



ANÁLISE EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE VIGAS LAMINADAS HÍBRIDAS MADEIRA/PLÁSTICO REFORÇADO

José Carlos Balthazar

Flamínio Levy Neto

Cláudia Tomás Pereira

Departamento de Engenharia Mecânica

UnB / FT / ENM

70.910-900 Brasília – DF

Resumo. Neste trabalho foi analisado o comportamento mecânico de vigas laminadas híbridas com camadas mogno e tecido de fibra de vidro-E impregnado com resina epóxi, fabricadas especialmente para este propósito. Para fins de comparação, também foram testadas à flexão vigas de: (i) mogno maciço; (ii) lâminas de mogno superpostas e coladas; (iii) madeira compensada; e (iv) híbrido de compensado e camadas de vidro-E/ epóxi. Os resultados, principalmente os referentes às vigas híbridas, apresentaram boa repetibilidade, e indicaram que ganhos de rigidez e resistência mecânica podem ser obtidos com o uso de vigas híbridas.

Palavras-chave: Vigas híbridas madeira/compósito, Ensaios destrutivos de flexão.

1. INTRODUÇÃO

Em décadas recentes, dois fenômenos dignos de nota vem ocorrendo no âmbito dos materiais estruturais: (i) uma acentuada escassez, e grande elevação nos preços, das madeiras estruturais nobres, em virtude da destruição indiscriminada de suas florestas nativas (Sun and Hawke, 1996); e (ii) a consagração, em vários ramos da engenharia, dos compósitos de material plástico reforçado com fibras sintéticas (i.e. vidro, carbono e aramida) de elevados índices de resistência e rigidez por unidade de peso (Gibson, 1994). Paralelamente a estes fatos, a demanda por novos materiais de baixo custo e alto desempenho estrutural continua a crescer. Neste contexto, um material com grande potencial para bem atender aos requisitos em pauta são os Híbridos de Madeira e Plástico Reforçado (HMPR), na forma de vigas e placas laminadas.

A alta resistência específica e o razoável custo, comparado a outras alternativas, sempre foram o maior atrativo para o uso de madeira laminada na construção civil, por exemplo em pontes e edificações. O fato de laminados de alta qualidade requererem madeiras de melhor qualidade, normalmente retiradas de florestas antigas, em muito tem encarecido esse material. Com isso, surgiram recentemente nos Estados Unidos os HMPR, que consistem basicamente na colagem de laminados de plásticos reforçados por fibras contínuas entre as lâminas de madeira, usando adesivos convencionais existentes no mercado (Sun and

Hawke, 1996). A adoção de HMPR poderá eventualmente proporcionar também economias de custo e peso.

Atualmente este tipo de material tem sido usado em componentes sujeitos a cargas de flexão como em pontes. Estima-se que em muitos casos ele substitua com vantagem vigas de aço e outros componentes estruturais metálicos (Leichiti et. all, 1990).

Este trabalho é uma investigação experimental sobre o comportamento mecânico de vigas laminadas híbridas de madeira / plástico reforçado por fibras de vidro, submetidas a cargas estáticas de flexão.

O mogno foi inicialmente escolhido para a confecção da maioria dos cdps por ser uma madeira de características mecânicas relativamente homogêneas. Esta madeira é de alta estabilidade dimensional, fato explicado pela sua baixa anisotropia e reduzidos valores de contrações tangencial, radial, longitudinal e volumétrica (Melo e Carvalho, 1989). Quanto à escolha da fibra de vidro para reforço, a razão primordial foi o baixo custo, relativamente às outras fibras, e a sua disponibilidade no Brasil.

2. Vigas Laminadas Híbridas

A superposição das partes do sanduíche da viga híbrida de madeira laminada permite reunir, em um mesmo material, camadas de diferentes propriedades com a vantagem da possibilidade de posicionar os materiais conforme se convenha, levando em conta suas características e as solicitações impostas. Um dos atrativos das vigas sanduíche híbridas são os efeitos sinérgicos que podem advir em muitos casos. Naturalmente, são várias as combinações possíveis.

Um exemplo desse tipo de estrutura pode ser a madeira compensada moldada, em cuja produção lâminas de madeira revestidas de resina são coladas, ainda úmidas, sobre um molde, até que se obtenha a espessura desejada, seguindo-se então a consolidação em uma bolsa de vácuo. O conjunto é, então, introduzido em uma autoclave e curado, para que se obtenha um produto de madeira aglutinada sólida.

A madeira laminada e colada é um produto estrutural, formado por associação de lâminas de madeira selecionadas, coladas com adesivos. As fibras das lâminas são, via de regra, orientadas na direção longitudinal da viga, e as lâminas podem ser normalmente emendadas formando peças de grande comprimento.

Os tipos de adesivo e as técnicas de colagem são essenciais à durabilidade do produto. Para vigas sujeitas à variação de umidade ou expostas ao tempo, usam-se adesivos sintéticos, de fenol-formaldeído, ou resorcinol-formaldeído (Leichti, 1989). Os produtos estruturais industrializados são normalmente fabricados com adesivos sintéticos. A colagem é feita sob pressão.

Antes da colagem as lâminas sofrem um processo de secagem em estufa, que dura de um a vários dias, conforme o grau de umidade inicial. A madeira sai da estufa com uma umidade de cerca de 12%. As especificações limitam a variação do grau de umidade das lâminas entre si, não devendo ultrapassar 5% na ocasião da colagem, a fim de se melhor controlar as tensões internas devidas à retração diferencial.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os ensaios foram realizados em uma máquina universal de ensaios Instron do Laboratório de Produtos Florestais do IBAMA/DF, utilizando-se corpos de prova (cdps) fabricados na Oficina de Maquetes e Protótipos do Instituto de Artes (IdA) da Universidade de Brasília, conforme descreve-se a seguir.

• Madeira Maciça (MM)

Vigas de seção retangular ($b \times t$), conforme ilustra-se na Figura 1, com comprimento L_{viga} , na direção longitudinal da viga, x , sendo suas dimensões nominais 50x50x1200 mm. Em todos os corpos de prova utilizou-se madeira mogno, adquiridos no mercado.

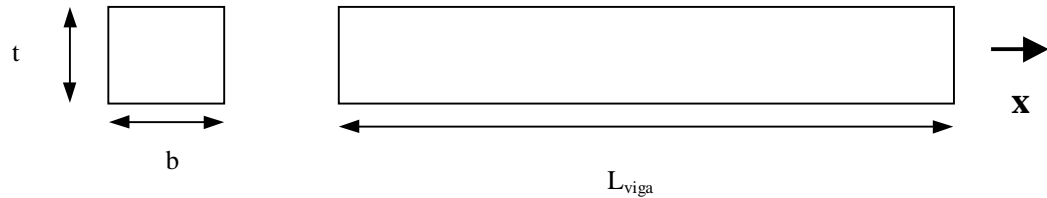


Figura 1: Corpo de prova de madeira maciça.

• Madeira Laminada (ML)

Foram utilizadas lâminas de mogno de espessuras individuais $t_j = 5$ mm, com largura b e comprimento L_{viga} . Cada viga se compõe de 9 camadas de madeira. As lâminas foram coladas com adesivo Araldite, o qual, basicamente é uma resina do tipo epóxi de cura a frio ($\approx 20^\circ\text{C}$). Suas dimensões nominais finais são próximas das vigas de mogno maciço.

• Madeira Laminada Híbrida (HMPR).

Cada viga se compõe de 9 lâminas de mogno, tais como no caso anterior (ML), e duas de laminado de plástico reforçado com 4 camadas de tecido balanceado de fibra de vidro tipo E ($t_j = 1,10\text{mm}$), de gramatura 200 g/m^2 , formando um laminado simétrico, conforme mostra-se na Figura 2. Os tecidos foram impregnados com o mesmo adesivo (Araldite) utilizado na colagem do mogno. Durante a cura da resina, as vigas permaneceram em uma prensa por cerca de 72 horas.

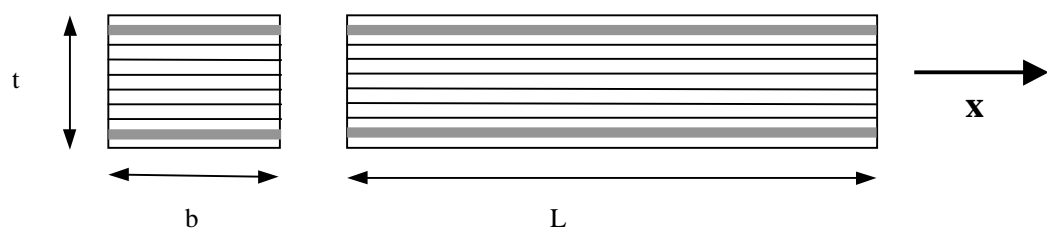


Figura 2: Corpo de prova de madeira laminada híbrida (HMPR).

As dimensões b , t e L_{viga} , e os pesos de cada cdp, encontram-se nas Tabelas 1 a 3. Adicionalmente às vigas MM, ML, e HMPR, também foram fabricadas, no CTA/IAE/MAC, 10 vigas sanduíche de madeira compensada revestidas com lâminas de tecido de fibra de vidro/epóxi ($t_j = 0,9\text{mm}$), ou seja, Compensados Híbridos (CH), com dimensões nominais: $t = 36$ mm, $b = 17$ mm, e $L = 300$ mm, utilizando-se saco de vácuo. Nas vigas de HMPR as camadas de vidro/epóxi foram a segunda e a penúltima (vide Fig. 2), e, nas vigas CH a primeira e a última (i.e. revestimentos superior e inferior). Para fins de comparação, também foram preparadas 10 vigas de Compensado Puro (CP), com as mesmas dimensões nominais que as de CH. Mais detalhes sobre o processo de fabricação e as características de todas as vigas testadas encontram-se no trabalho de Pereira (1999). Após os

procedimentos detalhados em Pereira (1999), obteve-se os seguintes valores aproximados médios de porcentagem de fibra e resina dos cdps HMPR (vide Tabela 4).

Tabela 1 - Características das vigas de mogno maciço.

Corpo de Prova	Largura (b) (mm)	Altura (t) (mm)	Comprimento (L_{viga}) (mm)	Momento de Inércia (I) (10^5 mm^4)	Peso (P_h) (kg)
MM01	49,5	49,6	1249	5,033	1,873
MM02	49,4	49,5	1250	4,993	1,867
MM03	49,5	49,6	1250	5,033	1,870
MM04	49,5	49,6	1247	5,033	1,870
MM05	49,4	49,4	1250	4,963	1,866
MM06	49,5	49,6	1250	5,033	1,874
MM07	49,6	49,7	1245	5,074	1,880
MM08	49,2	49,5	1248	4,973	1,870
MM09	49,8	49,7	1248	5,095	1,886
MM10	49,5	49,4	1248	4,973	1,863

Tabela 2 – Características das vigas de mogno laminado (ML).

Corpo de Prova	Largura (b) (mm)	Altura (t) (mm)	Comprimento (L_{viga}) (mm)	Momento de Inércia (I) (10^5 mm^4)	Peso (P_h) (kg)
ML01	46,0	46,0	1200	3,750	1,472
ML02	44,1	46,1	1200	3,600	1,413
ML03	44,1	47,3	1205	3,889	1,430
ML04	43,9	47,0	1200	3,798	1,432
ML05	44,4	48,2	1200	4,143	1,437
ML06	44,3	47,7	1200	4,007	1,420
ML07	44,0	47,0	1200	3,807	1,388
ML08	44,0	47,0	1205	3,807	1,394
ML09	43,9	46,0	1200	3,561	1,358
ML10	44,4	46,9	1205	3,871	1,400

Tabela 3 – Características das vigas híbridas (HMPR).

Corpo de Prova	Largura (b) (mm)	Altura (h) (mm)	Comprimento (L_{viga}) (mm)	Momento de Inércia (I) (10^5 mm^4)	Peso (P_h) (kg)
HMPR01	44,6	48,9	1200	4,346	1,651
HMPR02	44,4	48,6	1205	4,247	1,636
HMPR03	44,4	48,9	1200	4,326	1,643
HMPR04	44,6	49,3	1210	4,453	1,678
HMPR05	44,5	48,7	1205	4,283	1,647
HMPR06	44,7	49,3	1210	4,463	1,680
HMPR07	44,5	47,6	1200	4,000	1,600
HMPR08	44,0	48,0	1200	4,055	1,595
HMPR09	44,1	50,3	1205	4,677	1,687
HMPR10	44,6	50,2	1205	4,702	1,609

Tabela 4 – Porcentagens médias de fibra e resina nos cdps tipo HMPR.

	Fibra	Resina
% em massa	73%	27%
% em volume	57,5%	42,5%

Após a fabricação, os cdps sofreram ensaios destrutivos. Os testes consistiram na solicitação estática de cdps simplesmente apoiados nas extremidades a cargas crescentes de flexão, aplicadas em 1 ou 2 pontos, sendo a velocidade do cabeçote da máquina fixa em 2,5 mm/min de maneira que se tinha uma taxa de deflexão constante das vigas, conforme mostra-se nas Figuras 3 e 4, respectivamente.

A leitura de deflexão, δ , era feita por um deflectômetro, localizado estrategicamente no centro do vão (vão de 1140mm), cujo sinal era registrado constantemente pela máquina, a qual também controlava a aplicação da força, medida por uma célula de carga, mantendo a taxa de deflexão constante.

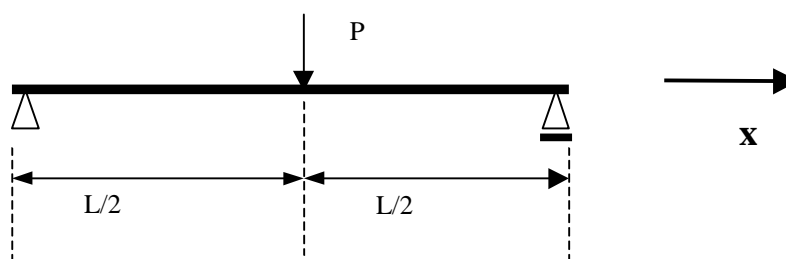


Figura 3 - Viga carregada em flexão de três pontos.

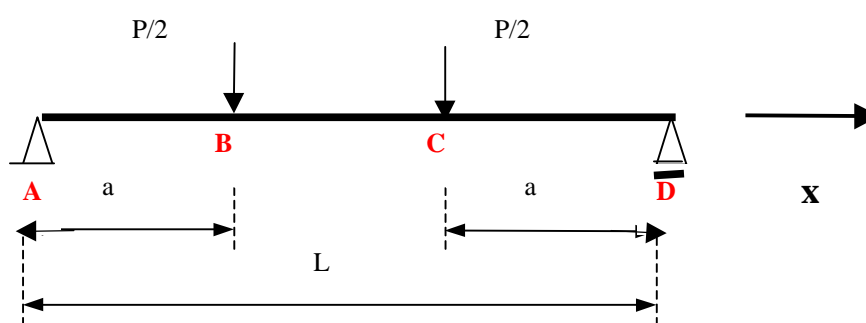


Figura 4 – Viga carregada em flexão de quatro pontos.

4. ANÁLISE DAS VIGAS SUBMETIDAS FLEXÃO.

Apresenta-se a seguir a análise aproximada das vigas, segundo a teoria de flexão de Euler Bernoulli (Gibson, 1994), que será feita levando-se em conta os resultados obtidos durante os ensaios dos corpos de prova.

Para flexão em 3 pontos, o Módulo de Elasticidade aparente (E) será (Beer and Johnston, 1985):

$$E = \frac{PL^3}{48\delta_{\max} I} \quad (1)$$

onde δ_{\max} é a deflexão máxima, $I = (bt^3) / 12$, é o momento de inércia da área da seção transversal, e o momento fletor máximo é dado por $M_{\max} = \frac{PL}{4}$, sendo a tensão máxima:

$$\sigma_{\max} = \frac{\pm M_{\max} \frac{t}{2}}{I} \quad (2)$$

Então, substituindo-se M_{\max} em (2), tem-se que:

$$\sigma_{\max} = \frac{PLt}{8I} \quad (3)$$

Para flexão em 4 pontos o Módulo de Elasticidade aparente (E) será (Beer and Johnston, 1985):

$$E = \frac{Pa}{24\delta_{\max} I} (3L^2 - 4a^2) \quad (4)$$

onde o momento fletor máximo é dado por: $M_{\max} = \frac{Pa}{2}$, como nos ensaios efetuados adotou-se $a = \frac{L}{3}$, neste caso, obtém-se:

$$\sigma_{\max} = \frac{PL}{bt^2} \quad (5)$$

Por serem as vigas híbridas não isotrópicas, não é possível fazer sua análise utilizando as equações (1), (2), (3), (4) e (5). Com isso foi utilizada a Teoria Clássica de Laminação pela qual tem-se que substituir o Módulo de Elasticidade aparente, E, pelo Módulo de Elasticidade de Flexão Efetivo (E_{ef}), conforme o caso (i.e. flexão em 3 ou 4 pontos), para uma viga simétrica em relação ao plano médio, de N camadas, cuja configuração é dada pela Figura 2 (Gibson, 1994):

$$E_{ef} = \frac{8}{t^3} \sum_{j=1}^{\frac{N}{2}} (E_x)_j (z_j^3 - z_{j-1}^3) \quad (6)$$

Onde: j: número da camada j ($1 \leq j \leq N$);

N: número total de camadas;

z_j : distância que localiza o início/fim de uma camada j até a linha de simetria da viga;

$(E_x)_j$: módulo de elasticidade da camada j;

E_{ef} : Módulo de Elasticidade efetivo;

t: espessura total da viga

E a expressão que dá a tensão na j-ésima camada é dada por:

$$(\sigma_x)_j = \frac{Mz}{I} \left[\frac{(E_x)_j}{E_{ef}} \right] \quad (7)$$

Onde: z: distância do início/fim de uma camada até a linha de simetria da viga;
 $(E_x)_j$: módulo de elasticidade da camada j;
 I: momento de inércia da viga;
 M: momento fletor.

Para calcular-se as cargas de ruptura teóricas das vigas híbridas (HMPR e CH) utilizou-se o critério de falha de Tsai-Hill, o qual é de boa aceitação para estimar-se o limiar da ruptura de lâminas de fibra de vidro/epóxi (Gibson, 1994). O limiar de falha é dado pela equação quadrática (8), na qual σ_1 e σ_2 são tensões normais atuantes nas direções longitudinal (1) e transversal (2) às fibras, e τ_{12} as tensões de cisalhamento no plano das lâminas. Nos denominadores encontram-se as tensões de ruptura a tração ou compressão, nas direções 1 (X) e 2 (Y), bem como a resistência ao cisalhamento S, conforme a legenda da equação (8).

$$\left(\frac{\sigma_1}{X} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_1 \sigma_2}{X^2} \right) + \left(\frac{\sigma_2}{Y} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}} \right)^2 = 1 \quad (8)$$

Onde:

X : é a resistência a tração ou compressão (dependendo do sinal de σ_1) na direção 1;
 Y : é a resistência a tração ou compressão (dependendo do sinal de σ_2) na direção 2; e
 S: é a resistência ao cisalhamento no plano 1 e 2.

As direções da urdidura (1) a da trama (2) dos tecidos de fibra de vidro utilizados nas vigas de HMPR e CH foram orientados longitudinal ($1 \equiv x$) e transversalmente às vigas, respectivamente (i.e. a 0° e 90° , em relação ao eixo x indicado na Figs. 2, 3 e 4).

5. RESULTADOS OBTIDOS

Para cada tipo de ensaio (flexão em 3 ou 4 pontos) e material empregado (MM, ML, HMPR, CH, e CP), foram testadas, no mínimo, 5 réplicas de cada cdp. A partir dos resultados foram obtidos os valores de P_{max} , M_{max} , e δ_{max} , bem como os limites de carregamento e deflexão nos quais o diagrama $P \times \delta$ permaneceu linear, ou seja, P_{lin} e δ_{lin} . Utilizando-se as equações (1) a (5) para as vigas de Mogno Maciço (MM), Mogno Laminado (ML) e Compensado Puro (CP) pode-se calcular os valores aproximados de E e σ_{max} . Para a estimativa de E foram utilizados P_{lin} e δ_{lin} . Para as vigas híbridas HMPR e CH, reforçadas com fibras de vidro, os cálculos de $E = E_{ef}$ e σ_{max} basearam-se nas equações (6) e (7). Ao se utilizar a equação (6), conforme descrito em Pereira (1999), necessitou-se dos Módulos de Elasticidade longitudinais do mogno, $E_1 = 13.5$ GPa (Weidmann et. al, 1990), e do laminado vidro/epóxi $E_1 = 23.7$ GPa (Levy Neto, 1991), os quais foram obtidos da literatura. Estes resultados, bem como os valores das densidades dos materiais (Pereira, 1999), encontram-se na Tabela 5. Deve-se ressaltar então que os resultados de E e σ_{max} dos casos 1, 2, 4, 6, e 7 da

Tabela 5 referem-se a cálculos baseados exclusivamente em resultados experimentais, ao passo que os dos casos 3, 5, e 8 (vigas híbridas) foram influenciados por grandezas obtidos na literatura (Pereira, 1999).

Utilizando-se o programa LAMINA (Levy Neto, 1991; Levy Neto and Lorenzini, 1998), o qual tem incorporado o critério de Tsai-Hill, expresso pela equação (8), foram calculadas a cargas de falha teóricas, P_{max} , das vigas de HMPR. Nestes cálculos obteve-se o limiar da carga de falha da primeira camada, P_{max1} , associada com a resistência à compressão das camadas superiores da viga, e a carga de falha da segunda camada, P_{max2} , associada à resistência à tração das camadas inferiores. $P_{max2} > P_{max1}$ é obtida através do programa LAMINA, incrementando-se o valor da carga P (vide Figs. 3 e 4) após a ocorrência de P_{max1} . Como a falha é controlada pelo momento fletor, a máxima tensão normal de compressão ocorre na região superior da viga, e a máxima de tração na inferior. Adicionalmente, foram também registrados os valores das cargas experimentais de falha, P_{exp} , conforme mostra-se na Tabela 6.

Tabela 5 Médias dos Resultados Obtidos

Caso	Material da Viga	Tipo de Flexão	E	σ_{max}	Densidade
			(GPa)	(MPa)	(kg/m ³)
1	MM	3 ptos	8,39	74,96	610,58
2	ML	3 ptos	8,71	81,77	559,45
3	HMPR	3 ptos	14,3	111,66	630,70
4	CP	3 ptos	2,76	51,18	512,03
5	CH	3 ptos	9,98	133,02	608,44
6	MM	4 ptos	8,67	70,03	610,58
7	ML	4 ptos	8,18	81,19	559,45
8	HMPR	4 ptos	14,3	99,62	630,70

Tabela 6 Resultados Teóricos e Experimentais de P_{max} para as Vigas de HMPR.

Tipo de Flexão	P_{max1}	P_{max2}	P_{exp}
	N	N	N
3 ptos	3047	5962	5223
4 ptos	4618	9035	7133

O valor de P_{max1} (i.e. falha da primeira camada da viga) refere-se ao limiar da carga P que provoca falha na região comprimida da viga, e $P_{max2} > P_{max1}$ (falha da segunda camada) refere-se à carga na qual inicia-se a falha na região tracionada. Neste estudo, $P_{max2} > P_{max1}$ em virtude das resistências à tração da madeira e do vidro/epóxi serem superiores às respectivas resistências à compressão.

Na grande maioria dos ensaios realizados, visualmente, o início do processo catastrófico da falha estrutural ocorreu nas regiões tracionadas das vigas. Nas regiões

comprimidas, durante o início da falha, os materiais das vigas devem ter sofrido apenas uma degradação de suas propriedades mecânicas. A falha final, na região tracionada, deu-se então após um processo progressivo de degradação iniciado na região comprimida. Esta observação é sustentada pelo fato dos diagramas carga x deflexão, em praticamente todos os testes, terem seguido uma trajetória distinta do trecho linear inicial, após a carga aplicada ter ultrapassado cerca 50% carga de ruptura final.

6. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

Analisando-se os resultados da Tabela 5 nota-se que todos os materiais ensaiados são extremamente leves em relação a ligas metálicas como o alumínio e o aço. Em termos quantitativos, possuem cerca de $\frac{1}{4}$ da densidade do alumínio e $\frac{1}{12}$ da do aço. Dentre os materiais ensaiados, o que apresentou o maior Módulo de Elasticidade aparente foi o HMPR, e, em função do mesmo ainda possuir uma baixa densidade em relação aos metais estruturais, seu módulo de elasticidade específico (i.e. rigidez / peso) aproxima-se do das ligas de aço e alumínio.

Quanto ao material que suportou a maior tensão normal devido à flexão, no instante da falha estrutural, conforme mostra-se na Tabela 5, foi o CH. Tal fato é coerente, já que nas vigas sanduíche de CH as camadas de vidro/epóxi (de Módulo de Elasticidade ao compensado de madeira) foram localizadas nas superfícies externas superior e inferior (i.e. na primeira e na última camada). Adicionalmente, no CH a soma das espessuras das camadas de vidro/epóxi (material de resistência mecânica bem superior às madeiras utilizadas) totalizou cerca de 5% da espessura total, ao passo que no HMPR totalizou apenas 2,2%. No que tange aos valores numéricos absolutos das tensões máximas, nota-se que os mesmos são modestos. Entretanto, se forem calculados os valores específicos correspondentes (i.e. resistência / peso), estes se mostrarão próximos dos de algumas ligas de aço e alumínio.

Finalmente, deve-se ressaltar que os valores das cargas de falha experimentais mostradas na Tabela 6 foram intermediários entre as previsões teóricas de P_{max1} e P_{max2} , sugerindo que as previsões teóricas foram consistentes, e que o mecanismo de falha das vigas híbridas foi um processo progressivo que envolveu, inicialmente, a degradação da madeira na região comprimida da viga. Neste particular, entretanto, um maior esforço em termos de trabalhos experimentais e teóricos adicionais faz-se necessário para maiores esclarecimentos.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelo financiamento da presente pesquisa, através do Processo 520138/95-3(NV); ao IBAMA, em particular ao Pesq. Dr. Mário Rabello, ao Pesq. M.Sc. Júlio Eustáquio de Melo, e ao Sr. Mário Siqueira, pela realização dos ensaios; e ao CTA/IAE/MAC, em particular ao Pesq. M.Sc. Adriano Gonçalves, pela confecção dos cdps híbridos de vidro/epóxi e madeira compensada.

REFERÊNCIAS

- Beer, F. P. and Jonhston, E. R. Jr., Resistência dos Materiais, McGraw-Hill, São Paulo, 1985
- Gibson, R. F. 1994, Principles of Composite Material Mechanics, McGraw-Hill, Michigan.
- Leichti, R. J., Falk, R.H. and Laufenberg, T.L., 1990, Prefabricated Wood Composite I-Beams: A Literature Review, Wood and Fiber Science, pp. 62 – 79.

- Levy Neto, F., 1991, The Behaviour of Externally Pressured Composite Domes, Ph. D. Dissertation Thesis, University of Liverpool, 1991
- Levy Neto, F. and Lorenzini, G.B., 1998, Theoretical Results on the Behavior of Wood/FRP Composite Beams Under Three Point Bending Loads, Second International Symposium on Natural Polymers and Composites, ISNaPol/98, Atibaia, pp. 107 – 110.
- Melo, J. E., Carvalho, G. M. e Martins, V. A., 1989, Espécies de Madeiras Substitutas do Mogno. – LPF/ IBAMA.
- Pereira, C.T., 1999, Análise Experimental do Comportamento Mecânico de Vigas Laminadas Híbridas Madeira / Plástico Reforçado, Trabalho de Graduação, UnB
- Sun, B.C. and Hawke, R.N., 1996, Flexural Strengths of Performance-Design Wood Fiber Composites, Journal of Advanced Materials, april/96, pp. 45 - 50
- Weidmann, G., Lewis, P. and Reid, N., 1990, Structural Materials, Butterworths, London

Abstract. The main objectives of this work were to manufacture and to do bending tests in hybrid laminated beams with layers of mahogany and fabrics of E-glass fibers impregnated with epoxy resin. In addition, for the purpose of comparison, beams of: (i) solid mahogany ; (ii) glued laminated mahogany; (iii) plywood; and hybrid E-glass/epoxy and compensated wood. The results, mainly those concerned with the hybrid beams, presented good repeatability, and indicated the improvements in stiffness and mechanical strength can be obtained with the use of hybrid wood reinforced plastic beams.

Key words: Composite laminated beams, destructive bending tests.