

DESEMPENHO DE CONECTORES METÁLICOS EM VIGAS MISTAS DE MADEIRA E CONCRETO NO ESTADO LIMITE DE SERVIÇO

José Antonio Matthiesen

Departamento de Engenharia Civil, FEIS, UNESP, e-mail: matth@dec.feis.unesp.br

Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho

Julio Cesar Molina

Marcelo Rodrigo Carreira

Departamento de Engenharia de Estruturas, EESC-USP,
e-mails: p_gutemberg2001@yahoo.com.br, juliocm@sc.usp.br, carreira@utfpr.edu.br

Resumo

Este trabalho apresenta uma investigação a respeito do emprego de diferentes conectores metálicos de cisalhamento utilizados na ligação de vigas mistas com mesa de concreto e alma de madeira. Foram testados três tipos de conectores, a saber: parafusos autoatarraxantes fixados em forma de “X”; pinos fixados em ângulo de 50° em relação às fibras de madeira; e pinos colados perpendicularmente em relação às fibras de madeira. Para tanto, foram confeccionadas quatro vigas para cada tipo de conector, totalizando doze vigas. As vigas foram submetidas ao ensaio de flexão estática, e os deslocamentos verticais obtidos nos experimentos foram comparados com os deslocamentos obtidos teoricamente por meio do Eurocode 5 (2004) e pelo Método da Seção Transformada. A análise dos resultados revelou que as vigas mistas com parafusos autoatarraxantes apresentaram valores de flechas inferiores aos previstos pelos modelos teóricos. Assim sendo, acredita-se que esse tipo de ligação seja recomendado para utilização em pisos mistos de madeira e concreto, desde que seja seguida a boa prática de engenharia. Certamente, também sugere-se uma análise segura de sua aplicabilidade em quaisquer outras situações particulares.

Palavras-chave: vigas mistas de madeira e concreto, parafusos autoatarraxantes, pinos de barras de aço de construção civil, conectores de cisalhamento.

Introdução

O Brasil, um país de dimensões continentais, apresenta imensa potencialidade para o uso de novos arranjos de materiais na construção civil. Para atender à demanda de novas construções, sugerem-se, como alternativa, as estruturas mistas feitas da combinação dos materiais madeira e concreto.

O campo de aplicação das estruturas mistas de madeira e concreto tem enormes potencialidades na construção civil, em obras de restauração e, principalmente, nos novos edifícios. Essa combinação de características, como redução de vibrações (ruídos tradicionais dos assoalhos são eliminados) e o excelente isolamento térmico (proteção ao fogo para 30, 60 e 90 minutos) e acústico (de 60 dB), conduz a uma solução construtiva competitiva que mostra grande flexibilidade em sua aplicação. Na Figura 1 apresenta-se o comportamento de três diferentes pisos submetidos ao mesmo carregamento variável, com registro para carregamento permanente e isolamento acústico, segundo Natterer *et al.* (1996).

A transformação dos pisos somente de madeira em pisos mistos de madeira e concreto permite a utilização desse sistema em edifícios antigos, respeitando os níveis de exigência atuais. Também há vantagens relativas à durabilidade das construções que usam somente madeira, no que se refere ao desgaste dos pisos, quando a troca do assoalho por uma laje de concreto sobre as vigas de madeira já existentes pode ser uma alternativa. Certamente essa reabilitação pode ser bem mais econômica.

Porém, a viabilidade de uso desse material só ocorrerá quando for possível quantificar a eficiência da ligação entre a madeira e o concreto, pois o tipo de ligação entre os dois materiais afeta diretamente a distribuição dos esforços internos, levando a deformações da estrutura. A ligação entre os dois materiais, neste caso, pode ser feita utilizando vários tipos de conectores metálicos que, em sua essência, são responsáveis pela quantificação da rigidez efetiva à flexão da estrutura.

Este artigo trata da pesquisa realizada em doze vigas mistas de madeira e concreto de seção T, em três grupos,

que utilizam conectores metálicos de ligação entre a mesa de concreto e a alma de madeira. No primeiro grupo, têm-se quatro vigas que utilizam madeira de reflorestamento na construção e parafusos autoatarraxantes como conectores de ligação entre o concreto e a madeira. No segundo e terceiro grupos, ambos com quatro vigas, foram empregados, como elementos de ligação, pinos metálicos confeccionados com barras de aço de construção civil. No segundo grupo, os pinos foram fixados por meio de pré-furação com inclinação de 50° em relação às fibras da viga de madeira; no terceiro grupo, os pinos foram fixados perpendicularmente às fibras da viga de madeira, por meio de pré-furação, e então colados nas vigas de madeira. O adesivo utilizado nessa colagem foi do tipo bicomponente, constituído de um pré-polímero A249 e de um polioli B1640, ambos extraídos de resina de óleo de mamona, que foram misturados na proporção em massa 1:1 para formar a cola. A madeira utilizada nesses dois últimos grupos é comercializada com grande frequência na região Noroeste do Estado de São Paulo. A colocação dos conectores em todas as vigas mistas foi feita com espaçamentos constantes em cada viga, mas com espaçamentos diferentes de viga para viga. Os espaçamentos adotados nessas vigas foram iguais a 10 cm, 15 cm e 20 cm.

O objetivo deste estudo foi avaliar o desempenho de conectores metálicos em vigas mistas de madeira e concreto levando em conta, principalmente, o tipo de conector e a forma de fixação. A avaliação de cada tipo de conector foi feita comparando-se os deslocamentos verticais (flechas) medidos no ensaio de flexão estática com os deslocamentos teóricos calculados pelo Eurocode 5 (2004) e pelo Método da Seção Transformada.

Materiais e Métodos

Madeira

As espécies de madeira utilizadas para a construção das vigas mistas de madeira e concreto foram *Pinus oocarpa*,

Eucalyptus grandis e Cupiúba. No total, foram utilizadas doze vigas de madeira, sendo as vigas de um a quatro com comprimento de 210 cm e as vigas de cinco a doze com comprimento de 220 cm. Na Tabela 4 são apresentadas as dimensões geométricas das vigas mistas de madeira e concreto. Os valores médios das propriedades mecânicas da madeira foram obtidos segundo a norma brasileira NBR 7190:1997 e são mostrados na Tabela 1.

Conectores

Os conectores utilizados nas vigas um a quatro foram parafusos autoatarraxantes da marca Ciser e Rex, vendidos comercialmente com diâmetro de 12,7 mm, cujo comprimento é igual a 12,5 cm e o diâmetro interno da rosca é igual a 9,2 mm. Para a pré-furação foi feito um diâmetro igual a 9,5 mm.

Esses conectores foram fixados nas vigas de madeira em forma de "X", espaçados de 10 cm, formando um ângulo de 50° em relação às fibras da madeira, e ancorados na madeira com 6,5 cm (comprimento da rosca no parafuso). Os conectores utilizados nas vigas cinco a doze foram retirados de barras de aço de construção civil, do tipo CA50, de diâmetro médio igual a 12,5 mm. O comprimento médio dos conectores foi igual a 150 mm. Nas vigas cinco a oito, os pinos foram colocados com inclinação igual a 50° em relação às vigas de madeira, profundidade igual a 64 mm e pré-furação igual a 12 mm.

Nas vigas nove a doze, os pinos foram colocados na posição perpendicular em relação às vigas de madeira, com profundidade igual a 100 mm e pré-furação igual a 14 mm. Nessas últimas vigas, os pinos foram colados, por isso tem-se um diâmetro de pré-furação maior do que o conector. Na Figura 2 têm-se os conectores utilizados nas doze vigas mistas de madeira e concreto, e na Tabela 2 são especificados o espaçamento, o posicionamento e a quantidade dos conectores nas mesmas.

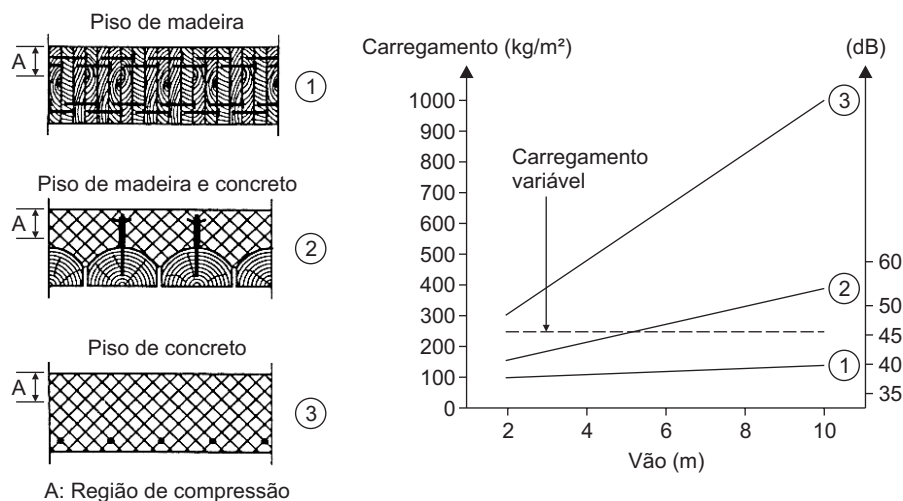
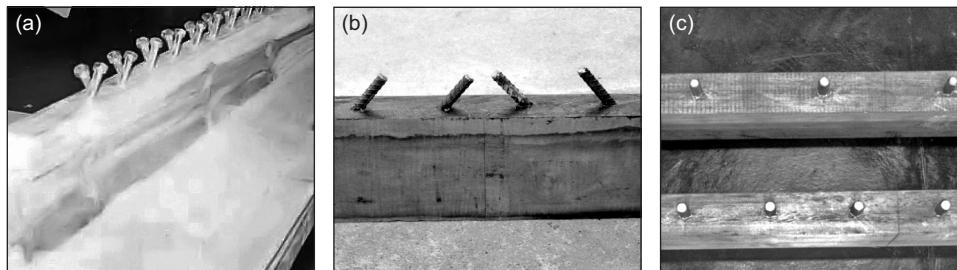


Figura 1 Comportamento de três diferentes tipos de pisos. Fonte: adaptado de Natterer et al. (1996).

Tabela 1 Propriedades mecânicas médias das madeiras.

Vigas	Madeira	$\rho_{m,w}$ (kg/m ³)	$f_{m,w}$ (MPa)	$E_{m,w}$ (MPa)
1	<i>Pinus oocarpa</i>	516	42,4	6415
2	<i>Pinus oocarpa</i>	516	42,4	6415
3	<i>Eucaliptus grandis</i>	703	49,6	18430
4	<i>Eucaliptus grandis</i>	703	49,6	18430
5	Cupiúba	838	51,3	8614
6	Cupiúba	838	51,3	9035
7	Cupiúba	838	51,3	8946
8	Cupiúba	838	51,3	10445
9	Cupiúba	838	54,4	10848
10	Cupiúba	838	54,4	11292
11	Cupiúba	838	54,4	18626
12	Cupiúba	838	54,4	17705

**Figura 2** Tipos de conectores: a) parafusos autoatarraxantes colocados em forma de “X”, b) pinos metálicos inclinados e c) pinos metálicos perpendiculares.**Tabela 2** Quantidade de conectores, espaçamento e posicionamento dos conectores.

Vigas	Pinos/viga	d (mm)	s (cm)	Posição
1 a 4	40	12,7	10	Em forma de “X”
5 e 6	20	12,5	10	Inclinado
7	14	12,5	15	
8	12	12,5	20	
9 e 10	20	12,5	10	Perpendicular
11 e 12	14	12,5	15	

Concreto

Nas doze vigas mistas de madeira e concreto utilizou-se concreto de traço em massa igual a 1:3,8:2,4 com fator água cimento igual a 0,54. Utilizaram-se os seguintes componentes: cimento CP II – F 32; areia grossa; e brita número 1. Para o concreto das vigas com conectores perpendiculares, adicionaram-se 9,5% de peso de microssílica e 0,6% de peso de superplastificante, ambos em relação ao cimento. Para cada concretagem, retiraram-se corpos de prova (de 15 x 30 cm) para determinação da resistência média à compressão e do módulo de deformação. Na Tabela

3 são mostradas as propriedades mecânicas do concreto utilizado nas doze vigas mistas de madeira e concreto, segundo a norma brasileira NBR 6118:2003.

Avaliação teórica e experimental das vigas de madeira e concreto

A análise de estruturas mistas de madeira e concreto demanda conhecimentos dos componentes: madeira, concreto e conectores. Vale mencionar que não existe uma norma específica brasileira para o dimensionamento de estruturas mistas de madeira e concreto. Portanto, o projetista

deve se nortear por recomendações de normas internacionais, levando em conta cada um dos materiais que compõem a seção mista.

Os procedimentos de cálculos para as estruturas mistas de madeira e concreto são apresentados em Ceccotti (1995) e serviram de base para os critérios de cálculo do código europeu, Eurocode 5 (2004). Tal norma leva em consideração a influência do deslizamento entre a madeira e o concreto por meio da adoção de um produto de rigidez efetivo $(EI)_{ef}$, dado pela Equação 1. O valor obtido por essa equação procede da forma da seção transversal, dos módulos de deformação longitudinal dos materiais constituintes, do espaçamento entre os conectores e do módulo de deslizamento da ligação.

$$(EI)_{ef} = E_{m,c} \cdot I_c + \gamma_c \cdot E_{m,c} \cdot A_c \cdot a_c^2 + E_{m,w} \cdot I_w + \gamma_w \cdot E_{m,w} \cdot A_w \cdot a_w^2 \quad (1)$$

Após terem sido definidos os parâmetros de cálculos da seção mista de madeira e concreto, mostrados na Figura 3, calcula-se o produto de rigidez efetivo dessa seção transversal em forma de T. Na Equação 1, $E_{m,c}$, $E_{m,w}$, I_c , I_w , A_c e A_w representam os valores médios dos módulos de deformação longitudinal, os momentos de inércia e as áreas da seção transversal do concreto e da madeira, respectivamente; γ_c é o fator parcial da mesa, calculado conforme Equação 2; γ_w , igual a 1,0, é o fator parcial da alma; a_w e a_c são as distâncias em relação à linha neutra, calculadas conforme as Equações 3 e 4, respectivamente.

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

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

Tabela 3 Propriedades mecânicas médias dos concretos.

Vigas	$\rho_{m,c}$ (kg/m ³)	$f_{m,c}$ (MPa)	$E_{m,c}$ (MPa)
1	2500	43,8	45000
2	2500	43,0	44500
3	2500	30,0	36000
4	2500	31,1	38000
5	2500	44,6	44410
6	2500	35,8	40900
7	2500	40,4	43290
8	2500	34,1	41590
9	2500	53,0	42005
10	2500	53,0	42005
11	2500	48,2	37935
12	2500	48,2	37935

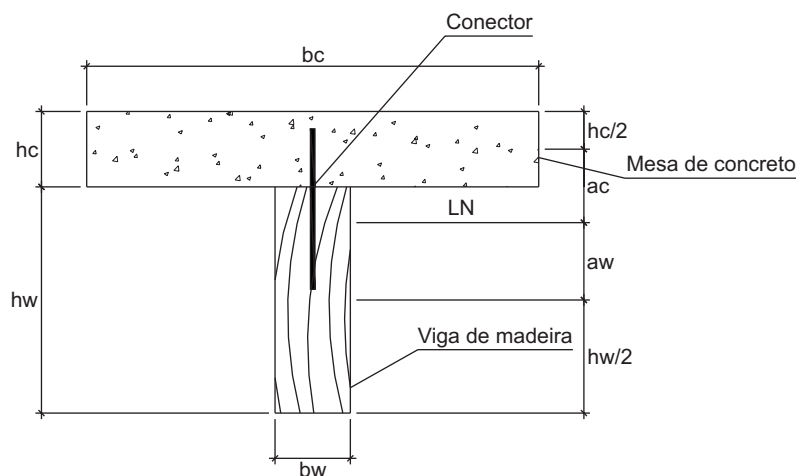


Figura 3 Seção transversal de madeira e concreto. *Fonte:* adaptado do Eurocode 5 (2004).

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

em que:

L : vão efetivo para viga simplesmente apoiada; neste estudo, é igual ao vão livre;

k_{ser} : módulo de deslizamento da ligação para o estado limite de serviço.

O procedimento de cálculo proposto pelo Eurocode 5 (2004) indica o cálculo do módulo de deslizamento de serviço, k_{ser} , de pinos fixados perpendicularmente às fibras da madeira. O valor do módulo de deslizamento de serviço é dado em função das densidades médias dos materiais, concreto e madeira e do diâmetro do conector, conforme mostrado na Equação 5.

$$k_{ser} = \frac{\rho_m^{1,5} \cdot d}{23} \quad (5)$$

em que:

ρ_m : densidade média do material composto (kg/m^3);

d : diâmetro do conector em (mm);

k_{ser} : módulo de deslizamento de serviço (N/mm).

Sendo o concreto e a madeira materiais de densidades diferentes, calcula-se a densidade média por meio da Equação 6;

$$\rho_m = \sqrt{\rho_{m,c} \cdot \rho_{m,w}} \quad (6)$$

em que:

$\rho_{m,c}$: densidade média do concreto (kg/m^3);

$\rho_{m,w}$: densidade média da madeira (kg/m^3).

Método da Seção Transformada

Para o cálculo do deslocamento vertical de uma viga composta por mais de um material, é necessário homogeneizar a seção, escolhendo-se apenas o módulo de deformação de um material como referência. A seção transversal da viga mista é, então, transformada em uma seção equivalente, composta por somente um material. Assim, as larguras dos outros materiais, diferentes do material de referência, são multiplicadas por suas respectivas razões modulares, para transformar toda a seção transversal no material de referência. É uma ferramenta utilizada no caso de vigas mistas totalmente rígidas. Segundo Timoshenko & Gere (1960), para que a seção transformada seja equivalente à seção real, é necessário que tais hipóteses ocorram simultaneamente:

- A linha neutra deve estar na mesma posição, na seção transformada e real.
- A capacidade de resistir ao momento fletor de serviço deve ser a mesma na seção transformada e real.

Define-se como razão modular, n_i , de determinado material o quociente entre o módulo de deformação desse

material, E_i , e o módulo de deformação do material tomado como referência, E_1 , representado pela Equação 7:

$$n_i = \frac{E_i}{E_1} \quad (7)$$

Numa seção transversal composta por n elementos, a posição da linha neutra (LN), Y , é definida pela Equação 8, em que A_i e y_i representam a área da seção transversal e a posição do eixo baricentral do material i , respectivamente.

$$Y = \frac{A_1 \cdot y_1 + \sum_{i=2}^n n_i \cdot A_i \cdot y_i}{A_1 + \sum_{i=2}^n n_i \cdot A_i} \quad (8)$$

Observa-se que o método da seção transformada assume perfeita transferência de cisalhamento entre os materiais. Todavia, os conectores utilizados podem não eliminar completamente o escorregamento na interface entre madeira e concreto e, assim, resultar em uma composição parcial da seção transversal. Por essa razão, o método da seção transformada pode não estimar com precisão as tensões, modos de ruptura e flechas.

Cálculo dos deslocamentos verticais nas vigas mistas de madeira e concreto

No cálculo das flechas, considerando que se trata de experimento feito em laboratório, desprezou-se o peso próprio das vigas mistas de madeira e concreto e adotaram-se os valores de módulo de deslizamento de serviço e módulos médios de deformação da madeira e do concreto. Considerou-se, no cálculo teórico das flechas instantâneas, o efeito do cisalhamento, pois a relação de $L/(h_w + h_c)$ é aproximadamente 10, sendo que se recomenda uma relação maior do que 20 para a influência do cisalhamento não ser significativa nas estruturas de madeira, segundo recomendações da NBR 7190:1997. Portanto, nos cálculos teóricos das flechas dessas doze vigas mistas foram somadas as parcelas de cisalhamento à de flexão.

O cálculo das flechas em $L/2$, em virtude somente da parcela de flexão para carga pontual $F/2$, aplicada nos terços de vão, localizada a dois pontos equidistantes do centro da viga, conforme mostra a Figura 4, foi feito pela Equação 9, a partir de dados obtidos pelo Método da Seção Transformada, e pela Equação 10, quando o produto de rigidez efetivo $(EI)_{ef}$ for obtido pelo Eurocode 5 (2004).

$$w_{inst} = \frac{F \cdot a}{48 \cdot E_{m,w} \cdot I_{t,total}} \cdot (3 \cdot L^2 - 4 \cdot a^2) \quad (9)$$

$$w_{inst} = \frac{F \cdot a}{48 \cdot (EI)_{ef}} \cdot (3 \cdot L^2 - 4 \cdot a^2) \quad (10)$$

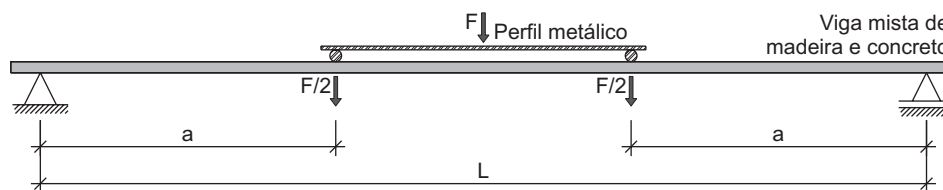


Figura 4 Esquema estrutural de ensaio das vigas mistas de madeira e concreto.

A parcela que deve ser somada à flexão em virtude do cisalhamento, quando $F/2$ é aplicada nos terços do vão, é dada pela Equação 11.

$$w_v = \frac{F \cdot L}{6 \cdot K \cdot G_{m,w} \cdot A_{t,\text{total}}} \quad (11)$$

em que:

$E_{m,w}$: módulo de deformação médio longitudinal da madeira;

I_t : momento de inércia da seção transformada da viga mista de madeira e concreto;

$G_{m,w}$: módulo de deformação médio transversal da madeira, adotado igual a $E_{m,w}/20$, segundo a NBR 7190:1997;

A_t : área total da seção transversal transformada da viga mista de madeira e concreto;

K : coeficiente de cisalhamento, adotado igual a 0,371, segundo Brody *et al.* (2000).

Ensaio das vigas mistas de madeira e concreto

As vigas mistas de madeira e concreto foram ensaiadas em um pórtico de reação, por meio de um atuador hidráulico com capacidade de 300 kN. As flechas instantâneas, em virtude dos carregamentos instantâneos, foram obtidas utilizando-se relógios comparadores com

sensibilidade igual a 0,01 mm, localizados na seção central das vigas mistas de madeira e concreto.

O ensaio de cada viga foi dividido em três partes: na primeira, foi colocada uma célula de carga com capacidade de 300 kN e, então, foi aplicada uma carga concentrada nos terços de vão, simultaneamente, por meio de um perfil metálico (Figura 4), até obter uma flecha de $L/500$, limitação para carga acidental no concreto; na segunda, chegou-se até uma flecha de $L/300$, limitação para carga permanente no concreto; na terceira e última, retiraram-se os aparelhos de medidas e levou-se o ensaio até a ruptura das vigas mistas de madeira e concreto.

Resultados

Na Tabela 4 são apresentadas as propriedades geométricas das vigas mistas de madeira e concreto, as quais foram utilizadas na determinação das propriedades mecânicas das mesmas.

A partir dos dados referentes à madeira, aos conectores, ao concreto e às propriedades geométricas das vigas mistas de madeira e concreto, mostrados nas Tabelas 1 a 4, obtiveram-se os valores de rigidez das vigas mistas de madeira e concreto e também as propriedades geométricas das vigas mistas pelo método da seção transformada, conforme apresentam as Tabelas 5 e 6, respectivamente.

Tabela 4 Propriedades geométricas das vigas mistas de madeira e concreto.

Vigas	b_c (cm)	h_c (cm)	A_c (cm ²)	I_c (cm ⁴)	b_w (cm)	h_w (cm)	A_c (cm ²)	I_w (cm ⁴)
1	30,0	5,0	150,0	312,5	5,8	15,3	88,74	1731,10
2	30,0	5,0	150,0	312,5	5,8	15,3	88,74	1731,10
3	30,0	5,0	150,0	312,5	5,7	15,6	88,92	1803,30
4	30,0	5,0	150,0	312,5	5,7	15,6	88,92	1803,30
5	30,0	5,0	150,0	312,5	5,5	15,0	82,50	1546,90
6	30,0	5,0	150,0	312,5	5,5	15,5	85,30	1706,80
7	30,0	5,0	150,0	312,5	5,5	15,5	85,30	1706,80
8	30,0	5,0	150,0	312,5	5,5	15,0	82,50	1546,90
9	30,0	5,0	150,0	312,5	5,0	14,5	72,50	1270,26
10	30,0	5,0	150,0	312,5	5,0	14,5	72,50	1270,26
11	30,0	5,0	150,0	312,5	5,0	14,5	72,50	1270,26
12	30,0	5,0	150,0	312,5	5,0	14,5	72,50	1270,26

Tabela 5 Rigidez das vigas mistas de madeira e concreto, segundo Eurocode 5 (2004).

Vigas	k_{ser} (N/mm)	γ_c	γ_w	a_c (cm)	a_w (cm)	$(EI)_{ef}$ (kN/cm ²)
1	42271,55	0,202	1,00	2,99	7,16	6656699,29
2	42271,55	0,204	1,00	2,99	7,16	6638306,88
3	53306,16	0,286	1,00	5,30	5,00	12879942,32
4	53306,16	0,275	1,00	5,27	5,03	13008262,86
5	29927,48	0,154	1,00	4,09	5,91	6918921,41
6	29927,48	0,165	1,00	4,43	5,82	7416576,95
7	29927,48	0,111	1,00	5,28	4,97	6768142,23
8	29927,48	0,089	1,00	6,09	3,91	6282747,98
9	29927,48	0,161	1,00	4,25	5,50	6906903,61
10	29927,48	0,161	1,00	4,35	5,40	7058914,68
11	29927,48	0,124	1,00	6,40	3,35	7966891,26
12	29927,48	0,124	1,00	6,28	3,47	7772285,92

Tabela 6 Propriedades geométricas das vigas mistas de madeira e concreto, conforme método da seção transformada.

Vigas	n_i	$b_{t,c}$ (cm)	$h_{t,c}$ (cm)	$A_{t,c}$ (cm ²)	$I_{t,c}$ (cm ⁴)	Y (cm)	$I_{t,total}$ (cm ⁴)	$A_{t,total}$ (cm ²)
1	7,01	210,44	5	1052,22	2192,13	17,01	12354,39	1140,96
2	6,94	208,11	5	1040,53	2167,77	17,00	12322,67	1129,27
3	1,95	58,60	5	293,00	610,42	15,70	9650,89	381,92
4	2,06	61,86	5	309,28	644,33	15,80	9774,59	398,20
5	5,16	154,67	5	773,33	1611,11	16,54	10612,71	855,83
6	4,53	135,81	5	679,03	1414,64	16,86	11078,94	764,28
7	4,84	145,17	5	725,86	1512,20	16,92	11234,18	811,11
8	3,98	119,45	5	597,27	1244,32	16,29	10039,93	679,77
9	3,87	116,16	5	580,82	1210,04	15,92	8607,52	653,32
10	3,72	111,60	5	557,98	1162,47	15,88	8532,24	630,48
11	2,04	61,10	5	305,50	636,46	15,13	7476,87	378,00
12	2,14	64,28	5	321,39	669,57	15,21	7563,31	393,89

Nas Figuras 5 a 7 são mostrados os resultados experimentais e teóricos referentes às flechas instantâneas, aquelas que ocorrem logo após a aplicação do carregamento, em virtude da aplicação de cargas nos terços de vão para as doze vigas mistas de madeira e concreto. As flechas instantâneas teóricas foram obtidas para o Caso 1, levando em consideração o método da seção transformada na flexão e no cisalhamento, sendo que o Caso 2 trata da obtenção dos resultados teóricos para a flexão obtidos por meio do Eurocode 5 (2004) e os dados de cisalhamento obtidos por meio da seção transformada. Nas Tabelas 7 a 9 tem-se a relação tomando por base a flecha experimental para

o estado limite de serviço compreendido numa faixa entre $L/300$ e $L/500$, comparando com os resultados obtidos teoricamente para os Casos 1 e 2. A escolha de flecha para fins de comparação nessas tabelas deu-se tomando os valores próximos de $L/300$ para cada viga mista de madeira e concreto.

As rupturas das vigas mistas de madeira e concreto ocorreram por tração localizada abaixo dos pontos de aplicação das cargas nos terços de vão, conforme mostrado nas Figuras 8 e 9. Na Tabela 10 são apresentados os valores das cargas de ruptura das doze vigas mistas de madeira e concreto.

Tabela 7 Relação entre as flechas medidas e calculadas nas vigas de madeira e concreto com parafusos autoarraxantes.

Viga	Força (kN)	Flecha (mm)			Relação	
		Experimental [1]	Caso 1 [2]	Caso 2 [3]	[2]/[1]	[3]/[1]
1	30	6,05	6,11	7,13	1,01	1,18
2	30	6,00	6,13	7,16	1,02	1,19
3	45	5,74	4,74	6,11	0,83	1,06
4	45	5,70	4,65	6,01	0,82	1,05

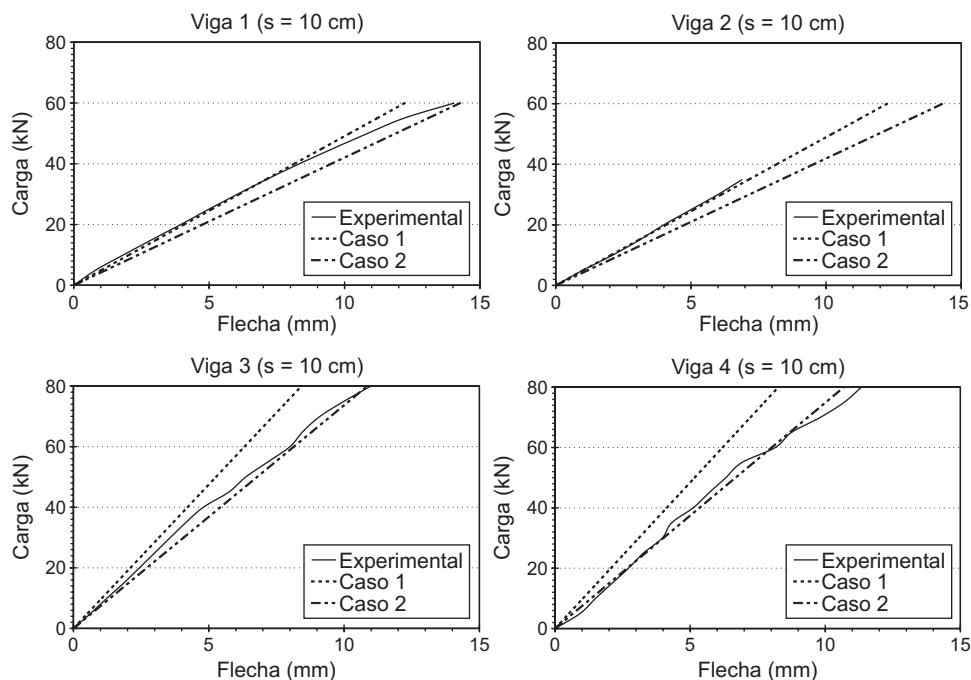


Figura 5 Flechas nas vigas com parafusos autoarraxantes.

Tabela 8 Relação entre as flechas medidas e calculadas nas vigas de madeira e concreto com pinos inclinados.

Viga	Força (kN)	Flecha (mm)			Relação	
		Experimental [1]	Caso 1 [2]	Caso 2 [3]	[2]/[1]	[3]/[1]
5	25	5,59	4,49	5,74	0,80	1,03
6	25	6,05	4,20	5,44	0,69	0,90
7	25	5,95	4,15	5,86	0,70	0,99
8	20	6,00	3,21	5,03	0,54	0,84

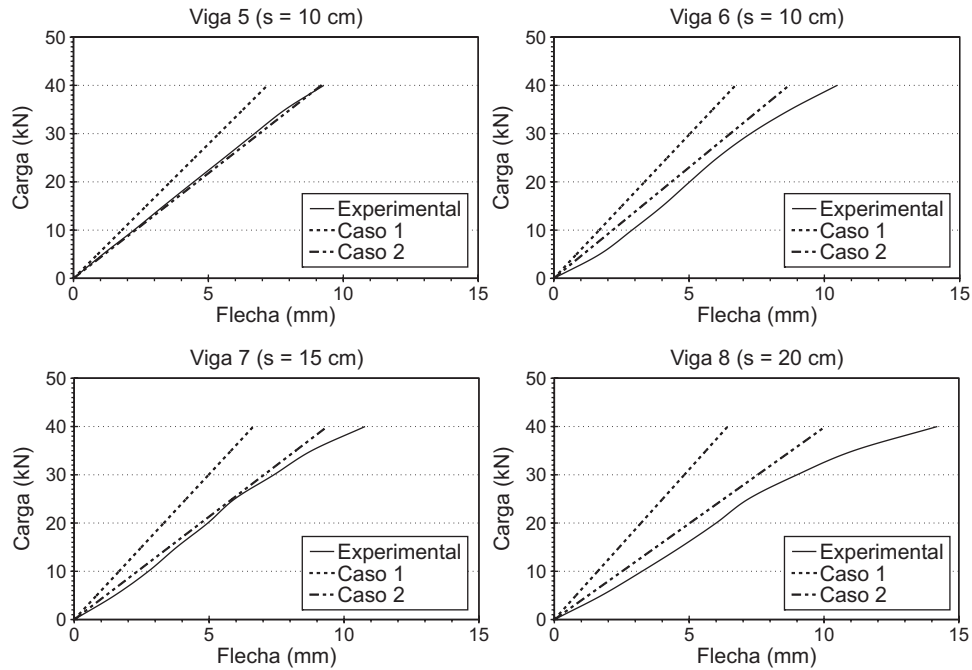


Figura 6 Flechas nas vigas com pinos inclinados.

Tabela 9 Relação entre as flechas medidas e calculadas nas vigas de madeira e concreto com pinos perpendiculares.

Viga	Força (kN)	Flecha (mm)			Relação	
		Experimental [1]	Caso 1 [2]	Caso 2 [3]	[2]/[1]	[3]/[1]
9	16,96	6,00	3,01	3,92	0,50	0,65
10	15,51	6,00	2,68	3,51	0,45	0,59
11	14,27	6,00	1,82	2,91	0,30	0,48
12	18,13	6,00	2,39	3,78	0,40	0,63

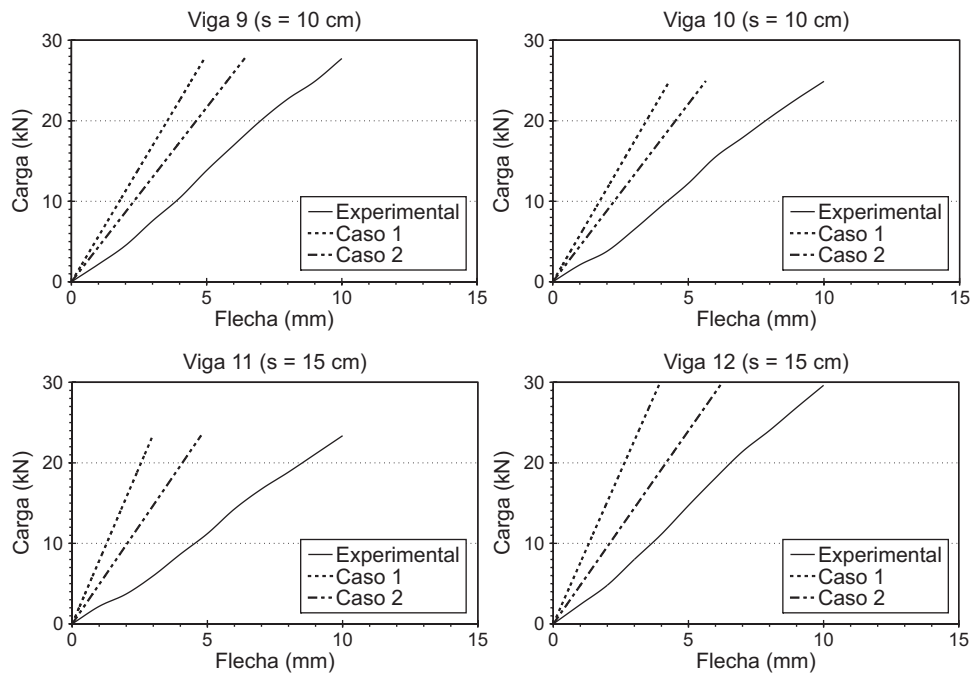


Figura 7 Flechas nas vigas com pinos perpendiculares.

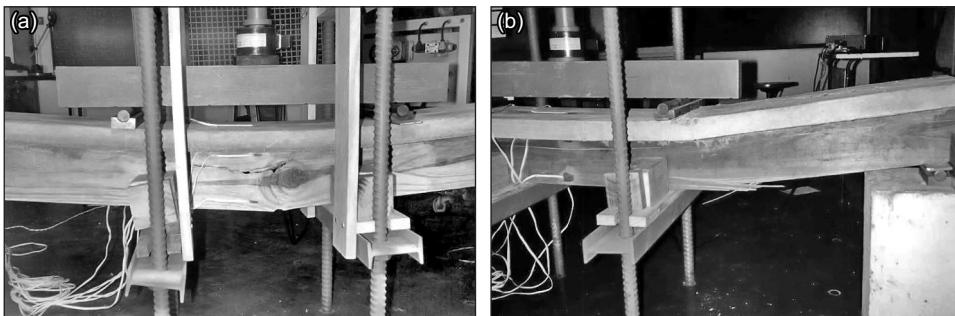


Figura 8 Ruptura nos pontos de aplicação da força nas vigas mistas: a) viga 1 e b) viga 3.

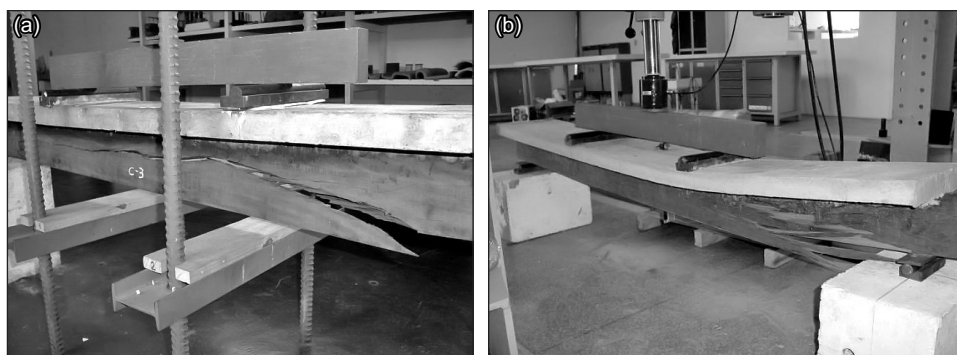


Figura 9 Ruptura nos pontos de aplicação da força nas vigas mistas: a) viga 7 e b) viga 11.

Tabela 10 Carga de ruptura das vigas mistas de madeira e concreto.

Vigas	Carga de ruptura (kN)
1	79,40
2	37,10
3	158,00
4	93,00
5	52,00
6	53,59
7	70,00
8	45,90
9	62,03
10	51,11
11	64,06
12	63,26

Considerações Finais

Analizando-se os resultados dos ensaios mecânicos, constatou-se que as vigas mistas empregando parafusos autoatarraxantes como conectores de cisalhamento tiveram desempenho estrutural melhor do que as demais, pois as flechas medidas nos experimentos foram inferiores aos valores teóricos calculados pelo Eurocode 5 (2004) e pelo Método da Seção Transformada.

As vigas mistas que possuíam pinos perpendiculares colados na madeira desenvolveram deslocamentos verticais

muito superiores aos previstos pelos modelos teóricos, enquanto as vigas com barras inclinadas como conectores apresentaram deslocamentos mais próximos dos valores obtidos teoricamente.

As vigas mistas com espaçamento entre os pinos igual a 10 cm, formando “X” e inclinados, apresentaram valores experimentais próximos do teórico, comprovando que a rigidez efetiva destas pode ser calculada teoricamente pelo Eurocode 5 (2004) e pelo Método da Seção Transformada. Somente o Eurocode 5 (2004) apresenta formulação

para o cálculo do módulo de deslizamento de serviço para pinos na direção perpendicular.

Observa-se que, neste trabalho, considerou-se a Equação 5 para o cálculo do módulo de deslizamento de serviço para os pinos formando “X” e os inclinados. Tal formulação apresenta valores conservadores quando comparada com os resultados obtidos em Pigozzo (2004), Molina (2008) e Miotto (2009).

Referências Bibliográficas

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6118*: Projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7190*: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.
- BRODY, J. et al. FRP-wood-concrete composite bridge girders. In: STRUCTURES CONGRESS 2000 – ADVANCED TECHNOLOGY IN STRUCTURAL ENGINEERING, 2000, Philadelphia, USA. *Proceedings...* Philadelphia: Mohamed Elgaaly, 2000. Section 53, Chapter 1.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. *EUROCODE 5 (prEN 1995-1-1)*: design of timber structures. Part 1-1: General – common rules and rules for buildings. Brussels, 2004.
- MIOTTO, J. L. *Estruturas mistas de madeira-concreto: avaliação das vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibras de vidro*. 2009. 325 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- MOLINA, J. C. *Análise do comportamento dinâmico da ligação formada por barras de aço coladas para tabuleiros mistos de madeira e concreto para pontes*. 2008. 240 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- NATTERER, J. et al. Composite wood-concrete floors for multi-story buildings. In: INTERNATIONAL WOOD ENGINEERING CONFERENCE, 1996, New Orleans, USA. *Proceedings...* New Orleans: Louisiana State University, 1996. p. 431-435.
- PIGOZZO, J. C. *Estudos e aplicações de barras de aço coladas como conectores em lajes mistas de madeira e concreto para tabuleiros de pontes*. 2004. 358 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- TIMOSHENKO, S. P.; GERE, J. E. *Mecânica dos sólidos*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1960. v. 1, 256 p.

