



SET
04
09
02

XXX JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL

27 a 31 de Maio de 2002

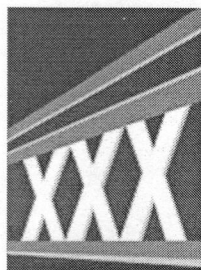
Brasília, DF, Brasil

ANAIS COM OS ARTIGOS COMPLETOS

Editores: Guilherme Sales S. de A. Melo
Luciano Mendes Bezerra

Programa de Pós Graduação em Estruturas e Construção Civil
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental
Universidade de Brasília – UnB

Associação Sulamericana de Engenharia Estrutural



27 a 31 de Maio de 2002 – Universidade de Brasília – UnB
Brasília, DF – Brasil

Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural

AValiação DO DESEMPENHO ESTRUTURAL DE VIGAS DE MADEIRA REFORÇADAS COM FIBRAS DE CARBONO E COM FIBRAS DE VIDRO

Juliano Fiorelli ⁽¹⁾; Antonio Alves Dias ⁽²⁾

F518a

(1) Aluno de mestrado Escola de Engenharia de São Carlos EESC USP, e-mail: fiorelli@sc.usp.br

(2) Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas SET EESC USP, e-mail: dias@sc.usp.br

RESUMO

A construção civil constantemente se depara com problemas relacionadas à deficiência de elementos estruturais, devido ao aumento de sobrecarga ou degradação por envelhecimento. Este cenário vem motivando o desenvolvimento de novas técnicas de reforço e recuperação de estruturas de madeira. Recentemente, novos materiais vêm sendo estudados para desempenhar esta função. Dentre eles, pode-se destacar as FRP – Fibras Reforçadas com Polímeros, as quais possuem alta resistência e alto módulo de elasticidade, quando comparadas com a madeira. Destas fibras as que vem apresentando melhores resultados no reforço e recuperação de estruturas de madeira são as fibras de vidro e as fibras de carbono. Este trabalho apresenta uma análise teórica e experimental de vigas estruturais de madeira da espécie *Pinus caribea var hondurensis*, reforçadas com fibra de vidro e com fibra de carbono. As vigas avaliadas experimentalmente, através de ensaios de flexão, foram reforçadas na parte inferior. O modelo teórico utilizado para o cálculo do momento resistente da viga considera os estados limites de ruptura por tração da madeira nas fibras inferiores, ou ruptura por compressão na madeira, após esmagamento na face superior. Os resultados obtidos indicam a validade do modelo teórico quando comparado com os resultados obtidos experimentalmente e a eficiência do reforço com fibra é constatada pelo aumento da resistência e da rigidez das vigas de madeira reforçadas.

1262068

200902

SYSNO	1262068
PROD	002968
ACERVO EESC	



1- Introdução

Problemas relacionados à baixa eficiência de elementos estruturais, aumento de sobrecarga e degradação por envelhecimento existem com bastante frequência na construção civil. Estas patologias vêm motivando o desenvolvimento de novas técnicas de reforço e recuperação para estruturas. O objetivo principal da recuperação não é simplesmente reparar, mas também prevenir e reduzir o aparecimento de futuros problemas. Existem situações em que as estruturas de madeira precisam ser reparadas, tornando-as novamente apta ao uso e outros casos em que é necessário a execução de reforço para obter um aumento na capacidade de carga do elemento estrutural.

Recentemente, materiais alternativos vêm sendo estudados para recuperar e reforçar estruturas. Uma maior atenção vem sendo dada para o uso de fibras reforçadas com polímeros (FRP). As fibras que vêm apresentando melhores resultados para reforçar e recuperar estruturas são: fibra de vidro, Kevlar 49 (aramid) e fibra de carbono. Novos estudos estão sendo conduzidos com estes materiais, objetivando a sua utilização em maior escala em toda a construção civil.

2- Fibras reforçadas com polímeros (FRP)

Por apresentar alta resistência, baixo peso e facilidade em associar a outros materiais as fibras reforçadas com polímeros (FRP) vêm sendo utilizadas nas indústrias aeroespaciais, automotivas e de equipamentos esportivos nos últimos cinquenta anos.

Atuando como reforço de elementos estruturais são os tecidos unidirecionais de fibra de vidro e de fibra de carbono que vêm demonstrando melhor eficiência no desempenho destas funções, devido às ótimas propriedades mecânicas destes materiais. No entanto, especialmente para estruturas de madeira, são as fibras de vidro, que apresentam melhor relação custo benefício, para atuar como reforço. A figura 01 ilustra os tecidos unidirecionais de fibra de vidro e de fibra de carbono.

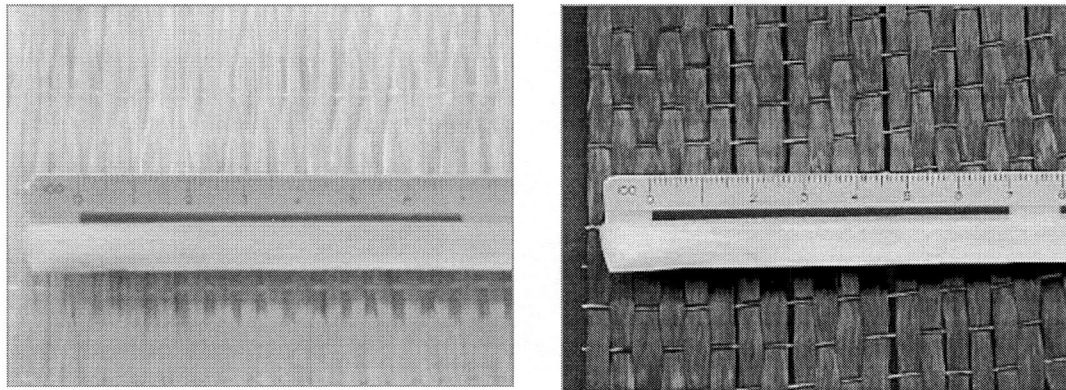


Figura 01: Tecido de fibra de vidro e de fibra de carbono

O emprego das FRP deve ser feito em conjunto com algum tipo de adesivo, formando, a partir da combinação de dois materiais, um compósito com propriedades superiores às destes materiais. As fibras são responsáveis pela resistência do compósito, e o adesivo as une, sendo responsável pela transmissão dos esforços entre as fibras e o material reforçado. Entre os adesivos mais utilizados na laminação destes tecidos podem ser destacadas as resinas a base de epóxi, poliéster e vinil.

A tabela a seguir apresenta as propriedades mecânicas de resistência e módulo de elasticidade dos tecidos unidirecionais de fibra de vidro e de fibra de carbono, obtidas em ensaios de caracterização feitos pelos autores.

**Tabela 01: Valores de resistência e rigidez**

Fibra unidirecional	Características		
	Resistência a Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Densidade (g/cm ³)
Vidro	1100	70.000	2,55
Carbono	2200	180.000	1,75

3- Modelo teórico

O desenvolvimento de um modelo de cálculo que determine o valor do momento máximo resistido por vigas de madeira reforçadas com fibras é de fundamental importância para a utilização correta e segura do material em reforço e recuperação de estruturas e também para ampliar seu uso na construção civil.

A norma NBR 7190/97 - Projeto de Estruturas de Madeira [1] está baseada no Método dos Estados Limites para verificação da segurança estrutural. Para o caso específico das vigas reforçadas com fibras, os seguintes estados limites devem ser verificados:

- estado limite de utilização, referente ao deslocamento vertical (flecha) máximo;
- estado limite último referente às tensões normais devidas ao momento fletor;
- estado limite último referente às tensões tangenciais devidas ao esforço cortante.

Para a verificação do estado limite de utilização, os deslocamentos verticais serão determinados a partir da rigidez à flexão avaliada segundo um modelo elástico linear de cálculo (método da seção transformada).

Para a determinação do momento fletor último será utilizado um modelo teórico que considera comportamento elasto-plástico para a madeira solicitada à compressão, e comportamento elasto-frágil para a madeira tracionada e para a fibra de reforço. Na avaliação da resistência quanto ao esforço cortante, será desprezada a contribuição da fibra, considerando-se a peça de madeira como sendo responsável pela absorção total deste esforço.

3.1 Avaliação da rigidez de vigas reforçadas com fibras

A avaliação teórica da rigidez de vigas de madeira constituiu em avaliar vigas com seção retangular (b x h) reforçadas com fibra. As vigas de madeira, sem reforço, apresentam momento de inércia (I) igual a:

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (1)$$

As vigas reforçadas serão analisadas de acordo com a teoria clássica da flexão, que considera os alongamentos e encurtamentos das fibras longitudinais proporcionais às suas distâncias ao eixo neutro. Para este tipo de viga, constituída por dois materiais diferentes basta determinar a seção equivalente da viga idealizada constituída por apenas um dos materiais. A seção retangular mostrada na figura 02 (a), constituída por madeira (material 1) e fibra (material 2) ilustra este modelo. Para o reforço de fibra será estabelecida largura igual à da viga de madeira e espessura “e”.

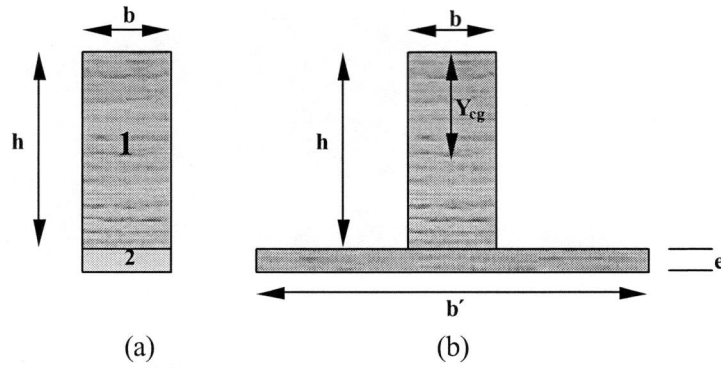


Figura 02: Viga constituída por dois materiais diferentes (a) e seção equivalente (b)

A seção transversal equivalente, apresentada na figura 2 (b), é considerada como sendo constituída apenas pelo material 1. A largura b' é determinada pelo produto da relação dos módulos de elasticidade da fibra (E_2) e da madeira (E_1) pela largura b .

$$b' = b \cdot \frac{E_2}{E_1} \quad (2)$$

Para a seção equivalente, foi determinada a posição do centro de gravidade da peça (y_{cg}), cotado em relação à borda superior da viga de madeira.

$$y_{cg} = \frac{(b \cdot h) \cdot (h/2) + (b \cdot E_2 \cdot e / E_1) \cdot (h + e/2)}{(b \cdot h) + (b \cdot e \cdot E_2 / E_1)} \quad (3)$$

Chamando de n a relação entre a espessura da fibra e a altura da viga ($n = e/h$), obtêm-se:

$$y_{cg} = \frac{(h/2 + (1 + n/2) \cdot (n \cdot E_2 / E_1))}{(1 + (n \cdot E_2 / E_1))} \quad (4)$$

O valor do momento de inércia para a seção equivalente da viga com reforço (I_r) é dado por:

$$I_r = \frac{bh^3}{12} + b \cdot h \cdot (y_{cg} - h/2)^2 + \frac{b \cdot E_2 \cdot e^3}{E_1 \cdot 12} + b \cdot \frac{E_2}{E_1} \cdot e \cdot (e/2 + (h - y_{cg}))^2 \quad (5)$$

$$I_r = \frac{b \cdot h^3}{12} + b \cdot h \cdot (y_{cg} - h/2)^2 + \frac{b \cdot E_2 \cdot n \cdot h^3}{E_1 \cdot 12} + b \cdot \frac{E_2}{E_1} \cdot n \cdot h \cdot (n \cdot h/2 + h - y_{cg})^2 \quad (6)$$

Pode-se verificar o aumento na rigidez à flexão das vigas reforçadas, em comparação com as vigas sem reforço, a partir da relação entre os momentos de inércia:

$$\frac{I_r}{I} = \frac{h^3/12 + h \cdot (y_{cg} - h/2)^2 + E_2 \cdot (n \cdot h)^2 / 12 \cdot E_1 + E_2 \cdot (n \cdot h) / E_1 (n \cdot h + h - y_{cg})^2}{(h^3/12)} \quad (7)$$



3.2 Avaliação do momento fletor último das vigas reforçadas com fibras

Este item apresenta o modelo de cálculo para avaliação do momento fletor último das vigas reforçadas com fibras. Este modelo é obtido a partir da hipótese de Navier/Bernoulli (seções planas após a deformação), e considera os estados limites de ruptura por tração e por compressão da madeira. A figura 03 apresenta o diagrama de deformação na seção transversal da viga.

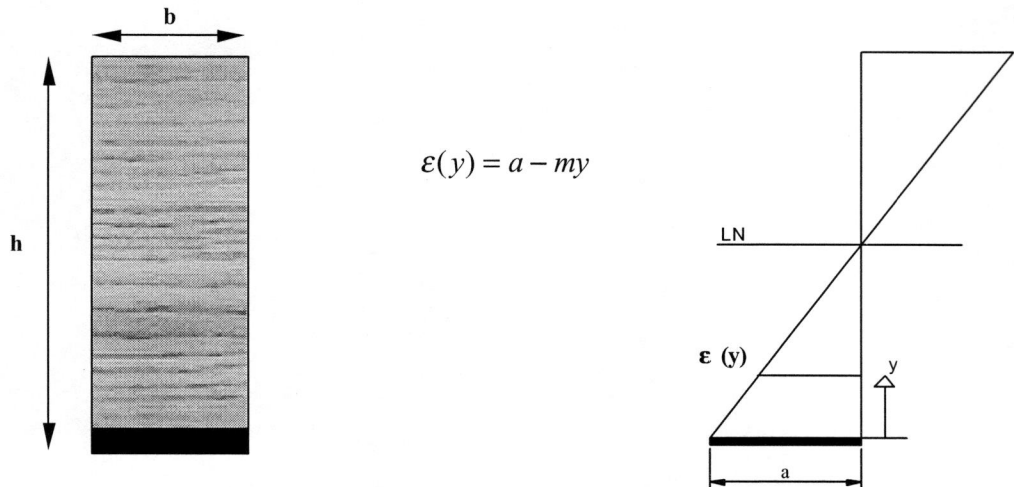


Figura 03: Diagrama de deformação na seção transversal

Para a madeira solicitada por compressão é admitido um comportamento elasto-plástico perfeito, com tensão de plastificação igual à resistência da madeira na compressão paralela às fibras. Considera-se um estado limite quando a máxima deformação específica atinge um determinado valor fixado. Este valor pode ser avaliado experimentalmente em ensaios de compressão paralela às fibras. A figura 04 ilustra o procedimento, mostrando o diagrama tensão x deformação idealizado a partir de resultados obtidos em um ensaio. A relação entre a deformação total (ϵ_2) e a deformação na fase elástica do modelo elasto-plástico (ϵ_1) idealizado é denominada como "k".

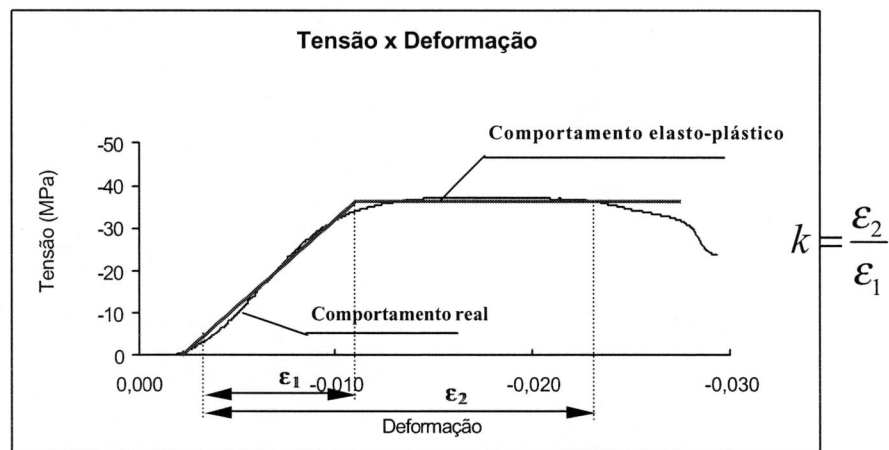


Figura 04: Diagrama σ x ϵ na compressão paralela às fibras

Para a madeira tracionada e para o reforço de fibra é considerado um comportamento elasto-frágil, admitindo-se que a deformação específica máxima da madeira é igual à da fibra. Então, a relação



entre a máxima tensão atuante na fibra e a máxima tensão atuante na madeira é igual à relação entre os módulos de elasticidade da fibra e da madeira. Como esta relação sempre é muito inferior à relação observada para a resistência à tração da fibra e da madeira, pode-se concluir que a ruptura por tração sempre ocorrerá na madeira.

A seguir são apresentadas as deduções das expressões para avaliação do momento fletor último, considerando os estados limites de compressão e de tração na madeira. Obviamente, o momento fletor último deve ser avaliado pela expressão que fornecer o menor valor.

Para as duas avaliações (ruptura por compressão ou por tração), são feitas as seguintes considerações:

a) para $\varepsilon_1 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_2$, a tensão de compressão na madeira é igual a:

$$\sigma_c = E_c \varepsilon_1 = f_{c0} \quad (8)$$

b) a deformação na fibra é igual à deformação máxima na madeira, desprezando-se a deformação ao longo da espessura da fibra.

c) os valores dos módulos de elasticidade a tração e a compressão na madeira são diferentes.

Foram estabelecidas as seguintes denominações:

C1 e C2 – Forças de compressão resultantes na madeira;

TM – Força de tração resultante na madeira

TF – Força de tração na fibra

h – altura da viga

e – espessura da fibra

f_{c0} – resistência à compressão paralela às fibras da madeira

f_{t0} – resistência à tração paralela às fibras da madeira

E_c – módulo de elasticidade à compressão paralela da madeira

E_t – módulo de elasticidade à tração paralela da madeira

E_f – módulo de elasticidade à tração da fibra

$$s = \frac{f_{c0}}{E_c \cdot m}$$

$$p = \frac{f_{t0}}{E_t \cdot m}$$

3.1.1 Modo de ruptura: compressão

Considera-se atingido o estado limite último na compressão quando a máxima deformação na parte comprimida atingir o valor ε_2 . A partir das relações estabelecidas entre tensões e deformações, a figura 05 apresenta a distribuição de tensões quando este limite é atingido, bem como as forças resultantes destas tensões e suas posições:

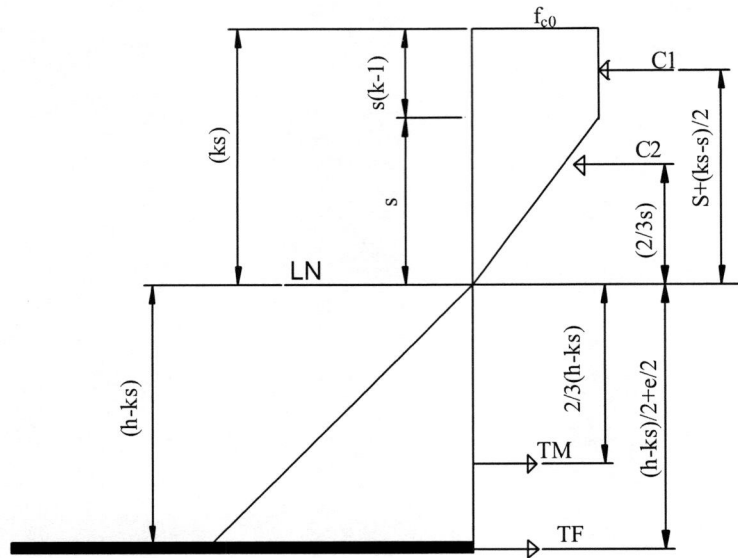


Figura 05: Distribuição de tensões na seção transversal (ruptura por compressão)

O valor das forças resultantes de compressão e de tração é igual a:

$$\begin{aligned} C_1 &= f_{c0} \cdot b \cdot s \cdot (k-1) \\ C_2 &= f_{c0} \cdot \frac{b \cdot s}{2} \\ T_m &= \frac{b}{2} \cdot (h-ks) \cdot E_t \cdot \left(m \cdot h - \frac{kf_{c0}}{E_c} \right) \\ T_f &= b \cdot e \cdot E_f \cdot \left(m \cdot h - \frac{kf_{c0}}{E_c} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

A partir da condição de equilíbrio de forças horizontais, substituição dos valores de "s" na equação 9 e rearranjo dos termos, obtém-se:

$$\begin{aligned} m^2 \cdot (h^2 E_t E_c^2 + 2 E_c^2 E_f e h) + m (-2 h E_t k f_{c0} E_c - 2 E_c e E_f k f_{c0}) + \\ (k^2 f_{c0}^2 E_t - 2 E_c f_{c0}^2 (k-1) - (E_c f_{c0}^2)) = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

Após a determinação de "m", por meio da equação 10, pode ser avaliado o valor do momento resistente, a partir da soma dos momentos das forças. Foi adotada a posição da linha neutra para se fazer à somatória das forças envolvidas no problema, obtendo-se:



$$M_c = \left[b \cdot \frac{f_{c0}^2}{E_c \cdot m} \cdot (k-1) \right] \cdot \left[\left(-\frac{f_{c0}}{E_c \cdot m} + \left(\frac{f_{c0}}{2 \cdot E_c \cdot m} \cdot (k-1) \right) \right) + \left[\left(\frac{f_{c0}^2 \cdot b}{2 E_c \cdot m} \right) \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot \frac{f_{c0}}{E_c \cdot m} \right) \right] + \right. \\ \left. \left[\frac{b}{2} \cdot \left(h - \frac{k \cdot f_{c0}}{E_c \cdot m} \right) \right] \cdot \left[E_t \cdot \left(mh - \frac{k f_{c0}}{E_c} \right) \cdot \frac{2}{3} \cdot \left(h - \frac{k f_{c0}}{E_c \cdot m} \right) \right] + \right. \\ \left. \left[b \cdot e \cdot E_f \cdot \left(mh - \frac{k f_{c0}}{E_c} \right) \cdot \left(h + \frac{e}{2} - \frac{k f_{c0}}{E_c \cdot m} \right) \right] \right] \quad (11)$$

3.1.2 Modo de ruptura - tração

Considera-se atingido o estado limite de tração na madeira, quando a máxima tensão atuante de tração na madeira é igual a sua resistência à tração. A partir das relações estabelecidas entre as tensões e as deformações, a figura 06 apresenta a distribuição de tensões quando este estado limite é atingido, bem como as forças resultantes destas tensões e suas posições.

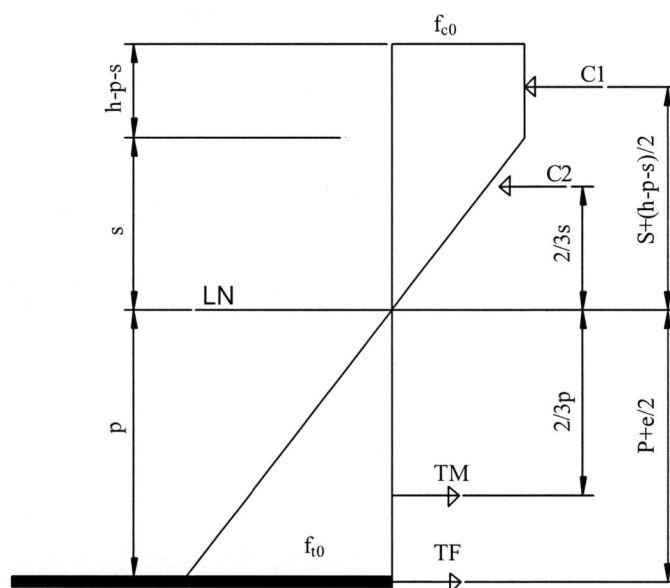


Figura 06: Distribuição de tensões na seção transversal (ruptura por tração na madeira)

O valor das forças resultantes de compressão e de tração é igual a:

$$C_1 = f_{c0} \cdot b \cdot (h - s - p) \\ C_2 = f_{c0} \cdot \frac{b \cdot s}{2} \\ T_m = f_{t0} \cdot \frac{b}{2} \cdot \left(\frac{f_{t0}}{E_t \cdot m} \right) \\ T_f = b \cdot e \cdot E_f \cdot \left(\frac{f_{t0}}{E_t} \right) \quad (12)$$

A partir da condição de equilíbrio de forças horizontais, substituição dos valores de "s" na equação 12 e rearranjo dos termos, obtém-se:



$$m = \frac{f_{t0}^2 \cdot E_c + 2 \cdot E_t \cdot f_{c0}^2 + 2 \cdot E_c \cdot f_{c0} \cdot f_{t0} - f_{c0}^2 \cdot E_t + 2 \cdot E_c \cdot e \cdot E_f \cdot f_t}{2 \cdot f_{c0} \cdot h \cdot E_t \cdot E_c} \quad (13)$$

Após a determinação de "m", por meio da equação 13, pode ser avaliado o valor do momento resistente, a partir da soma dos momentos das forças. Foi adotada a posição da linha neutra para se fazer à somatória das forças envolvidas no problema, obtendo-se:

$$M_t = f_{c0} \cdot b \cdot \left[\left(h - \frac{f_{c0}}{E_c \cdot m} - \frac{f_{t0}}{E_t \cdot m} \right) \cdot \left(\frac{f_{c0}}{E_c \cdot m} + \left(\frac{h}{2} - \frac{f_{t0}}{2 \cdot E_t \cdot m} - \frac{f_{c0}}{2 \cdot E_c \cdot m} \right) \right) + \left[\left(\frac{f_{c0}^2 \cdot b}{2 \cdot E_c \cdot m} \right) \right] \right] \quad (14)$$

$$\left[\left(\frac{2}{3} \cdot \frac{f_{c0}}{E_c \cdot m} \right) \right] + \left[\left(\frac{f_{t0}^2 \cdot b}{2 \cdot E_t \cdot m} \right) \cdot \left(\frac{2 \cdot f_{t0}}{3 \cdot E_t \cdot m} \right) \right] + \left[\left(\frac{b \cdot e \cdot E_f \cdot f_{t0}}{E_t} \right) \cdot \left(\frac{f_{t0}}{E_t \cdot m} + \frac{e}{2} \right) \right]$$

4- Trabalho experimental

A análise experimental consistiu na execução e ensaio de vigas de madeira da espécie *Pinus caribea* var. *hondurensis*. As vigas foram avaliadas por meio de ensaios de flexão de acordo com a norma ASTM D198/84 – Methods of Static Tests of Timbers in Structural Sizes, da American Society for Testing Materials [2].

Para os ensaios realizados adotou-se o esquema estático de viga simplesmente apoiada, com aplicação de cargas iguais, aplicadas nos terços do vão, conforme mostra a figura 07. Este ensaio permitiu avaliar a resistência e a rigidez a flexão das peças estruturais.

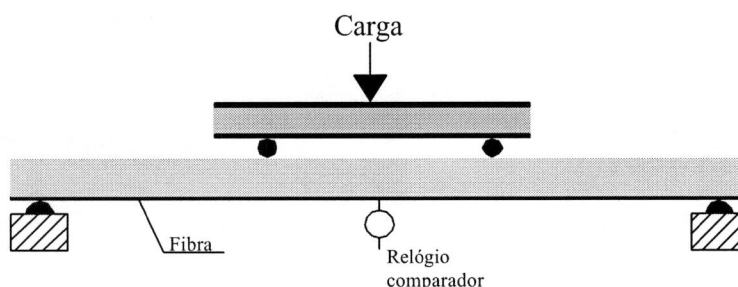


Figura 07: Modelo do ensaio de flexão em vigas simplesmente apoiadas

As vigas avaliadas possuíam seção transversal de 6x12 cm. As vigas foram reforçadas com 6 camadas de fibra de vidro ou com duas camadas de fibra de carbono coladas com adesivo epóxi na face inferior da peça, por ser esta a região solicitada por maior tensão. A opção por este número de camadas de tecido de fibra foi feita por se tratar de um "ponto ótimo" da relação custo benefício. Este número ótimo de camadas de tecido foi determinado através de simulações utilizando o modelo teórico de cálculo.

5- Resultados obtidos e análise

Os resultados apresentados a seguir foram obtidos experimentalmente e determinados seguindo os modelos teóricos apresentados anteriormente. As tabelas apresentam os valores experimentais e teóricos de momento máximo resistido pelas vigas e de rigidez a flexão (EI).



Para a determinação da rigidez a flexão, a norma NBR – 7190/97 – Projeto de estruturas de madeira [1], estipula que devem ser efetuados ciclos de carregamento, conforme indicado na figura 08.

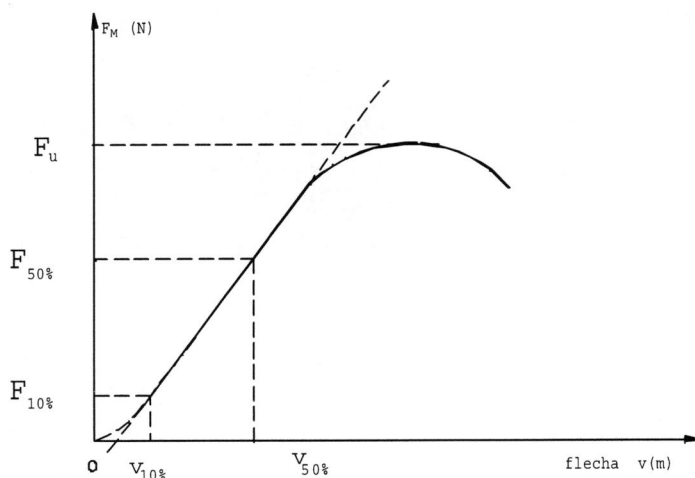


Figura 08: Ciclo de carregamento

Para tanto, deve ser estimada a força de ruptura ($F_{M,est}$) a partir de um ensaio de um corpo-de-prova gêmeo. A providência dos ciclos é necessária para os casos nos quais se deseja avaliar a rigidez à flexão. Esta rigidez é determinada no último ciclo de carregamento, utilizando o incremento de deslocamento vertical ocorrido quando há incremento da força aplicada, de um valor igual a $0,1 F_{M,est}$ até $0,5 F_{M,est}$, conforme mostrado na figura 09.

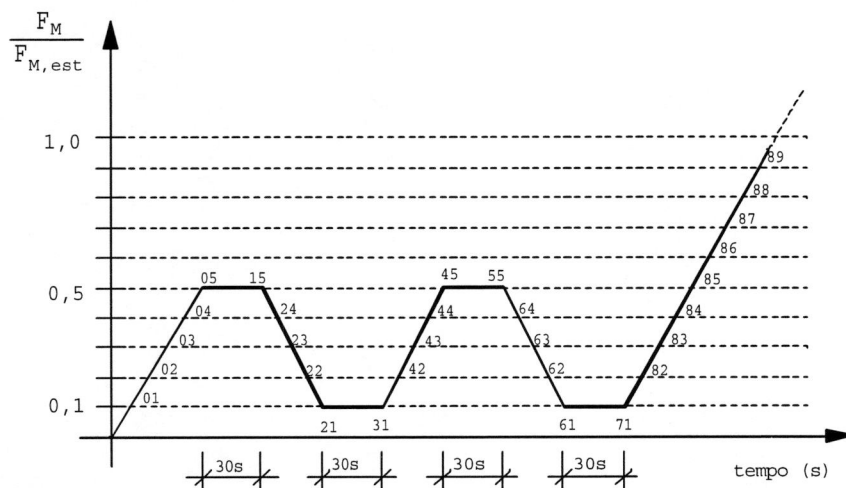


Figura 09: Ciclo de carregamento

Para que os resultados obtidos no ensaio do primeiro corpo-de-prova sem reforço pudessem ser utilizados na comparação da rigidez à flexão, o valor de $F_{M,est}$ foi estipulado como sendo igual ao da força correspondente a uma flecha de $L/200$, sendo L o vão da viga. Com este procedimento, garantiu-se que a avaliação da rigidez à flexão foi feita no regime elástico linear da viga.

Com os valores de força aplicada e correspondente deslocamento vertical no meio do vão foi possível determinar a rigidez à flexão (EI) de vigas bi apoiadas com cargas concentradas nos terços do vão, de acordo com a seguinte equação:



$$EI = \frac{23 \cdot L^3 \cdot \Delta P}{1296 \cdot \Delta v} \quad (15)$$

Onde:

L – distância entre apoios

ΔP – variação da força (10% e 50%)

ΔV – variação da flecha (10% e 50%)

Após a colagem do reforço de fibra, repetiu-se o ensaio de flexão, respeitando os mesmos incrementos de força aplicadas nas vigas antes do reforço. Desta forma determinou-se o valor da rigidez a flexão de vigas de madeira reforçadas com fibra.

Os modelos de cálculo apresentados consideram valores de resistência e módulo de elasticidade a tração e a compressão paralela às fibras da madeira. Estes valores foram determinados separadamente para cada viga (tabela 02), seguindo os procedimentos descritos na norma NBR – 7190/97 – Projeto de estruturas de madeira [1].

Tabela 02: Valores médios de resistência e módulo de elasticidade

Resistência (MPa)			Módulo de elasticidade (MPa)		
Pinus		Fibra	Pinus		Fibra
	f_{c0}	f_{t0}		E_{c0}	E_{t0}
V1	35	54		9.926	13.851
V2	37	62		10.120	12.585
V3	36	73	1.100	12.410	12.109
V4	45	54	1.100	15.087	12.771
V5	40	61	2.200	10.492	8002
V6	48	68	2.200	13.044	13.442

Onde:

f_{c0} – resistência a compressão paralela

f_{t0} – resistência a tração paralela

E_{c0} – modulo de elasticidade a compressão paralela

E_{t0} – módulo de elasticidade a tração paralela

Tabela 03: Valores de momento de ruptura experimental e teórico

Vigas de pinus seção (6x12 cm)						
	Sem reforço		2 camadas de fibra de carbono		6 camadas de fibra de vidro	
	V1	V2	V3	V4	V5	V6
Momento de ruptura teórico (kN.cm)	584,46	665,53	871,11	783,10	934,46	935,18
Momento de ruptura experimental (kN.cm)	587,50	687,20	920,00	1051,00	978,39	1071,50
Diferença (%)	+0,50	+3,25	+5,61	+34,22	+4,70	+14,57



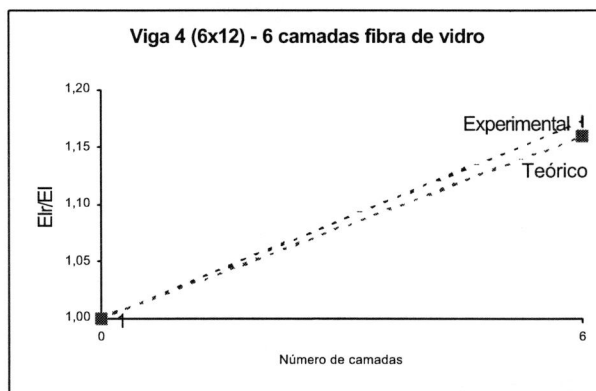
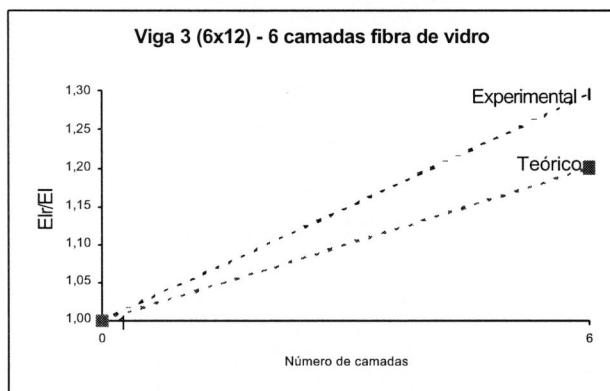
Tabela 04: Valores de rigidez a flexão experimental

Vigas de pinus seção (6x12 cm)						
Nº de camadas de fibra	Vigas	ΔP (kN)	Deslocamento (cm)		EI (kN.cm ²)	
			ΔV (sr)	ΔV (cr)	(sem reforço)	(com reforço)
Sem reforço	V1	186,36	1,43		23128	
	V2	186,36	1,20		27561	
2 camadas fibra de carbono	V3	186,36	1,605	1,255	556371	711534
	V4	275,54	1,398	1,238	958128	1081958
6 camadas fibra de vidro	V5	186,36	1,265	0,976	705910	914934
	V6	186,36	0,847	0,722	1054281	1236808

Observando os valores apresentados nas tabelas pode-se dizer que o modelo teórico conseguiu avaliar o comportamento estrutural das vigas de maneira satisfatória. Os valores determinados experimentalmente são superiores aos teóricos estando, portanto a favor da segurança estrutural.

Os momentos teóricos apresentados na tabela 03 foram determinados de acordo com o modelo de ruptura por tração, por apresentar resultados inferiores ao modelo de ruptura por compressão. Com relação à resistência das vigas pode-se observar um aumento de aproximadamente 35% tanto para vigas reforçadas com 6 camadas de fibra de vidro como para vigas reforçadas com duas camadas de fibra de carbono.

O momento de inércia teórico foi determinado de acordo com o modelo de seção transformada. Os valores obtidos experimentalmente são bastante próximos dos valores teóricos. O aumento da rigidez da seção transversal variou de 15% a 30% para vigas reforçadas com fibra de vidro e com fibra de carbono, conforme ilustra a figura 10.



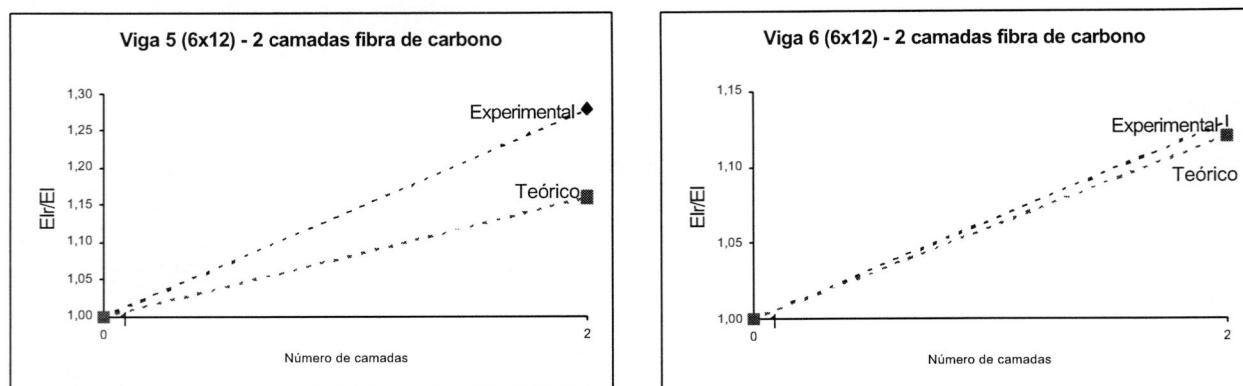


Figura 10: Rigidez teórica e experimental

Outra importante observação é que o emprego do reforço propiciou um aumento dos deslocamentos verticais na fase da ruptura. A figura 11 ilustra uma viga de pinus com flecha bastante acentuada.

Para as vigas reforçadas apesar de ocorrer esmagamento das fibras superiores por compressão, houve aumento na resistência da viga até o ponto de ruptura por tração na madeira, próxima a linha de cola figura 12.

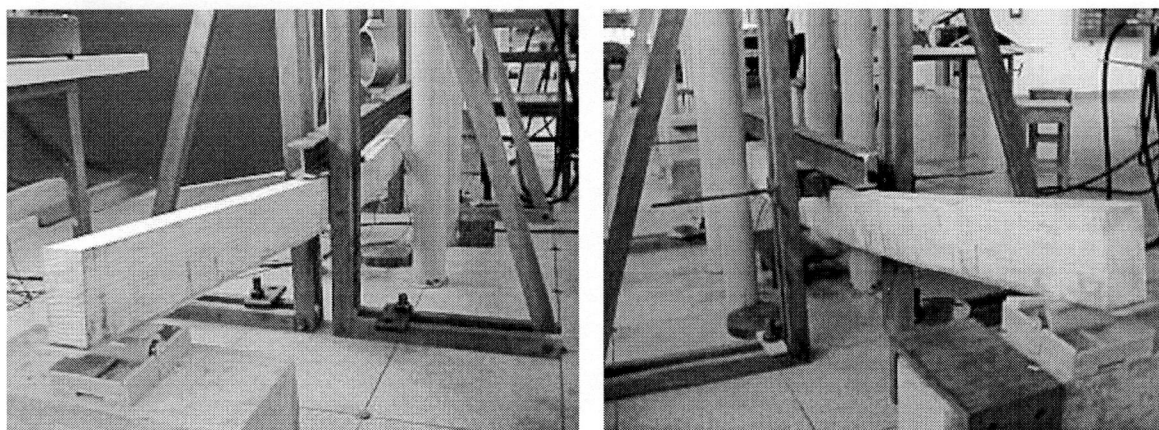


Figura 11: Flecha na viga

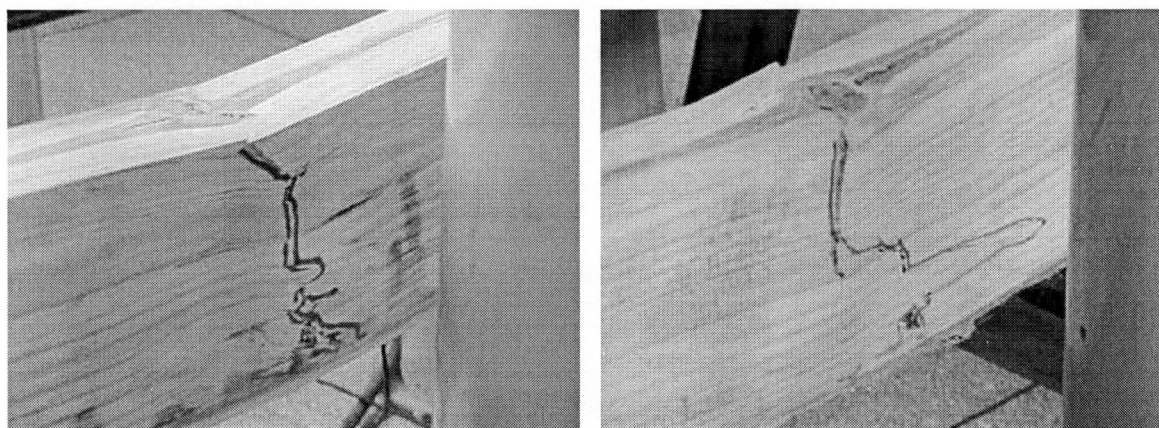


Figura 12: Ruptura por tração na madeira



Os resultados obtidos nos ensaios demonstram o ótimo desempenho desta técnica de reforço evidenciado pelo aumento da resistência e rigidez das vigas reforçadas. Comparando os resultados experimentais com os teóricos pode-se comprovar a validade do modelo de cálculo proposto.

6- Custos

Com relação ao emprego de fibra de vidro e de fibra de carbono em reforço de estruturas de madeira, cabe ao projetista avaliar a relação custo benefício da técnica em questão, em alguns casos torna-se mais vantajoso realizar o reforço e a recuperação da estrutura ao invés de substituir os elementos degradados.

A grande vantagem de se utilizar tecido de fibra de vidro em reforço de estruturas é exatamente seu baixo custo, em relação à fibra de carbono. Para a realização de um reforço de com seis camadas de fibra de vidro e largura de seis centímetros, o custo por metro linear, incluindo mão-de-obra, é R\$ 12,00. Já o preço do mesmo reforço com duas camadas de fibra de carbono seria aproximadamente a R\$ 23,00.

7- Conclusões

Através dos resultados apresentados pode-se concluir que a utilização de FRP como reforço de vigas de madeira proporciona a obtenção de bons resultados de ganho na capacidade de carga e no deslocamento vertical da viga. Além disso, este reforço impede a ocorrência de ruptura frágil da madeira por tração.

A proximidade dos resultados teóricos aos experimentais demonstram a validade do modelo desenvolvido.

Pode-se concluir pela viabilidade de aplicação das fibras de vidro no reforço e na recuperação de vigas de madeira.

8- Bibliografia

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190-**Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro, ABNT, 1997.
- [2] AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS. (1984). **Methods of static tests of timbers in structural sizes**. ASTM D198-84. Philadelphia, PA.

AGRADECIMENTOS

FAPESP – Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo