

ESTUDO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DO SISTEMA DE TRELIÇAS MODULARES PARA PONTES EM MADEIRA

Bianca Oliveira Fernández¹, Carlito Calil Junior² & Julio Cesar Molina³

Resumo

O sistema de treliças modulares para pontes de madeira é constituído por vigas treliçadas planas, que utilizam peças serradas de madeira, com seções transversais comerciais, na composição da superestrutura da ponte. Esse trabalho de pesquisa tem por objetivo a avaliação e otimização do referido sistema a partir de uma análise numérica e experimental. A avaliação do sistema foi efetuada para pontes de 3,80 m de largura e vãos de até 36 m, sendo a superestrutura formada por quatro vigas treliçadas de madeira com 1 m de altura e ligações parafusadas. Como resultado foi elaborada uma tabela contendo o número de vigas treliçadas a serem utilizadas em uma largura de ponte dependendo do tamanho do vão. O sistema proposto proporciona vantagens como redução de custos e maior rapidez de execução, além de posterior reaproveitamento dos módulos.

Palavras-chave: Vigas treliçadas de madeira. Sistema pré-fabricado. Madeira serrada. Pontes de madeira.

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF THE MODULAR SYSTEM OF TRUSSES FOR TIMBER BRIDGES

Abstract

The modular system of trusses for timber bridges is composed by beams plane trusses, that use sawed pieces of wood, with commercial cross sections, in the composition of the superstructure of the bridge. This aim of this work is the evaluation and optimization of the system starting from a numeric and experimental analysis. The evaluation of the system was made for bridges of 3,80 m of width and spans of up to 36 m, being the superstructure formed by four beams wood trusses with 1 m of height and screwed connections. As result was presented a table containing the number of beam trusses to be used in a bridge width depending on the size of the span. The proposed system provides advantages as lower costs and faster execution, besides subsequent reuse of modules.

Keywords: Beam trusses of wood. Prefabricated system. Sawed timber. Bridges of wood.

1 INTRODUÇÃO

É de suma importância para o desenvolvimento de qualquer lugar, dos pontos de vista tanto econômico como social, a existência de boas rodovias seja para o deslocamento de cargas como também pessoas. A construção de pontes com pequenos e médios vãos é imprescindível para a melhoria do transporte intermunicipal e interestadual.

¹ Mestre em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, biancaoliveirafernandez@hotmail.com

² Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, calil@sc.usp.br

³ Pós-Doutorando do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, juliocm@sc.usp.br

Ao longo dos anos, processos incorretos de construção e manutenção foram empregados nas pontes nacionais, principalmente pela carência de informações técnicas das administrações estaduais e/ou municipais.

O sistema de treliças modulares para pontes, já estudado no Reino Unido, Brasil e implantado na África, como também na América Central, se adéqua bem ao Brasil. O referido sistema é constituído por vigas treliçadas planas, que utilizam peças estruturais serradas de madeira com seções transversais comerciais na composição da superestrutura da ponte.



Figura 1 – Vistas distintas de uma ponte de madeira serrada em Monte Dourado-PA, 2008.



Figura 2 – Ponte de madeira que liga a cidade de Esperantina à Barros-PI (Fonte: <reporteresp.blogspot.com/2008_01_27_archive.html>).

Ao se utilizar o sistema estrutural de elementos modulares treliçados pré-fabricados, de madeira serrada, interligados por meio de parafusos e chapas metálicas, busca-se encontrar uma solução simples, ágil, segura, de alta durabilidade e, principalmente, de baixo custo para construção

de pontes de madeira com médios vãos (de oito a trinta metros). É fundamental a pré-fabricação do sistema. O processo construtivo é simples, no qual a maior parte do sistema é confeccionado fora do local definitivo da obra, tem baixo custo, e utiliza um material construtivo barato e de grande disponibilidade.

O objetivo deste trabalho consistiu na adequação do projeto de uma ponte treliçada de Eucalipto citriodora em projetos com madeiras tropicais como Maçaranduba, Jatobá e Ipê para o estado do Pará.

O sistema modular treliçado neste trabalho de pesquisa foi estudado por meio de análise numérica e experimental, e avaliado para pontes de 3,80 m de largura e vãos de até 30 m, com superestrutura formada por quatro vigas treliçadas de madeira com 1 m de altura e ligações parafusadas. Posteriormente foi elaborada uma tabela contendo o número de vigas treliçadas a serem utilizadas em uma largura de ponte dependendo do tamanho do vão.

2 METODOLOGIA

Na seqüência estão apresentados os principais detalhes da montagem e avaliação do sistema de treliças modulares para pontes de madeira.

2.1 Descrição dos módulos das treliças

A ponte de madeira modular pré-fabricada é formada por treliças com banzos geralmente paralelos, sendo o tabuleiro apoiado na sua parte superior. O banzo superior, os montantes, as diagonais, os contraventamentos e o tabuleiro foram feitos de madeira. Os banzos inferiores foram constituídos por elementos de aço e foram utilizadas ligações do tipo parafusadas.

O procedimento de montagem dos módulos foi feito de acordo com Calil et al. (2004), e detalhado conforme a descrição a seguir:

➤ Peças de madeira serrada:

- Banzo superior:

Formado por duas peças de madeira serrada com seção transversal de 5 x 20 cm, espaçadas 10 cm uma da outra.

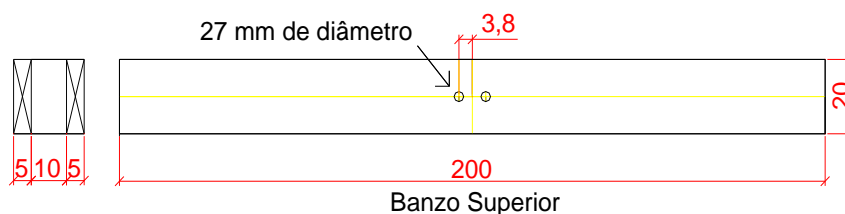


Figura 3 – Peça de madeira serrada que compõe o banzo superior dos módulos.

- Diagonais:

Cada módulo contém duas diagonais, sendo cada uma formada por uma peça de madeira serrada com seção transversal de 10 x 20 cm.

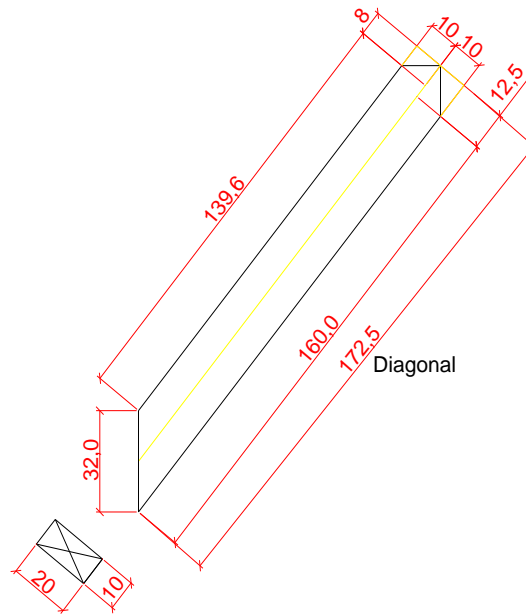


Figura 4 – Peça de madeira serrada que compõem as diagonais dos módulos.

- Montante:
Formado por uma peça de madeira serrada com seção transversal de 10 x 20 cm.

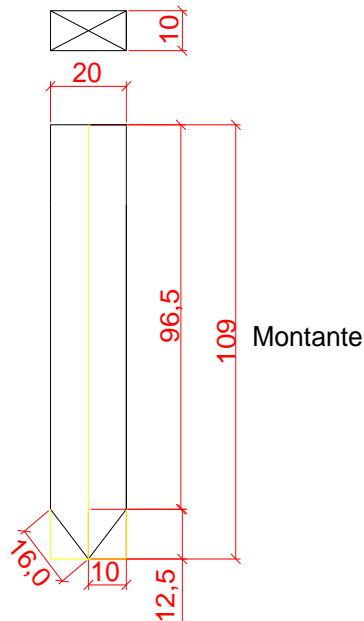


Figura 5 – Peça de madeira serrada que compõem o montante dos módulos.

➤ Ligações:

As peças de madeira serrada foram conectadas através de dois tipos de chapas de aço, além de parafusos e pinos.

- Ligação superior:

Quatro chapas metálicas por módulo, cada uma com 0,9 cm de espessura. Cada dupla em uma extremidade superior, e conectadas à madeira por 12 parafusos de 2 cm de diâmetro.

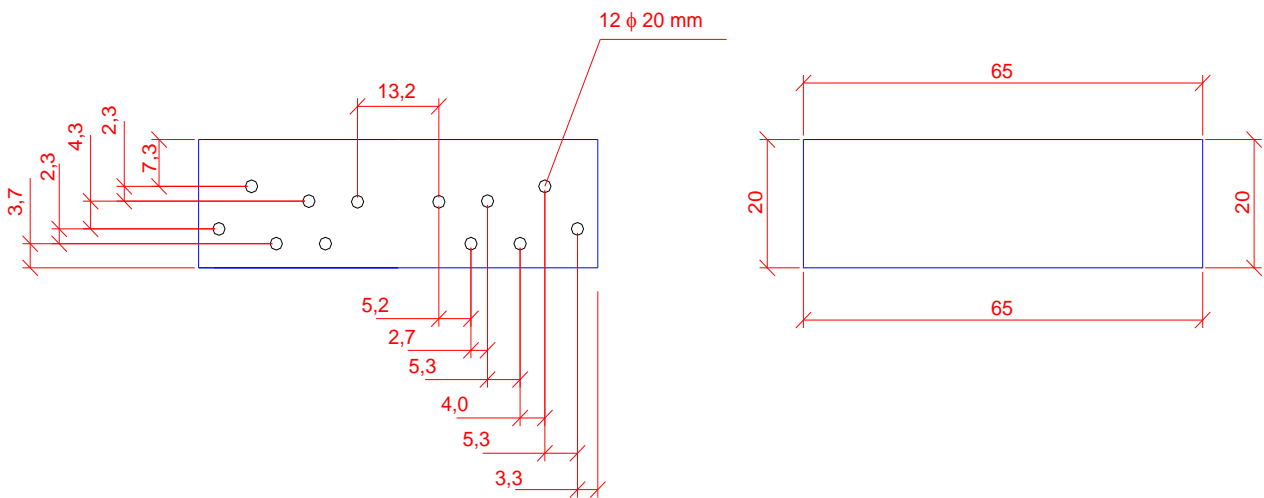


Figura 6 – Chapa de aço que compõem a ligação banzo superior-diagonal dos módulos.

A ligação do montante com o banzo superior foi feita por dois parafusos de 2 cm cada.

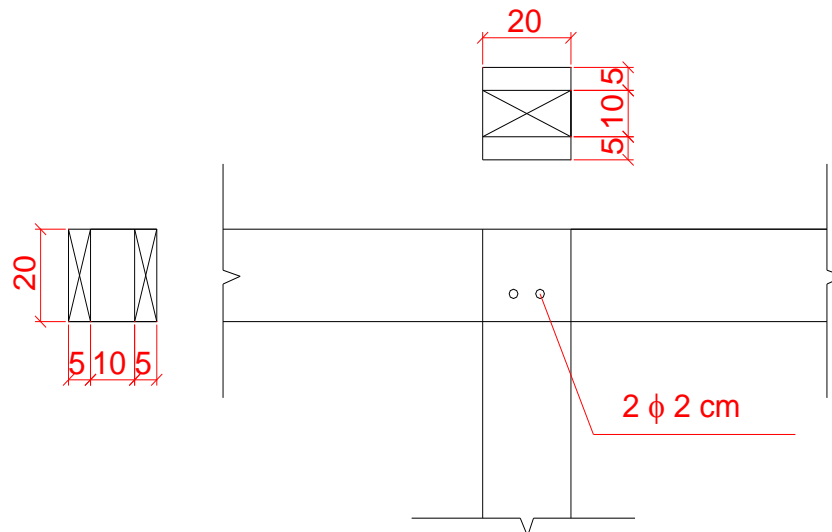


Figura 7 – Detalhe da ligação montante-banzo superior dos módulos.

- Ligação inferior:

Duas chapas metálicas por módulo, cada uma com espessura de 0,9 cm, conectadas a madeira por 12 parafusos de 2 cm de diâmetro e um pino de aço soldado de 3,8 cm, que atravessa o montante e as diagonais fixando a chapa.

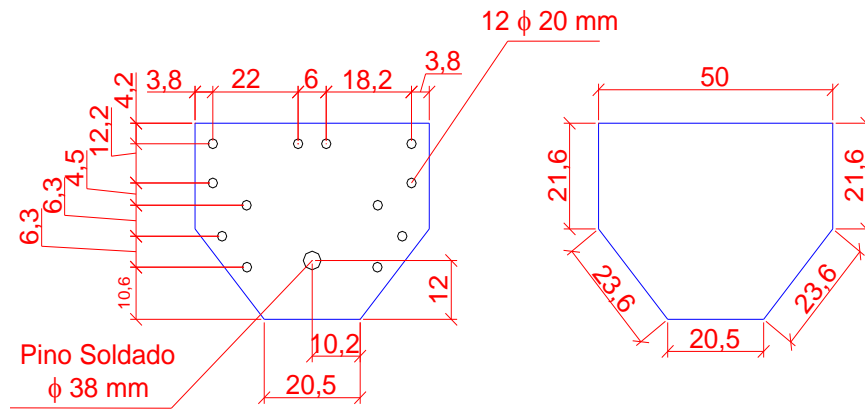


Figura 8 – Chapa de aço que compõem a ligação entre as diagonais e os montantes dos módulos.

Depois de montadas e parafusadas essas peças formaram um módulo como apresentado na figura 9.

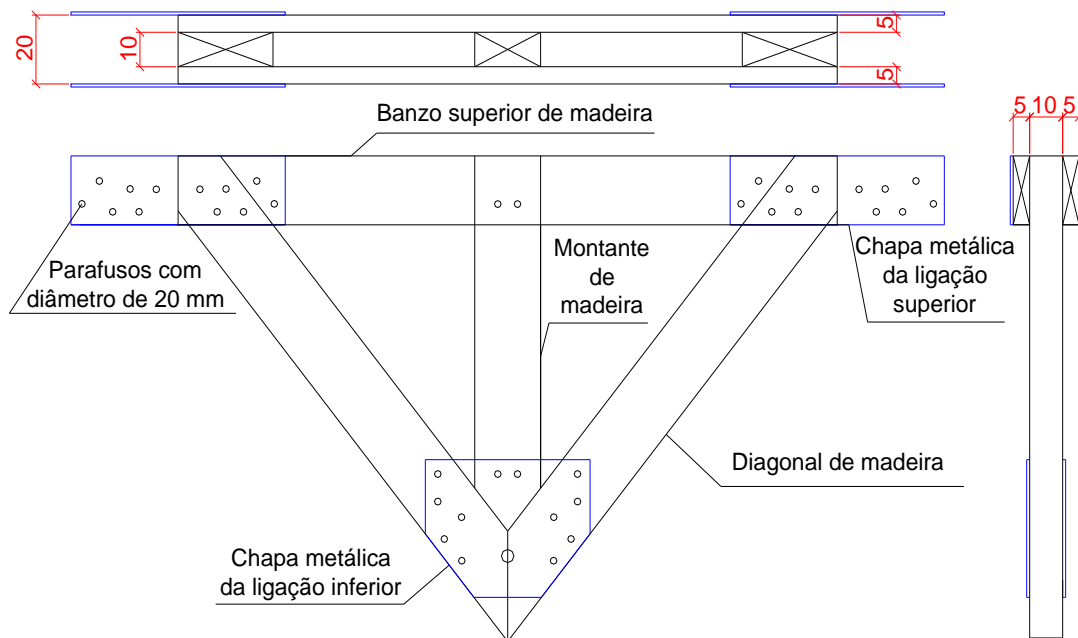


Figura 9 – Um módulo de treliça.

Para os ensaios foram montados dois módulos treliçados, sendo que nos nós inferiores foram utilizadas duas barras de aço, conforme figura 10.

➤ Banzo inferior:

Com a seção transversal de 10 x 0,6 cm cada uma duas barras de aço (tirantes) com espaçamento de 16 cm conectaram os módulos a partir da chapa metálica da ligação inferior e formaram o banzo inferior da treliça.

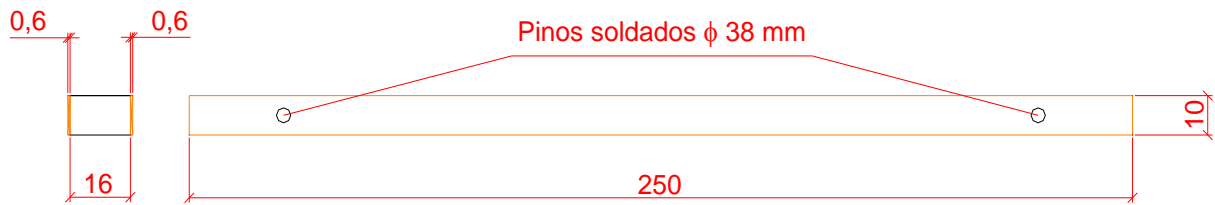


Figura 10 – Barra de aço que forma o banzo inferior do módulo.

As barras de aço foram conectadas aos nós inferiores dos módulos pelas chapas metálicas (mostradas na figura 8), que também são responsáveis pela união das diagonais e montantes.

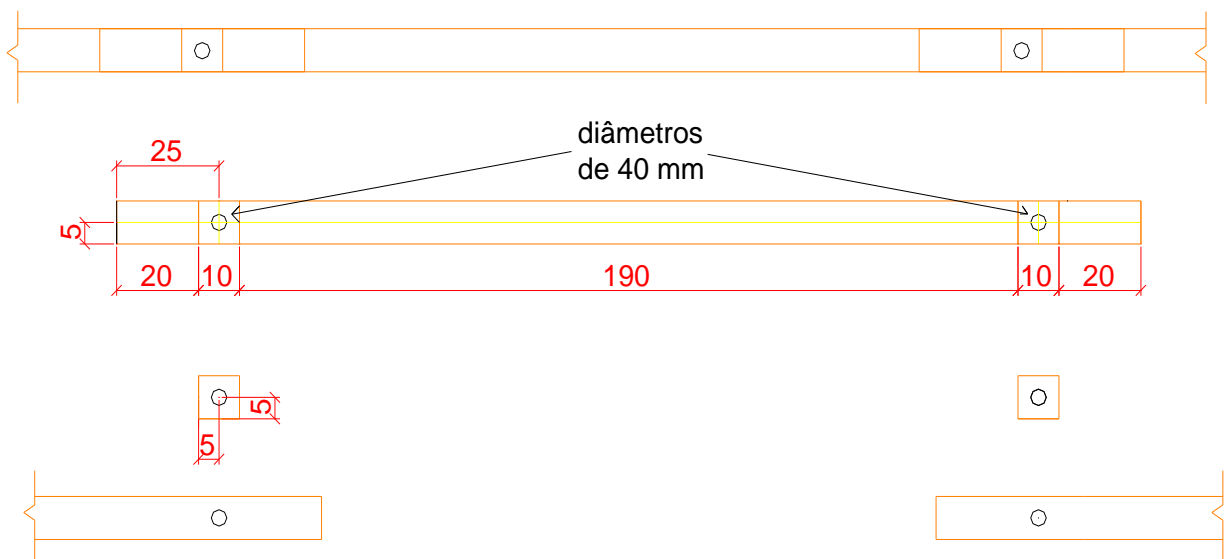


Figura 11 – Detalhe da ligação da barra de aço, com chapas e pinos soldados.

Dois módulos foram montados e ligados de acordo com a figura 12.

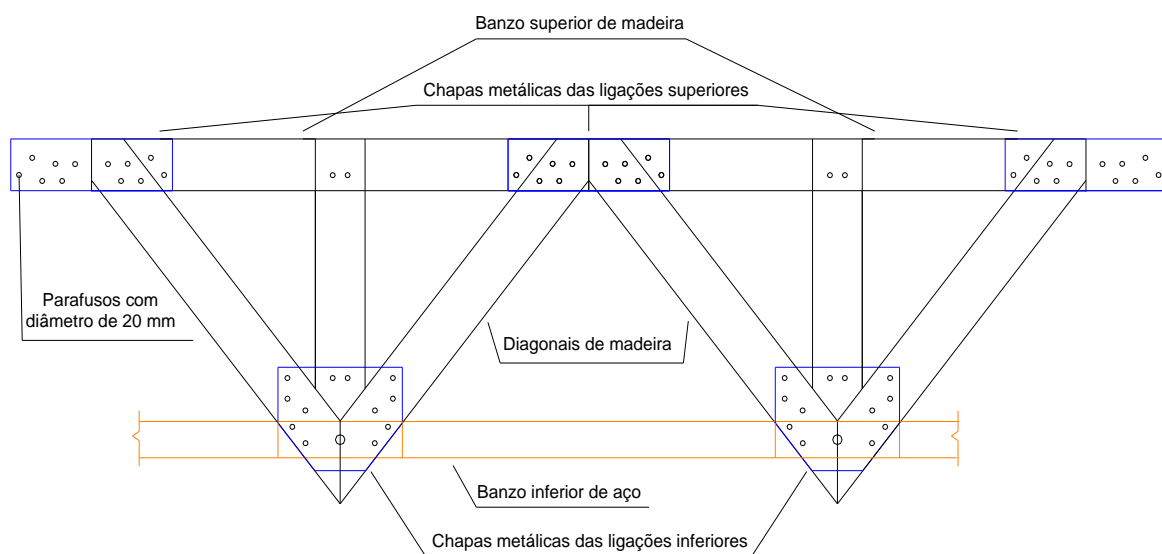


Figura 12 – Módulos prontos para o ensaio.

2.2 Ensaio dos módulos das treliças

Para o ensaio dos módulos treliçados a madeira utilizada foi da espécie Eucalipto citriodora por apresentar a mesma classe de resistência das madeiras tropicais a serem utilizadas para tal finalidade. Foram montados dois módulos, sendo que a união dos mesmos foi realizada através da fixação do banzo inferior por uma barra metálica e do banzo superior através de uma chapa de ligação metálica.

Assim como fizeram Calil et al. (2004), para facilitar o procedimento do ensaio, optou-se pela colocação dos módulos de modo invertido ao que seria colocado em uma ponte.

A aplicação da carga foi efetuada por meio de um pistão do tipo *Yellow Power* acoplado a uma célula de carga, tendo sido previamente aferida conforme NBR 6674/1981. O sistema Kyowa foi utilizado para a aquisição de dados.

Para a avaliação do sistema foram aplicados carregamentos no meio do vão dos módulos treliçados, conforme indicado na figura 13, e medidas as deformações nos banzos e diagonais da treliça e os deslocamentos nos pontos indicados pelos relógios. O sistema foi avaliado para carregamentos de serviço.

Foram feitas duas séries de ensaio, cada série com quatro leituras, e aplicações de carga de 7,85 kN a 78,5 kN na primeira série, e de 7,85 kN a 109,9 kN na segunda série.

A célula de carga tinha constante de 0,157 e foram utilizadas divisões de 50 em 50. Para determinar a força aplicada multiplicou-se a constante da célula pelo número de divisões do relógio, ou seja, 50 divisões x 0,157 = 7,85 kN de carga aplicada.

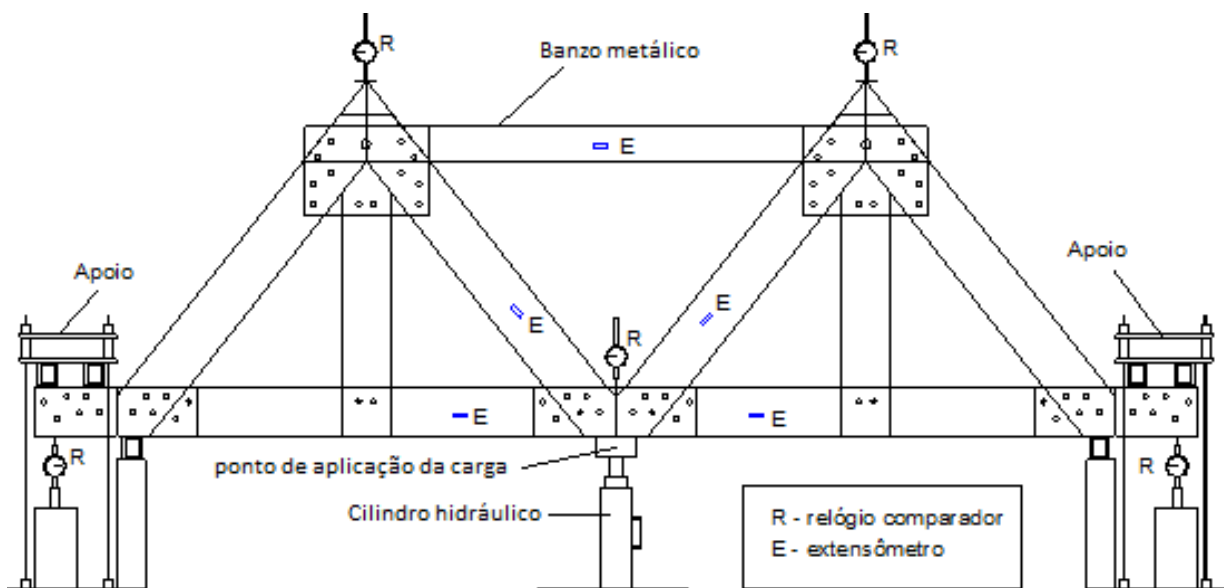


Figura 13 – Esquema do ensaio dos módulos da treliça.

Com a aplicação do carregamento de acordo com o esquema proposto, os banzos superiores e os montantes devem trabalhar sempre a compressão, os inferiores a tração, e as diagonais a tração e compressão.

Para a determinação dos deslocamentos verticais os relógios comparadores foram instalados nos pontos dos módulos, como mostram as figuras 13, 14 e 15. A calibração dos mesmos foi feita de acordo com a NBR 6388/1983 e a precisão considerada foi de 0,01 mm.

Foram usados nos ensaios, extensômetros elétricos da marca Kyowa, e as instruções para o uso dos mesmos foram seguidos atentamente, conforme recomendações de Calil e Dias (2003). Foram instalados também 10 extensômetros nos módulos, que seriam responsáveis pela análise experimental das deformações sofridas pelas barras, sendo 5 unidades de cada lado: quatro no banzo superior, quatro nas diagonais e duas no banzo inferior. Maiores detalhes estão apresentados nas figuras 14 e 15.

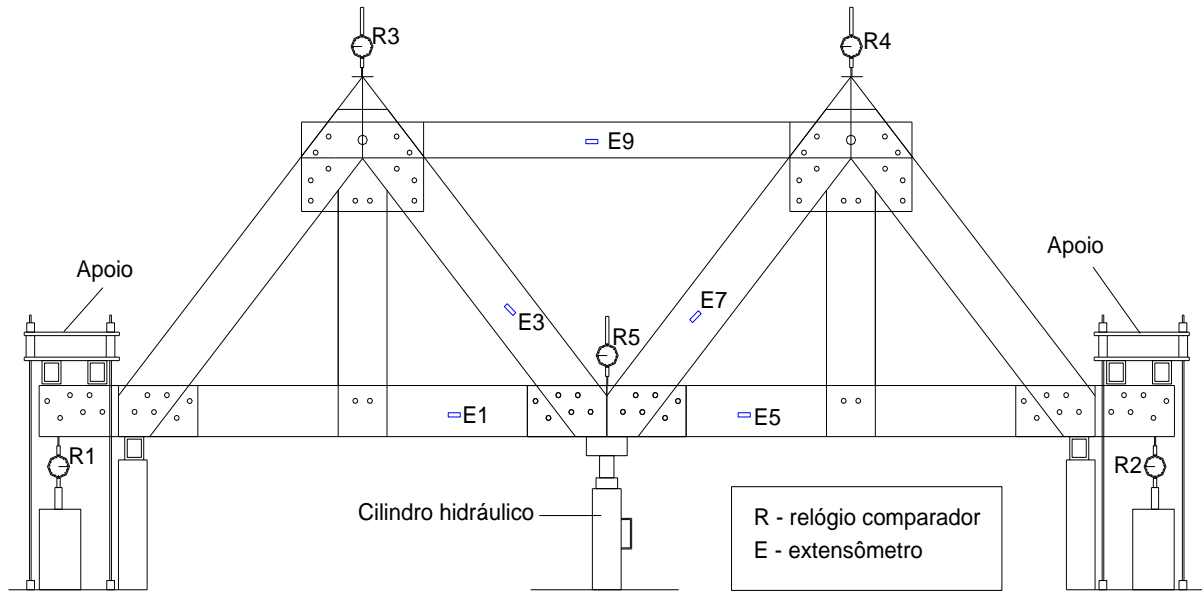


Figura 14 – Detalhe das posições de extensômetros e relógios vistos pelo lado 1 dos módulos.

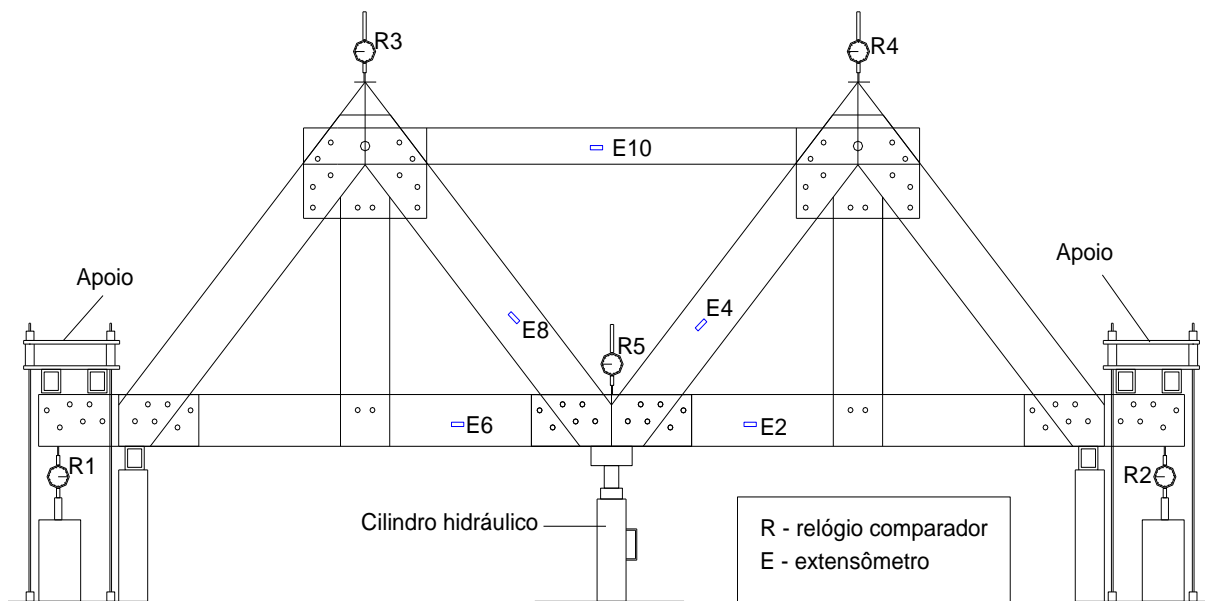


Figura 15 – Detalhe das posições de extensômetros e relógios vistos pelo lado 2 dos módulos.



Figura 16 – Módulo montado de maneira invertida.

2.3 Ensaio de ruptura

Foram repetidos os esquemas de ensaios anteriores, até a ruptura (274,75 kN).



Figura 17 – Ruptura dos módulos na ligação do apoio.

2.4 Análise numérica

A modelagem numérica foi efetuada em concordância com os ensaios experimentais. O software utilizado para a modelagem foi o *Ftool*, versão 2.12. A treliça foi modelada com a utilização

de elementos de barra sendo que todas as ligações entre os elementos da treliça foram consideradas rotuladas. Na simulação efetuada foi realizada uma análise linear para carregamentos de serviço aplicados.

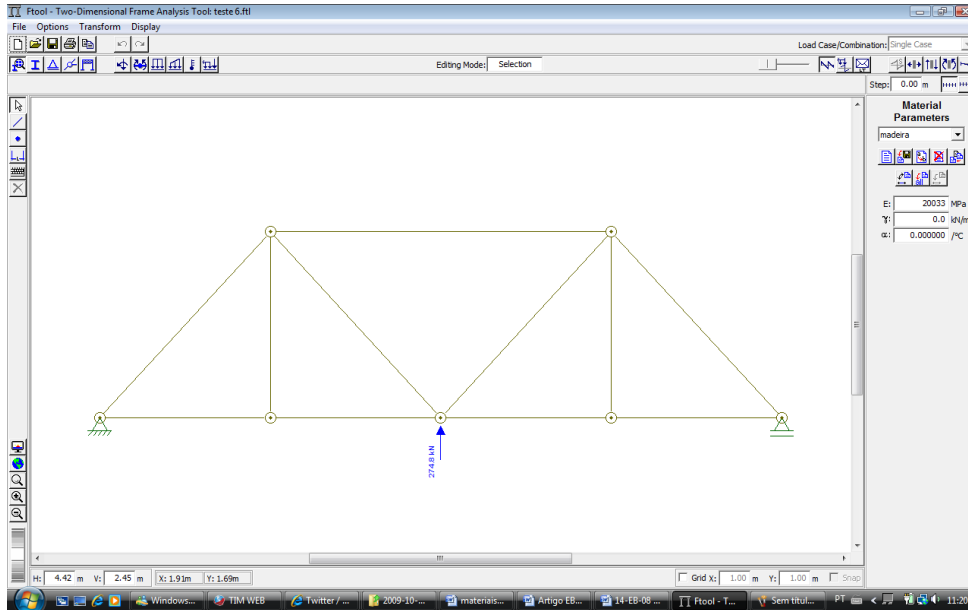


Figura 18 – Módulos de treliça montados na tela do *Ftool*.

2.5 Ponte de treliça modular

O projeto das pontes foi baseado no mesmo projeto das pontes construídas no Quênia, por Parry (1981), com algumas adaptações. As ligações foram melhoradas, conseguindo-se assim uma maior resistência para as mesmas.

O procedimento utilizado para o cálculo dos módulos treliçados foi realizado com base na normas brasileiras da ABNT NBR 7190/1997.

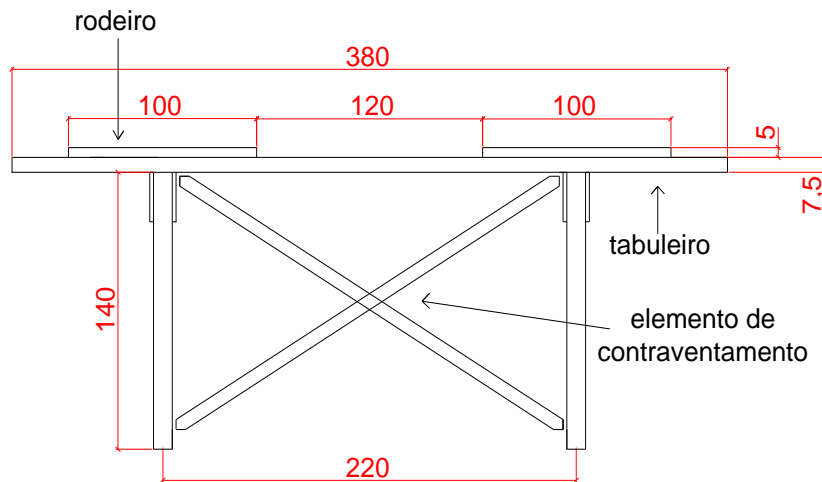


Figura 19 – Seção transversal da ponte para duas treliças.

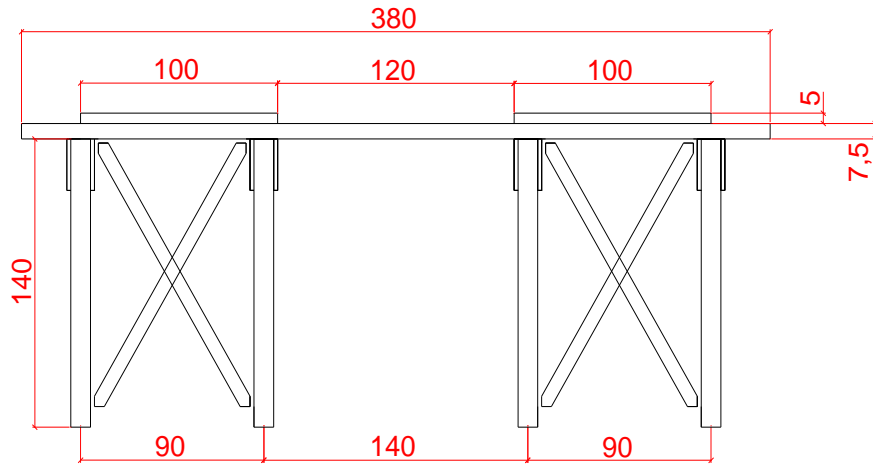


Figura 20 – Seção transversal da ponte para quatro treliças.

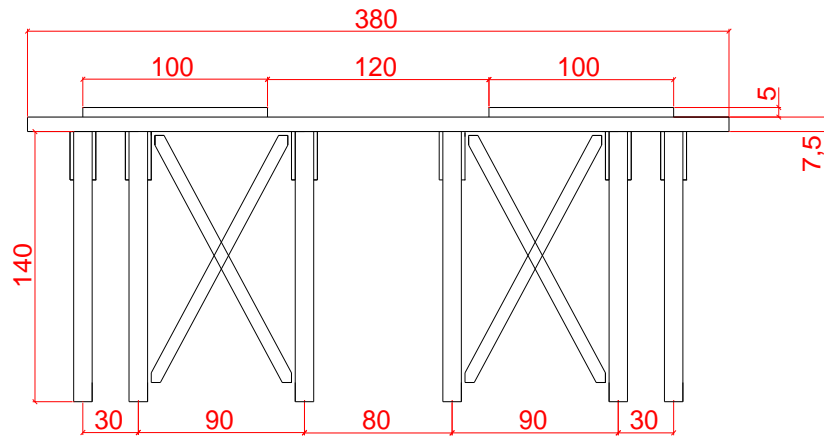


Figura 21 – Seção transversal da ponte para seis treliças.

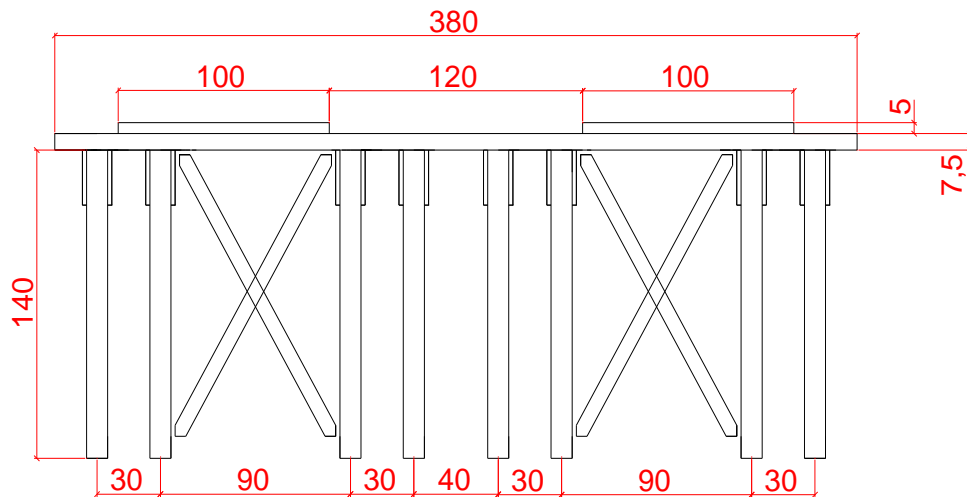


Figura 22 – Seção transversal da ponte para oito treliças.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise numérica e experimental

Os dados de deformação e deslocamento foram estudados para cada peça do módulo e estão apresentados a seguir na forma de gráficos comparativos obtidos por meio da análise experimental e numérica feitas anteriormente.

Para construção dos gráficos de tensão em função dos esforços normais do banzo superior e diagonal, na análise experimental, foi feita uma média entre as duas barras representativas de cada posição.

As figuras 23 e 24 apresentam, respectivamente, as comparações entre os resultados numéricos e experimentais para os níveis de força aplicados no módulo treliçado e as tensões obtidas no banzo superior e na diagonal.

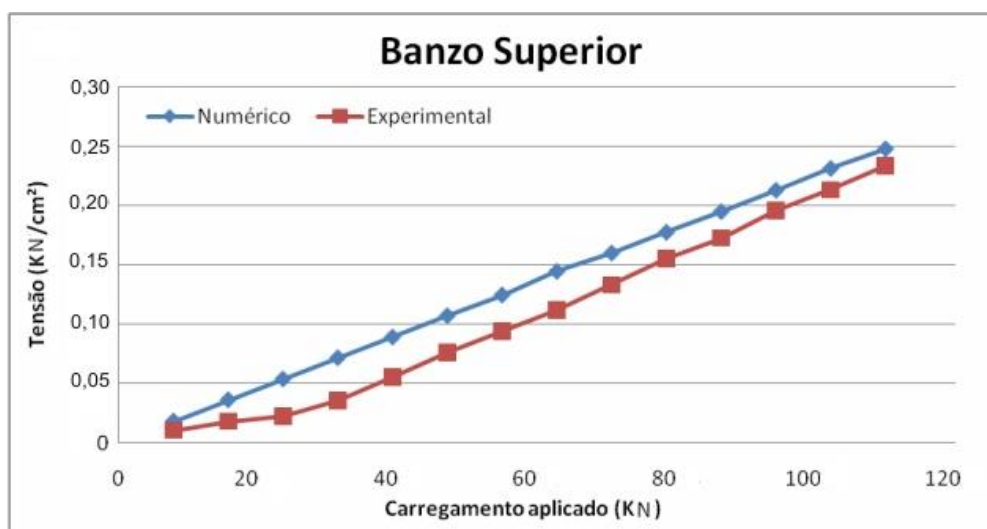


Figura 23 – Relação entre o carregamento aplicado e a tensão sofrida pelo banzo superior.

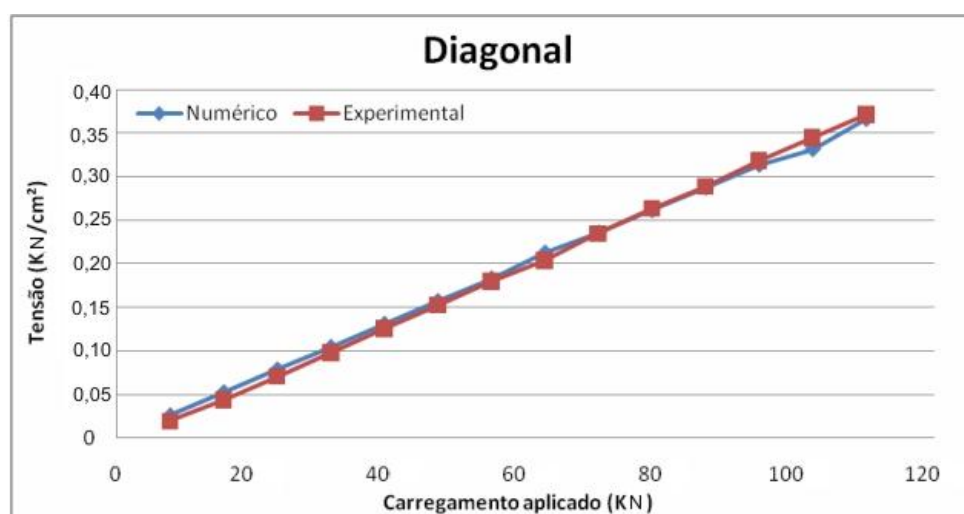


Figura 24 – Relação entre carregamento aplicado e tensão sofrida pela diagonal.

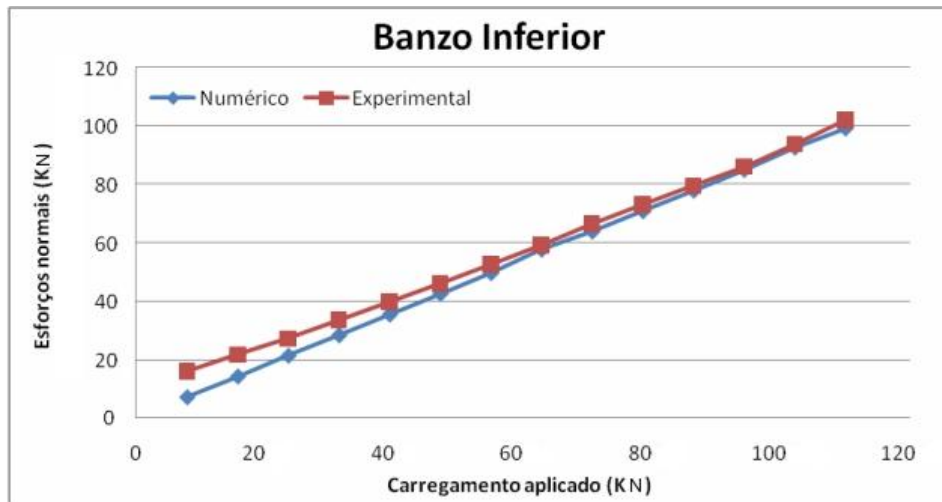


Figura 25 – Relação entre carregamento aplicado e esforço normal sofrido pelo banzo inferior.

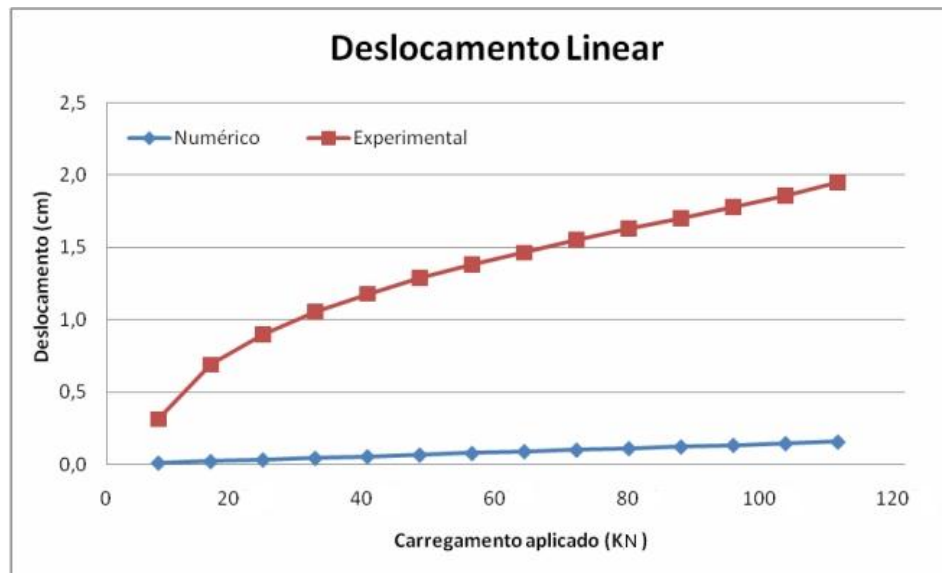


Figura 26 – Relação entre carregamento aplicado e deslocamento vertical no meio do vão.

A Figura 25 apresenta comparação entre a força aplicada no módulo treliçado e o esforço normal de tração obtido para o banzo inferior.

A Figura 26 mostra o deslocamento vertical no meio do vão da treliça (no ponto de aplicação da força) em função da força aplicada ao sistema.

3.2 Tabela de pré-dimensionamento para pontes de treliça modular

A Tabela 1 descreve o número de treliças que devem ser usadas na construção da ponte de treliça modular, dependendo da classe do carregamento e do tamanho do vão da ponte. O dimensionamento dos módulos de treliça foi efetuado com base nas recomendações da NBR 7190/1997, NBR 8681/2003 e NBR 7188/1984.

Tabela 1 – Tabela de pré-dimensionamento da ponte de treliça modular.

Carregamento	Vão				
	8 m	12 m	16 m	20 m	24 m
Classe 30	2	4	6	6	8
Classe 45	4	6	6	8	-

3.3 Discussão dos resultados

O esforço máximo de tração medido no elemento de aço foi de 101 kN para uma resistência de cálculo de 241 kN. Para as peças de madeira a tensão máxima de compressão medida foi de 0,42 kN/cm² e observada na diagonal, sendo a resistência de cálculo, neste caso, calculada conforme NBR 7190/1997, e igual a 1,60 kN/cm².

Ao analisar o deslocamento experimental obtido pelo relógio comparador no meio do vão (1,95 cm), para a maior carga aplicada (109,9 kN) na treliça, com o deslocamento limite máximo permitido ($L/200 = 2$ cm) dado segundo a NBR 7190/1997, observou-se que ficou este abaixo do limite. O deslocamento obtido numericamente para a mesma carga foi de 0,14 cm.

Percebe-se assim que existiu uma grande diferença entre o deslocamento vertical no meio do vão, obtido entre os procedimentos numérico e o experimental. Essa diferença pode ser em parte atribuída, ao tipo de análise numérica realizada, do tipo linear geométrica, que não consideração os efeitos localizados que surgem nas ligações em função da maior concentração de tensões. O efeito das deformações nas ligações deve ser considerado a partir de uma análise não linear física considerando critério de ruptura dos materiais.

A madeira mostrou-se um excelente material estrutural, mas seu maior problema encontrou-se justamente nas ligações, onde se deu a ruptura no ensaio dos módulos. A madeira não possui uma boa resistência normal às fibras e, por isso, o problema das ligações juntamente com a deformação por flexão nos locais críticos deve ser muito bem avaliado para que não ocorram problemas de ruptura localizados.

No ensaio experimental, os módulos romperam com uma carga aplicada de 274,75 kN. Aplicando esta carga nos módulos estudados numericamente, o banzo superior sofreu 126,4 kN de compressão, as diagonais internas, 186,4 kN, também de compressão, e o banzo inferior 252,8 kN de tração. Estes valores foram considerados relativamente baixos e, por isso, foi feito um estudo mais detalhado das ligações (local onde ocorreu a ruptura) com o intuito de melhorá-las para o projeto da ponte.

O projeto das pontes estudadas, neste caso, foi baseado no mesmo projeto das pontes construídas no Quênia, segundo Parry (1981), com algumas adaptações, procurando a melhoria do sistema.

Um importante aspecto desse projeto de ponte é que o tabuleiro absorve parte da compressão axial que deveria ser toda suportada pelo banzo superior do módulo treliçado, mas, o mais importante é que o mesmo distribui o carregamento ao longo das treliças. Desconsiderando essa ressalva, o carregamento mais preocupante na estrutura ocorre quando dois eixos de veículos se encontram perto do centro da ponte de duas treliças, no ponto que causa flexão máxima na mesma e, conseqüentemente os banzos superiores centrais também sofrem os maiores esforços de compressão. Neste caso, os esforços de tração no elemento aço também são os maiores, mas, menos críticos que a compressão na madeira.

Vale mencionar que na prática é necessária a utilização de contraventamento adequado dos módulos para evitar a perda de estabilidade lateral das vigas treliçadas.

4 CONCLUSÕES

Os módulos ensaiados apresentaram um bom comportamento, sendo o seu ponto crítico as ligações (local onde ocorreu a ruptura dos módulos), que foram melhoradas para o projeto da ponte.

O modelo numérico usado foi capaz de avaliar o comportamento da estrutura com relação a esforços e tensões, para carregamentos de serviço.

O estudo numérico-experimental dos módulos mostrou que os podem ser utilizados, de maneira eficaz, para construção de pontes de madeira de médios vãos.

A treliça de madeira é, provavelmente, a estrutura mais econômica para pontes de médios vãos, pois precisa de menos material apresentando uma elevada rigidez. É uma estrutura leve e pode ser montada com equipamentos de pequena capacidade e menor tecnologia. A pré-fabricação é um processo construtivo simples, no qual a maior parte da obra é confeccionada fora do local definitivo da mesma.

As pontes propostas segundo a tabela de pré-dimensionamento apresentada (Tabela 1) devem ter para o carregamento de classe 45, entre 8m e 28 m de vão; para carregamento de classe 30, os vãos podem ser maiores de até 36 m. Esta tabela pode ser utilizada por engenheiros e calculistas de estruturas de madeira no pré-dimensionamento de pontes de treliça modulares pré-fabricada de madeira.

5 AGRADECIMENTOS

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo amparo à pesquisa) pelo suporte financeiro da pesquisa e à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo pelos serviços de apoio a pesquisa.

6 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6674**: aferição de instrumentos de medição de força adequados à verificação de máquinas de ensaio. Rio de Janeiro, 1981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7188**: carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestre: procedimento; Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: projeto e execução de estruturas de aço de edifícios (Método dos estados limites) – procedimento. Rio de Janeiro, 1986

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: projeto de estruturas de madeira: procedimento; Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681**: ações e segurança nas estruturas. Rio de Janeiro, 2003.

CALIL JR, C.; LAHR, F. A. R.; DIAS, A. A. **Dimensionamento de Elementos Estruturais de Madeira**. Editora Manole Ltda, 2003.

CALIL JR, C.; **Manual de Projeto e Construção de Pontes de Madeira**. Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, SET – EESC – USP, 2006.

CALIL JR, C.; MARIN, C. P.; PALMA, G.; Ponte treliçada modular pré-fabricada de madeira. In: IX ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 2004, Cuiaba - MT. **Anais do IX EBRAMEM, 2004.**

CALIL JR, C.; DIAS, A. A. (2003). **Experimentação em Estruturas de Madeira.** Apostila.

EUROPEAN PRESTANDARD (1993). ENV 1995-1-1, EUROCODE 5, Part 1-1, **Design of timber structures: General rules and rules buildings**, Brussels, Belgium, European Committee for Standardization, Dec, 110p.

EUROPEAN PRESTANDARD (1997). ENV 1995-2, EUROCODE 5, Part 2, **Design of timber structures: Bridges**, Brussels, Belgium, European Committee for Standardization, July, 45p.

JUNIOR, E; Ponte de madeira está quebrada. Esperantina, 09 de fevereiro de 2008. Disponível em: <reporteresp.blogspot.com/2008_01_27_archive.html>. Acesso em: 05 de julho de 2008.

KYOWA. **Instruction manual for static strain indicator** – model SM – 60B & SM - 60C.

MOLINA, J. C. “**Análise dinâmica de conectores verticais para tabuleiros mistos de pontes**”. XI ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E ESTRUTURAS DE MADEIRA, Londrina, Brasil, Julho, 2008.

PARRY, J.D. (1986). **A prefabricated modular timber bridge.** Transportation Research Board. Transportation Research Record 1053, Timber Bridges. 49-55. Washington, USA.

