

Projeto, construção e teste de duas treliças *Howe* em madeira

Project, construction and test of two *Howe's* trusses in wood

Daniele Filippini

Thiago L. Boll

Felipe F. Almeida

Alfredo Petruski

Sandra M. F. C. Petruski

Mauro J. Valcanaia Jr.

Resumo

Esse trabalho foi desenvolvido objetivando avaliar aspectos de projeto, execução e comportamento de estruturas. Para isso foram utilizadas treliças tipo *Howe*. Com base em projeto, foram executadas e submetidas a teste de carga duas treliças, em escala real, com vão de 6,90 metros, de madeira *Pinus sp.* Uma feita com ligações pregadas e outra com ligações parafusadas. O dimensionamento das barras principais foi feito em condições limites ao prescrito na norma brasileira, objetivando avaliar a segurança das estruturas. Foram, portanto, utilizadas para os banzos inferiores peças simples com bitolas de 2,5 x 9 cm e 2,5 x 12 cm, e para os banzos superiores peças duplas com bitolas individuais de 2,5 x 9 cm, contradizendo o estabelecido pela norma para seções mínimas. As treliças foram testadas individualmente com acompanhamento das flechas centrais e deformações em algumas ligações. As rupturas ocorreram em peças dos banzos inferiores para cargas superiores a 3 vezes as de projeto.

Abstract

This work was developed to evaluate project aspects, performance and behavior of wood structure, in particular, trusses in *Howe's* configuration. Based on previous design were built and subjected to load tests two trusses, one made with nailed connections and the other with bolted connections, in real size scale, 6,90 meters long, with a pine called *Pinus sp.* The design was made in boundary conditions prescribed by the Brazilian norm, to evaluate the safety of the structures. This led to the use of simple pieces of 2.5 x 9 cm and 2.5 x 12 cm for the lower uprights and double parts with individual gages of 2.5 x 9 cm for the upper flanks, contradicting the standard for minimum sections. The trusses were tested individually with monitoring of the central arrows and deformations in some connections. The ruptures occurred in the lower flanges for loads greater than 3 times the design loads.

Palavras-chave: Treliça tipo *Howe* / Ligações pregadas e parafusadas / Comportamento estrutural

Keywords: *Howe's* truss / Nailed and bolted connections / Structural behavior

Daniele Filippini

Engenheira Civil e Mestranda de Engenharia de Energia na Agricultura pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná Cascavel, Paraná, Brasil
danielefingerfili@hotmail.com

Thiago L. Boll

Engenheiro Civil pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná Cascavel, Paraná, Brasil
thiago_luiz_boll@hotmail.com

Felipe F. Almeida

Engenheiro Civil pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná Cascavel, Paraná, Brasil
felipe-fagner@outlook.com

Alfredo Petruski

Professor Doutor da Universidade Estadual do Oeste do Paraná Cascavel, Paraná, Brasil
petrusk@terra.com.br

Sandra M. F. C. Petruski

Professora Doutora da Universidade Estadual do Oeste do Paraná Cascavel, Paraná, Brasil
sandra.petruski@unioeste.br

Mauro J. Valcanaia Jr.

Engenheiro Civil pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná Cascavel, Paraná, Brasil
maurovalcanaia@gmail.com

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

FILIPPINI, D. [et al.] – Projeto, construção e teste de duas treliças *Howe* em madeira. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 7. ISSN 2183-8488. (julho 2018) 49-54.

1 Introdução

A madeira é um dos mais antigos materiais construtivos usados pela humanidade. Por ser um material renovável, seu uso foi difundido na construção civil, atendendo diversas necessidades da indústria. Na atualidade, o uso da madeira competitivamente aceitável frente a outros materiais se tornou viável devido às técnicas de reflorestamento, as quais tornam o uso do material ecologicamente praticável [1][2].

Entretanto, devido à tradição brasileira do uso do concreto e aço, o potencial estrutural da madeira não é utilizado, sendo essa utilizada majoritariamente em estruturas de coberturas de construções. O processo construtivo dessas estruturas é raramente industrializado, sendo, ainda, um processo extremamente artesanal [3].

Para a maioria das estruturas de cobertura são utilizadas barras ligadas nas extremidades, formando um conjunto rígido, denominado como treliça [2]. As treliças com a geometria do tipo Howe são as mais utilizadas.

As ligações das barras em estruturas do tipo treliça são chamadas de nós e necessitam de atenção especial quando a estrutura é concebida [2]. Os nós são os pontos mais vulneráveis de uma estrutura de madeira, o que torna indispensável a previsão do seu comportamento em condições reais. Dentre os tipos de ligações existentes, as de maior conhecimento e utilização são as parafusadas e pregadas, devido à sua confiabilidade e facilidade de execução, diferente de ligações coladas, por exemplo [5].

Nesse sentido, esse trabalho almeja contribuir com a caracterização de treliças, em escala real, do tipo Howe, com dois tipos de ligações: as pregadas e as parafusadas. Assim, comparou-se a variação das propriedades das estruturas quando submetidas a carregamentos similares àqueles encontrados em situações reais. A comparação ainda avalia as condições de segurança impostas pela norma brasileira de estruturas de madeira [6].

2 Revisão bibliográfica

A madeira é um material natural utilizado em larga escala na construção civil, estando presente em praticamente todas as etapas de uma construção: desde formas até estruturas para sustentação de coberturas [7].

Destaca-se que as estruturas de madeira podem ser consideradas sustentáveis, uma vez utilizada a técnica de reflorestamento que, aliada à industrialização, possibilitam a comercialização do material de forma economicamente competitiva frente aos outros materiais construtivos [2]. Uma das madeiras de reflorestamento mais utilizadas é o *Pinus sp.*, espécie caracterizada por ter densidade baixa.

É de grande importância a utilização de madeiras de reflorestamento, visto a preocupação sob o aspecto econômico das estruturas, pois as madeiras consideradas nobres possuem um valor bastante elevado, comparado ao de madeiras oriundas de reflorestamento. Além disso, em relação ao aspecto técnico, as estruturas de telhado possuem desempenhos satisfatórios quando utilizadas madeiras reflorestadas, como é o exemplo do eucalipto e do pinus [8].

No Brasil, devido a questões culturais, a madeira não é utilizada em larga escala em elementos estruturais. Porém, o material é muito

utilizado na confecção de treliças de sustentação de coberturas. [3]. Denomina-se treliça o conjunto de barras ligadas em suas extremidades formando os denominados nós. Para efeitos de cálculo, esses nós são considerados rotulados [9].

Os principais tipos de treliças existentes são: Howe, Pratt, Belga, Fink ou Polonceau (variante da treliça belga), Bowstring e estruturas pontaleadas [10][11]. Sendo assim, escolhe-se, dentre os diversos tipos existentes, a geometria que satisfaça os requisitos necessários a cada estrutura, levando em consideração a forma geométrica das instalações, o uso ou não de lanternins, cargas provenientes de outros elementos que compõe a cobertura, a experiência dos construtores, o grau de facilidade de construção e os esforços desenvolvidos em cada barra [11]. Considerada a aplicação de estruturas treliçadas em edificações residenciais, ou seja, de vãos menores, as tipologias mais frequentes são: Pratt, Fink e Howe, por terem geometria mais simplificada [4].

Dentre todas as outras tesouras e treliças existentes, a tesoura tipo Howe é a mais utilizada no país. Sua geometria é comumente empregada para vencer vãos de até 18 m. A treliça do tipo Howe apresenta para o carregamento principal (de cima para baixo) compressão nas diagonais e tração nos montantes [4][12].

Para a escolha do tipo de ligação utilizada, considera-se a necessidade de satisfazer os seguintes requisitos: propriedades técnicas compatíveis com os esforços a serem absorvidos, proporcionar a menor quantidade possível de madeira a ser usada no dimensionamento, ter comportamento previsível, ser elástico o suficiente para não gerar esforços adicionais, permitir inspeções e ser durável. Esses requisitos são necessários pois as ligações das peças de madeira de uma estrutura requerem cuidados especiais, não só na fase de sua concepção mas também durante a sua execução. A falta de atenção no estudo de uma ou mais ligações possivelmente levará a estrutura treliçada ao colapso [13][14].

A norma brasileira de estruturas de madeira considera os seguintes métodos de ligação por penetração: cavilhas (pinos de madeira torneados), conectores (anéis ou chapas metálicas) e pinos metálicos (pregos ou parafusos) [6].

Os pregos estruturais devem ser feitos de aço com resistência característica de escoamento f_{yk} de pelo menos 600 MPa, e devem ter diâmetro mínimo de 3 mm. Para parafusos, recomenda-se um diâmetro mínimo de 10 mm e f_{yk} de 240 MPa [6].

3 Materiais e métodos

As duas treliças foram executadas nas dependências do Laboratório de Tecnologia e Estruturas de Madeira (LATEM) e do Laboratório de Estruturas e Materiais de Engenharia (LEME), pertencentes ao Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas (CCET) da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste), na cidade de Cascavel. Ambas, com geometria Howe, com 6,90 metros de vão livre, como apresentado na Figura 1, e madeira *Pinus sp.*, adquirida no comércio local.

O lote de madeira, quando adquirido, foi caracterizado quanto à sua resistência característica à compressão paralela às fibras, ao cisalhamento e ao módulo de elasticidade médio da madeira. A partir desses valores, foram calculados os valores de cálculo, apresentados na Tabela I.

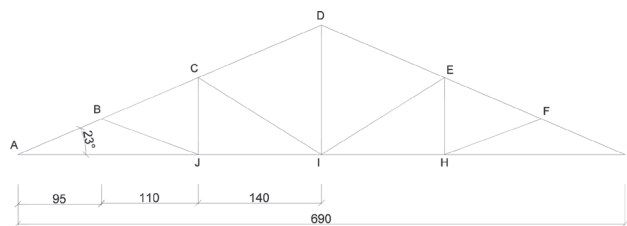


Figura 1 Geometria adotada para treliça, dimensões em centímetros (Fonte: Autor, 2015)

Tabela I Valores de cálculo da madeira

$f_{c0,d}$	13,39 MPa
$f_{t0,d}$	13,39 MPa
$E_{c0,ef}$	8.712,01 MPa
$f_{v0,d}$	3,58 MPa

O dimensionamento da treliça foi feito a partir dos requisitos apresentados na norma brasileira regulamentadora de estruturas de madeira [6]. Para o levantamento de cargas, foi considerada a influência das cargas de origem permanente (743,9 Pa), sobrecarga (250,0 Pa) e cargas devidas ao vento (300,0 Pa). Sendo assim, o esforço total de projeto de cada uma das treliças correspondeu a 310,3 kN. Entretanto, as cargas aplicadas nos nós das extremidades são imediatamente transferidas aos pilares/fundação, sendo assim, foram desconsideradas neste projeto, o que gerou uma “carga de projeto” de 217,8 kN.

O dimensionamento foi feito considerando-se o tipo do esforço normal predominante na peça, neste caso, tração ou compressão. Para as barras comprimidas adotou-se peças duplas com espaçadores interpostos a intervalos regulares e unidos por meio de parafusos. O resumo final das seções transversais das peças encontra-se na Tabela II.

Tabela II Resumo das seções transversais das peças

Barra	Banzo superior*	Banzo inferior	BJ/FH*	CJ/EH	CI/EI*	DI
b (cm)	2 x 2,5	2,5	2 x 2,5	2,5	2 x 2,5	2,5
h (cm)	9,0	12,0	4,0	5,0	6,0	12,0

*Peças duplas

Os dimensionamentos das ligações levaram em consideração os dois possíveis modos de ruptura de ligações desse tipo: embutimento na madeira ou flexão no pino, e foram calculados a partir dos requisitos descritos pela norma brasileira de estruturas de madeira [6]. Entretanto, percebeu-se que o número de pregos e parafusos necessários por ligação seria elevado. Sendo assim, optou-se pela utilização de dentes/entalhes que auxiliassem na absorção do esforço, em algumas ligações.

Nas ligações das extremidades, onde o carregamento das barras é mais elevado, foram utilizadas duas talas parafusadas, fixadas no banzo inferior, que receberiam o carregamento do banzo superior

por meio de testadas, trabalhando à compressão inclinada. Solução semelhante se deu para o nó D. As demais ligações tiveram soluções combinando o uso de dentes e pinos metálicos.

O ensaio de ruptura das estruturas aconteceu em um Quadro de Reações de concreto armado, como mostrado na Figura 2.

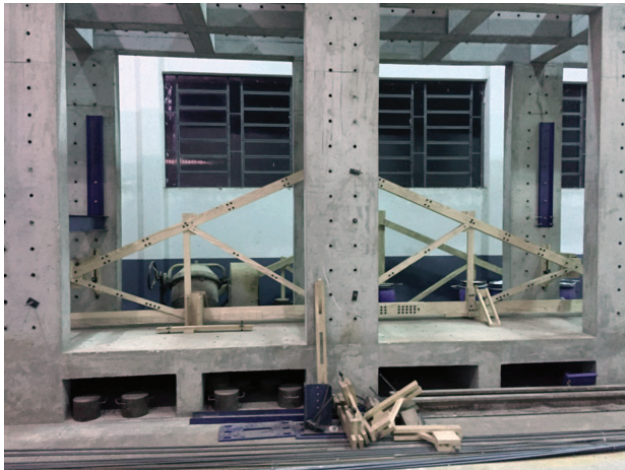


Figura 2 Treliça de madeira posicionada para ensaio no quadro de reações de concreto armado (Fonte: Autor, 2016)

Foram colocadas duas células de carga, com capacidade individual de 100 kN, para acompanhamento dos níveis de sollicitação. Uma dessas células foi localizada no nó G da treliça e a outra no nó C, sendo a disposição dos nós conforme Figura 1. Como consequência do funcionamento correto de um sistema hidráulico, portanto, a célula do nó G acusaria metade do carregamento imposto à treliça sob teste. A célula sob o pistão locada no nó C acusaria, portanto, 1/5 da carga total aplicada à estrutura.

Ainda, foram instalados relógios comparadores, como demonstrado na Figura 3, com resolução de 0,001 mm, responsáveis pela leitura das deformações das ligações de extremidade e da ligação da emenda do banzo inferior. No centro das treliças instalaram-se relógios adicionais, com resolução de 0,01 mm, responsáveis por medir o deslocamento vertical da treliça neste ponto.



Figura 3 Relógio para leitura do deslocamento vertical instalado na estrutura (Fonte: Autor, 2016)

Com todos os dispositivos instalados, foram feitos pré-testes das treliças para conferência de todos os equipamentos. Nestes testes a máxima carga total aplicada foi da ordem de 300,0 kN.

Na sequência foram realizados ensaios oficiais, que se iniciaram com aplicação de carga a cada 20,0 kN (na soma dos pistões) até um carregamento de 300,0 kN, seguido de descarregamento das estruturas. Aplicou-se, novamente, carga a cada 20,0 kN até um carregamento de 450,0 kN, e então foram retirados os aparelhos de medição de deformabilidade e aplicadas cargas adicionais de forma gradativa até a ruptura das estruturas.

4 Resultados e discussões

As rupturas de ambas as estruturas ocorreram no banzo inferior, e nos dois casos, foram ocasionadas por desvios de fibras. Com relação à carga de ruptura da estrutura, a treliça pregada atingiu um valor de 7.452,5 kgf, enquanto a treliça parafusada rompeu com um carregamento de 6.828 kgf. Tendo em conta que ambas foram dimensionadas a partir da mesma norma [6] e para a mesma carga de projeto, acredita-se que a diferença de carregamento máximo seja devido ao fato de a treliça pregada ter sido executada com peças de melhor qualidade, possuindo menor quantidade de nós e menores desvios de fibra, especialmente no banzo inferior.

Em ambas as estruturas foram executadas emendas nos banzos inferiores. As deformações ocorridas nestas emendas obtiveram aumento aproximadamente linear. Entretanto, quando as barras das emendas foram submetidas a aproximadamente 2.500 kgf, a emenda da treliça pregada atingiu uma deformação de aproximadamente 0,14 mm, enquanto a emenda da treliça parafusada deformou aproximadamente 0,06 mm.

Os relógios comparadores instalados nas ligações das extremidades das treliças indicaram comportamentos aproximadamente lineares para as deformações, conforme o aumento do carregamento da estrutura.

Quanto às deformações das estruturas, ambas apresentaram comportamentos lineares, e valores de deformação muito próximos aos dados pela estimativa teórica PTV 1. Os valores de deformação resultantes da estimativa teórica PTV 2 foram mais pessimistas tanto para a treliça pregada, quanto para a parafusada. Isto se deve ao fato de a equação do PTV 2 ter sido realizada a partir do módulo de elasticidade efetivo da madeira. Percebeu-se ainda que as deformações e as estimativas teóricas da treliça parafusada obtiveram valores ligeiramente inferiores aos da treliça pregada.

A treliça pregada, quando submetida a uma carga de 2,500 kgf, apresentou no ponto central deformação de 10,55 mm, enquanto as estimativas teóricas para este carregamento PTV 1 e PTV 2 apresentaram respectivamente 10,0 mm e 17,86 mm. Já a treliça parafusada, quando submetida à mesma ordem de carregamento, deformou 9,05 mm no ponto central da estrutura, enquanto o PTV 1 indicava uma deformação de 8,99 mm e o PTV 2 um valor de 16,06 mm.

As cargas de ruptura real superaram as cargas de projeto, admitidas pela norma brasileira de estruturas de madeira, em uma ordem de 3 vezes em ambas estruturas, o que leva a uma conclusão de que

a norma é extremamente conservadora, minorando a capacidade estrutural da madeira.

As duas treliças obtiveram alto desempenho, pois além de terem atingido carregamentos superiores aos esperados pelo projeto, as deformações foram lineares e as flechas não atingiram o máximo permitido pela norma mesmo para cargas superiores a duas vezes a carga de projeto.

Referências

- [1] Issa, C. A.; Kmeid, Z. – "Advanced wood engineering: glulam beams". *Construction and Building Materials*, v. 19, n. 2, p. 99-106, 2005.
- [2] Pfeil, W.; Pfeil, M. – *Estruturas de madeira*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2003.
- [3] Couri Petruski, S. M. F. – *Desenvolvimento de pórticos de madeira laminada colada de eucalipto, utilizando adesivos à base de resorcinol e óleo de mamona*. Tese (Doutorado), 119 f., 2012. Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG.
- [4] Moliterno, A. – *Caderno de Projetos de Telhados em Estruturas de Madeira*. 4. ed. São Paulo: Blucher, 268 p., 2010.
- [5] Calil, C., Neto; Lahr, F. A. R. – "Ligações em madeira com parafusos auto-atarraxantes sem pré-furação para uso estrutural". *Cadernos de Engenharia de Estruturas*, São Carlos, Sp, 2014.
- [6] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7190 – Projeto de Estruturas de Madeira. Rio de Janeiro, 107 p., 1997.
- [7] Pfeil, W.; Pfeil, M. – *Estruturas de madeira*. 6. ed. Rio de Janeiro: Ltc. Editora, 224 p., 2011.
- [8] Petruski, A. – *Estudo da madeira da pindaiba (Xilopia sericea St. Hil.) para confecção de tesouras de telhado, com ligações de chapas e pregos*. Dissertação (Mestrado), 102 f., 1991 - Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1991.
- [9] Pfeil, W. – *Estruturas de Madeira*. Rio de Janeiro. Editora LTC, Livros Técnicos e Científicos, 1977. 3ed, 1982.
- [10] Valle, I. M. R. – *A pré-fabricação de dois sistemas de cobertura com madeira de florestas plantadas. Estudos de casos: os assentamentos rurais Pirituba II e Sepé Tiaraju*. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, SP, 2011.
- [11] Alvino, F. C. G.; Lopes Neto, J. P. – "Estudo de treliças coplanares para coberturas de construções rurais". *Congresso de Iniciação Científica*, Universidade de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2011.
- [12] Gesualdo, F. A. R. – *Estruturas de Madeira*. Uberlândia: UFU, 93p., 2003.
- [13] Leitner, R. J. – *As ligações em estruturas de madeira e, em especial, as ligações pregadas de peças estruturais de madeira de pinho*. Tese (Concurso de provimento do cargo de Professor catedrático da cadeira de Materiais de Construção, Tecnologia e Processos gerais). Escola de Engenharia da Universidade do Paraná, Curitiba, PR, 1952.
- [14] Calil, C. Jr.; Brito, L. D. – "Manual de projeto e construção de estruturas com peças roliças de madeira de reflorestamento". São Carlos: EESC, 2010.

Projeto, construção e teste de duas treliças *Howe* em madeira

Daniele Filippini, Thiago L. Boll, Felipe F. Almeida, Alfredo Petruski, Sandra M. F. C. Petruski, Mauro J. Valcanaia Jr.