

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE VIGAS MISTAS DE MLC-CONCRETO REFORÇADAS COM FIBRAS DE VIDRO

Miotto, J.L.¹; Dias, A.A.²

¹Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá, Brasil

²Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, Brasil



RESUMO

Com o propósito de amenizar os problemas de durabilidade das vigas de madeira laminada e colada (MLC), quando expostas às intempéries, uma solução consiste na sua associação com lajes de concreto armado, geralmente por meio de conectores flexíveis. Todavia, diante de grandes vãos ou de elevados carregamentos, a aplicação de reforços com fibras sintéticas, na face tracionada, contribui para aprimorar ainda mais essa técnica. Este trabalho evidencia as avaliações experimentais realizadas em modelos físicos – com dimensões estruturais – de vigas mistas de MLC-concreto, com e sem reforços com fibras de vidro, em que foram utilizados ganchos de aço com diâmetro de 8 mm como conectores. Ao serem comparados os desempenhos das vigas de MLC com os das vigas mistas de MLC-concreto, ambas reforçadas com fibras de vidro, registrou-se aumento médio de 28% no módulo de ruptura. Ademais, o emprego do reforço colaborou para atenuar as tensões das lâminas tracionadas da MLC.

1- INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, os produtos estruturais derivados de madeira – tal como a madeira laminada e colada (MLC) – têm propiciado novos campos de aplicação para a madeira, uma vez que apresentam padrões compatíveis com as modernas exigências das construções.

Embora seja um dos mais antigos produtos resultantes da colagem de lâminas, a MLC ainda não é um material plenamente justificável para o emprego nas construções brasileiras, resultado da pequena tradição no seu uso, elevado custo de adesivos e reduzido número de empresas envolvidas em sua fabricação. Em contraposição, suas vantagens em relação à madeira serrada são relevantes, especialmente quanto à possibilidade de se

produzir peças praticamente sem limitações dimensionais, com aumentos de resistência e rigidez.

Para se obter uma maior resistência à flexão, desejável em situações de grandes vãos ou de elevadas solicitações, uma das soluções pressupõe a adoção de reforço com fibras sintéticas na face tracionada das peças de MLC.

No entanto, o relativamente baixo módulo de elasticidade longitudinal da madeira faz com que as deformações sejam fatores limitantes no projeto dessas vigas. Além do mais, o emprego de fibras sintéticas, como reforço, não resolve plenamente os problemas de deformabilidade das vigas de MLC, já que os acréscimos conferidos à sua rigidez são modestos.

Assim, para assegurar um melhor desempenho à flexão, além de outras vantagens, propõe-se nesta pesquisa a associação entre o concreto armado e a MLC reforçada com fibras sintéticas, na forma de compósitos conhecidos como *estruturas mistas*. O estudo enfoca, particularmente, as vigas mistas com seção transversal em T, cuja alma é de MLC reforçada com fibras de vidro e a mesa é de concreto armado, nas quais se utilizam conectores metálicos como elementos de ligação entre os materiais.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - MLC reforçada com fibras sintéticas

Fibras sintéticas podem ser utilizadas como reforço de madeiras. Combinar dois materiais com propriedades físicas e mecânicas compatíveis e complementares pode revolucionar as técnicas construtivas, segundo Dagher (2000). No século XIX, a adição do aço como reforço para o concreto mudou significativamente a construção de pontes e edifícios em todo o mundo. No início do século XXI, muitos dos fatores que contribuíram para o sucesso do concreto armado são encontrados na madeira reforçada com fibras.

Em Triantafyllou e Deskovic (1992) assegura-se que os reforços nas estruturas de madeira, aliado aos métodos de projeto mais confiáveis, permitem que formas contemporâneas e avançadas de grandes estruturas (pontes com grandes vãos, por exemplo) sejam pelo menos tão confiáveis e economicamente competitivas como aquelas construídas a partir de outros materiais, tais como concreto armado, aço e plásticos.

Ressalta-se, ainda, a redução no consumo de madeira. Estudos indicam uma diminuição de 30% a 40% no volume de madeira quando se utiliza a MLC reforçada com fibras, de acordo com Dagher (1999).

Vigas de MLC podem ter suas propriedades mecânicas melhoradas com a colagem de reforços nas suas regiões

tracionadas, como ilustra a Fig. 1. Essa associação reúne as vantagens da madeira – alto desempenho com custo relativamente baixo e excelente relação entre resistência e densidade – com as vantagens das fibras, tais como alta resistência e rigidez, além de versatilidade, segundo Dagher (2000).



Fig. 1 – Seção transversal de viga de MLC reforçada com fibras de vidro.

De acordo com Lindyberg (2001), o impacto da diminuição da resistência, devido aos defeitos na face tracionada das vigas de MLC, diminuiu com a adição adequada dos polímeros reforçados com fibras, usualmente designados por FRP (*Fiber Reinforced Polymer*).

2.2 - Estruturas mistas de madeira e concreto

A exposição direta e contínua das estruturas de madeira às intempéries é um motivo de constante preocupação, pois promove a sua deterioração e compromete a segurança dessas construções e, conseqüentemente, de seus usuários. Uma das possibilidades para amenizar esse inconveniente consiste em associar uma laje de concreto à mesma, conforme Fig. 2, gerando as chamadas *estruturas mistas de madeira-concreto*, que além de garantir o aumento da vida útil das estruturas de madeira, também é capaz de melhorar o seu comportamento mecânico.

Para que o sistema misto funcione adequadamente é indispensável a presença

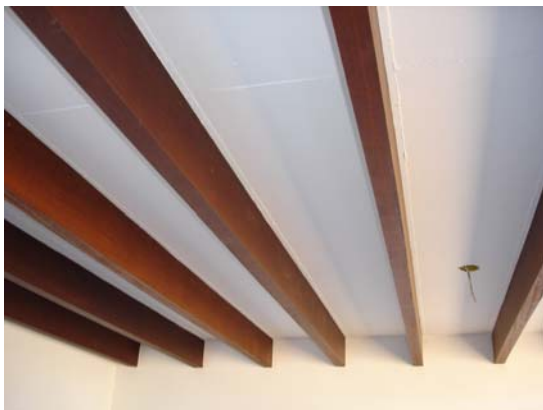


Fig. 2 – Vista interna de residência com estrutura mista de madeira-concreto.

do elemento de ligação entre os materiais, o qual assegura a transferência dos esforços de cisalhamento horizontal e também evita o desprendimento vertical entre as partes. Geralmente empregam-se, para esse fim, conectores metálicos flexíveis, tais como pregos, parafusos, chapas com dentes estampados, anéis, pinos e ganchos.

Em Davids (2001) se afirma que, quando comparadas às vigas de madeira e concreto com os materiais considerados isoladamente, ou seja, sem qualquer efeito de interação, a consideração da interação entre a madeira e o concreto resulta em um aumento de resistência à flexão em pelo menos 40% e acréscimos na rigidez em 200% ou mais.

Um modelo elasto-plástico para vigas mistas de madeira e concreto, considerando a ductilidade do sistema de ligação, é apresentado em Frangi e Fontana (2003). Os autores ressaltam que o deslizamento entre a mesa de concreto e a viga de madeira conduz ao efeito de composição parcial da seção transversal.

Em Pigozzo (2004) expõem-se as investigações experimentais realizadas com conectores metálicos na forma de ganchos, fixados com diferentes tipos de resina epóxi e de tal forma que resultassem em ângulos de 0°, 45° e 90° com as fibras da madeira.

Mantilla Carrasco et al. (2004) realizaram investigações experimentais em duas vigas mistas com seção transversal em T, com alma de MLC e mesa de concreto armado, solidarizadas por meio

de chapas com dentes estampados. Antes de receberem a laje de concreto armado, as vigas de MLC foram submetidas à flexão para determinação de seus limites elásticos. Os autores observaram que a associação da laje de concreto proporcionou um aumento de 26% na capacidade última de carregamento do sistema.

Em Brody et al. (2000) relatam-se as investigações realizadas acerca do comportamento das vigas de MLC reforçadas com fibras de vidro associadas com uma mesa de concreto, cuja seção transversal encontra-se representada na Fig. 3.

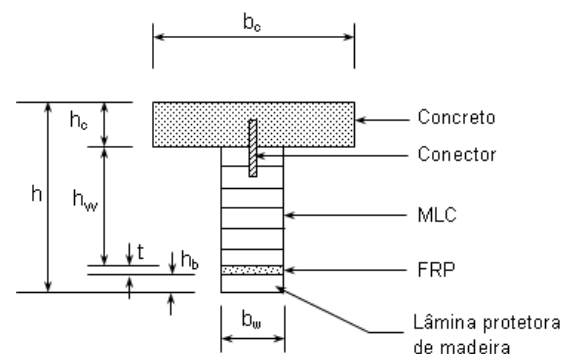


Fig. 3 - Seção transversal da viga mista. Fonte: Brody et al. (2000)

Em Weaver (2002) se relata o desempenho experimental de duas vigas de MLC com reforço de fibras de vidro, considerando a contribuição parcial da laje de concreto armado associada. As descontinuidades ocorridas na interface madeira-concreto, conforme Fig. 4, indicam a contribuição parcial da laje de concreto armado na rigidez do sistema misto.

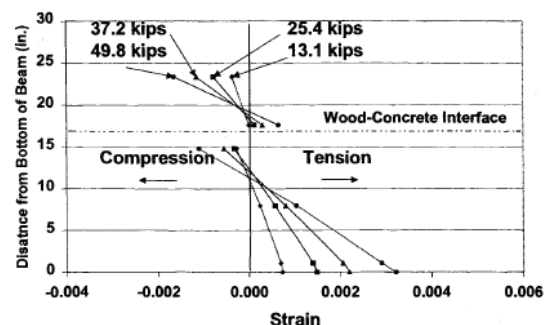


Fig. 4 – Diagrama de deformações para a viga 1 na fase de carregamento até a ruptura. Fonte: Weaver (2002)

3 - MATERIAIS E MÉTODOS

Para a avaliação das vigas mistas de MLC-concreto, objeto de análise neste trabalho, foi desenvolvido um programa experimental constituído pelas seguintes etapas: (a) caracterização dos materiais envolvidos; (b) determinação do módulo de deslizamento e força de ruptura do sistema de conexão proposto; (c) ensaios de vigas com dimensões estruturais, compostas de mesa de concreto armado e alma de MLC, reforçadas com fibras de vidro.

3.1 - Caracterização dos materiais

A madeira adquirida para a confecção das vigas de MLC foi um híbrido de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*, procedente de áreas de reflorestamento situadas no sul do Estado da Bahia, Brasil. Na Tabela 1 estão expostas algumas de suas propriedades, obtidas a partir de ensaios realizados em corpos-de-prova e segundo as prescrições do Anexo B da NBR 7190 (1997).

Tabela 1 – Propriedades físicas e mecânicas da madeira – valores médios

Propriedades	Valores médios
Teor de umidade	9,1 %
Densidade aparente – teor de umidade de 12%	0,79 g/cm ³
Resistência à compressão paralela às fibras, $f_{c,0}$	69,4 MPa
Módulo de elasticidade na direção das fibras, $E_{c,0}$	27.541 MPa
Módulo de elasticidade à flexão, E_M	18.004 MPa

Concluída a etapa de realização de emendas dentadas, as lâminas de madeira passaram, então, por classificação visual e mecânica antes da confecção das vigas de MLC.

Do concreto adquirido para a confecção das vigas mistas extraiu-se quantidade suficiente para moldar seis corpos-de-prova cilíndricos, com 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura. Esses corpos-de-prova foram moldados e ensaiados em

conformidade com as normas NBR 5738 (2003), NBR 5739 (1994) e NBR 8522 (2003). Foram encontrados os seguintes valores médios para o concreto: resistência à compressão aos 28 dias – $f_{c,28} = 45,2$ MPa e módulo de elasticidade tangente inicial – $E_{ci} = 36.436$ MPa.

Os ganchos de aço utilizados como sistema de conexão, com 8 mm de diâmetro, foram obtidos a partir do fracionamento de barras de aço trefilado, com resistência característica ao escoamento $f_{yk} = 500$ MPa e fixados nas vigas de MLC, por meio de adesivo epóxi, formando-se um ângulo de 45° em relação à direção das fibras da madeira.

Por sua vez, o reforço com fibras de vidro foi constituído a partir da impregnação, com resina epóxi, de tecido unidirecional de fibras de vidro, com espessura efetiva de 0,50 mm. A resina epóxi utilizada para a impregnação dos tecidos de fibras de vidro foi a AR-300, com o endurecedor AH-30, ambos produzidos pela *Barracuda Advanced Composites*. Após a impregnação do tecido de fibras de vidro com a resina epóxi, os corpos-de-prova apresentaram espessura média de 1 mm, o que significa dizer que o percentual de fibras de vidro nos corpos-de-prova foi equivalente a 50%. Para a determinação das propriedades mecânicas das fibras de vidro foram produzidos corpos-de-prova, cujas dimensões e procedimentos de ensaio obedeceram às recomendações da norma ASTM D 3039/D 3039M (2006). O valor médio encontrado para a resistência à tração foi 956 MPa e para o módulo de elasticidade longitudinal foi 59.463 MPa.

3.2 - Sistema de ligação

Miotto (2009) avaliou, por meio de ensaios do tipo *push-out*, o desempenho do sistema de ligação entre a mesa de concreto armado e a alma de MLC, constituído por ganchos e chapas metálicas perfuradas. Apesar das chapas perfuradas terem apresentado altos valores de módulo de deslizamento inicial (K_{ser}), seu modo de ruptura foi frágil. Assim, para a produção das vigas mistas optou-se pelo emprego de ganchos metálicos com 8 mm de diâmetro,

os quais apresentaram força de ruptura média de 131 kN e módulo de deslizamento $K_{ser} = 142.936$ N/mm.

3.3 - Produção e ensaios das vigas

Na fabricação das vigas de MLC empregou-se adesivo do tipo isocianato – Wonderbond EPI EL 70, com o catalisador EPI WS 742 – produzidos pela Hexion Química do Brasil. As dimensões médias das quatro vigas de MLC produzidas foram: 82 mm de largura, 314 mm de altura e 5.400 mm de comprimento. As vigas que receberam apenas o reforço com fibras de vidro foram denominadas V1 e V2, e aquelas que além do reforço receberam também a mesa de concreto armado foram designadas por V3 e V4.

Foram aplicadas 20 camadas de tecido de fibras de vidro para o reforço das vigas de MLC, resultando em uma espessura nominal de reforço equivalente a 10 mm, o que corresponde a 3,1% da área total da seção transversal. Salienta-se que a espessura final foi de 16 mm, considerando o espaço ocupado pela resina epóxi entre as diversas camadas de tecido.

Para estabelecer as dimensões da seção transversal das vigas mistas, inicialmente buscou-se analogia na pesquisa desenvolvida por Brody et al. (2000), pela qual a mesa de concreto deveria ter largura $b_c = 420$ mm. Porém, para amenizar o efeito do *shear lag*, evitou-se a adoção de mesas com larguras exageradas, adotando-se as dimensões indicadas na Fig. 5, com as armaduras da mesa de concreto representadas na Fig. 6.

Para avaliar as deformações e a distribuição de tensões na seção transversal

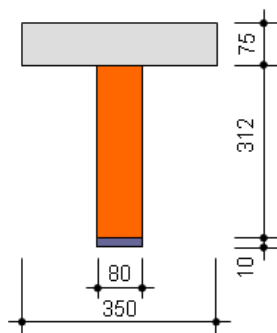
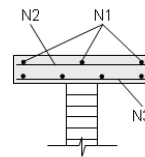


Fig. 5 – Seção transversal das vigas mistas de MLC e concreto (dimensões em milímetros).



Armadura	Tipo aço	Diâmetro (mm)	Comprimento (cm)
N1	CA50	6,3	536
N2	CA50	6,3	32
N3	CA60	4,2	32 x 536

A armadura N3 foi obtida a partir do recorte de tela soldada com malha 10x10 cm.

Fig. 6 – Armaduras da mesa de concreto.

localizada no centro das vigas V1 e V2, foram instalados os extensômetros elétricos do tipo KFG-10-120-C1-11, com comprimento de 10 mm e nas posições indicadas na Fig. 7, em que os algarismos indicam o número do extensômetro, e uma célula de carga com capacidade para 250 kN. Posteriormente, esses dispositivos foram conectados ao sistema de aquisição de dados *System 5000* da *Vishy Measurements Groups*.

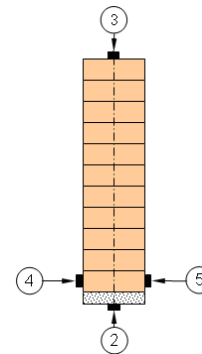


Fig. 7 – Posicionamento dos extensômetros elétricos nas vigas V1 e V2.

No caso das vigas V3 e V4, sob o pistão do atuador hidráulico instalou-se uma célula de carga com capacidade para 500 kN. Para avaliar as deformações e a distribuição de tensões na seção transversal, localizada no centro da viga, foram instalados extensômetros elétricos do tipo KFG-10-120-C1-11, com comprimentos de 10 mm nas partes de MLC e 20 mm na mesa de concreto armado, nas posições indicadas na Fig. 8. Posteriormente, todos esses dispositivos foram conectados ao sistema de aquisição de dados.

Seguindo as prescrições da ASTM D 198 (2005) e a partir do esquema de ensaio de flexão em 4 pontos, as vigas foram inicialmente ensaiadas à flexão estática (conforme ilustra a Fig. 9) para serem determinados os seus respectivos módulos de elasticidade (MOE) e propriedades elásticas.

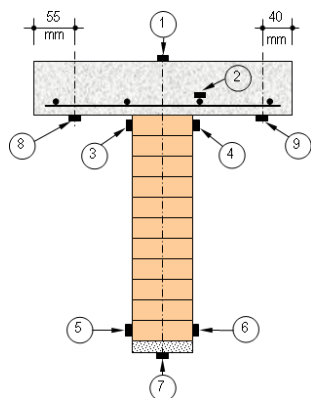


Fig. 8 – Posicionamento dos extensômetros elétricos nas vigas V3 e V4.

O carregamento foi aplicado de forma monotônica até atingir aproximadamente 40% da força de ruptura prevista, em dois ciclos de carga e descarga. Numa segunda fase dos ensaios, as vigas foram carregadas até a ruptura para a obtenção dos respectivos módulos de ruptura (MOR).



Fig. 9 – Arranjo de ensaio das vigas mistas.

Relógios comparadores foram instalados no centro do vão, sob os pontos de aplicação do carregamento (1/3 do comprimento), sobre os apoios e em ambos os lados da interface entre o concreto e madeira, esses últimos para a aferição do deslizamento entre a mesa e a alma da seção transversal.

4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base nas leituras da célula de carga e dos extensômetros elétricos instalados, foi possível a construção dos perfis de distribuição de deformações na

seção transversal central das vigas V1 e V2, para três níveis de carregamento, sendo o último referente à força de ruptura, conforme mostram as Fig. 10 e 11.

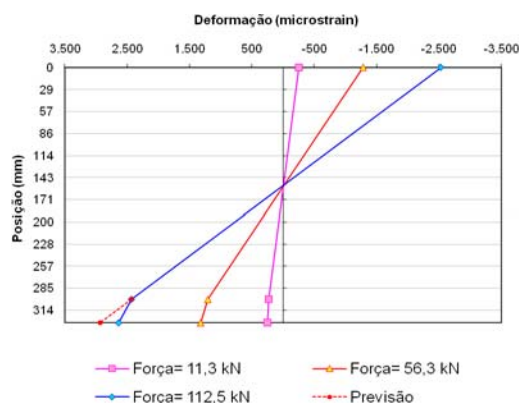


Fig. 10 – Distribuição das deformações na seção transversal central da viga V1.

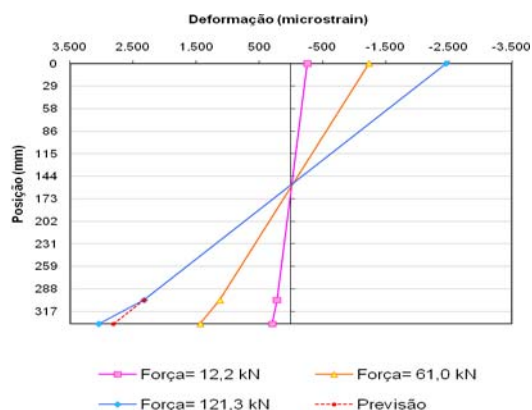


Fig. 11 – Distribuição das deformações na seção transversal central da viga V2.

Nas Fig. 10 e 11 é possível se observar, na representação relativa ao último nível de carregamento, um segmento pontilhado, em cuja legenda aparece a inscrição “previsão”. Fez-se a representação dessa previsão de deformação porque não houve sinais evidentes de deslizamento entre a MLC e o reforço com fibras de vidro. Assim, amparando-se na hipótese da flexão de vigas em que as seções planas permanecem planas, as deformações na região do reforço deveriam seguir o segmento pontilhado.

A partir da distribuição das deformações na seção transversal foi possível a construção dos diagramas de distribuição de tensões, válido também para a seção transversal central das vigas

V1 e V2, optando-se pela construção do diagrama de tensões somente para o último nível de carregamento, conforme mostram as Fig. 12 e 13, respectivamente. As diversas camadas da MLC, bem como a camada de reforço, encontram-se indicadas nessas figuras, ressaltando-se que, para simplificar a representação, as tensões foram admitidas constantes ao longo da altura de cada camada e seus valores equivalem à média das tensões nas respectivas lâminas.

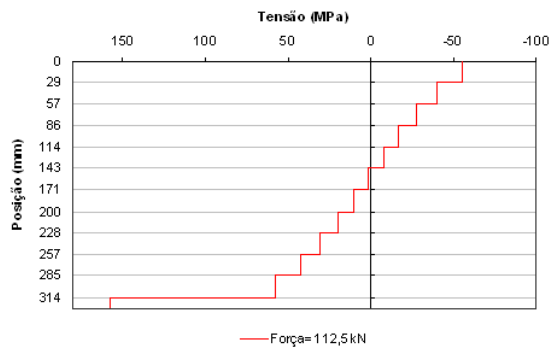


Fig. 12 – Distribuição das tensões na seção transversal central da viga V1, considerando aplicada a força de 112,5 kN (ruptura).

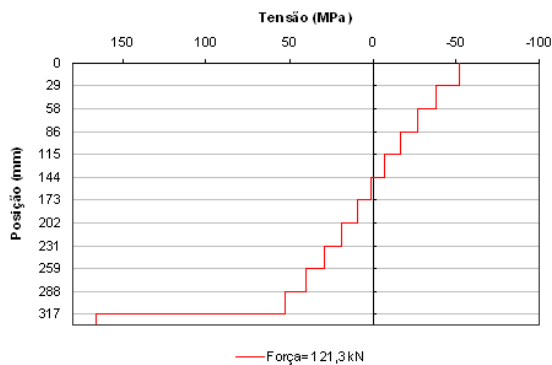


Fig. 13 – Distribuição das tensões na seção transversal central da viga V2, considerando aplicada a força de 121,3 kN (ruptura).

Igualmente, com base nas leituras da célula de carga e dos extensômetros elétricos instalados, foi possível construir o perfil de distribuição de deformações na seção transversal central das vigas mistas V3 e V4, para três níveis de carregamento, sendo o último referente à força de ruptura, conforme mostram as Fig. 14 e 15. Observa-se, em ambas as vigas, que não houve a descontinuidade registrada anteriormente entre o reforço com fibras de vidro e a MLC.

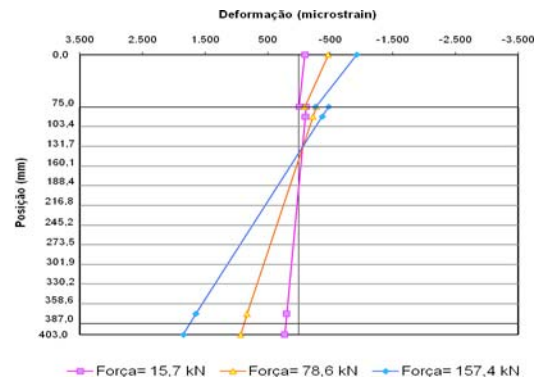


Fig. 14 – Distribuição das deformações na seção transversal central da viga V3.

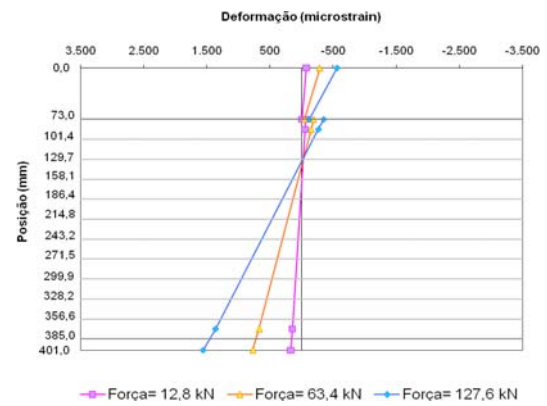


Fig. 15 – Distribuição das deformações na seção transversal central da viga V4.

A partir da distribuição das deformações na seção transversal foi igualmente possível a construção dos diagramas de distribuição de tensões, válidos para a seção transversal central das vigas mistas V3 e V4, no último nível de carregamento, conforme mostram as Fig. 16 e 17, respectivamente.

Uma das vantagens da adição do reforço com fibras sintéticas, enfatizada em Davids (2001), é a redução no consumo de

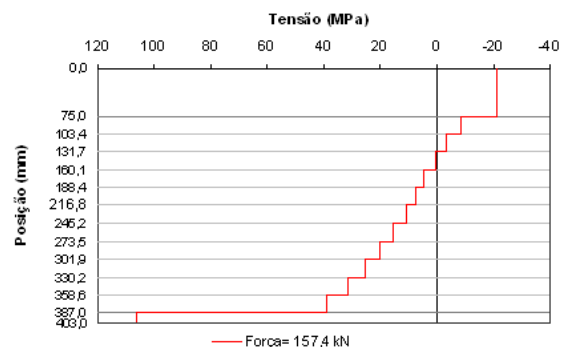


Fig. 16 – Distribuição das tensões na seção transversal central da viga V3, considerando aplicada a força de 157,4 kN (ruptura).

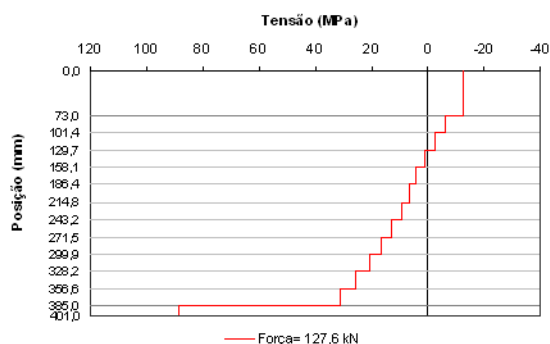


Fig. 17 – Distribuição das tensões na seção transversal central da viga V4, considerando aplicada a força de 127,6 kN (ruptura).

lâminas de madeira de excepcional qualidade, as quais devem ser posicionadas especialmente na face tracionada das vigas de MLC. Pela análise dos gráficos de distribuição de tensões – Fig. 12, 13, 16 e 17 – comprova-se tal afirmação.

Pelo Método da Seção Transformada foram obtidas as rigidezes das vigas mistas V3 e V4 sob o efeito de composição total da seção transversal, isto é, sem a consideração do deslizamento entre a mesa e a alma, designadas por $(EI)_t$ na Tabela 2. Posteriormente foram comparadas com as rigidezes experimentais observadas no nível de carregamento de 40,6 kN. Observa-se que a redução da rigidez experimental foi de aproximadamente 40%.

Tabela 2 – Rigidezes das vigas mistas V3 e V4

Viga	Rigidez total $(EI)_t$ (N.mm ²)	Rigidez experimental $(EI)_{exp}$ (N.mm ²)	$\frac{(EI)_{exp}}{(EI)_t}$
V3	2,1118E+13	1,1796E+13	0,56
V4	2,1338E+13	1,3330E+13	0,62

Na Tabela 3 se apresenta um resumo das rigidezes experimentais verificadas em cada etapa da pesquisa, tomando-se como base a média das rigidezes experimentais das vigas V1 e V2 para estabelecer a comparação.

Na Tabela 4 e Fig. 18 foi estabelecido um comparativo entre o desempenho médio à flexão das vigas V1 e V2 e das vigas mistas V3 e V4, considerando o nível de carregamento de 40,6 kN.

Por envolver o uso de conexões flexíveis,

Tabela 3 – Rigidezes experimentais das vigas

Vigas	Rigidez experimental média $(EI)_{exp,m}$ (N.mm ²)	Diferença (%)
V1 e V2	5,3720E+12	---
V3 e V4	1,2563E+13	134,0

Tabela 4 – Comparativo entre as flechas médias das vigas, no nível de carregamento de 40,6 kN

Viga	Flecha média (mm)	Comparação com a média de V3 e V4 (%)
Vigas V3 e V4	7,2	---
Vigas V1 e V2	16,8	133,3

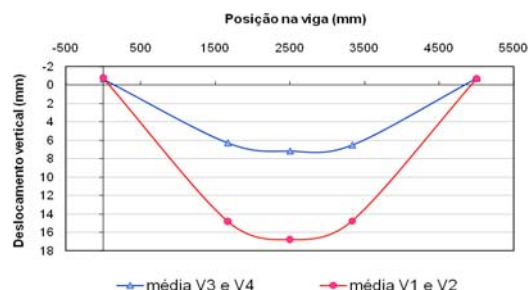


Fig. 18 – Desempenho à flexão das vigas V1 e V2 e das vigas mistas V3 e V4, considerando o nível de força de 40,6 kN.

a rigidez experimental à flexão das vigas mistas de MLC-concreto sofreu redução de aproximadamente 40%, como evidenciado na Tabela 2. Para ilustrar a redução na rigidez das vigas mistas, proporcionadas pela utilização de conexões flexíveis, foram preparados os gráficos mostrados nas Fig. 19 e 20, em que se mostram as flechas correspondentes à essas vigas em três diferentes situações: (a) sob o efeito de *composição total* da seção transversal, ou seja, considerando que não houve escorregamentos entre a mesa de concreto armado e a alma de MLC, sendo as flechas calculadas a partir da rigidez obtida pelo Método da Seção Transformada; (b) *experimentais*, que se encontram sob o efeito de composição parcial; (c) *sem efeito de composição* da seção transversal, em que as flechas foram calculadas como se apenas as almas de MLC fossem responsáveis pelo suporte do conjunto.

Embora os conectores possam ter demonstrado um desempenho dúctil nos ensaios de cisalhamento, em Ceccotti (2002) enfatiza-se que a ductilidade do sistema misto de madeira-concreto não é obrigatoriamente alcançada. Se a rigidez do sistema de conexão é muito elevada, a madeira pode alcançar a ruptura enquanto os conectores ainda estão respondendo elasticamente. Essa explicação ilustra bem as respostas demonstradas nas Fig. 19 e 20.

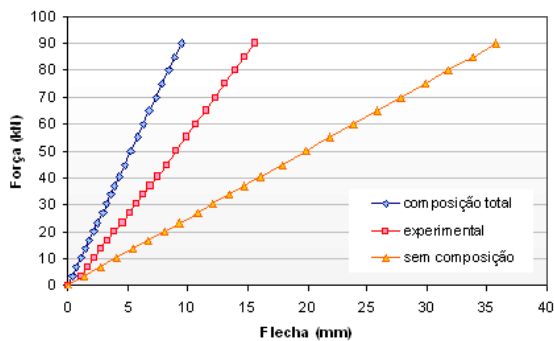


Fig. 19 – Flechas na viga V3 considerando-se os diversos efeitos de composição.

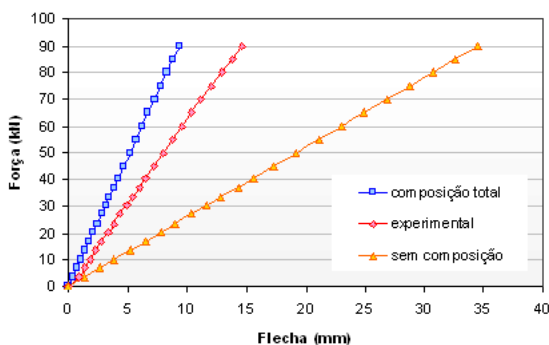
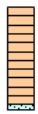
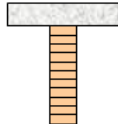


Fig. 20 – Flechas na viga V4 considerando-se os diversos efeitos de composição.

Na Tabela 5 revela-se o comportamento das vigas ensaiadas na ruptura, especificamente por meio dos seus módulos de ruptura (MOR). Relativamente às forças de ruptura das vigas de MLC e das vigas mistas de MLC-concreto, ambas reforçadas com fibras de vidro, observou-se uma menor dispersão dos resultados, quando comparados com vigas semelhantes, mas que não receberam o reforço com fibras de vidro, conforme apresentado em Miotto (2009). Assim, uma das grandes vantagens da aplicação do reforço com fibras de vidro consiste na redução da dispersão dos resultados.

Tabela 5 – Desempenho das vigas ensaiadas na ruptura: MORs.

Tipo de viga	Designação	MOR médio (kN)	Relação com V1 e V2 (%)
	V1 e V2	66,6	---
	V3 e V4	85,3	28,0

5 - CONCLUSÕES

Apesar das expressivas vantagens propiciadas pela MLC, inclusive a possibilidade de utilização de madeiras provenientes de florestas plantadas na sua produção, o avanço de sua aplicação nas construções brasileiras esbarra na falta de divulgação das qualidades e propriedades do material.

Com o propósito de amenizar os problemas de durabilidade, decorrentes da exposição da madeira às intempéries, uma solução pressupõe a associação de vigas de MLC com um tabuleiro de concreto armado, sendo as partes interligadas por meio de conexões flexíveis. Essa técnica tem sido aplicada com sucesso, especialmente por conta do expressivo acréscimo de rigidez proporcionado pela composição e os desejáveis aumentos na durabilidade das estruturas de madeira.

No entanto, em situações de elevados carregamentos ou de grandes vãos, a aplicação de reforço com fibras sintéticas, na face tracionada das vigas de MLC, aprimora ainda mais essa técnica, refletindo-se em acréscimos nas forças de ruptura, mas, sobretudo, na diminuição da dispersão dos resultados, e, por conseguinte, no aumento da confiabilidade estrutural.

Diante desse contexto foi desenvolvido um programa experimental em que se buscou, num primeiro momento, a

caracterização completa dos materiais envolvidos nesta pesquisa. Numa fase seguinte da pesquisa foram confeccionadas quatro vigas de MLC, com dimensões estruturais, por meio da colagem de lâminas de eucalipto (híbrido de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*), com a utilização de adesivo do tipo isocianato. Todas as vigas receberam reforço com fibras de vidro e duas delas receberam uma mesa de concreto armado, com ligação entre os materiais proporcionada por ganchos metálicos fixados em 45° com a direção das fibras da madeira.

Os ensaios com essas vigas revelaram que a adição da mesa de concreto armado proporcionou um aumento médio de 28% no módulo de ruptura. Com a adição da mesa de concreto armado também se testemunhou uma redução média de 57% nas flechas.

Além do acréscimo na resistência, a inserção do reforço com fibras de vidro promove outras vantagens, tais como a redução no nível de tensões de tração das lâminas inferiores da MLC – que se traduz em economia de madeira – e a diminuição na dispersão dos resultados, conferindo maior credibilidade ao sistema.

Por outro lado, observou-se que a rigidez efetiva à flexão das vigas mistas de MLC-concreto foi equivalente a 60% da rigidez das vigas mistas sob o efeito da composição total da seção transversal, em virtude do deslizamento entre a mesa e a alma da seção transversal, permitido pela flexibilidade do sistema de ligação.

Com a divulgação dos resultados desta pesquisa pretende-se, dessa forma, ampliar o repertório de utilização estrutural da madeira de reflorestamento e o reconhecimento de seu potencial.

6 - AGRADECIMENTOS

Os autores expressam sua gratidão ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq – pelo apoio financeiro concedido.

7 - REFERÊNCIAS

- American Society for Testing and Materials. 2005. ASTM D198-05a: Standard tests methods of static tests of lumber in structural sizes, Philadelphia, USA.
- American Society for Testing and Materials. 2006. ASTM D 3039/D 3039M: Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials, Philadelphia, USA.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2003. NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova, Rio de Janeiro, Brasil.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1994. NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos, Rio de Janeiro, Brasil.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1997. NBR 7190: Projeto de Estruturas de Madeira, Rio de Janeiro, Brasil.
- 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, Brasil.
- Brody, J. et al. 2000. FRP-wood-concrete composite bridge girders, Proceedings of Structures Congress 2000 – Advanced Technology in Structural Engineering, Philadelphia, USA, Section 53, chapter 1.
- Ceccotti, A. 2002. Composite concrete-timber structures, Progress in Structural Engineering and Materials, v.4, p.264-275.
- Dagher, H.J. 1999. FRP-reinforced wood in bridge applications, Proceedings of 1st RILEM Symposium Timber Engineering, Stockholm, Sweden, p.591-598.
- Dagher, H.J. 2000. High-performance wood composites for construction, Anais do VII Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas de Madeira, São Carlos, Brasil. CD-ROM.
- Davids, W.G. 2001. Nonlinear analysis of FRP-glulam-concrete beams with partial composite action, Journal of Structural Engineering, ASCE, 127 (8), p.967-971.
- Frangi, A. e Fontana, M. 2003. Elasto-plastic model for timber-concrete composite beams with ductile connection, Structural Engineering International, Science and Technology, v.1, p.47-57.

- Lindyberg, R.F. 2001. The volume effect in FRP-glulams, Proceedings of 2nd International Conference on Advanced Engineered Wood Composites, Bethel, USA.
- Mantilla Carrasco, E.V. et al. 2004. Viga mista de madeira laminada colada de *Eucalyptus Grandis* e concreto armado – uma avaliação experimental e numérica, Anais do IX Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, Cuiabá, Brasil. CD-ROM.
- Miotto, J.L. 2009. Estruturas mistas de madeira-concreto: avaliação das vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibras de vidro, 325p., Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- Pigozzo, J.C. 2004. Estudos e aplicações de barras de aço coladas como conectores em lajes mistas de madeira e concreto para tabuleiros de pontes, 358p., Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- Triantafillou, T.C. e Deskovic, N. 1992. Prestressed FRP sheets as external reinforcement of wood members, Journal of Structural Engineering, ASCE, 118 (5), p.1270-1284.
- Weaver, C.A. 2002. Behavior of FRP-reinforced glulam-concrete composite bridge girders, 236p., Dissertation of Master of Science in Civil Engineering, The University of Maine.