

## NUMERICAL ANALYSE OF THE STEEL SPACE-TRUSS WITH CONSTRUCTIVE CORRECTION IN THE STAMPED CONNECTION.

**Cleirton A. S. de Freitas<sup>a</sup>, Luciano M. Bezerra<sup>b</sup>, Ana V. G. Borges<sup>a</sup> e Rafael M. Araújo<sup>a</sup>**

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

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

**Keywords:** Space Truss, Stamped connection, Finite elements.

**Abstract.** Three-dimensional structures made of steel bars, widely known as space trusses, are very frequently used at the construction of roofs. These structures consist of steel bars, generally, connected by bolts at nodes. In Brazil, the connection usually employed in these 3D trusses is the so called typical node, which is produced by stamping the ends of the bars, thus generating a low cost connection. This typical node is also known as a stamped connection. However, several accidents in space structures using this type of connection have also been reported in Brazil. This research proposed the use of constructive correction in the connection in order to increase its capacity. The base for this is the reduction in the eccentricity of the typical node connection. This research, verifies numerically, the strength increase achieved with the proposed construction corrections. At the end of work, it is concluded that the suggestions presented improve the strength and safety of steel space trusses with stamped connections.

# 1 INTRODUÇÃO

As estruturas treliçadas tridimensionais são caracterizadas por possuírem elementos de barras entre dois nós descritos em coordenadas tridimensionais. São aplicadas, em geral, em coberturas com grandes vãos (Ver Figura 1). A Figura 2 apresenta os elementos que compõem uma estrutura treliçada tridimensional típica. Os Banzos e diagonais são barras tubulares, geralmente constituídas de aço ou alumínio, que combatem esforços de tração e ou compressão.

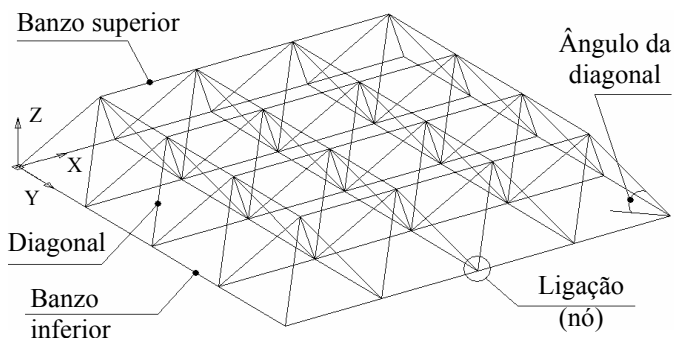


Figura 1: Estrutura espacial plana (Freitas, 2008)

Figura 2: Elementos de uma estrutura espacial (Freitas, 2008)

A ligação é o ponto de intercessão das barras (banzos e diagonais). Nos modelos de cálculo as ligações são consideradas como nós rotulados com cargas axiais centradas. A execução de nós que garantam uma rótula perfeita é muito difícil e onerosa. Desta forma, o que se procura conceber é uma ligação com cargas concêntricas.

O sistema de ligação formado com o nó típico é o mais aplicado no Brasil. Esse nó típico é constituído por barras com extremidades amassadas unidas por apenas um parafuso. É o que apresenta o maior número de problemas estruturais. Este nó apresenta excentricidade dos esforços, formação de charneira plástica, excesso de rotação e colapso dos elementos com carga inferior as previstas (Souza, 2003).

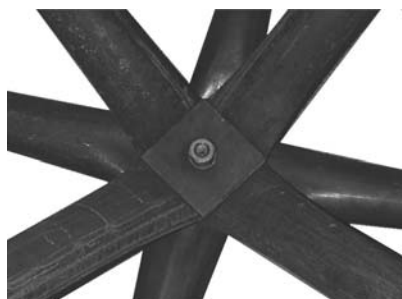


Figura 3: Nó típico (Souza, 2003)

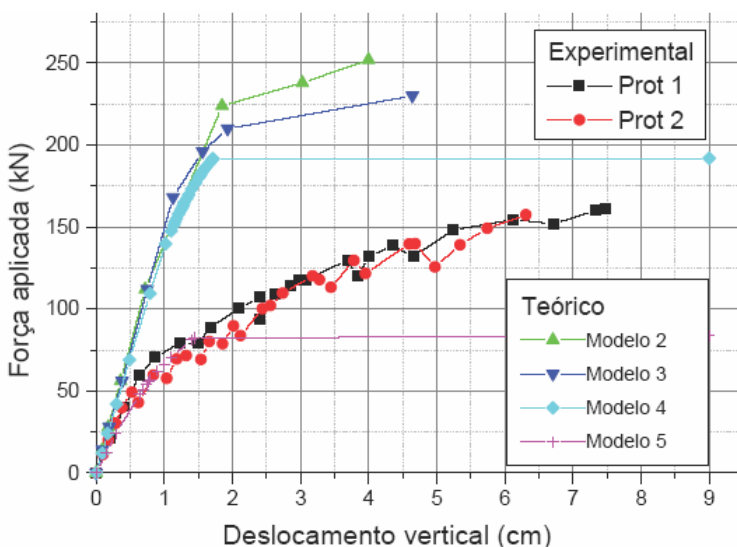


Figura 4: Resultados teóricos e experimentais: nó típico (Souza, 2003)

Em estudos realizados por Souza (2003), observaram-se que os resultados experimentais divergem dos resultados calculados com modelos teóricos (regime elástico linear), quanto ao cálculo da carga de colapso da estrutura e quanto aos deslocamentos.

Observe, na Figura 4, os resultados comparativos de dois protótipos experimentais em relação a quatro modelos teóricos. Nos protótipos foram adotadas as ligações com nó típico. Nos modelos teóricos foram consideradas as não linearidades físicas. Pode-se notar que a força última teórica pode ser de até 50% superior a experimental e que os deslocamentos experimentais são maiores que aqueles teóricos.

## 2 PROPOSTA DO ESTUDO

A proposta desta pesquisa é estudar uma alternativa para aumentar a resistência última de estruturas treliçadas tridimensionais com nó típico, a partir do reforço dos nós que a compõem. Pretende-se, propor recomendações para futuros projetos, além de possibilitar a recuperação de estruturas existentes.

Para a proposta da pesquisa, inicialmente é considerado o detalhe da ligação com nó típico, Figura 5. Estas ligações formadas com tubos com extremidades amassadas e conectadas por um único parafuso. É possível observar que neste sistema existem duas excentricidades “ $E_1$ ”, horizontal (Região amassada), e “ $E_2$ ”, vertical (distância entre os pontos A e B).

A proposta desta pesquisa é uma correção na excentricidade da ligação, utilizando um distanciador, Figura 6. Neste caso note a correção da excentricidade “ $E_2$ ”, aplicando uma distância “ $d$ ” igual a “ $E_2$ ” entre os banzos e diagonais. Desta forma os pontos A e B podem ser considerados como sobrepostos.

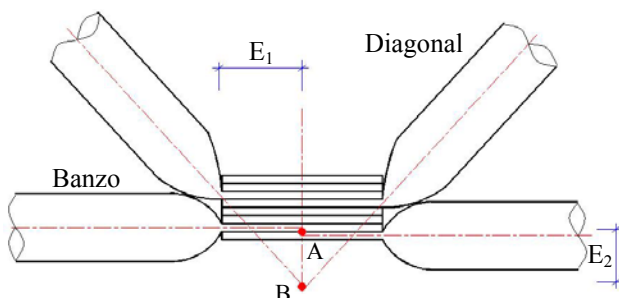


Figura 5: Excentricidade no nó típico

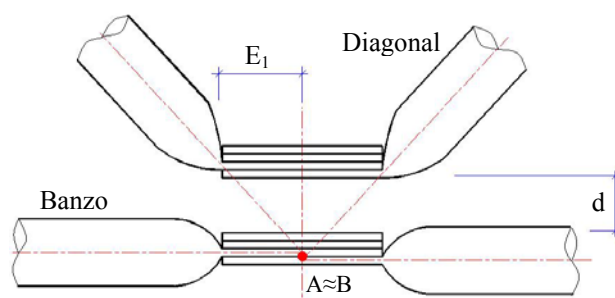


Figura 6: Correção da excentricidade

Sabe-se que a excentricidade “ $E_1$ ”, horizontal, é devido ao amassamento do tubo, e é equivalente a distância do centro do furo ao início da região amassada (Figura 4). A excentricidade “ $E_2$ ”, vertical, é proporcional ao ângulo “ $\theta$ ”, e é equivalente a distância de correção “ $d$ ”.

Na Figura 7, note que a medida de “ $d_2$ ” é igual a 5 vezes a espessura da parede do tubo do banzo “ $t_1$ ”, mais 3 vezes a espessura da parede do tubo da diagonal “ $t_2$ ”. Considerando as espessuras das paredes dos tubos das diagonais e banzos diferentes. Adotando a relação trigonométrica na Figura 4, deduz-se a Equação 1.

Na Figura 8, pode-se observar a altura da projeção vertical da diagonal “ $H$ ” e a distância da projeção horizontal da diagonal “ $D$ ”. Sendo assim, considerando o ângulo de inclinação da diagonal “ $\theta$ ” e aplicando trigonometria pode-se deduzir a Equação 2. Finalmente, se compararmos as Equações 1 e 2, podemos encontrar a distância “ $d$ ”, na Equação 3.

A Equação 3 expõe uma formulação genérica para o cálculo da distância “ $d$ ” de

correção da excentricidade vertical “ $E_2$ ”. Porém, para o caso em estudo, estrutura treliçada tridimensional quadrado sobre quadrado, a diagonal é esconsa, ver Figura 9. Logo a necessidade do cálculo da projeção horizontal da diagonal pela Equação 4, sendo “ $\ell$ ” a distância entre os centros dos nós consecutivos na treliça. Quanto à projeção da diagonal na vertical permanece o mesmo valor “ $H$ ”.

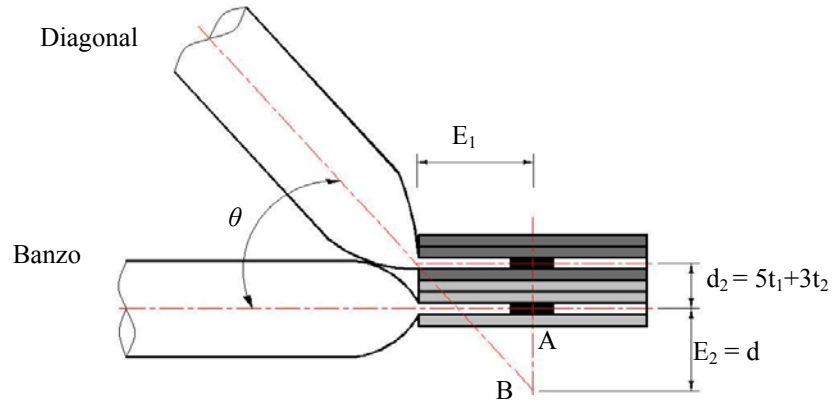


Figura 7: Detalhe da ligação com tubos amassados (típica)

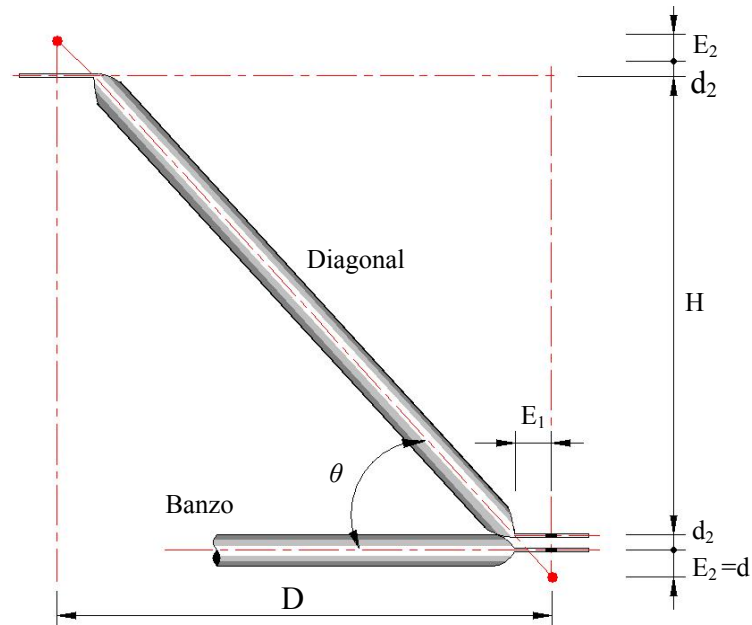


Figura 8: Projeção vertical e horizontal do elemento diagonal

$$\tan(\theta) = \frac{(d_2 + E_2)}{E_1} = \frac{[(5t_1 + 3t_2) + d]}{E_1} \quad (1)$$

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

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

Considerando o caso de tubos com as espessuras iguais para diagonais e banzos, têm-se à distância “ $d_2$ ” é igual a 8 vezes a espessura da parede do tubo “ $t$ ”. Assim a Equação 5 expressa a formulação para o cálculo da excentricidade “ $d$ ” para o sistema de treliça espacial quadrado sobre quadrado com diagonais e banzos com mesma espessura.

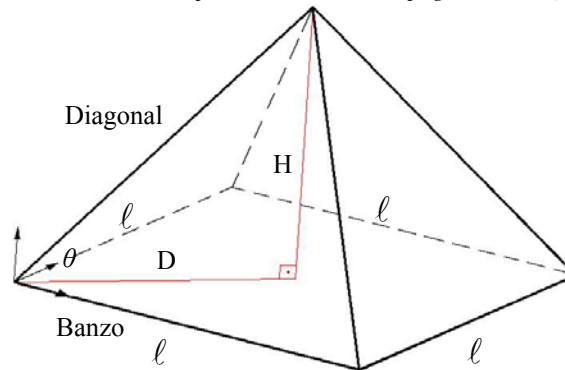


Figura 9: Projeção da diagonal no sistema quadrado sobre quadrado

$$D = \frac{l\sqrt{2}}{2} \quad (4)$$

$$d = \frac{2HE_1}{l\sqrt{2} - 4E_1} - 8t \quad (5)$$

Quanto à excentricidade horizontal “ $E_1$ ” não há como corrigi-la, pois esta é intrínseca do amassamento das barras da ligação com o nó típico. Porém espera-se que a colocação de chapas de reforço aumente a inércia e conseqüentemente à rigidez da ligação.

### 3 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Para avaliar a coerência e viabilidade da proposta foi realizado um estudo numérico computacional a partir da comparação de três configurações de ligações dos elementos das estruturas. O primeiro modelo é a “LI”, ligação ideal, que é um sistema de estrutura treliçada tridimensional constituída por ligações com barras centradas no nó, ver Figura 10. O segundo modelo é a “LT” ligação típica, é constituído por elementos de extremidades amassadas com união excêntrica no nó, ver Figura 11. O terceiro modelo é a “LTD”, é a ligação típica com distanciador, e é o modelo proposto para correção de excentricidade, ver Figura 12.

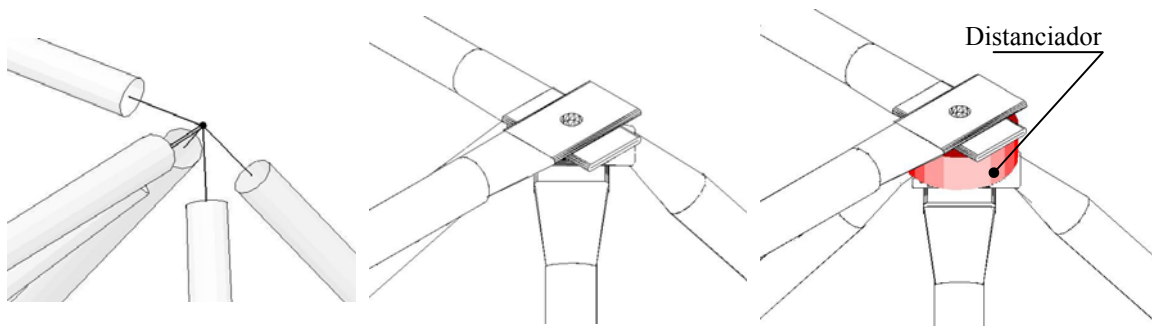


Figura 10: Ligação ideal (LI)

Figura 11: Ligação típica (LT)

Figura 12: Proposta (LTD)

Foi adotado um modelo de treliça tridimensional padrão de acordo com a Figura 13. É um sistema modular com pirâmides com base de 1000mm e altura de 707mm. O ângulo de inclinação das diagonais é de 45°. Os banzos e diagonais são compostos com tubos diâmetro 25,4 milímetros e parede de 1,5mm. A material do tubo é equivalente ao aço ASTM A36, tensão de escoamento igual a 250MPa. As extremidades são amassadas e furadas com furos de 10mm. Para fixação foram utilizados parafusos

sextavados (ASTM A325) de 10mm de diâmetro.

Considerando as características geométricas dos protótipos e considerando a Equação (1) foi adotado um distanciador com altura de 20,0mm, diâmetro de 50,0mm e aço ASTM A36. As chapas cobrejunta são quadradas com largura de 50,0mm e espessura de CH#3/4", A36.

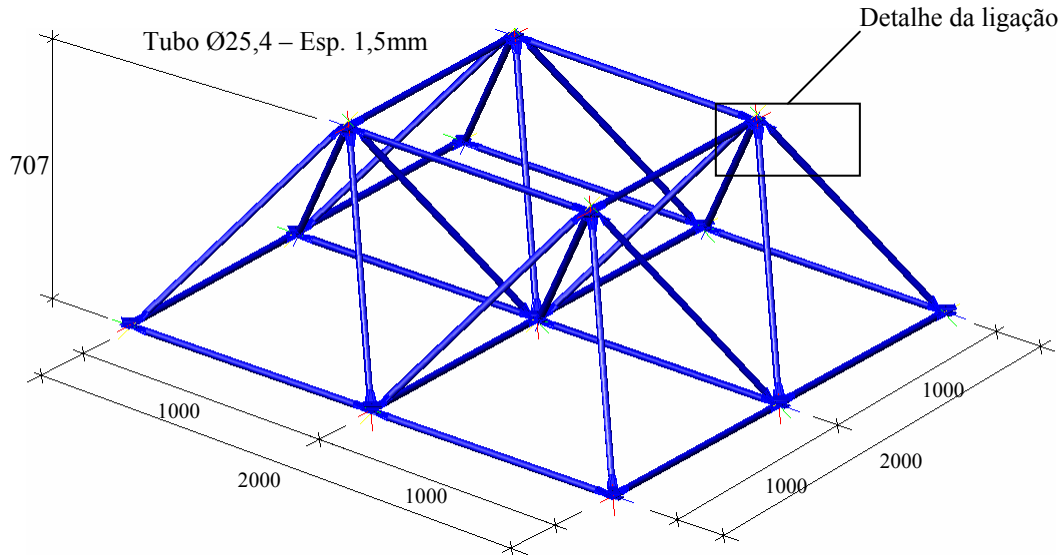


Figura 13: Modelo da estrutura treliçada tridimensional adotada, cotas em milímetro

## 4 ESTUDO NUMÉRICO

Este estudo foi realizado numericamente aplicando o programa comercial SAP2000, que é fundamentado no método dos elementos finitos. Os modelos foram discretizados com elementos de barra, considerando as não linearidades geométricas, caracterizadas pelo amassamento das extremidades das barras. As análises foram feitas considerando apenas o comportamento elástico do material.

### 4.1 Elementos utilizados na discretização

Para a discretização das barras é utilizado o elemento “FRAME”. O elemento “FRAME” é um elemento de barra do programa de elementos finitos SAP2000. Esse elemento é definido com dois nós, tendo seis graus de liberdade por nó (deslocamentos: UX, UY e UZ e rotações: RotX, RotY e RotZ) no modelo 3D ou dois graus de liberdade por nó (deslocamentos: UX e UY e rotações: RotX e RotY) no modelo 2D, Figura 14.

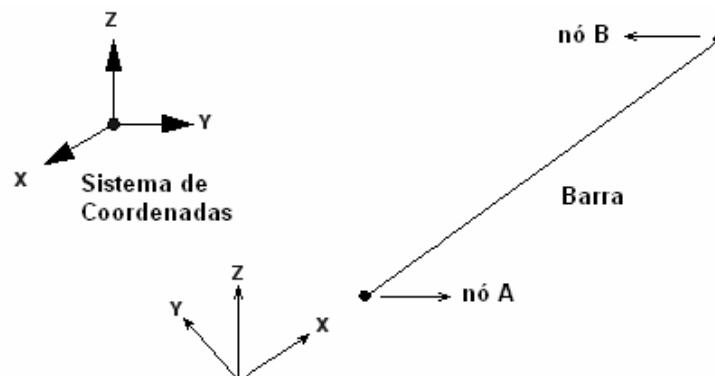


Figura 14: Elemento de Barra (FRAME)



Para a discretização do distanciador (Figura 12) foi utilizado o elemento “SHELL”. O elemento “SHELL” é um elemento de placas do programa de elementos finitos SAP2000, usado para uma modelagem bidimensional ou tridimensional. Esse elemento é definido com três ou quatro nós, tendo seis graus de liberdade por nó (deslocamentos: UX, UY e UZ e rotações: RotX, RotY e RotZ) no modelo 3D ou dois graus de liberdade por nó (deslocamentos: UX e UY e rotações: RotX e RotY) no modelo 2D (Figura 15).

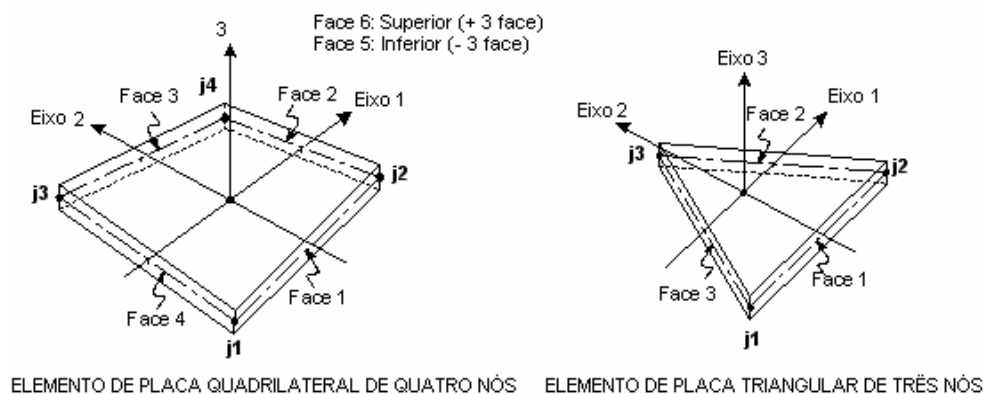


Figura 15: Elemento de Placa (SHELL)

## 4.2 Discretização dos modelos do estudo preliminar

Na discretização da estrutura treliçada tridimensional constituída com nó ideal foram utilizados 32 elementos de barra (FRAME), com um total de 13 nós. Restrições de terceiro gênero foram aplicadas nos nós 10, 11, 12 e 13. Um carregamento vertical foi aplicado no nó 9. Observe na Figura 16, a discretização e o detalhe da concentricidade das barras.

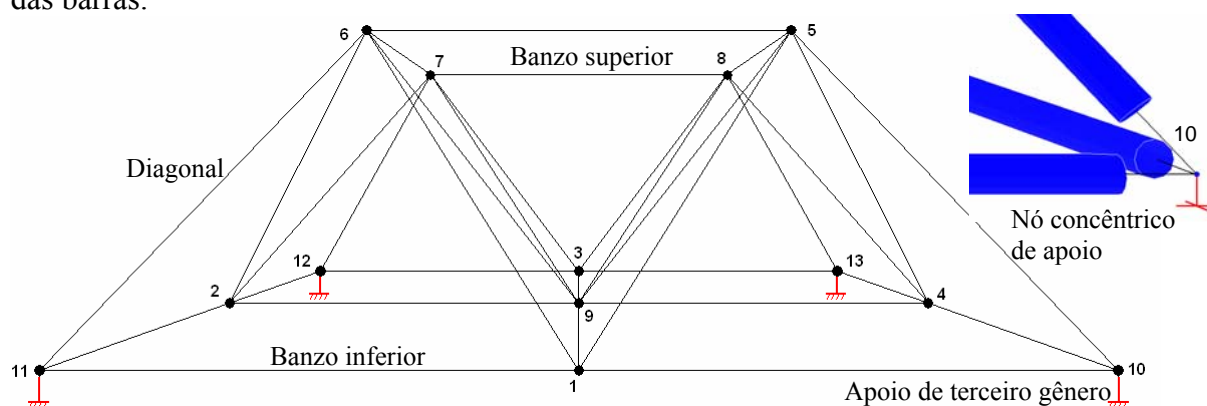


Figura 16: Modelo de treliça com ligação com nó ideal

Na discretização da estrutura treliçada tridimensional constituída com nó típico foram utilizados 32 elementos de barra (FRAME) com seção tubular. Na discretização das ligações foram utilizados 64 elementos de barra (FRAME) com seção retangular, para simular as extremidades amassadas. Para tanto, foram utilizados 77 nós. Restrições de terceiro gênero foram aplicadas nos nós 10, 11, 12 e 13. Um carregamento vertical foi aplicado no nó 9. Observe na Figura 17, a discretização da estrutura e o detalhe da excentricidade dos eixos das barras.

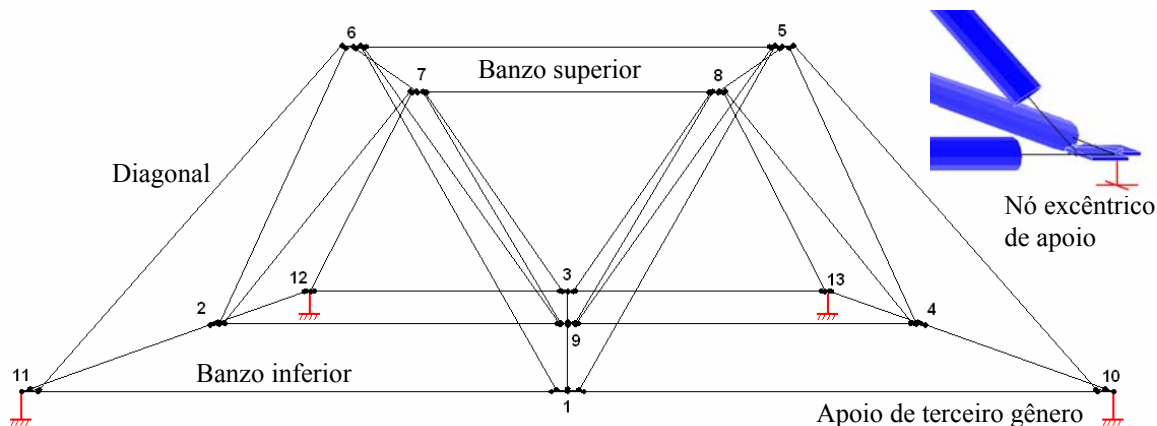


Figura 17: Modelo de treliça com ligação com nó típico

Na discretização da estrutura treliçada tridimensional constituída com nó típico e distanciador foram utilizados 32 elementos de barra (FRAME) com seção tubular. Na discretização das ligações foram utilizados 64 elementos de barra (FRAME) com seção retangular, para simular as extremidades amassadas. Os distanciadores foram discretizados com 104 elementos de placa (SHELL). Para tanto, foram utilizados 298 nós. Restrições de terceiro gênero foram aplicadas nos nós 10, 11, 12 e 13. Um carregamento vertical foi aplicado no nó 9. Observe na Figura 18, a discretização da estrutura e o detalhe da correção excentricidade dos eixos das barras.

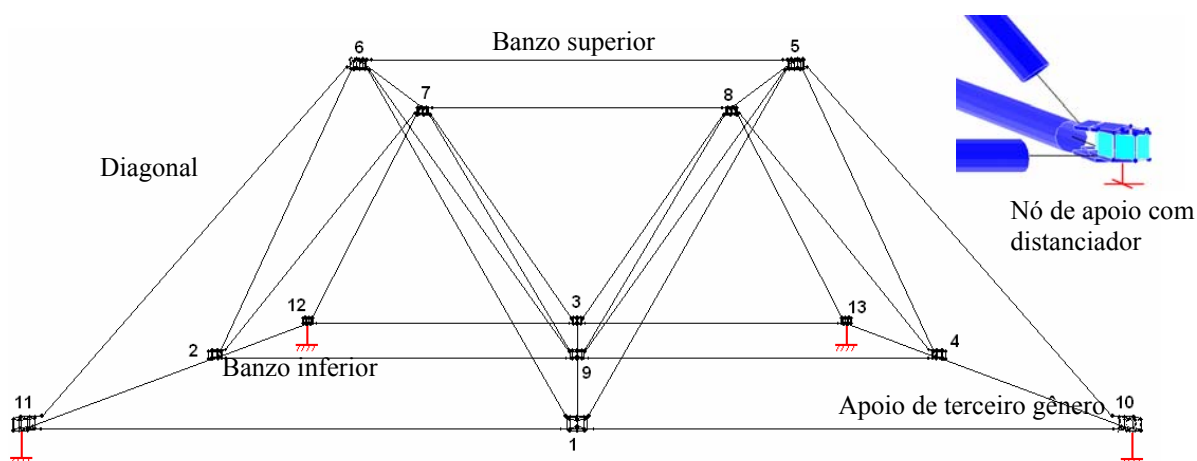


Figura 18: Modelo de treliça com ligação com nó típico e distanciador

### 4.3 Carregamento aplicado restrições

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

Foram adotadas ainda restrições de terceiro gênero nos quatro pontos de apoios das estruturas.



## 5 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

### 5.1 Esforços axiais nos elementos

Os resultados dos esforços axiais nos elementos das estruturas podem ser apreciados nos gráficos das Figuras 19, 20 e 21, respectivamente representam os modelos com ligação ideal, ligação típica e ligação típica com distanciador. Os valores com sinal negativo indicam o efeito de compressão e os positivos de tração. Portanto, os elementos do banzo superior e diagonal de apoio estão sob compressão.

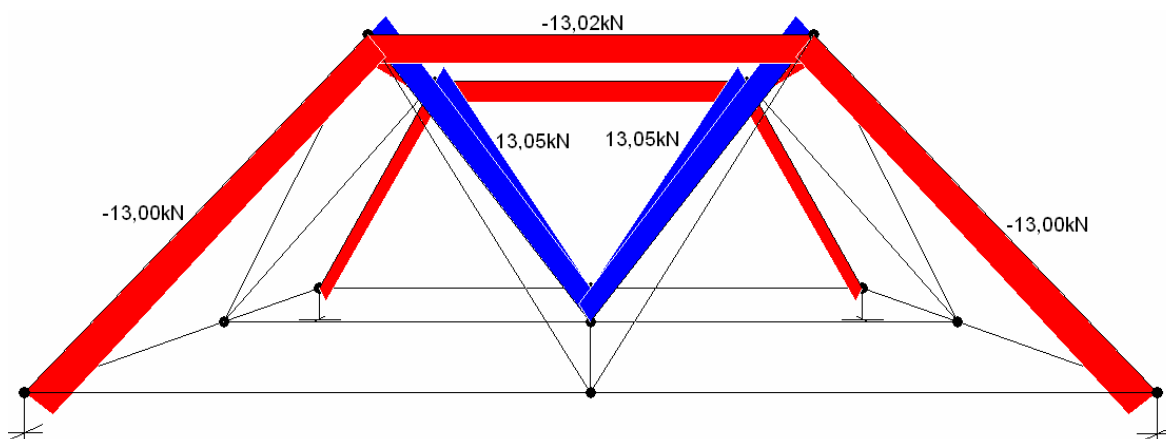


Figura 19: Diagrama de esforços axiais da estrutura espacial com ligação ideal (LI)

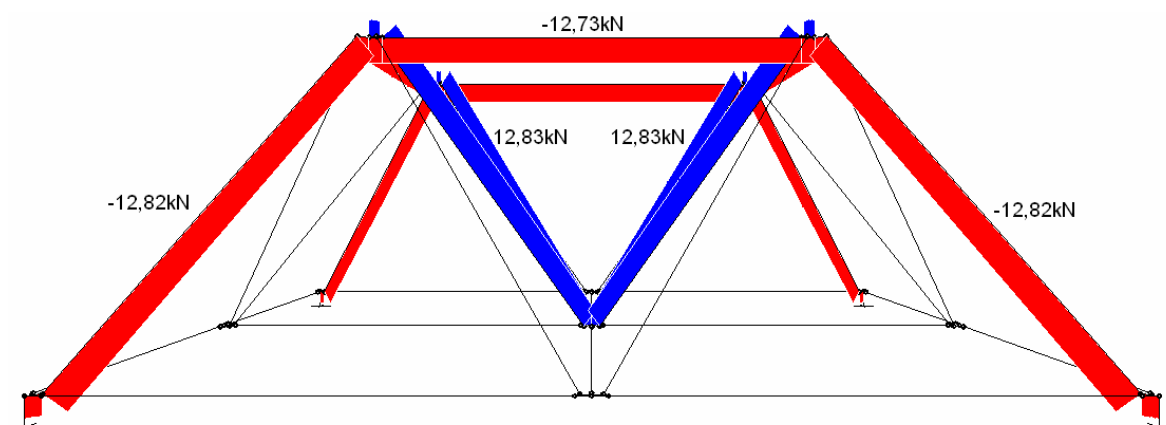


Figura 20: Diagrama de esforços axiais da estrutura espacial com ligação típica (LT)

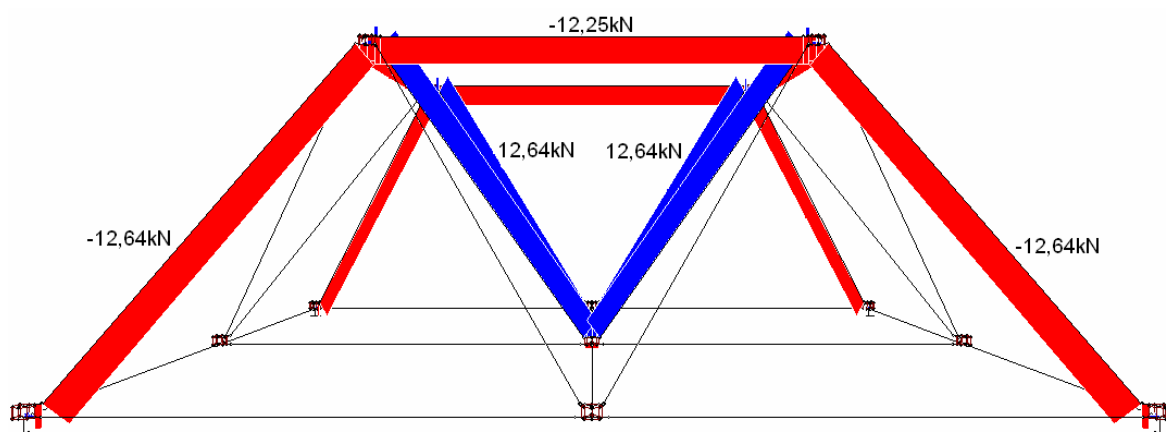


Figura 21: Diagrama de esforços axiais da estrutura espacial com ligação típica e distanciador (LTD)

Para o três modelos analisados observa-se uma pequena variação na intensidade dos esforços, o que pode ser comprovado no gráfico da Figura 22. Neste, estão dispostos os resultados dos esforços axiais, em kN, dos três modelos e para as 32 barras.

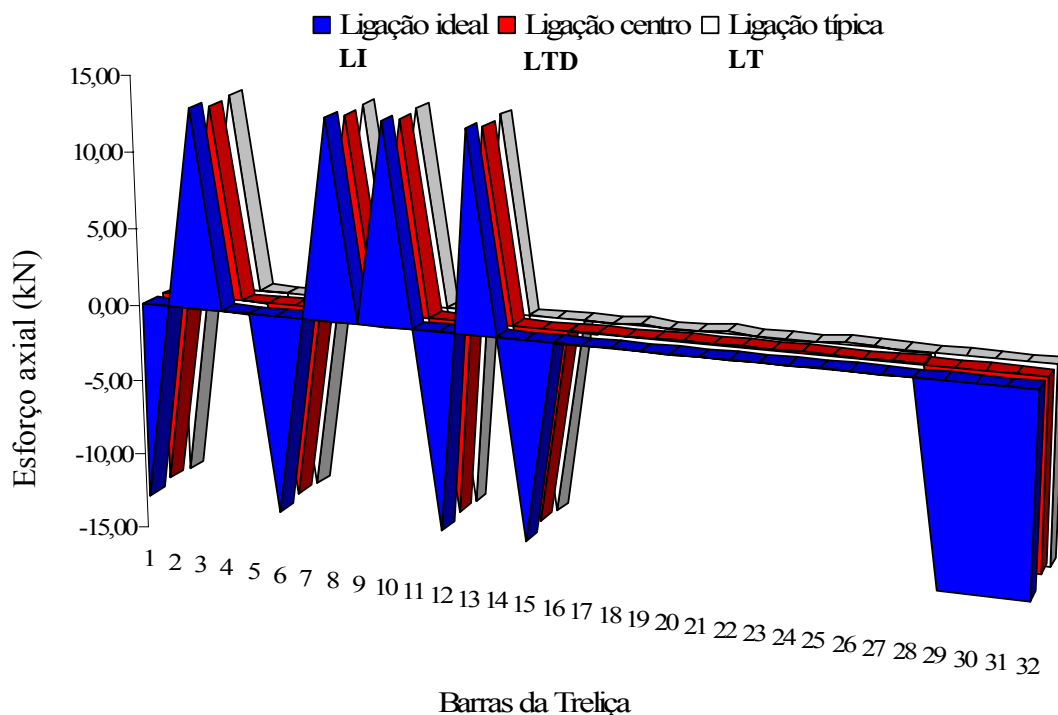


Figura 22: Comparação dos esforços axiais nos modelos de ligação

## 5.2 Momento fletor nas estruturas

Os resultados numéricos dos momentos fletores nos elementos das estruturas treliçadas tridimensionais podem ser apreciados nos gráficos das Figuras 23, 24 e 25, respectivamente, e representam os modelos com ligação ideal (LI), ligação típica (LT) e ligação típica com distanciador (LTD). No gráfico da Figura 26 estão dispostos, comparativamente, os resultados momentos fletores, em kN.cm, dos três modelos para as 32 barras das treliças.

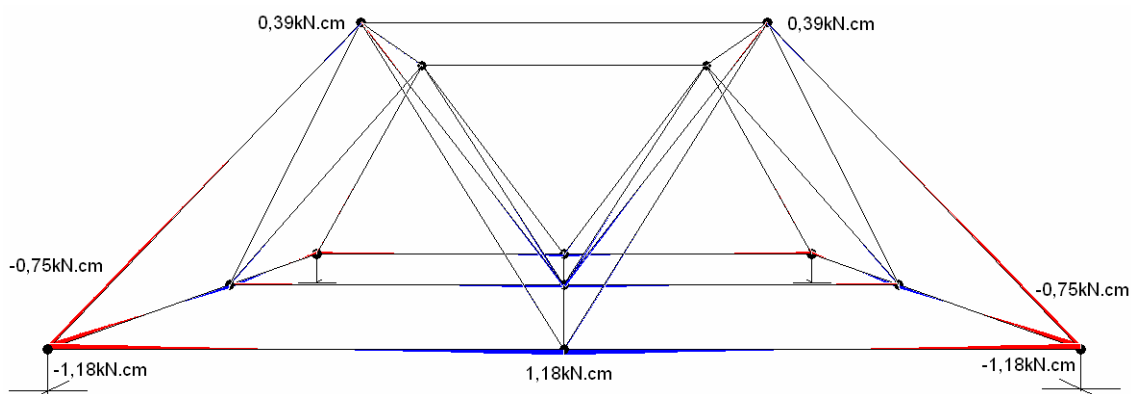


Figura 23: Diagrama do momento fletor da estrutura com ligação ideal (LI)

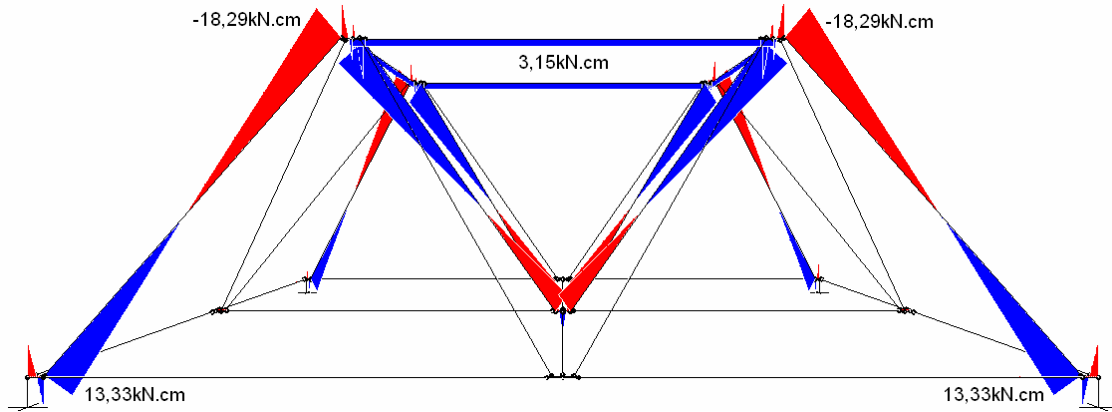


Figura 24: Diagrama do momento fletor da estrutura com ligação típica (LT)

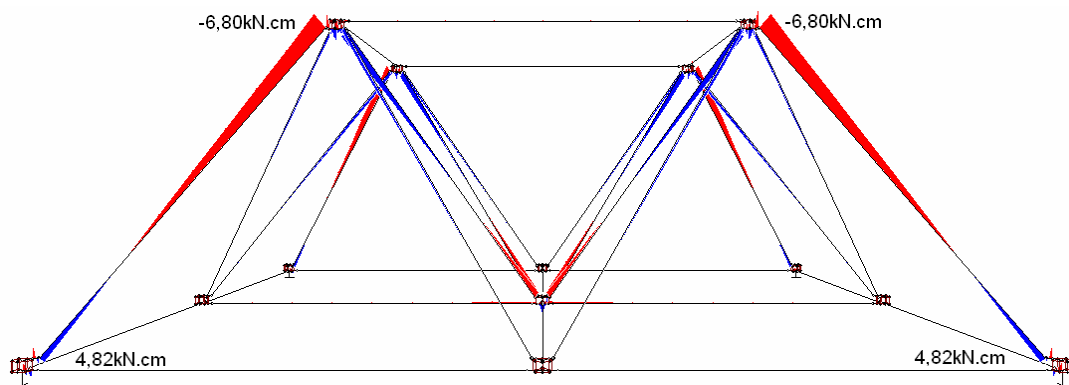


Figura 25: Diagrama do momento da estrutura com ligação típica e distanciador (LTD)

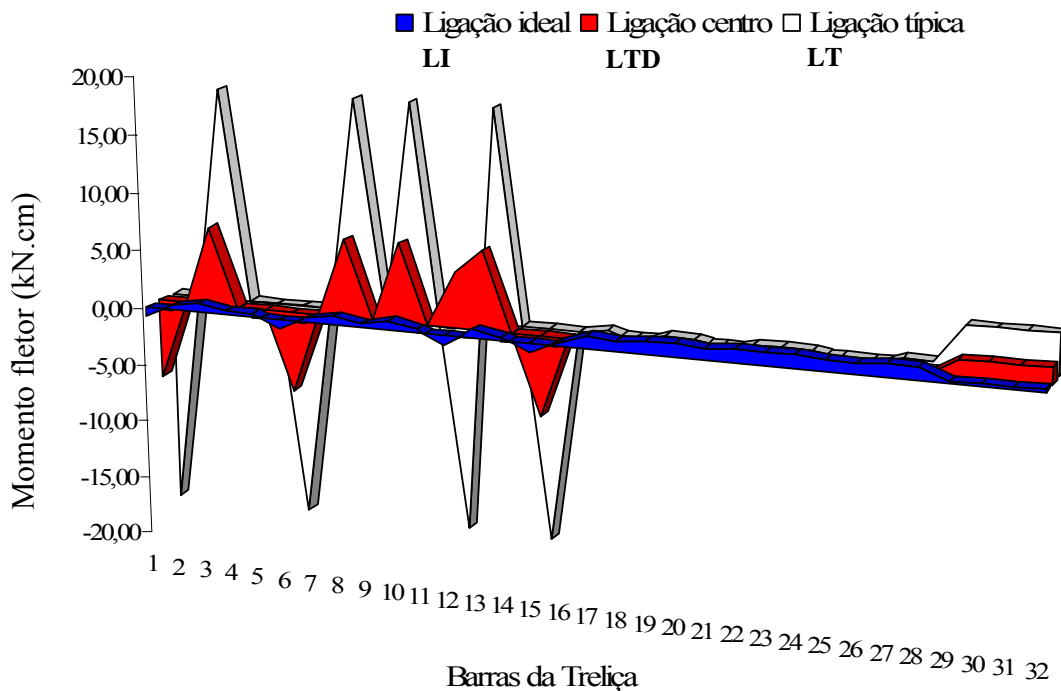


Figura 26: Comparação dos momentos fletores nos modelos de ligação

É notório que os momentos na estrutura com ligação ideal são desprezíveis, confirmando o que é adotado na literatura, quando as linhas de centro das barras se unem no centro do nó. Entretanto, a ligação típica apresenta elevados valores de

momento fletor nos nós, provavelmente devido à excentricidade intrínseca deste sistema. Quanto ao modelo proposto neste trabalho, ligação com correção da excentricidade com distanciador, nota-se uma sensível redução no momento fletor nos nós. Esta redução no momento fletor diminui a sollicitação nodal e pode aumentar a resistência última da estrutura.

### 5.3 Deslocamentos verticais nos nós das estruturas

Os resultados numéricos dos deslocamentos verticais nodais das estruturas treliçadas tridimensionais podem ser apreciados nos diagramas de deformadas das Figuras 27, 28 e 29, respectivamente, e representam os modelos com ligação ideal (LI), ligação típica (LT) e ligação típica com distanciador (LTD). A escala da deformada é 15 vezes.

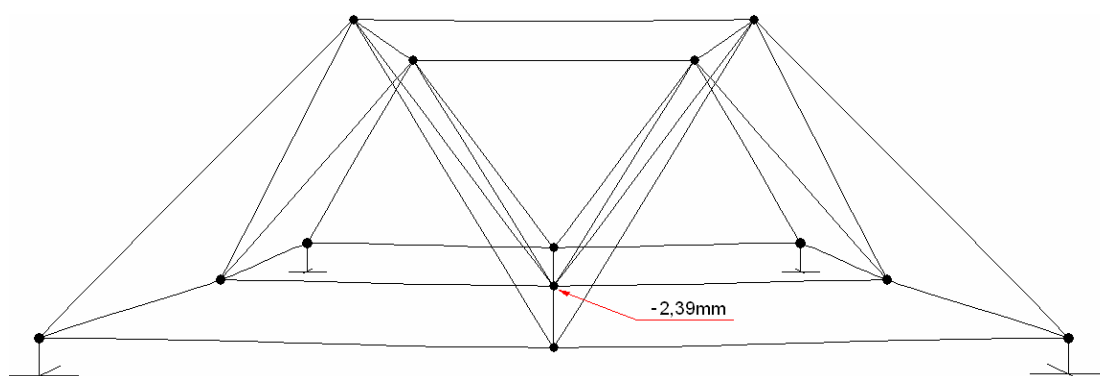


Figura 27: Diagrama da deformada da estrutura com ligação ideal (LI)

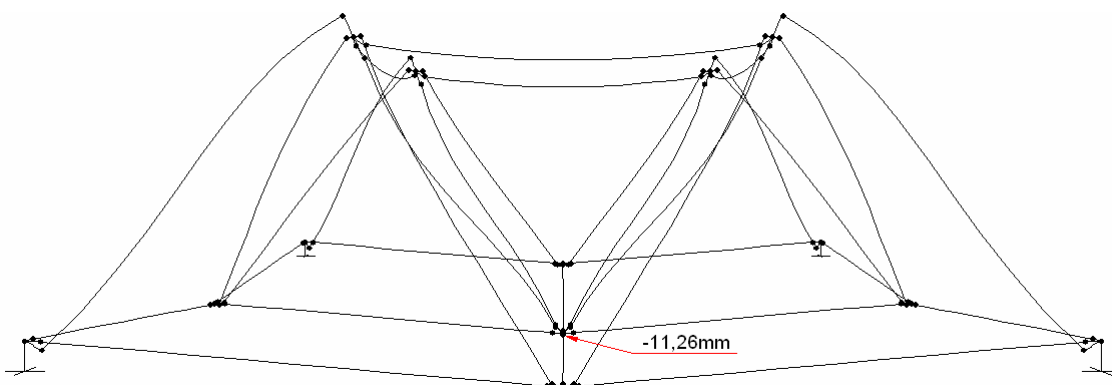


Figura 28: Diagrama da deformada da estrutura com ligação típica (LT)

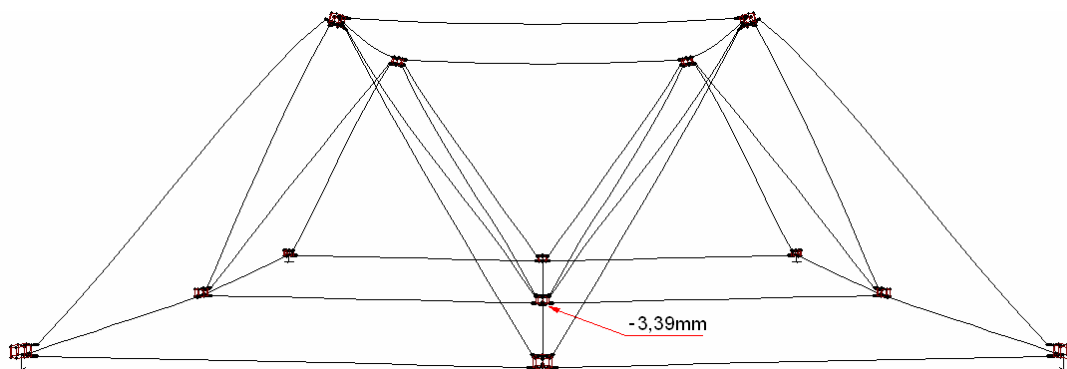


Figura 29: Diagrama da deformada da estrutura com ligação típica e distanciador (LTD)

No gráfico da Figura 30 estão dispostos os resultados dos deslocamentos, em mm, dos três modelos para os nós 2, 9 e 4.

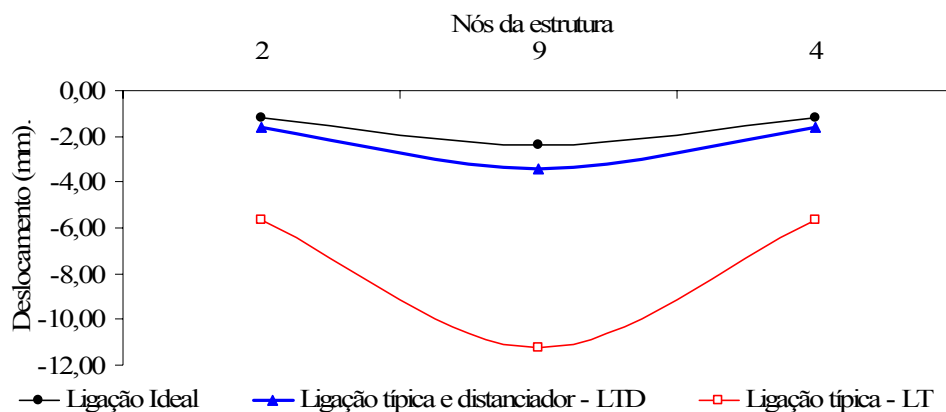


Figura 30: Comparação dos deslocamentos verticais nos modelos de ligação

## 6 CONCLUSÃO

Após o estudo comparativo entre estruturas com nó típico, nó ideal e nó típico com distanciador (proposta), foi observado que há uma melhoria significativa na resistência das estruturas com distanciador em relação à estrutura com nó típico. Tal estudo respalda a necessidade de estudos experimentais para maiores conclusões.

## 7 AGRADECIMENTOS

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

## REFERÊNCIAS

- Freitas, C. A. S., Estudos experimental, numérico e analítico de conexões de estruturas espaciais em aço com correção e reforço na ligação típica estampada. Tese de doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2008;
- Freitas, C.A.S.; Bezerra, L.M.; Nagato, Y., Increasing load capacity of steel space trusses with staking end-flattened connections. Journal of constructional steel research – Elsevier, 2008.
- Souza, A. S. C., Análise teórica e experimental de treliças espaciais – Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, EESC/USP, São Paulo, 2003;