

ESTUDO DE CONECTORES DE BARRAS DE AÇO CA 50 PARA VIGAS MISTAS DE MADEIRA E CONCRETO DE PONTES

STUDY OF CONNECTORS DOWEL TYPE CA 50 FOR TIMBER CONCRETE COMPOSITE BEAMS OF BRIDGES

Julio C. Molina ⁽¹⁾ (A), Carlito Calil Junior ⁽²⁾

(1) Prof. Dr., Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia Industrial Madeireira, Brasil

(2) Prof. Dr., Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Brasil

Endereço de contato: molina@itapeva.unesp.br; (A) Apresentador

Código de identificação: T6-06

Resumo

Neste trabalho foram analisadas, de forma teórica e experimental, vigas mistas de madeira e concreto, com seção transversal T, com dois diferentes tipos de conexão efetuadas por barras de aço do tipo CA50. Os conectores, com diâmetro de 12,5mm, foram posicionadas perpendicularmente à direção longitudinal das fibras da madeira, na interface dos materiais madeira e concreto. Nos ensaios experimentais de flexão foram consideradas um total de oito vigas mistas, sendo quatro destas vigas confeccionadas com conectores colados com resina epóxi do tipo *Compound Adesivo* e outras quatro vigas com conectores fixados somente por pré-furação na madeira em furos com diâmetros menores e sem a utilização de resina. Na confecção das vigas utilizou-se madeiras de *Eucalyptus citriodora* e laje armada de concreto de média resistência. A análise teórica das vigas para verificação da resistência e da rigidez (EI) foi feita com base no modelo de Mohler (Eurocode 5: 1993). Os resultados obtidos mostraram que o conector colado com a resina epóxi proporcionou maior resistência e rigidez (EI) para as vigas mistas quando comparados com o conector fixado somente por pré-furação. As diferenças, neste caso, foram de até 10%. Além disso, os valores de resistência e rigidez (EI)_{ef}, obtidos teoricamente pelo modelo de Mohler, foram menores que os valores obtidos experimentalmente nos ensaios de flexão, sendo as diferenças, neste caso, de até 25%.

Palavras chave: conectores de cisalhamento; resistência; rigidez; viga mista; madeira e concreto

Abstract

In this work, wood-concrete composite beams, with T cross section, and two different types of connection made by CA50 steel bars, were theoretically and experimentally analyzed. The connectors, with a diameter of 12.5 mm, were positioned perpendicular to the longitudinal direction of the wood fibers at the interface of the wood and concrete materials. In the experimental bending tests a total of eight composite beams were considered; four of these beams made with connectors bonded with epoxy resin Adhesive Composite and four other beams with connectors only fixed by pre-drilling in the wood in holes with smaller diameters and without The use of resin. Eucalyptus citriodora wood and concrete slab with medium strength were used in the confection of the beams. The theoretical analysis of the beams for the verification of strength and stiffness (EI) was based on the Mohler model (Eurocode 5: 1993). The results showed that the epoxy resin-bonded connector provided higher strength and stiffness (EI) for composite beams when compared to a pre-drilled connector. The differences, in this case, were up to 10%. In addition, the values of strength and stiffness (EI), theoretically obtained by the Mohler model, were lower than the values obtained experimentally in the bending tests, with differences in this case being up to 25%.

Keywords: shear connectors; strength; stiffness; composite beam; wood and concrete

1. INTRODUÇÃO

O sistema estrutural misto de madeira e concreto é apresentado como uma solução que pode aumentar a vida útil da madeira. Esse sistema é de fácil implementação e apresentam vantagens econômicas e estruturais com relação à madeira e o concreto nas suas formas simples. Segundo Alvim e Almeida (2003) [1], a associação dos materiais madeira e concreto em pontes resulta em elementos com excelentes características estruturais, combinando-se o que há de melhor em cada material, isto é, a leveza da madeira com uma maior resistência do concreto às intempéries. No tabuleiro misto de uma ponte, a peça de concreto (constituída de uma laje armada) deve ser conectada às vigas de madeira de tal modo que ambos os materiais trabalhem em conjunto. A ação conjunta da madeira (tracionada) e do concreto (comprimido), na flexão, é obtida através da utilização de conectores que, dispostos ao longo da interface dos materiais, transmitirem as forças de cisalhamento longitudinais e impedem a separação vertical da laje de concreto das peças de madeira. Esses conectores são conhecidos no meio técnico como “conectores de cisalhamento”. A Figura 1 mostra um exemplo da aplicação de conectores de cisalhamento em uma viga mista de madeira e concreto.



Figura 1: Cisalhamento dos conectores verticais na interface dos materiais madeira e concreto.

Fonte: Molina (2008) [2].

Muitos são os tipos de conectores utilizados em estruturas mistas e as principais características que permitem comparações entre eles são: resistência última, módulo de deslizamento e principalmente, custo final de instalação. Um sistema de conexão que tem ganhado a atenção especial dos pesquisadores é o de barras de aço coladas em peças de madeira, por apresentar baixo custo, possibilitando ligações simples e fáceis de serem executadas. Caracteriza-se pela colagem de barras aço comum em furos com diâmetro maior através da utilização de resinas estruturais. A adesão na conexão, inicialmente, é a combinação da adesão química e mecânica. A partir do aumento do nível de solitação a adesão química se rompe, permanecendo apenas a adesão mecânica. Porém, ainda não existem normas técnicas brasileiras regulamentando o uso de barras de aço coladas, embora tenham sido usadas há mais de vinte anos em alguns países Escandinavos e também na Alemanha. Atualmente constam na norma europeia Eurocode 5 (1997) [3] algumas recomendações do seu uso. A Figura 2 mostra a utilização de barras de aço coladas em vigas serradas de madeira.



Figura 2: Barras de aço comum do tipo CA 50 (com mossas) coladas com resina epóxi em vigas serradas de madeira. Fonte: Molina (2008) [2].

No presente trabalho analisou-se, de forma teórica e experimental, o comportamento de resistência e rigidez de conectores de cisalhamento formados por segmentos de barras de aço comum fixados

perpendicularmente (verticalmente) ao plano cisalhante (interface dos materiais) de vigas mistas de madeira e concreto para pontes. Foram analisados conectores colados com resina epóxi, como também conectores fixados na madeira somente por pré-furação e sem a utilização de resinas.

2. MODELO DE MOHLER – ANÁLISE TEÓRICA

Um dos modelos de cálculo mais utilizados no dimensionamento de vigas mistas é o modelo de viga equivalente, proposto por Mohler, o qual está apresentado no Eurocode 5 (1993) [4]. Esse modelo foi adaptado para estruturas mistas de madeira e concreto e considera uma viga equivalente de seção transversal T, formada por uma laje armada de concreto, unida a uma viga de madeira, através de um sistema de conexão metálico, como mostra a Figura 3.

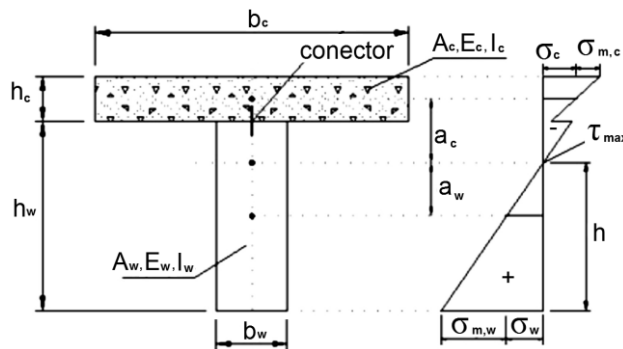


Figura 3: Tensões internas na seção mista. Fonte: Modificado de Molina (2008) [2].

Neste modelo, a partir do módulo de deslizamento (K) do conector, que é definido como coeficiente angular da curva força-deslocamento, define-se o fator de redução de inércia do conjunto de acordo com as equações (1) e (2). A redução é feita para o material com o maior módulo de elasticidade. Vale mencionar que os ensaios realizados em corpos de prova ainda representam a melhor maneira de se conhecer o comportamento mecânico dos conectores de cisalhamento.

$$\gamma_w = 1 \quad (1)$$

$$\gamma_c = \left[1 + \frac{\pi^2 \cdot E_c \cdot A_c \cdot s}{K \cdot L^2} \right]^{-1} \quad (2)$$

Onde:

- γ_c = fator de redução de inércia da mesa de concreto;
- γ_w = fator de redução de inércia da alma de madeira;
- E_c = módulo de elasticidade longitudinal do concreto;
- A_c = área da seção transversal do concreto;
- s = espaçamento entre os conectores;
- L = distância entre apoios da viga mista.

A norma Eurocode 5 (1993) [4] apresenta expressões para a determinação analítica do módulo de deslizamento K para ligações entre peças de madeira, utilizando conector de pino metálico, posicionados “verticalmente” ao plano cisalhante, a partir da pré-furação das peças. A rigidez da ligação (em N/mm) para as condições de serviço, neste caso, é dada pela equação (3):

$$k_{ser} = \rho_k^{1,5} \times \frac{d}{20} \quad (3)$$

Onde:

d = diâmetro do conector (em mm);

ρ_k = densidade característica da madeira (em kg/m³).

Para valores últimos de carga, o módulo de deslizamento último é ser expresso pela equação (4):

$$k_u = \frac{2}{3} \times k_{ser} \quad (4)$$

As distâncias entre os centros de gravidade de cada elemento da seção até a linha neutra são dadas pelas equações (5) e (6):

$$a_w = \frac{\gamma_c \cdot E_c \cdot A_c \cdot (h_w + h_c)}{2 \cdot (\gamma_c \cdot E_c \cdot A_c + \gamma_w \cdot E_w \cdot A_w)} \quad (5)$$

$$a_c = \left[\frac{h_c + h_w}{2} \right] - a_w \quad (6)$$

Onde:

h_c = altura da mesa de concreto;

h_w = altura da alma de madeira;

b_c = largura da mesa de concreto;

b_w = largura da alma de madeira.

O momento de inércia de cada elemento da seção composta é obtido por (7) e (8):

$$I_c = \frac{b_c \cdot h_c^3}{12} \quad (7)$$

$$I_w = \frac{b_w \cdot h_w^3}{12} \quad (8)$$

Onde:

I_w = momento de inércia da peça de madeira;

I_c = momento de inércia da peça de concreto.

A rigidez efetiva na direção longitudinal da viga mista resulta em (9):

$$(EI)_{ef} = E_c \cdot I_c + \gamma_c \cdot E_c \cdot A_c \cdot (a_c)^2 + E_w \cdot I_w + \gamma_w \cdot E_w \cdot A_w \cdot (a_w)^2 \quad (9)$$

O valor da rigidez efetiva $(EI)_{ef}$ da viga mista, neste caso, é obtido inicialmente a partir da utilização do módulo de deslizamento obtido para condições de serviço (k_{ser}). Para valores de carga última o valor da rigidez efetiva $(EI)_{ef}$ é calculado a partir do módulo de deslizamento último (k_u).

As tensões normais nas extremidades dos elementos de concreto e de madeira são dadas, respectivamente, pelas expressões (10) e (11).

$$\sigma_c = \gamma_c \cdot E_c \cdot A_c \cdot a_c \cdot \frac{M}{EI_{ef}} + 0,5 \cdot E_c \cdot h_c \cdot \frac{M}{EI_{ef}} \quad (10)$$

$$\sigma_w = \gamma_w \cdot E_w \cdot A_w \cdot a_w \cdot \frac{M}{EI_{ef}} + 0,5 \cdot E_w \cdot h_w \cdot \frac{M}{EI_{ef}} \quad (11)$$

Onde:

M = momento fletor na seção considerada.

A tensão máxima cisalhante ocorre na linha neutra (LN) da seção e é dada por (12):

$$\tau_{w,\max} = 0,5.E_c.h^2 \cdot \frac{V}{EI_{ef}} \quad (12)$$

Onde:

V = força máxima de cisalhamento na seção considerada.

A força cisalhante nos conectores é dada por (13):

$$F = \gamma_c \cdot E_c \cdot A_c \cdot s \cdot \frac{V}{EI_{ef}} \quad (13)$$

Na ABNT NBR 6118: 2003 [5] o deslocamento máximo para o concreto na flexão é dado por (14):

$$u_{q,\lim} \leq \frac{L}{500} \quad (14)$$

Onde:

$u_{q,\lim}$ = limitação do deslocamento para o concreto, medido na direção vertical, no centro do vão, devido a carga accidental;

Para a madeira, o deslocamento máximo na flexão, na ABNT NBR 7190:1997 [6], é dado por (15):

$$u_{\lim} \leq \frac{L}{200} \quad (15)$$

Onde:

u_{\lim} = limitação do deslocamento para a madeira, medido na direção vertical, no centro do vão, devido a carga variável.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios experimentais foram realizados em corpos de prova mistos e em vigas mistas conforme mostrado na Figura 7. Os ensaios em corpos de prova foram realizados para se determinar o comportamento de resistência e de rigidez das ligações utilizadas nas vigas mistas.

3.1 Materiais utilizados

Na confecção das vigas mistas e corpos de prova mistos utilizou-se madeiras de *Eucalyptus citriodora* sem tratamento preservativo. As barras de aço foram fixadas na madeira com a utilização de resina e por pré-furação da madeira sem uso de resina. No caso dos conectores colados foi utilizada a resina bi-componente do tipo epóxi *Compound Adesivo* (fluido). Segundo o fabricante esta resina apresenta cura inicial de 4 horas e cura final de 7 dias e é recomendada para a colagem entre peças de concreto, de madeira, e para ancoragens em geral, estando as superfícies dos materiais em contato úmidas, porém não encharcadas. Em 24 horas a resistência a compressão da resina *Compound Adesivo* é de até 100MPa. Uma camada entre 1 e 2 mm é suficiente para promover a aderência para a resina epóxi. Na confecção dos conectores de cisalhamento para os corpos de prova mistos e viga mistas foram utilizadas barras de aço comum (superfícies com mossas), do tipo CA-50, com diâmetro de 12,7 mm (1/2"). O concreto utilizado, neste caso, foi preparado com traço 1:2:2 em peso, com relação água-cimento ($a/c=0,42$). Utilizou-se cimento Portland CP III RS 40, areia média, brita 5/8" e *slump* igual a 8 cm para obtenção de um concreto trabalhável visando o adequado preenchimento das fôrmas que continham as armaduras de aço. A resistência média esperada para o concreto aos 28 dias de idade foi de 25MPa. As armaduras admitidas para o concreto representaram armaduras

mínimas com relação ao volume de concreto utilizado, conforme ABNT NBR 6118 (2003) [5]. Estas armaduras foram utilizadas com o objetivo reduzir as fissurações no concreto durante a realização dos ensaios. Os ensaios de caracterização do concreto e a moldagem dos corpos-de-prova foram efetuados em corpos-de-prova cilíndricos com diâmetro de 10 cm e altura 20 cm, conforme recomendações das normas: ABNT NBR 5739 (1994) [7], ABNT NBR 5738 (2003) [8] e ABNT NBR 8522 (2003) [9]. A caracterização da madeira foi realizada conforme as recomendações da norma ABNT NBR 7190 (1997) [6].

3.2 Fixação dos conectores de barra de aço na madeira

As barras de aço foram fixadas na madeira na umidade $14\% \pm 1\%$, com inclinação 90° em relação à direção das fibras. Para os conectores colados, o diâmetro dos furos nas peças de madeira foi de 1,59 cm. Esse valor foi obtido por meio da relação $D = 1,25.d$, de acordo com Buchanan e Moss (1999) [10]. Para os conectores fixados por pré-furação, o diâmetro dos furos na madeira foi de 1,27 cm. O comprimento de ancoragem na madeira utilizado para os conectores foi de 6,0 cm, sendo a relação de esbeltez $\lambda = 4,72$ ($\lambda = l_a/d$), obtida conforme Baimbridge, Harvey e Mettem (2001) [11]. A injeção da resina epóxi nas peças de madeira iniciou-se a partir da extremidade interna do furo até o afloramento da resina na superfície exterior do furo. A preparação da resina epóxi, neste caso, utilizada foi feita parcialmente em quantidades de aproximadamente 400g. Para se eliminar as bolhas de ar durante a introdução das barras de aço nos furos, aplicou-se nestas barras, pequenos movimentos rotativos, alternando-se sequencialmente da esquerda para direita e vice-versa, até que o excesso de resina aflorasse pelo furo. As barras de aço, após terem sido coladas, ficaram em repouso durante sete dias para que a resina atingisse sua resistência máxima.

3.3 Retirada das amostras de madeira

Foram consideradas quatro repetições de amostras para os ensaios em corpos de prova mistos e vigas mistas. Dessa forma, para a realização dos ensaios de flexão das vigas e de cisalhamento direto dos corpos de prova foram utilizadas um total de oito vigas com seções retangulares de madeira tendo as seguintes densidades aparentes a 14% de umidade: V1 (1173 kg/m^3), V2 (1045 kg/m^3), V3 (1123 kg/m^3), V4 (937 kg/m^3), V5 (1087 kg/m^3), V6 (1093 kg/m^3), V7 (950 kg/m^3) e V8 (1005 kg/m^3). As vigas V1, V5 e V6 (com conectores fixados por pré-furação da madeira, sem a utilização de resinas) e as vigas V3, V4 e V7 (com conectores colados com resina epóxi) foram usadas nos ensaios de flexão para a determinação dos valores médios de resistência e rigidez $(EI)_{exp}$. As vigas V2 e V8 foram utilizadas como peças gêmeas para a estimativa dos valores de resistência última e de rigidez $(EI)_{exp}$. De maneira similar, os corpos de prova nomeados por CP1, CP5 e CP6 foram confeccionados com conectores fixados por pré-furação da madeira e os corpos de prova CP3, CP4 e CP7 foram confeccionados com conectores colados com resina epóxi. Os corpos de prova nomeados por CP2 e CP8 foram utilizados como corpos de prova gêmeos, neste caso. Os corpos de prova mistos foram admitidos com as mesmas densidades aparentes admitidas para as vigas mistas e nomeadas pelos números correspondentes. Assim, o corpo de prova CP1 apresentou a mesma densidade aparente da viga V1 e assim sucessivamente para os demais corpos de prova associados as referidas vigas. As propriedades mecânicas da madeira ao longo do comprimento dos corpos de prova e vigas foram admitidas constantes.

3.4 Ensaio de cisalhamento dos corpos de prova

Os corpos de prova mistos utilizados nos ensaios de cisalhamento representaram os sistemas de conexão (colado e fixado na madeira por pré-furação) utilizados nas vigas mistas. O comprimento de cada peça retangular de madeira, utilizada nos corpos-de-prova mistos foi de 50 cm, com seção transversal retangular de 5,0 cm x 15 cm, como mostra a Figura 4. Em cada corpo-de-prova foram

corpos de prova mistos na análise experimental. As almas das vigas mistas foram compostas por peças serradas de madeira com seções retangulares de dimensões 5 cm x 15 cm com mesa formada por lajes armadas de concreto com seções retangulares de 30 cm x 5 cm. O vão teórico considerado para as vigas mistas foi de 5,10 m, tendo as vigas aproximadamente 6 metros de comprimento cada. Em cada uma das vigas mistas foram utilizados um total de 36 conectores de cisalhamento espaçados de 16 cm. A Figura 5 mostra a configuração utilizada para as vigas ensaiadas neste trabalho.

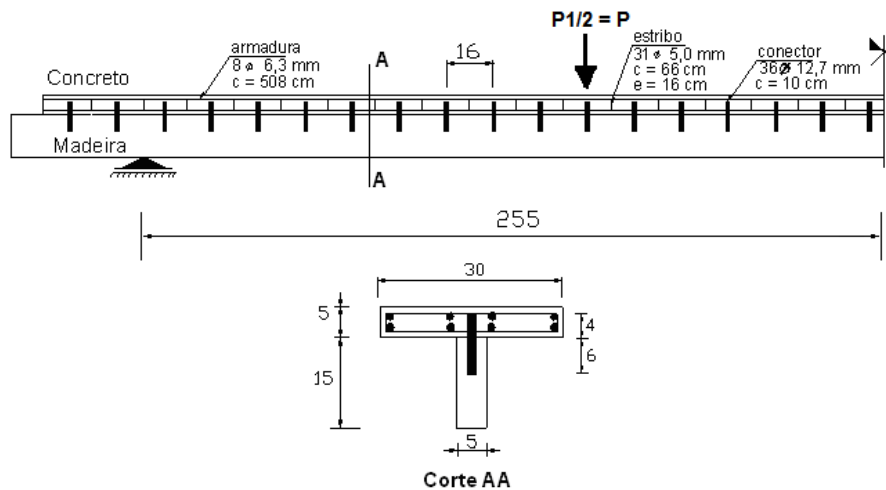


Figura 5: Metade simétrica da viga mista com conectores verticais para os ensaios de flexão com carga aplicada nos terços do vão.

A norma ASTM D 198-05a (2005) [12] propõe um esquema para o ensaio de flexão estática de 4 pontos de modo a se ter flexão pura no trecho central conforme ilustra a Figura 6. Neste trabalho, os ensaios de flexão para a determinação experimental da resistência última e rigidez $(EI)_{exp}$ das vigas mistas foram conduzidos com a aplicação de forças $P1/2$ nos terços do vão, sendo a força $P1$ aplicada pelo cilindro com capacidade de 480 kN, acoplado ao pórtico de reação.

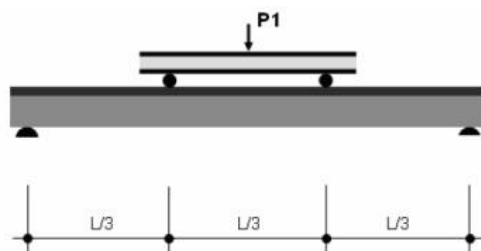


Figura 6: Esquema do ensaio das vigas mistas segundo ASTM D 198-05 (2005) [12].

Os ensaios estáticos de flexão, para a determinação da força última das vigas mistas, foram realizados em três ciclos de carga (carga $P1$ aplicada a uma velocidade aproximada de 0,10 kN/seg.), sendo o primeiro e o segundo ciclo com carga aplicada até 50% da resistência última da viga (determinada a partir das vigas gêmeas: V2 e V8). O terceiro ciclo de carregamento foi aplicado progressivamente até a ruptura da viga por tração na fibra inferior da alma de madeira. Para carregamentos de serviço (considerado neste estudo como sendo aquele que provoca uma flecha no meio do vão igual a $L/300$) considerados nas vigas mistas, foram medidas as flechas nos terços e no centro do vão da viga biapoiada. O valor da flecha no meio do vão foi utilizado para a determinação da rigidez experimental $(EI)_{exp}$. Para a determinação dos valores experimentais de rigidez $(EI)_{exp}$ das vigas mistas utilizou-se a equação 16. O valor da carga ($P1$) na viga para a obtenção da rigidez $(EI)_{exp}$

foi obtido para o deslocamento no meio do vão de 1,70 cm ($L/300$). Portanto este valor de carga $P1$ foi o valor admitido para as vigas trabalhando no regime de serviço.

$$(EI)_{\text{exp}} = \frac{P \cdot a \cdot (3 \cdot L^2 - 4 \cdot a^2)}{24 \cdot \delta} \quad (16)$$

Onde:

P = valor da carga no terço do vão aplicada no ensaio de flexão ($P = P1/2$);

L = vão considerado para a viga mista;

δ = valor obtido para a flecha no ensaio de flexão referente a carga $P1$;

a = distância do apoio até o ponto de aplicação da carga, neste caso, $L/3$.



(a)



(b)

Figura 7: Detalhes dos ensaios experimentais: (a) corpos de prova mistos; (b) vigas mistas.

3.6 Cálculo da viga pelo teórico de Mohler

O modelo de Mohler foi utilizado para determinar a rigidez teórica $(EI)_{\text{ef}}$ e também para estimativa da força limite P das vigas. Para carregamentos de serviço (correspondente a flecha $L/300$) a determinação de $(EI)_{\text{ef}}$ considerou o módulo de deslizamento K_{ser} , obtido pelo ensaio de cisalhamento direto dos corpos de prova mistos. Posteriormente, foram também verificados os modos de ruptura das vigas mistas para as cargas máximas aplicadas. Neste caso, foram determinados novos valores de $(EI)_{\text{ef}}$ para as vigas em função do módulo de deslizamento último (k_u). Para esse valor $(EI)_{\text{ef}}$ foram verificados os valores de força limite P capazes de provocar a ruptura nos pontos de verificação das seções mistas (mesa de concreto, conexão metálica e alma de madeira, seja por tração na fibra inferior, ou por cisalhamento na linha neutra). Os valores admitidos para o momento fletor e força cortante em função da carga P aplicada nos terços do vão foram, respectivamente, $M=PL/3$ e $V=P$.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste item são apresentados os resultados da caracterização dos materiais, seguidos dos resultados de resistência e rigidez obtidos para os corpos de prova, e por fim, os resultados de resistência e rigidez EI obtidos para as vigas mistas. São também apresentados os comentários mais relevantes.

4.1 Ensaios dos corpos de prova mistos

Na Tabela 1 são apresentados os resultados da caracterização dos materiais corpos de prova. A Tabela 2 apresenta os resultados de resistência (F_u) e rigidez (K_{ser}) obtidos para os conectores com base nos ensaios de cisalhamento direto dos corpos de prova. São também apresentados os valores do módulo de deslizamento (K_u) obtidos para o cálculo dos modos de ruptura das vigas mistas. Na Tabela 3 apresentam-se os valores médios de resistência e de rigidez obtidos a partir dos ensaios em corpos de prova. São também apresentados os coeficientes de variação de cada propriedade.

Tabela 1: Resultados dos ensaios de caracterização dos materiais dos corpos de prova.

CP ⁽¹⁾	Tipo de conector	Concreto		Madeira			
		$f_{c,m}$ ⁽²⁾ (MPa)	$E_{c,m}$ ⁽³⁾ (MPa)	$f_{c0,m}$ (MPa)	$E_{c,0,m}$ ⁽⁴⁾ (MPa)	ρ_{ap} (kg/m ³)	U (%)
01	Pré-furação	26,02	24157	82,13	20460	1173	14,01
02	Pré-furação	26,02	24157	79,55	18726	1045	14,93
03	Colado	26,02	24157	80,00	20586	1123	14,04
04	Colado	26,02	24157	81,13	16949	937	14,11
05	Pré-furação	26,02	24157	82,98	20587	1087	14,03
06	Pré-furação	26,02	24157	81,01	19729	1093	14,05
07	Colado	26,02	24157	80,25	19726	950	14,40
08	Colado	26,02	24157	81,14	20672	1005	14,26

(1) numeração dos corpos de prova mistos;
(2) resistência média do concreto na compressão, referente ao dia do ensaio (média de 06 repetições);
(3) módulo de elasticidade médio do concreto na compressão no dia do ensaio (média de 06 repetições);
(4) módulo de elasticidade médio da madeira na compressão paralela às fibras (média de 06 repetições).

Tabela 2. Valores de resistência e de rigidez obtidos para os corpos de prova mistos.

CP	Tipo de conector	F_{rup} [*] (kN)	F_u ^{**} (kN)	F_u /conector (kN)	K_{ser} /conector (kN/mm)	K_u /conector (kN/mm)
CP1	Pré furação	119,81	107,01	26,75	21,67	14,45
CP2	Pré furação	132,95	111,43	27,86	22,63	15,09
CP3	Colado	152,84	119,83	29,96	27,38	18,25
CP4	Colado	161,19	120,54	30,14	27,60	18,40
CP5	Pré-furação	120,01	106,21	26,55	21,40	14,27
CP6	Pré-furação	135,88	114,55	28,64	22,95	15,30
CP7	Colado	153,80	120,78	30,20	28,22	18,81
CP8	Colado	164,76	119,65	29,91	27,20	18,13

* F_{rup} : força máxima aplicada ao corpo de prova até atingir a ruptura;
** F_u : força última da ligação convencionada a deformação $\epsilon = 2\%$.

Tabela 3: Valores médios de resistência e de rigidez e variabilidade dos dados dos conectores dos corpos de prova.

U(%)	Tipo de conector	F_{rup} ⁽¹⁾ (kN)	F_u ⁽²⁾ (kN)	F_u /conector (kN)	K_{ser} /conector (kN/mm)	K_u /conector (kN/mm)
14,26	Pré furação	125,23	109,26	27,31	22,01	14,67
14,20	Colado	155,94	120,78	30,20	28,22	18,81
CV ⁽³⁾ (%)	Pré furação	7,36	4,21	4,22	3,76	3,75
CV ⁽³⁾ (%)	Colado	2,93	0,41	0,41	1,57	1,57

(1) F_{rup} : força máxima aplicada ao corpo de prova com 4 conectores verticais até atingir a ruptura;
(2) F_u : força última da ligação convencionada a deformação $\epsilon = 2\%$;
(3) CV: coeficiente de variação = média / desvio padrão.

4.2 Ensaios de flexão das vigas mistas

Na Tabela 4 são apresentados os resultados da caracterização dos materiais das vigas mistas e na Tabela 5 os resultados de resistência e rigidez EI das vigas. Os resultados experimentais concordam com os resultados obtidos por Pigozzo (2008) [13] para os dois tipos de conexão analisados.

Tabela 4: Resultados de caracterização dos materiais das vigas mistas para ensaios de flexão.

Viga	Tipo de conector	Concreto		Madeira				
		$f_{c,m}^{(1)}$ (MPa)	$E_{c,m}^{(2)}$ (MPa)	$f_{c0,m}$ (MPa)	$E_{fl,m}^{(3)}$ (MPa)	$E_{c,m}^{(4)}$ (MPa)	ρ (kg/m ³)	U (%)
V1	Pré-furação	26,02	24156	82,13	18604	20460	1173	14,01
V2	Pré-furação	26,02	24156	79,55	17027	18726	1045	14,93
V3	Colado	26,02	24156	80,00	19465	20586	1123	14,04
V4	Colado	26,02	24156	81,13	15411	16949	937	14,11
V5	Pré-furação	26,02	24156	82,98	19885	20587	1087	14,03
V6	Pré-furação	26,02	24156	81,01	17939	19729	1093	14,05
V7	Colado	26,02	24156	80,25	14972	19726	950	14,40
V8	Colado	26,02	24156	81,14	19682	20672	1005	14,26

(¹) Resistência média do concreto na compressão no dia do ensaio (média de 06 repetições);
(²) Módulo de elasticidade médio do concreto na compressão no dia do ensaio (média de 06 repetições);
(³) Módulo de elasticidade médio do Eucalipto citriodora na flexão (média de 06 repetições);
(⁴) Módulo de elasticidade médio do Eucalipto citriodora na compressão (média de 06 repetições).

Tabela 5: Resultados de resistência e rigidez EI obtidos para as vigas mistas.

Viga	Fixação do conector	$P_{1L/300}^{(1)}$ (kN)	$P_1^{(2)}$ (kN)	$(EI)_{exp}^{(3)}$ (KN.cm ²)	$(EI)_{ef}^{(4)}$ (KN.cm ²)
V1	Pré-furação	5,62	59,56	14.401.833,33	10.715.949,40
V2	Pré-furação	4,79	58,20		
V5	Pré-furação	5,89	59,89		
V6	Pré-furação	4,94	58,75		
V3	Colado	6,06	61,98	15.454.275,00	11.885.507,34
V4	Colado	5,10	60,76		
V7	Colado	5,74	60,82		
V8	Colado	6,62	62,04		
CV ⁽⁵⁾ (%)	Pré-furação	8,93	0,99	8,93	11,98
CV ⁽⁵⁾ (%)	Colado	8,68	1,12	8,68	14,06

(¹) Carga que provoca uma flecha igual a L/300 (1,70 cm);
(²) Carga última de ruptura das vigas;
(³) Rigidez média da viga obtida pela equação 16;
(⁴) Rigidez média da viga obtida pelo modelo de Mohler, (equação 9, usando K_{ser} e $P_{1L/300}^{(1)}$);
(⁵) CV: coeficiente de variação (média /desvio padrão);

Para valores de cargas de serviço aplicadas, o valor médio da rigidez experimental $(EI)_{exp}$, obtido para as vigas com conectores fixados por pré-furação foi aproximadamente 25,59% maior que o valor teórico $(EI)_{ef}$ calculado pelo modelo de Mohler. No caso das vigas com conectores colados, o valor médio $(EI)_{exp}$ foi aproximadamente 23,09% maior que o valor teórico. O valor experimental médio da força P_1 aplicada nas vigas com conectores fixados por pré-furação foi de 59,10 kN, enquanto que para as vigas com conectores colados o valor de P_1 foi de 61,40 kN. Para as vigas mistas com conectores colados, os modos de falha ocorreram, respectivamente, por compressão da mesa de concreto, para uma força média P igual a 15,23 kN, seguidos da ruptura por tração na fibra inferior da alma de madeira ($P = 25,80$ kN). Os demais modos de ruptura verificados, neste caso, foram na conexão metálica ($P = 27,27$ kN) e, então, por cisalhamento da madeira na linha neutra da seção T ($P = 63,23$ kN). Para as vigas com conectores fixados por pré-furação os mesmos e respectivos modos de falha foram identificados para os seguintes valores médios de força P : 14,44 kN, 25,14 kN, 25,17 kN e 63,18 kN. Estes modos de falha das vigas foram também verificados pelo modelo de Mohler.

5. CONCLUSÃO

De uma maneira geral, as vigas mistas com conectores colados se mostraram mais rígidas e resistentes que as vigas com conectores fixados por pré-furação. O valor médio de resistência do conector colado foi aproximadamente 8,65% maior que o valor da resistência do conector fixado por pré-furação. O módulo de deslizamento K_{ser} de cada conector colado foi aproximadamente 19,40% maior com relação ao conector fixado por pré-furação. A diferença entre os valores teóricos de rigidez $(EI)_{ef}$, para os dois tipos de conexão analisados foram de aproximadamente 9,8%, enquanto que a diferença entre os valores experimentais de rigidez $(EI)_{exp}$ foram de aproximadamente 6,8%. A diferença entre os valores experimentais de carga última, obtidos por meio dos ensaios de flexão para as vigas analisadas com os dois tipos de conexão foi de aproximadamente 3,7%. A diferença entre os valores teóricos das cargas últimas necessárias para ruptura das vigas foi de aproximadamente 5,2%. Os modos de ruptura teóricos obtidos para as vigas com os dois tipos de conexão concordaram com os modos de ruptura obtidos experimentalmente nos ensaios de flexão. Para ambos os tipos de conexão, as rupturas das vigas na flexão ocorreram por compressão da mesa de concreto, seguida da tração na fibra inferior da alma de madeira, por cisalhamento da conexão e por fim por cisalhamento da alma de madeira nas regiões da LN.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pelo financiamento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] Alvim, R. C., Almeida, P. A., “Estudo paramétrico da rigidez efetiva dos pisos mistos de madeira-concreto”. In Simpósio EPUSP sobre estruturas de concreto, V, São Paulo, p.15, 2003.
- [2] Molina, J. C “Análise do comportamento dinâmico da ligação formada por barras de aço coladas para tabuleiros mistos de madeira e concreto para pontes”. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.
- [3] European Prestandard. ENV 1995-2, EUROCODE 5, Part 2, Design of timber structures: Bridges, Brussels, Belgium, European Committee for Standardization, Jul, 45p, 1997.
- [4] European Prestandard. 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, 1993.
- [5] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6118 –Projeto de estruturas de concreto - procedimento. Rio de Janeiro, ABNT, 2003.
- [6] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7190 – Projeto de Estruturas de Madeira. ABNT. Rio de Janeiro. 1997.
- [7] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5739: Concreto –Ensaio de compressão de corpos-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.
- [8] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003.
- [9] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8522: Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão - deformação. Rio de Janeiro, 2003.
- [10] Buchanan, A., Moss, P., Desin of epoxied steel rods in glulam timber, Pacific Timber Engineering Conference, Rotorua, New Zeland, March 1999, p 286 – 293, 1999.
- [11] Baimbridge, R. J., Harvey, K., Mettem, C. J., Fatigue Performance of Structural Timber Connections, IABSE (International Associations for Bridge and Structural Engineering) Conference, Lahty, Finland, Aug., session B5, p. 573-578, 2001.
- [12] American Society Testing and Materials. ASTM D-198-05a – “Standard test methods of static test of lumber in structural sizes”. Philadelphia, 2005.
- [13] Pigozzo, J. C “Estudo e aplicações de barras de aço coladas como conectores em lajes mistas de madeira e concreto para tabuleiros de pontes”. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.