

## ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE CONECTORES METÁLICOS EM VIGAS MISTAS DE MADEIRA E CONCRETO

Molina, J.C.<sup>1</sup>; Calil Jr., C.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo

<sup>2</sup> Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo



### RESUMO

*Neste trabalho avaliou-se o comportamento de vigas mistas de madeira e concreto, focalizando o sistema de conexão metálico. Foram obtidos e comparados, a partir de ensaios de flexão, os valores de rigidez (EI) de seis vigas com seção transversal T, sendo três vigas com conectores “verticais” e três com conectores em “X”. Na confecção das vigas utilizou-se madeira de reflorestamento de Eucalyptus citriodora, concreto de média resistência, e conectores de aço comum, do tipo CA-50, colados com resina epóxi. Posteriormente, os valores de rigidez (EI) foram determinadas a partir de simulações numéricas, efetuadas no software ANSYS, versão 9.0, para comparação dos resultados. Os resultados mostraram que o sistema de conexão em X apresentou maior resistência e menor rigidez quando comparado com o sistema de conexão vertical. No entanto, ambos os sistemas proporcionam ligações simples, baratas, e fáceis de serem executadas.*

### 1- INTRODUÇÃO E OBJETIVO

No Brasil, os tabuleiros mistos de madeira e concreto se apresentam como uma excelente alternativa para os problemas apresentados nas pontes de madeira, como a soltura das pranchas que acontece com a passagem dos veículos sobre a ponte e desgaste superficial do tabuleiro de madeira. Além disso, o sistema misto apresenta grande resistência e rigidez quando comparado ao tabuleiro somente de madeira. No entanto, para um adequado comportamento do sistema misto deve ser garantida a interação entre os materiais unidos por meio de elementos metálicos, denominados *conectores de cisalhamento*. Esses conectores são fixados

ao longo das vigas mistas que compõem o tabuleiro, transferem o fluxo de cisalhamento na interface dos materiais, impedindo a separação vertical entre a laje de concreto e as vigas de madeira.

Vários tipos de conectores são utilizados em estruturas mistas, mas um sistema que tem ganhado a atenção dos pesquisadores é o sistema de barras de aço coladas, por proporcionar ligações simples, baratas, e fáceis de serem executadas. Os conectores de barras de aço podem ser fixados na madeira com vários ângulos de inclinação em relação às fibras da madeira, em furos efetuados na madeira com diâmetro maior.

Por outro lado, o ensaio de flexão em vigas consiste no meio mais efetivo de simular, experimentalmente, o efeito do tráfego dos veículos em tabuleiros de pontes, possibilitando a obtenção de valiosas informações sobre a interação dos materiais na flexão.

O objetivo deste trabalho consistiu basicamente em analisar numérico-experimentalmente a rigidez (EI) de vigas mistas de madeira e concreto através de ensaios de flexão, considerando dois sistemas de conexão formados por barras de aço coladas: sistema de conexão “vertical” e sistema de conexão em “X”.

## 2- FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Segundo Branco e Cruz (2003), o método de dimensionamento das estruturas mistas é condicionado pela rigidez das conexões, ou seja, se a conexão for rígida, a hipótese de Navier-Bernoulli da conservação das seções planas pode ser aceita tornando o cálculo extremamente simples. Basta homogeneizar a seção num só material, madeira ou concreto, por exemplo, para que se obtenham os esforços e as deformações da seção, sendo suficiente a aplicação das equações básicas da resistência dos materiais. Quando a conexão deixa de ser rígida, passando a ter um comportamento semi-rígido, a seção deixa de ser plana, e o aparecimento de pequenos deslizamentos entre os dois materiais torna necessária a quantificação do escorregamento relativo entre ambos, sendo este escorregamento obtido através do módulo de deslizamento, K.

### 2.1 - Modelo de Mohler

Um dos modelos de cálculo mais utilizados no dimensionamento de tabuleiros mistos é o modelo de viga equivalente, proposto por Mohler, e que está apresentado na norma EUROCODE 5 (1993, Parte 1-1, Anexo B). Esse modelo foi adaptado para estruturas mistas de madeira e concreto e considera o tabuleiro misto como 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.

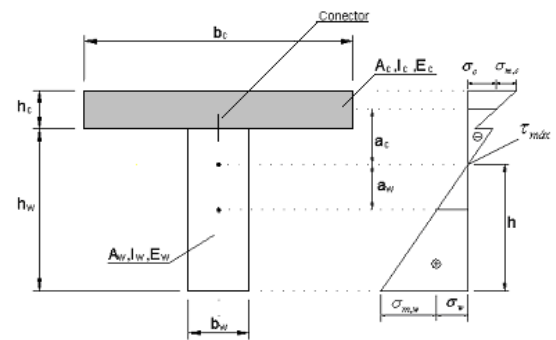


Fig. 1 – Viga equivalente e tensões nos materiais.

Neste modelo, a partir do módulo de deslizamento K do conector utilizado, define-se o fator de redução de inércia do conjunto. A redução é feita para o material que apresentar o maior módulo de elasticidade.

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

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

Onde,  $E_c$  é módulo de elasticidade do concreto na compressão,  $A_c$  é a área da seção da peça de concreto,  $s$  é o espaçamento entre os conectores,  $K$  é o módulo de deslizamento do conector utilizado e  $L$  é vão livre da viga mista.

As distâncias entre os centros de gravidade da seção até a linha neutra (LN) da peça, para cada um dos materiais, são:

$$a_w = \frac{\gamma_c \cdot E_c \cdot A_c \cdot (h_c + h_w)}{2 \cdot (\gamma_c \cdot E_c \cdot A_c + \gamma_w \cdot E_w \cdot A_w)} \quad (3)$$

$$a_c = \left[ \frac{h_c + h_w}{2} \right] - a_w \quad (4)$$

Onde  $a_c$  é a distância do centróide da área de concreto até a linha neutra da peça,  $a_w$  é a distância do centróide da área de madeira até a linha neutra,  $h_c$  é a altura da laje de concreto e  $h_w$  é a altura da viga de madeira.

A influência do deslizamento da ligação composta é considerada mediante o seguinte produto de rigidez efetivo:

$$(EI_{ef}) = E_c \cdot I_c + \gamma_c \cdot E_c \cdot A_c \cdot a_c^2 + E_w \cdot I_w + \gamma_w \cdot E_w \cdot A_w \cdot a_w^2 \quad (5)$$

Onde:  $I_c$  é o momento de inércia da seção de concreto e  $I_w$  é o momento de inércia da seção de madeira.

Na seção mista, a verificações de resistência a serem efetuadas são referentes aos Estados Limites Últimos (tensões internas: normais e cisalhantes) e também aos Estados Limites de Utilização (ligação e deslocamentos). A verificação da tensão normal de compressão na mesa de concreto, neste caso, é efetuada por:

$$\sigma_c = \gamma_c \cdot E_c \cdot a_c \cdot \frac{M}{(EI)_{ef}} \quad (6)$$

$$\sigma_{m,c} = 0,5 \cdot E_c \cdot h_c \cdot \frac{M}{(EI)_{ef}} \quad (7)$$

$$\sigma_c + \sigma_{m,c} \leq f_{c,c} \quad (8)$$

Onde:  $M$  é o momento fletor na seção considerada,  $\sigma_c$  é a tensão normal no centróide da área de concreto devido à força normal,  $\sigma_{m,c}$  é a tensão normal na extremidade da área de concreto devido ao momento e  $f_{c,c}$  é a resistência do concreto na compressão.

Na extremidade inferior da peça mista, a tensão normal de tração, na madeira, é verificada por:

$$\sigma_w = \gamma_w \cdot E_w \cdot a_w \cdot \frac{M}{(EI)_{ef}} \quad (9)$$

$$\sigma_{m,w} = 0,5 \cdot E_w \cdot h_w \cdot \frac{M}{(EI)_{ef}} \quad (10)$$

$$\sigma_w + \sigma_{m,w} \leq f_{w,t} \quad (11)$$

Onde  $\sigma_w$  é a tensão normal no centróide da área de madeira devido a força normal,  $\sigma_{m,w}$  é a tensão normal na extremidade da área de madeira devido ao momento fletor e  $f_{w,t}$  é a resistência da madeira a tração.

A tensão máxima de cisalhamento na linha neutra da viga mista é satisfeita por:

$$\tau_{w,max} = 0,5 \cdot E_w \cdot h^2 \cdot \frac{V}{(EI)_{ef}} \leq f_{v,0} \quad (12)$$

Onde:  $V$  é a força máxima de cisalhamento na seção considerada e  $f_{v,0}$  é a resistência ao cisalhamento da madeira medida paralelamente às fibras.

A força cisalhante no sistema de conexão é satisfeita por:

$$F = \gamma_c \cdot E_c \cdot A_c \cdot a_c \cdot s \cdot \frac{V}{(EI)_{ef}} \leq R_{v1} \quad (13)$$

Sendo  $R_{v1}$  a resistência ao cisalhamento de cada conector.

Segundo a ABNT NBR 6118:2003, o deslocamento máximo admitido para o concreto é:

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

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

No caso da madeira, o deslocamento máximo admitido segundo a ABNT NBR 7190:1997 é dado por:

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

Onde  $u_{lim}$  é a limitação do deslocamento para a madeira, medido na direção vertical, no centro do vão, devido à carga variável.

### 3- MATERIAIS E MÉTODOS

Na confecção das vigas mistas utilizou-se a espécie de reflorestamento *Eucalyptus citriodora* tratada com CCA. Para a colagem das barras de aço foi utilizada a resina bi-componente do tipo epóxi: Sikadur 32. As barras de aço foram coladas na madeira na umidade  $U=30\% \pm 1\%$ . Na confecção dos conectores de cisalhamento foram utilizados segmentos de barras de aço comum, galvanizados, tipo CA-50, tendo superfícies com mossas, sendo utilizado diâmetro de 8 mm para os conectores dispostos em “X” e diâmetro de 19 mm para os conectores “verticais”. O concreto utilizado nas vigas foi preparado com traço 1: 2,67: 3,05 em peso, com relação água-cimento ( $a/c=0,42$ ) e a resistência média esperada para o concreto aos 28 dias de idade foi de 28 MPa. Utilizou-se cimento portland CP III RS 40, areia média e britas 5/8 e 1” em porções 25% e 75%

respectivamente. As armaduras utilizadas nas mesas das vigas mistas representaram armaduras mínimas com relação ao volume de concreto utilizado. Estas armaduras foram utilizadas com o objetivo reduzir as fissurações no concreto durante a realização dos ensaios de flexão. Para se evitar o atrito entre a madeira e o concreto, na interface dos materiais foram utilizados plásticos de polietileno. As configurações das vigas submetidas aos ensaios de flexão estão apresentadas nas Figuras 2 e 3.

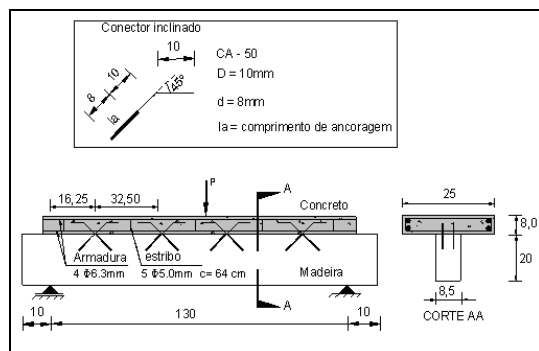


Fig. 2 – Viga mista com conectores em “X”.

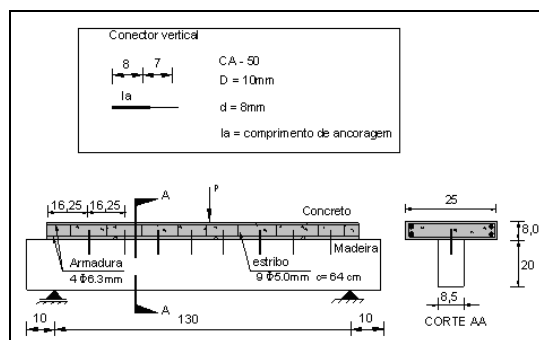


Fig. 3 – Viga mista com conectores em “verticais”.

Os ensaios para a caracterização do concreto das vigas e a moldagem dos corpos-de-prova para os referidos ensaios foram efetuados em corpos-de-prova cilíndricos com diâmetro de 10 cm e altura 20 cm, conforme as recomendações das normas de concreto: ABNT NBR 5739/1994, ABNT NBR 5738/2003 e ABNT NBR 8522/2003.

A caracterização das vigas de madeira foi realizada a partir de ensaios realizados em corpos-de-prova e vigas de madeira, conforme as recomendações da norma de madeiras ABNT NBR 7190/1997. As propriedades mecânicas da madeira ao longo do comprimento de cada viga foram admitidas constantes.

### 3.1 - Ensaio estáticos de flexão

Para a condução dos ensaios estáticos de flexão foi utilizado um pórtico de reação com cilindro hidráulico com capacidade de 480 kN (48.000 kgf), acionado por um atuador de controle manual. Para a medida das flechas das vigas foi utilizado um transdutor mecânico de deslocamento (relógio comparador) com sensibilidade de 0,01mm e curso máximo de 50 mm no centro do vão das vigas mistas. Os valores de flecha foram medidos no meio do vão das vigas para três níveis de carga, ou seja, 30%, 40% e 50% com relação ao valor de carga última obtido para a ligação, em cada uma das configurações de viga analisadas.



Fig. 4 – Ensaio estático de flexão em andamento.

As forças médias últimas de ruptura das vigas foram obtidas a partir de vigas gêmeas com três replicações de vigas. As vigas com conectores em “X”, utilizadas para determinação da carga última média foram nomeadas por VT1, VT2 e VT3 e as vigas com conectores “verticais” por VT04, VT5 e VT6. As vigas com conectores em “X” para as quais, posteriormente, foram medidas as flechas foram nomeadas por V01, V02, V03 enquanto as vigas com conectores “verticais”, neste caso, foram nomeadas por V04, V05 e V06. Antes de serem tomadas as medidas das flechas das vigas V01 a V06, foram aplicados nas mesmas dois ciclos de carga para acomodação. Na sequência foram aplicados os níveis de carga desejados e medidos os valores das flechas no meio do vão das vigas. A carga P (mostrada nas Figuras 2 e 3) foi aplicada no meio do vão a uma velocidade

aproximada de 0,10 kN/seg. A partir dos valores das flechas obtidos para as vigas foram calculados os valores de rigidez (EI). A rigidez (EI) das vigas foi verificada pela seguinte relação:

$$(EI) = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot f} \quad (16)$$

Onde P é o valor da carga aplicada no ensaio de flexão, L é o vão considerado para a viga mista e f é o valor obtido para a flecha no ensaio de flexão.

### 3.2 - Modelagem numérica das vigas

A opção pela utilização do ANSYS, versão 9.0, se deu pelo fato de que as ferramentas disponibilizadas pelo referido software permitem a análise dos modelos em regime de não linearidade física e geométrica. Na discretização do elemento de concreto foi utilizado o elemento *solid65* que é um elemento hexaédrico, que possui oito nós, tendo cada nó três graus de liberdade, ou seja, translações segundo os eixos x, y e z. Este elemento é capaz de simular o comportamento do concreto com fissuração na tração e esmagamento na compressão, bem como um comportamento com não-linearidade física. Na discretização das armaduras de aço imersas no concreto foi utilizado o elemento *link8* que consiste num elemento tridimensional de barra, que possui dois nós, cada nó com três graus de liberdade (translações segundo os eixos x, y e z), e responde a esforços de tração e compressão axiais. O eixo “x” do elemento é orientado segundo o seu comprimento e nenhuma flexão no elemento é considerada. Também é possível admitir a ocorrência de deformação plástica para o material. Na discretização das peças de madeira e também dos conectores de cisalhamento foi utilizado o elemento *solid45* que consiste num elemento hexaédrico, com oito nós, tendo cada nó três graus de liberdade (translações segundo os eixos x, y e z), e permite a consideração de efeitos importantes como, por exemplo, plasticidade e ortotropia para os materiais. Além disso, a fim de representar os contatos existentes com possíveis deslocamentos nas interfaces

madeira-concreto, aço-concreto e aço-madeira foram utilizados os elementos *target170* (definido pelo ANSYS como superfície alvo) e *conta173* (definido como superfície de contato). Esses elementos são utilizados em análises tridimensionais, com contato do tipo superfície-superfície. Esses elementos são capazes de simular a existência de pressão entre os elementos, quando há contato, e separação entre os mesmos elementos quando não há contato. O par de contato utilizado permite ainda a consideração do atrito entre as partes. Vale mencionar que para diminuição do tempo de processamento optou-se pela modelagem de ¼ de estrutura, no caso das vigas com conectores “verticais”, e pela modelagem de ½ estrutura, no caso das vigas com conectores em “X”.

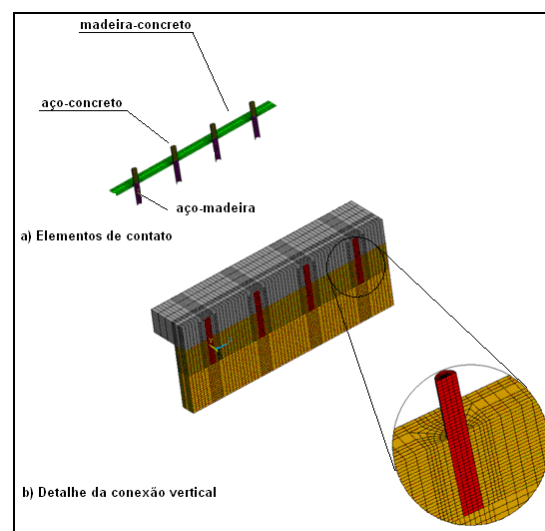


Fig. 5 – Discretização das vigas com conectores “verticais”.

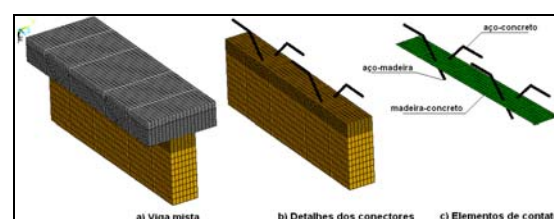


Fig. 6 – Discretização das vigas com conectores em “X”.

As Figuras 7 e 8 ilustram as condições de simetria e vinculação para os modelos de viga analisados. Os modelos foram vinculados em concordância com os ensaios experimentais.



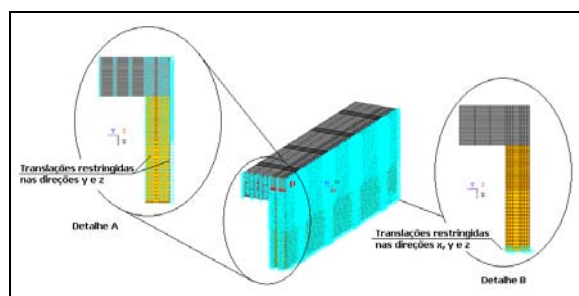


Fig. 7 – Condição de simetria e vinculação para o modelo de viga com conectores “verticais”.

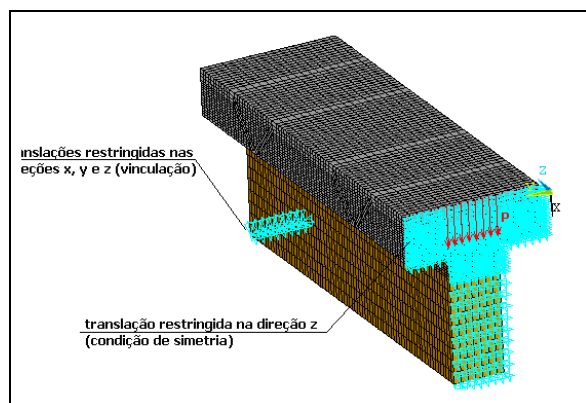


Fig. 8 – Condição de simetria e vinculação para o modelo de viga com conectores em “X”.

Nos modelos numéricos, a aplicação dos carregamentos e a medida das flechas também foram feitas em conformidade com os ensaios experimentais.

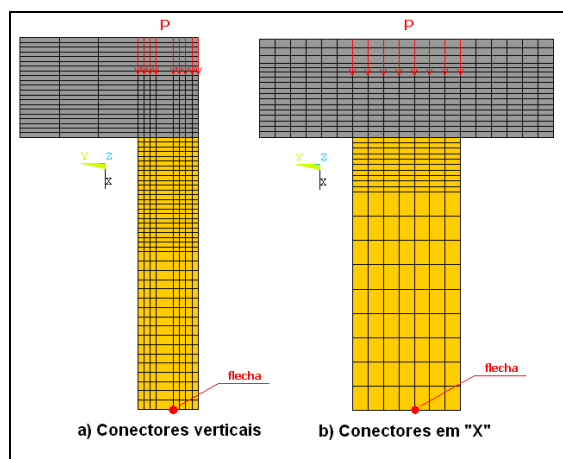


Fig. 9 – Pontos de aplicação dos carregamentos e medidas das flechas no meio do vão.

Em cada modelo a intensidade de força aplicada foi definida por meio da divisão da força de ruptura estimada na análise experimental (considerando  $\frac{1}{2}$  ou  $\frac{1}{4}$  de estrutura) pelo número de nós presentes na região relativa à aplicação da força.

Foram também admitidas relações constitutivas para os materiais utilizados na modelagem numérica, como se segue:

**Concreto:** o comportamento do concreto na tração foi representado pelo modelo *concrete*, disponibilizado na biblioteca do ANSYS, que tem como base o modelo de *Willan-Warnke*, através do qual é possível a simulação da fissuração do concreto quando submetido a tensões de tração. Admitiu-se também o critério de plastificação de *von Mises* para o concreto na compressão. O modelo constitutivo adotado para o concreto na compressão foi do tipo multilinear com encruamento isotrópico.

**Madeira:** admitiu-se para a madeira um comportamento ortotrópico com a utilização do critério de resistência de *Hill*, associado ao encruamento isotrópico. O modelo constitutivo, adotado para a madeira, simula um comportamento elasto-plástico, através de curvas bi-lineares.

**Aço dos conectores:** para os conectores de cisalhamento foi adotado um modelo bi-linear, com encruamento isotrópico, e critério de plastificação de *von Mises*.

**Aço das armaduras:** a relação constitutiva utilizada para o aço da armadura também seguiu o critério de *von Mises*, sendo representada por meio da curva tensão versus deformação, com base em um modelo elasto-plástico perfeito.

### 3.3 - Aplicação dos carregamentos

Os carregamentos nos modelos analisados foram aplicados de forma incremental, devido à consideração da não linearidade física. O incremento de carga foi controlado utilizando-se o recurso do ANSYS denominado “*Automatic Time Stepping*”. De acordo com a documentação do ANSYS, o recurso citado reduz o valor do incremento quando a previsão do número de iterações ultrapassa o limite estabelecido, caso se obtenha incrementos de deformações plásticas maiores que 15%, ou ainda, deslocamentos excessivos. O valor do incremento pode também ser aumentado, caso o processo venha a convergir de forma sistemática na primeira

iteração. O controle dos passos de carga foi efetuado a partir da opção “*Time increment*”, onde foram admitidos os seguintes valores: *Time Step Size* = 1,0; *Minimum Time Step* = 0,1 e *Maximum Step Size* = 1,0. Utilizou-se como parâmetro de convergência uma tolerância igual a 0,001.

#### 4- RESULTADOS E DISCUSSÕES

##### 4.1 - Caracterização dos materiais

Nas Tabelas 1 e 2 são apresentadas as propriedades físicas e mecânicas dos materiais que compõem as vigas mistas. Estes valores foram obtidos a partir de ensaios de caracterização dos materiais.

Tabela 1 – Propriedades do concreto.

Viga	$f_{c,m}^{1)}$ (MPa)	$E_{c,m}^{2)}$ (MPa)
01	29,7	27158
02	28,3	26115
03	29,4	27484
04	28,7	26167
05	30,4	28413
06	29,4	27373

<sup>1)</sup> Resistência média do concreto, referente à laje no dia do ensaio (média de 03 amostras);

<sup>2)</sup> Módulo de elasticidade médio, referente à laje no dia do ensaio;

Tabela 2 – Propriedades da madeira.

Viga	$f_{c0,m}$ (MPa)	$E_{fl,m}^{3)}$ (MPa)	$E_{c0,m}^{4)}$ (MPa)	U (%)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
01	47,2	15578	18764	29,0	910
02	52,7	16375	19822	29,3	950
03	54,5	17573	19775	30,8	1050
04	49,9	15240	19761	29,2	920
05	51,7	16005	19932	29,7	970
06	55,5	17601	19876	30,2	1040

<sup>3)</sup> Módulo de elasticidade médio do Eucalipto citriodora na flexão (Considerou-se o efeito de cisalhamento na deformação total da viga ( $u = u_{flexão} + u_{cisalhamento}$ ), pois  $L/h < 21$ );

<sup>4)</sup> Módulo de elasticidade médio do Eucalipto citriodora na compressão.

Vale mencionar que para as vigas mistas analisadas, a razão entre o comprimento (L) e a altura (h) das mesmas foi menor que 20 e, portanto, sob o ponto de vista teórico, o efeito da deformação por cisalhamento para as vigas deve ser considerado. Essas dimensões foram consideradas para as vigas em função da limitação de espaço para os ensaios e para que a ruptura na viga acontecesse primeiramente no sistema de conexão.

A flecha no meio do vão foi considerada mediante a seguinte relação:

$$f = f_{flexão} + f_{cisalhamento} \quad (17)$$

As parcelas de deformação por flexão e por cisalhamento, para as vigas corresponderam, respectivamente, a 57,78% e 42,22% do valor total obtido para a flecha no meio do vão.

##### 4.2 - Modos de falha das vigas

Os valores das cargas últimas de ruptura, obtidos para cada uma das vigas com conectores “X”, submetidas aos ensaios estáticos de flexão foram, respectivamente, 218,39 kN para VT1, 119,12 kN para VT2 e 198,53 kN para VT3. Para as vigas com conectores “verticais” esses valores foram, respectivamente, 196,05 kN para VT4, 191,24 kN para VT5 e 188,33 kN para VT6. O valor médio da força de ruptura para as vigas com conectores em “X” foi de 178,68 kN e para as vigas com conectores “verticais” foi 191,87 kN. A relação obtida entre o esforço limite de cisalhamento na conexão e a força última de ruptura nas vigas mistas foi de 73,89% para as vigas com conectores em “X” e de 77,31% para as vigas com conectores “verticais”. Esses resultados foram estimados a partir do modelo de Mohler. O modelo de Mohler foi o método mais rápido para obtenção desses resultados, sendo estes razoavelmente precisos. Para as vigas V01, V02 e V03 a força média limite de cisalhamento nos conectores foi de 132,03 kN e para as vigas V04, V05 e V06 foi de 148,47 kN.



Fig. 10 – Fissuras na mesa de concreto das vigas com conectores em “X”.



Fig. 11 – Ruptura ultima da viga por cisalhamento na linha neutra – vigas com conectores “X”.



Fig. 12 – Fissuração do concreto nas regiões dos conectores – vigas com conectores “verticais”.



Fig. 13 – Ruptura ultima por cisalhamento na linha neutra – vigas com conectores “verticais”.

#### 4.3 - Valores experimentais de rigidez

Os valores experimentais das flechas e de rigidez (EI) estão apresentados nas Tabelas 3 e 4.

Nas referidas tabelas, os parâmetros  $P_{30\%}$ ,  $P_{40\%}$  e  $P_{50\%}$  indicam as porcentagens de força  $P$  aplicadas para as quais foram obtidas as flechas e os valores de rigidez (EI) experimentais.

Para as vigas com conectores em “X” esses valores foram  $P_{30\%} = 39,61$  kN,

$P_{40\%} = 52,81$  kN e  $P_{50\%} = 66,02$  kN e, para as vigas com conectores “verticais” esses valores foram  $P_{30\%} = 44,54$  kN,  $P_{40\%} = 59,39$  kN e  $P_{50\%} = 74,24$  kN.

Tabela 3 – Flechas obtidas no meio do vão.

Viga	Flecha (mm)		
	$P_{30\%}$	$P_{40\%}$	$P_{50\%}$
01	1,70	2,30	2,89
02	1,72	2,29	2,87
03	1,69	2,28	2,87
04	1,77	2,42	3,04
05	1,78	2,45	3,01
06	1,75	2,43	3,00

Tabela 4 – Valores de rigidez (EI) das vigas.

Viga	(EI) (kN.cm <sup>2</sup> )		
	$P_{30\%}$	$P_{40\%}$	$P_{50\%}$
01	10664604	10509381	10456022
02	10540597	10555273	10528886
03	10727708	10601568	10528886
04	11517700	11232767	11177719
05	11452993	11095223	11289125
06	11649330	11186542	11326755

#### 4.4 - Calibração dos modelos

Na calibração dos modelos numéricos as curvas “experimentais” foram plotadas para os valores últimos de ruptura, obtidos experimentalmente.

As curvas “experimentais” foram plotadas até o último ponto de leitura efetuado antes da retirada dos transdutores de deslocamentos, valores estes correspondentes a aproximadamente 70% dos valores de ruptura finais.

Já as curvas “numéricas” foram plotadas até o ponto máximo onde foi possível a obtenção de convergência dos resultados em correspondência a uma tolerância de 0,001.

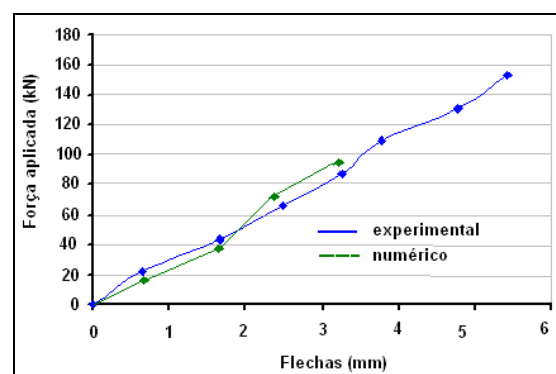


Fig. 14 – Calibração numérico-experimental da viga 01 com conectores “X”.



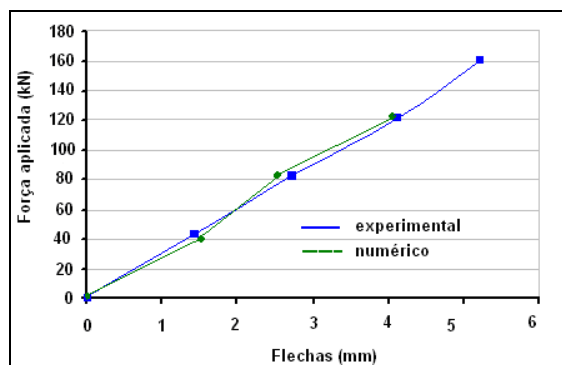


Fig. 15 – Calibração numérico-experimental da viga 04 com conectores “verticais”.

Observou-se que as curvas de calibração obtidas para os modelos numéricos, tenderam a uma inclinação ascendente. Além disso, em nenhum dos modelos analisados foi possível a obtenção do comportamento da curva numérica força versus deslocamento para valores próximos aos valores de ruptura. Isso se deve ao fato dos elementos utilizados na modelagem considerarem somente os efeitos de elasticidade e plasticidades dos materiais.

#### 4.5 - Valores numéricos de rigidez

Os valores numéricos das flechas e de rigidez (EI) estão apresentados nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 5 – Flechas obtidas no meio do vão.

Viga	Flecha (mm)		
	P <sub>30%</sub>	P <sub>40%</sub>	P <sub>50%</sub>
01	1,69	2,29	2,87
02	1,70	2,29	2,85
03	1,67	2,27	2,84
04	1,76	2,40	3,03
05	1,78	2,43	3,01
06	1,76	2,41	3,01

Tabela 6 – Valores de rigidez (EI) das vigas.

Viga	(EI) (kN.cm <sup>2</sup> )		
	P <sub>30%</sub>	P <sub>40%</sub>	P <sub>50%</sub>
01	10727708	10555273	10528886
02	10664604	10555273	10602773
03	10856183	10648271	10640107
04	11583141	11326374	11214609
05	11452993	11186542	11289125
06	11583141	11279376	11289125

## 5- CONCLUSÕES

Os valores de rigidez (EI) das vigas com conectores em “X” foram menores que os valores de rigidez das vigas com conectores “verticais”. Porém os valores obtidos para as forças últimas de ruptura das vigas com “verticais” foram maiores que os valores obtidos para as vigas com conectores “X”.

Globalmente, os danos observados nas vigas mistas com conectores “X” foram verificados para a mesa de concreto, mas, no entanto, estes danos foram de pequena magnitude e corresponderam à fissuração do concreto. Para as vigas com conectores “verticais” os danos na mesa de concreto ficaram mais concentrados nas regiões dos conectores mostrando que há maior concentração de tensões nas regiões dos conectores e as tensões, neste caso, podem ultrapassar os limites de resistência do material.

O modo de ruptura última, observado nas vigas mistas, conduzidas até a ruptura por meio de ensaios estáticos de flexão, foi o cisalhamento da viga mista na LN.

Os modelos numéricos propostos foram capazes de simular o comportamento mecânico dos sistemas mistos de conexão “vertical” e em “X”, não somente na fase elástica linear, mas também no início da fase não linear, quando se inicia o processo de plastificação dos materiais.

A partir dos modelos propostos não foi possível prever o comportamento das curvas força versus deslocamento para valores últimos de ruptura.

O erro obtido entre os resultados numéricos e experimentais foi de até 15%.

## 6- REFERÊNCIAS

- ANSYS versão 9.0 Documentation. ANSYS, Inc.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1986. NBR 8800 – Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios. Rio de Janeiro.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1997. NBR 7190 – Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1984. NBR 7188 – Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestre. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1978. NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1994. NBR 5739: Concreto– Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2003. NBR 8522: Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão - deformação. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2003. NBR 8681 – Ações e segurança nas estruturas - Procedimento. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2003. NBR 6118 –Projeto de estruturas de concreto - procedimento. Rio de Janeiro, ABNT.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2003. NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro.
- Balarin, A. W.; Nogueira, M. 2003. Caracterização elástica da Madeira de Eucalipto citriodora, Cerne, V9, N.1, p. 066-080.
- Branco, J. M., Cruz, P.J. 2003. Ligações mistas Madeira-Betão Leve. In Simpósio EPUSP sobre estruturas de concreto, V, 2003, São Paulo, p.17.
- Calil Junior, C., Lahr, F. A. R, Dias, A. A. 2003. Dimensionamento de Elementos Estruturais de Madeira. Barueri – SP, Editora Manole Ltda, p. 152, 2003.
- Dias, A. M. P. G. 2005. Mechanical behavior of timber-concrete joints. 293p. Thesis (Doctorate) – University of Coimbra, Portugal, 2005.
- 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.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION. 2001 – (Draft nº 3 of prEN 1994-1-1). Design of composite steel and concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels.
- Flores, E. S.; Rioseco, C. A.; Matamal, A. V. 2007. Calibración del modelo de Hill modificado para el Pino Radiata cilenio en conexiones de cizalle doble sometidas a compresión paralela. In: II JORNADAS CHILENAS DE ESTRUCTURAS DE MADERA, 2007, Santiago, Chile, 12 a 15 de Novembro.
- Góes, J. L. N. 2004. Análise de vigas de madeira pregadas com seção composta I. 123p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2004.
- Hellmeister, J. C. 1978. Pontes de eucalipto citriodora. 85p. Tese (Livre-docência) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1978
- Kirchhof, L.D. 2006. Uma contribuição ao estudo de vigas mistas aço-concreto simplesmente apoiadas em temperatura ambiente e em situação de incêndio. 1v. 143p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- Kotinda, T.I. 2004. Modelagem numérica de vigas mistas aço-concreto simplesmente apoiadas: ênfase ao estudo da interface laje - viga. 1v. 87p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- Matthiesen, J. A. 2000. Estudo da ligação madeira-concreto com parafusos auto-atarrachantes comerciais. In: VII Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas de Madeira, São Carlos, Anais, 12-14 jul, CD, 10 p.
- Matthiesen, J. A. 2001. Contribuição ao estudo das estruturas mistas. “Estudo experimental de estruturas mistas de madeira e concreto interligados por parafusos”, Tese (Livre Docência), 84p, Ilha Solteira, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Departamento

Molina, J.C. ; Calil Jr, C.

de Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista.

Molina, J.C. 2008. “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, Brasil. Universidade de São Paulo. São Paulo, Brasil. 2004.

Pigozzo, J. C. 2006. Determinação do módulo de deslizamento e resistência limite de conectores de cisalhamento para estruturas mistas de madeira e concreto. In X Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira – EBRAMEM, São Pedro, Anais, 16p.

Soriano, J. 2001. Estruturas mistas em concreto e madeira: análise de vigas e painéis e aplicações na construção civil. 215 p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2001.

Weaver, C. A., Davids, W. G., Dagher H. J. 2004. Testing and Analysis of Partially Composite Fiber-Reinforced Polymer-Glulam-Concrete Bridge Girders. Journal of Bridge Engineering – ASCE, July/August, 316-325.

Weaver, C. A. 2002. Behavior of FRP-reinforced glulam-concrete composite bridge girders. MS thesis, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Univ. of Maine, Orono, Me.