})/2} \times 100$ (%) |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | -28,02 | -34,45 | 6,43 | -31,24 | -20,6 |
| 2 | -39,27 | -48 | 8,73 | -43,64 | -20,0 |
| 3 | -53,05 | -65,45 | 12,4 | -59,25 | -20,9 |
| 4 | -67,52 | -84,29 | 16,77 | -75,91 | -22,1 |
| 5 | -79,46 | -100,1 | 20,67 | -89,80 | -23,0 |
| 6 | -93,47 | -117,8 | 24,35 | -105,65 | -23,0 |
| 7 | -105,4 | -133,4 | 28,02 | -119,43 | -23,5 |
| 8 | -118,7 | -151,4 | 32,61 | -135,05 | -24,1 |
| 9 | -132,3 | -169,5 | 37,2 | -150,89 | -24,7 |
| 10 | -145,6 | -187 | 41,34 | -166,28 | -24,9 |
| 11 | -159,4 | -205,8 | 46,39 | -182,59 | -25,4 |
| 12 | -172,9 | -223 | 50,06 | -197,97 | -25,3 |
| 13 | -188,6 | -243,2 | 54,66 | -215,89 | -25,3 |
| 14 | -203,9 | -256,8 | 52,83 | -230,36 | -22,9 |
| 15 | -216,3 | -274,9 | 58,57 | -245,63 | -23,8 |
| 16 | -229,9 | -294,9 | 65 | -262,39 | -24,8 |
| 17 | -242,8 | -315,1 | 72,34 | -278,93 | -25,9 |
| 18 | -256,1 | -334,6 | 78,54 | -295,35 | -26,6 |
| 19 | -272,6 | -349,6 | 76,94 | -311,08 | -24,7 |
| 20 | -288,7 | -374,4 | 85,66 | -331,52 | -25,8 |
| 21 | -298,1 | -392,5 | 94,39 | -345,31 | -27,3 |
| 22 | -318,3 | -416,4 | 98,06 | -367,35 | -26,7 |
| 23 | -334,6 | -432,2 | 97,61 | -383,43 | -25,5 |
| 24 | -348,4 | -452,4 | 104,04 | -400,42 | -26,0 |
| 25 | -361,7 | -471,5 | 109,78 | -416,61 | -26,4 |
| 26 | -378,7 | -490,8 | 112,07 | -434,76 | -25,8 |
| 27 | -394,3 | -509,9 | 115,53 | -452,10 | -25,6 |
| 28 | -412,3 | -532,1 | 119,88 | -472,19 | -25,4 |
| 29 | -422,8 | -549,4 | 126,55 | -486,09 | -26,0 |
| 30 | -439,6 | -573,2 | 133,66 | -506,41 | -26,4 |
| 31 | -451,8 | -599,9 | 148,14 | -525,82 | -28,2 |
| 32 | -467,1 | -621,7 | 154,56 | -544,42 | -28,4 |
| 33 | -478,4 | -650 | 171,56 | -564,17 | -30,4 |
| 34 | -489,4 | -667,6 | 178,22 | -578,53 | -30,8 |
| 35 | -498,8 | -694,1 | 195,22 | -596,44 | -32,7 |
| 36 | -509,2 | -721,4 | 212,21 | -615,28 | -34,5 |
| 37 | -518,1 | -748,3 | 230,13 | -633,19 | -36,3 |
| 38 | -525,7 | -777,4 | 251,72 | -651,56 | -38,6 |
| 38,8 | -531,3 | -807,7 | 276,41 | -669,46 | -41,3 |

B. ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO DO AÇO

A seguir os valores obtidos nos ensaios de caracterização do material do tubo. Foram realizados três ensaios de caracterização com o fim de obter a média dos dados. Estes dados são representados graficamente pela Figura B.8.1. A tensão de escoamento foi adotada de 300 Mpa e módulo de elasticidade foi adotado de 205000 Mpa.

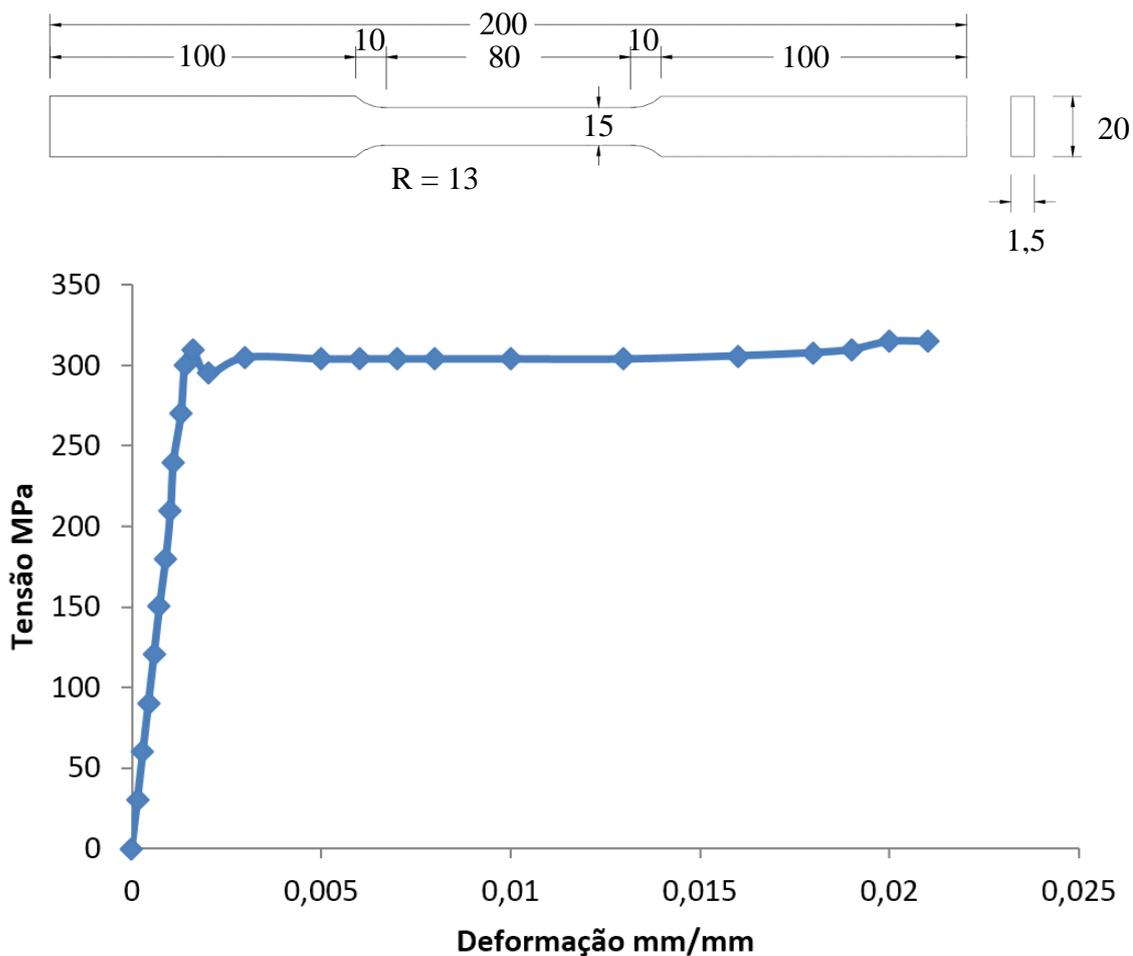


Figura B.8.1 - Diagrama tensão vs. Deformação do aço