

# ESTUDO DO DESEMPENHO ESTRUTURAL DE VIGAS DE MADEIRA DANIFICADAS REFORÇADAS COM O USO DE MATERIAIS ALTERNATIVOS

Elisabeth Penner<sup>1</sup>  
Wellington Mazer<sup>2</sup>  
Carmelita Lopes D'Ávila<sup>3</sup>  
Eli Gustavo Bill<sup>4</sup>

**Resumo:** A madeira pode ser considerada um dos materiais de construção mais antigos devido, principalmente, à sua disponibilidade e sua facilidade de manuseio. Até o século XIX, as mais importantes obras de engenharia eram construídas com pedra ou madeira, combinando-se, frequentemente, os dois materiais. Devido ao surgimento de novos materiais, com tecnologias que permitiram a determinação mais precisa de propriedades físicas e mecânicas, a madeira foi perdendo mercado para o aço e o concreto. As limitações das estruturas de madeira quanto aos ataques de animais xilófagos, à ação do fogo e à influência da umidade, contribuíram para a sua substituição por materiais alternativos. A umidade tem influência significativa sobre a resistência da madeira, fato que se torna um risco às estruturas submetidas a intempéries, ocasionando, em muitos casos, a condenação de uma estrutura inteira, ou à limitação do seu uso. Porém, é possível melhorar as características físicas e mecânicas das estruturas, com reforços compostos por polímeros e fibras. Assim, esta pesquisa teve por objetivo a avaliação da eficácia dos métodos de reforço de estruturas de madeira, submetidas a um ambiente úmido, utilizando materiais alternativos. Os materiais escolhidos foram mantas fabricadas com fibras de vidro, com fibras de carbono e com fibras de sisal. A matriz polimérica utilizada foi a resina epóxi. Os elementos estruturais ensaiados consistiram em vigas de madeira úmidas, de tal forma que pudessem ser consideradas danificadas, reforçadas com as mantas fabricadas com cada uma das fibras já citadas e submetidas a um carregamento de flexão simples reta. Ao final, foi possível avaliar o ganho de rigidez e de capacidade de carga das vigas consideradas danificadas e reforçadas em relação àquelas sem reforço.

**Palavras-chave:** estruturas de madeira, reforço estrutural, mantas de fibras para reforço.

<sup>1</sup> Professora Doutora da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)  
contato: epenner@utfpr.edu.br

<sup>2</sup> Professor Doutor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

<sup>3</sup> Engenheira Civil pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

<sup>4</sup> Engenheiro Civil pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

**Abstract:** Wood can be considered one of the oldest construction materials, mainly due to its availability and ease of handling. Until the nineteenth century, the most important engineering works were built of stone or wood, blending in, often, the two materials. Due to the emergence of new materials, technologies that have enabled more accurate determination of physical and mechanical properties, wood has been losing market share for steel and concrete. The limitations of wood structures with regard to attacks of xylophage's animals, the action of fire and the influence of humidity, contributed to its replacement with alternative materials. The humidity has significant influence on the resistance of wood, a fact that becomes a risk to structures subjected to weathering, resulting in many cases, the conviction of an entire structure, or the limitation of its use. However, it is possible to improve the physical and mechanical characteristics of structures, with reinforced made of polymers and fibers. This research was aimed at evaluating the effectiveness of methods of reinforcement of wood structures, subjected to a humid environment, using alternative materials. The materials chosen were quilts made of glass fibers, carbon fibers and sisal fibers. The polymer matrix used was epoxy resin. The structural elements tested consisted of wooden beams wet, so that could be considered damaged, reinforced with each of the aforementioned fibers and subjected to a load of bending straight. In the end, it was possible to evaluate the gain in stiffness and load capacity of beams considered damaged and strengthened compared to those without reinforcement.

**Keywords:** wood structures, structural reinforcement, quilts of fiber reinforcement.

## 1. Introdução

Responsável pela sustentação e acabamento de diferentes tipos de construções, as madeiras tiveram papel fundamental para o desenvolvimento urbano ao longo do contexto histórico. Porém, essa situação tem sido invertida por ocasião da utilização de materiais que podem ser justapostos à superfície das peças de madeira, tornando possível melhorar as características físicas e mecânicas das estruturas. Nesse contexto, enquadram-se os reforços compostos por mantas constituídas por polímeros e fibras, tais como, fibras de carbono, fibras de vidro e fibras de sisal. A matriz polimérica, normalmente empregada é a resina epóxi. A proporção adequada desses materiais, associada às boas características usuais das peças de madeira, podem garantir, ao produto final, confiabilidade e segurança quanto às suas propriedades físicas e mecânicas. Assim, esses materiais compostos podem ser empregados em

diferentes situações em que a madeira, como material isolado não, seria aconselhada.

A técnica de reforço de peças de madeira com mantas constituídas por polímeros e fibras surgiu para melhorar, principalmente, a resistência das peças de madeira, entretanto, esse processo também melhora as características da madeira quanto à influência da umidade. Baseado nesse fato, esta pesquisa tem por objetivo, por meio de uma análise experimental, demonstrar o quanto é eficiente revestir uma estrutura de madeira com mantas constituídas por polímeros e fibras de carbono, de vidro e de sisal, quando submetida a um ambiente úmido.

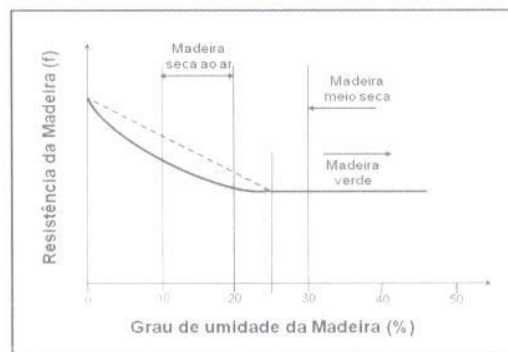
Com os resultados obtidos foi possível determinar em quais situações o reforço com mantas constituídas por polímeros e fibras é válida e viável, do ponto de vista técnico.

## **2. Influência da umidade da madeira sobre a sua resistência**

De acordo com (PFEIL, 2003), a umidade tem grande efeito sobre as propriedades da madeira. Com o aumento da umidade, a resistência diminui até ser atingido o ponto de saturação das fibras; acima deste ponto, a resistência mantém-se constante. Acima do ponto de saturação das fibras (30% de umidade), volume e peso específico da madeira não são influenciados pelo grau de umidade, resultando numa resistência praticamente constante. Com a secagem da peça, abaixo do grau de saturação das fibras, observa-se a redução de volume e aumento do peso específico e da resistência.

Ainda de acordo com (PFEIL, 2003), as propriedades de resistências mecânicas, em diferentes direções, começam a aumentar quando a umidade fica abaixo de um grau entre 22% e 28%, podendo considerar-se um valor médio de 25%. Abaixo de 25% a variação de umidade pode ser representada por uma lei logarítmica ou, aproximadamente, por uma lei linear. Conhecendo-se a lei da variação das propriedades da madeira com o grau de umidade, podem-se fazer as determinações experimentais em peças de madeira seca ao ar, corrigindo-se os valores para umidade na condição padrão,  $U = 12\%$ , figura 1.





**Figura 1** – Variação da resistência da madeira com o grau de umidade

Fonte: (PFEIL, 2003)

Pode-se considerar, aproximadamente linear, a variação das propriedades da madeira com a umidade entre 2% e 25%.

### 3. Patologias nas madeiras

Os problemas encontrados na construção civil não se resumem aos encontrados nas estruturas de concreto ou de aço. As estruturas de madeira apresentam, também, alguns tipos de defeitos, principalmente, pelo fato de se tratarem de um material orgânico.

Segundo (VERÇOZA, 1991), normalmente, os defeitos nas madeiras são irreversíveis, ou seja, depois que aparecem não tem correção, a não ser reforços provisórios e, madeiras com reforços, raramente, podem ser consideradas recuperadas e a solução quase sempre é a substituição da peça. Porém, em determinadas situações não é possível a substituição de algumas peças, por se tratar de edificações muito antigas que utilizam materiais que não podem ser facilmente encontrados no mercado, ou por outras razões, como o comprometimento estrutural de determinado local. Em algumas ocasiões, peças de madeira, apesar de danificadas, ainda podem estar servindo de apoio para uma estrutura inteira e, a remoção dessa peça, para algum tipo de tratamento, poderia condenar uma edificação.

Os defeitos nas estruturas de madeira podem ser consequências de problemas com as peças que compõem a estrutura ou com o tipo estrutural escolhido para aquela ocasião.

Os principais defeitos nas peças de madeira, segundo (VERÇOZA, 1991) são conhecidos por:

- Abaulamentos;
- Defeitos congênitos e de desdobramento;
- Defeitos causados por animais xilófagos;
- Apodrecimento da madeira;
- Outros defeitos causados por influência da umidade.

Nesta pesquisa, optou-se por simular a danificação de uma estrutura de madeira, apenas pela influência da umidade.

#### 4. Fibras de vidro

Conforme (FIORELLI, 2005), as fibras de vidro são produzidas a partir da sílica ( $\text{SiO}_2$ ), por meio da adição de óxido de cálcio, boro, sódio e alumínio. Estas fibras são materiais amorfos e sua cristalização ocorre após prolongado tratamento com altas temperaturas.

As fibras de vidro são obtidas pela fusão e fiberização de uma mistura de óxidos metálicos em determinadas proporções, as quais determinam o seu tipo que pode ser: Tipo E (elétrico) usado para fazer garrafas e copos e o Tipo A (alcalino) utilizado para reforço de plásticos e outros materiais.

No quadro 1 estão apresentadas algumas das principais propriedades mecânicas e elásticas das fibras de vidro.

Propriedades	Fibra de Vidro
Módulo de Elasticidade (MPa)	71589
Alongamento na Ruptura ( $^{\circ}/_{00}$ )	1,2 – 2,5
Resistência à Tração (MPa)	853 – 1765
Coefficiente de Poisson	0,22
Densidade ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	267,8

**Quadro 1** – Propriedades da fibra de vidro

Fonte: (CARVALHO, 1992) adaptado pelos autores

#### 5. Fibras de carbono

As fibras de carbono resultam do processo de carbonização de fibras de polímeros, como o poliacrilonitril, sendo suas características mecânicas diretamente dependentes da estrutura

molecular obtida. Dependendo do tipo de tratamento da fibra básica que inclui carbonização, grafitação e oxidação, é possível fabricar fibras de carbono com diversas configurações de resistência e algumas delas podem chegar a ser várias vezes mais resistentes que o aço. A produção dessas fibras exige exposição ao ar das fibras base, seguida de processamento a altas temperaturas (da ordem de 1000°C a 1500°C para as fibras de carbono). Essa característica confere à fibra resistência à tração da ordem de 3500 MPa com uma deformação específica de 1,5% (PUC RIO, 2007).

No quadro 2 estão apresentadas as principais propriedades de diferentes tipos de fibras de carbono.

TIPO DE FIBRAS		Resistência à Tração Mpa	Módulo de Elasticidade e Mpa	Deformação Específica Última (%)	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	Diâmetro da Fibra (µm)
CARBONO	tipo PAN* - com alta resistência (HS)	3500 - 5000	200 - 260	1,2 - 1,8	1700 - 1800	5 - 8
	tipo PAN* - com alto módulo de elasticidade (HM)	2500 - 4000	350 - 700	0,4 - 0,8	1800 - 2000	5 - 8
	tipo Pitch** - com alto módulo de elasticidade (HM)	3000 - 3500	400 - 800	0,4 - 1,5	1900 - 2100	9 - 18

**Quadro 2** – Propriedades típicas dos principais tipos de fibra de carbono

Fonte: (PUC RIO) adaptado pelos autores

As fibras de carbono podem ser encontradas em quatro principais tipos de qualidade, dependendo de suas propriedades:

- Alta Resistência (*HS - High Strength*);
- Módulo Intermediário (*IM - Intermediary Modulus*);
- Alta Rigidez ou Módulo (*HM - High Modulus*);
- Superior Rigidez ou Módulo (*UHM - Ultra High Modulus*).

Nestas últimas, as superfícies dos filamentos são ligeiramente oxidadas para melhorar a adesão entre a fibra e a resina.

**6. Fibras de sisal**

Segundo (CARVALHO, 1992), as fibras naturais são uma importante alternativa para uso como reforço em estruturas de madeira, considerando as seguintes vantagens: abundância, biodegradabilidade e o baixo custo se comparadas às fibras de carbono e de vidro, muito utilizadas para essa finalidade.

O Brasil produz cerca de 40% do sisal produzido no mundo e boa parte deste, cerca de 85%, é produzido na Bahia. Devido a essa grande disponibilidade aliada ao baixo custo em comparação com a concorrência, aproximadamente 11% do preço das fibras de vidro e 0,07% do valor das fibras de carbono, colocam o sisal como um material muito interessante para aplicações diversas. As fibras de sisal apresentam um desempenho mecânico satisfatório e, da mesma forma que as demais fibras, necessitam de uma matriz polimérica que possa unir as fibras ao elemento estrutural de madeira, sendo a mais usual a epóxi.

A composição química das fibras vegetais é muito variável, e depende da localização geográfica, da idade, do clima, das condições do solo e até mesmo de qual parte da folha está sendo extraída a fibra. O sisal apresenta um alto teor de celulose em sua composição, cerca de 43 a 62%, característica relacionada com o seu bom desempenho mecânico. Além da celulose é composta em grande parte por lignina, cerca de 8%, e apresenta algumas propriedades como pode ser observado no quadro 3.

Propriedades	Fibra de Sisal
Módulo de Elasticidade (MPa)	9400 - 22000
Alongamento na Ruptura (‰)	2,0 - 2,5
Resistência à Tração (MPa)	511 - 635
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	154,5

**Quadro 3** - Principais propriedades das fibras de sisal

Fonte: (CARVALHO, 1992) adaptado pelos autores

## 7. Resinas poliéster e viniléster

As resinas poliéster e viniléster após a adição de alguns catalisadores e aceleradores transformam-se em um sólido rígido, infusível e insolúvel, e a sua cura se faz a temperatura ambiente, favorecendo o seu emprego em várias situações, como nos casos de estruturas de madeira danificadas, as quais geralmente não podem ser removidas dos locais originais e precisam de um tratamento que seja realizado no local, (CARVALHO, 1992). As diferenças das resinas poliéster e viniléster estão relacionadas com a sua composição química e origem, mas a sua utilização é praticamente a mesma, sendo a viniléster mais indicada para ambientes agressivos. As resinas epóxi são polímeros termooestáveis com vantagens como a resistência química, a adesividade a diferentes substratos, a estabilidade química, estabilidade em



ambientes quentes e úmidos. São polímeros derivados do petróleo que podem formar ligações cruzadas entre as cadeias poliméricas. Ainda na fase bi-componente, as resinas apresentam outras vantagens: a ausência de componentes voláteis, a amplitude de variação da viscosidade adequando a resina em função dos processos de moldagem e cura, estabilidade dimensional durante os processos de cura, e a polimerização não resulta gases à atmosfera. Estas características fizeram da resina poliéster epóxi, a resina mais utilizada como matriz para compósitos de elevado desempenho.

## **8. Catalisadores e aceleradores**

Essas substâncias são utilizadas para acelerar o processo de polimerização, ou seja, iniciar o processo de cura das resinas. O peróxido de metil-etil cetona associado ao cobalto em quantidades pré-estabelecidas, formam o principal composto acelerador da cura das resinas associadas às fibras.

## **9. Procedimentos metodológicos**

Para avaliar a resistência de peças de madeira, com e sem reforço estrutural, foi adotado o ensaio de flexão simples reta, onde os corpos de prova consistiram em vigas de seção transversal retangular, submetidas a uma carga concentrada no meio do vão, até a ruptura. Para tornar a análise dos resultados consistente, alguns procedimentos foram adotados:

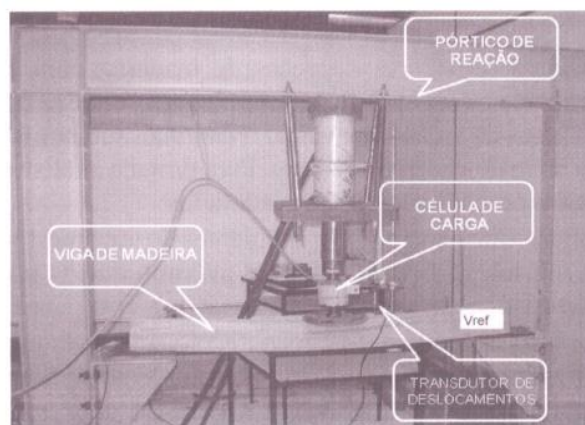
- As madeiras utilizadas foram provenientes de uma mesma madeireira e compradas em um lote, a fim de evitar ao máximo que as peças pudessem apresentar características diferentes;
- Todas as peças de madeira foram confeccionadas pela mesma pessoa, a fim de evitar diferenças no processo de confecção, sendo 5 (cinco) lotes de 6 (seis) vigas a serem ensaiados, totalizando 30 vigas;
- Cada viga foi confeccionada com dimensões de 5cm x 10cm x 125cm, correspondentes à largura, altura e comprimento, respectivamente;
- O primeiro lote foi deixado em umidade ambiente, caracterizando a situação de madeira seca e os quatro demais lotes foram imersos em um tanque de água durante 15 dias a fim de caracterizar a danificação da madeira por saturação;
- O processo de aplicação das mantas de fibras de carbono, de vidro e de sisal, também foi executado por uma mesma pessoa. Este processo de aplicação das mantas foi realizado antes de colocar as vigas em imersão pois o



processo da cura da resina utilizada poderia ser atrasado ou até prejudicado;

- As mantas foram aplicadas apenas na superfície da base das vigas, face que seria tracionada durante os ensaios de flexão simples reta;
- Os ensaios de flexão simples reta foram executados conforme as especificações do anexo B da norma para projeto de estruturas de madeira (NBR 7190, 1997);
- Durante os ensaios de flexão simples reta, a carga concentrada foi aplicada no meio do vão e os deslocamentos foram medidos a 13cm do centro por impossibilidade de instalar o transdutor de deslocamentos juntamente com a célula de carga.

Na figura 2 está apresentado o arranjo de ensaio utilizado na realização dos experimentos. Para a aplicação das cargas utilizou-se uma célula de carga de capacidade de 50 kN e para a medição dos deslocamentos utilizou-se um transdutor do tipo indutivo. O vão livre efetivo das vigas simplesmente apoiadas foi de 1,00m e, para caracterizar um arranjo de ensaio isostático, foram utilizadas placas de neoprene que possibilitaram a rotação e o deslocamento horizontal junto aos apoios.



**Figura 2** – Arranjo de ensaio empregado nos experimentos de flexão simples reta

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA)

As vigas ensaiadas na pesquisa foram da espécie denominada Cambará, cujas características segundo a (NBR 7190, 1997) podem ser classificadas na classe de resistência C40. Essa classe corresponde à resistência à compressão paralela às fibras, no seu valor característico, de  $f_{c0,k} = 40\text{MPa}$ .

A nomenclatura empregada para cada lote de vigas ensaiada está

apresentada no quadro 4.

Lot e	Nomenclatur a	Descrição
1	VS	Vigas SECAS ao ar – SEM REFORÇO
2	VM	Vigas SATURADAS por 15 dias – SEM REFORÇO
3	VMC	Vigas SATURADAS por 15 dias – COM REFORÇO DE MANTA DE FIBRA DE CARBONO
4	VMV	Vigas SATURADAS por 15 dias – COM REFORÇO DE MANTA DE FIBRA DE VIDRO
5	VMS	Vigas SATURADAS por 15 dias – COM REFORÇO DE MANTA DE FIBRA DE SISAL

**Quadro 4-** Nomenclatura dos lotes de vigas ensaiadas

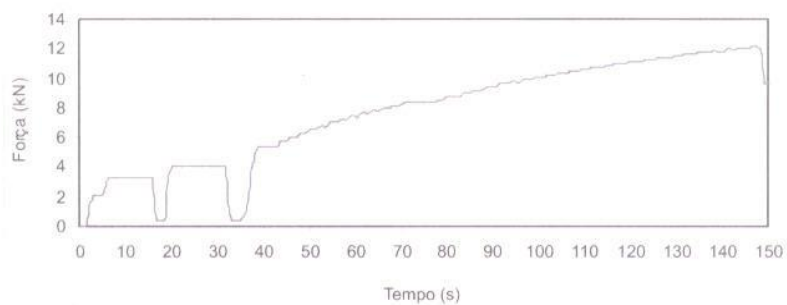
Fonte: (Autoria própria)

## 10. Resultados

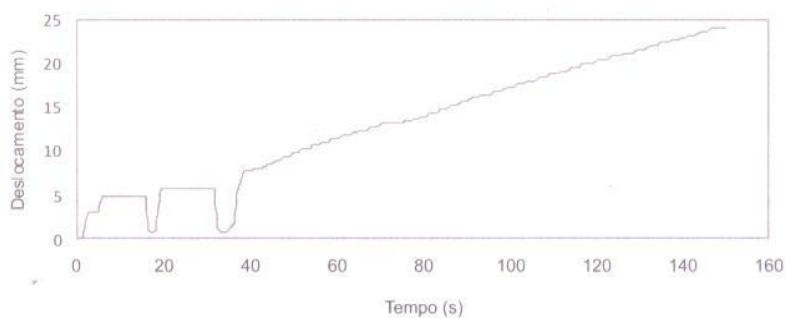
Antes da realização dos ensaios de flexão simples reta, com base na geometria das vigas (momento de inércia e módulo de resistência) e da referência da (NBR 7190, 1997) do valor da resistência à compressão paralela às fibras de, no seu valor característico de  $f_{c0,k} = 40\text{MPa}$ , foi possível estimar o valor da carga de ruptura ( $F_{m\acute{a}x}$ ) igual a 13,3 kN.

Nos gráficos da figura 3 estão apresentados os procedimentos de ensaio empregados nos ensaios de flexão simples reta, condizentes com a (NBR 7190, 1997), que consistem em dois ciclos de carga e descarga para posterior acréscimo de carga até a ruptura. Os resultados ilustrados são referentes às séries temporais de forças e de deslocamentos de uma das vigas saturadas reforçadas com manta de fibra de carbono.

### SÉRIE TEMPORAL DE FORÇAS - VMC4



### SÉRIE TEMPORAL DE DESLOCAMENTOS - VMC4



**Figura 3-** Ciclos de carga e descarga empregados nos ensaios de flexão simples reta

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA)

No quadro 5 estão apresentados os valores médios das forças máximas de ruptura obtidas para cada um dos lotes das das vigas ensaiadas.

LOTE	Força Máxima de Ruptura ( $F_{m\acute{a}x}$ em kN)
VS	10,6
VM	9,4
VMC	11,8
VMV	11,5
VMS	12,0

**Quadro 5-** Valores médios das forças máximas de ruptura obtidas nos ensaios de flexão simples reta

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA)



No gráfico da figura 4 pode-se visualizar os resultados das forças médias de ruptura de cada um dos lotes das vigas ensaiadas à flexão simples reta.

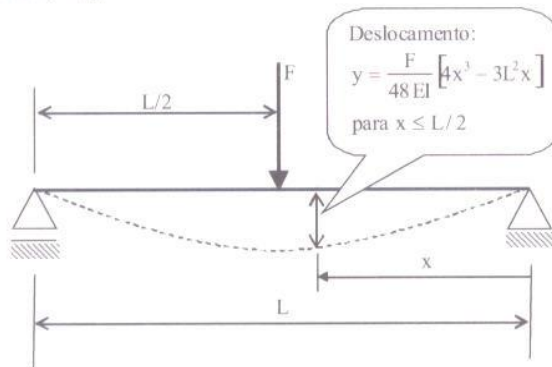


**Figura 4-** Gráfico dos valores médios das forças de ruptura de cada lote ensaiado

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA)

### 11. Análise dos resultados

Para a determinação do produto de rigidez ( $EI$ ) de cada uma das vigas, foi empregada a equação da linha elástica correspondente para a situação ensaiada, figura 5.

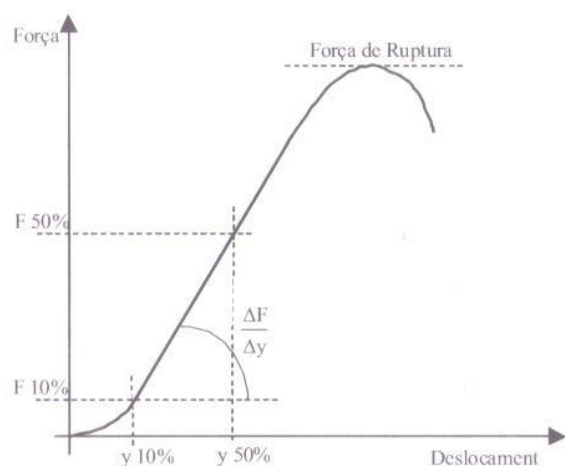


**Figura 5** – Equação da linha elástica para obtenção do valor de  $EI$

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA)

Conforme especificações da (NBR 7190, 1997), para a obtenção do coeficiente angular da relação entre forças e deslocamentos ( $\Delta F/\Delta y$ ),

devem ser descartados valores abaixo de 10% e acima de 50% da força de ruptura, figura 6.



**Figura 6-** Diagrama Força x Deslocamento na flexão simples reta

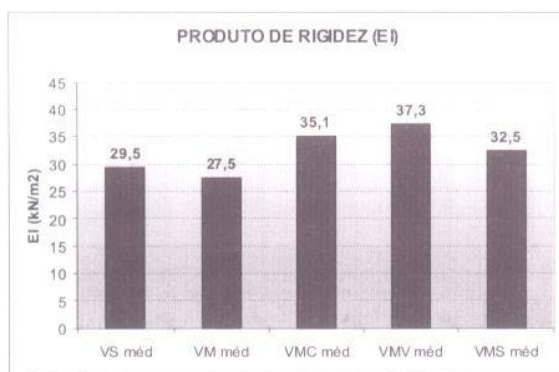
Fonte: (NBR 7190, 1997) adaptado pelos autores

Como já apresentado, o transdutor de deslocamentos foi instalado a 13 cm do centro do vão ( $L=1,0$  m), resultado então em  $x = 37$  cm, valor a ser empregado na equação apresentada na figura 5.

Desta forma, conforme a figura 7, o valor do produto de rigidez ( $EI$ ), para cada uma das vigas ensaiadas, pode então, ser determinado a partir da relação:

$$EI = \frac{0,907 \Delta F}{48 \Delta y}$$

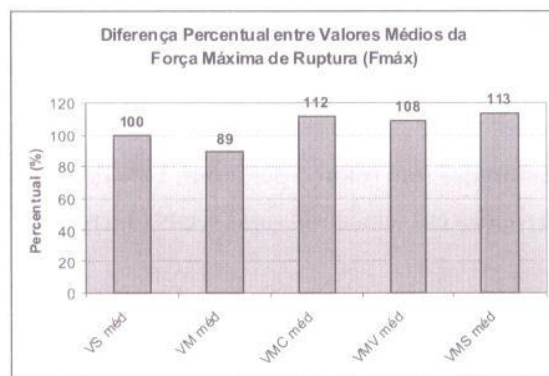
No gráfico da figura 7 pode-se visualizar os resultados dos valores médios produtos de rigidez obtidos para cada um dos lotes das vigas ensaiadas à flexão simples reta.



**Figura 7** – Gráficos dos valores médios dos produtos de rigidez de cada lote ensaiado

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA)

Com relação à diferença percentual dos resultados obtidos, adotou-se como referência o lote das vigas secas sem reforço, tanto para o valor médio da força de ruptura quanto para o valor médio do produto de rigidez. Desta forma, nos gráficos da figuras 8 e da figura 9 estão apresentados os resultados que representam o ganho ou a perda de capacidade de carga e de rigidez, para os diferentes lotes ensaiados.



**Figura 8**- Diferença percentual entre valores médios da força máxima de ruptura dos lotes ensaiados

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA)





**Figura 9-** Diferença percentual entre valores médios do produto de rigidez dos lotes ensaiados

Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA)

Pelos resultados das figuras 8 e 9, pode-se observar que todas as vigas de madeira saturadas, consideradas danificadas, com o reforço dos diferentes tipos de fibras, tiveram um ganho de capacidade de carga e de rigidez, em relação às vigas sem reforço, tanto as secas como as saturadas. Esses valores de ganho ficaram entre 8% e 13% para valores de capacidade de carga e entre 10% e 26% para valores de rigidez, em relação às vigas secas sem reforço.

Em relação às vigas saturadas sem reforço esses valores ficaram entre 19% e 24% no ganho de capacidade de carga e entre 17% e 33% no ganho de rigidez.

As vigas saturadas sem reforço perderam 11% de capacidade de carga e perderam 7% de rigidez em relação às vigas secas sem reforço.

## 12. Considerações Finais

Por meio dos ensaios realizados utilizando vigas reforçadas e não reforçadas e submetidas à umidade constante, chegou-se à conclusão de que todos os tipos de fibra influenciam, de forma positiva, na capacidade de carga e na rigidez das vigas submetidas à flexão simples reta. Vale salientar que as vigas danificadas pela saturação foram reforçadas e, todos os exemplares

ensaiados apresentaram resultados superiores àqueles obtidos para as vigas secas, consideradas íntegras, sem reforço, como também em relação às vigas danificadas sem reforço.

De maneira esperada e coerente, todas as vigas danificadas por saturação, ensaiadas sem reforço, apresentaram resultados inferiores, em 11%, àqueles obtidos para as vigas secas, consideradas íntegras, sem reforço.

Em relação ao produto de rigidez, o reforço que representou maior ganho, foi o de manta de fibra de vidro. Em relação ao reforço com manta de fibra de carbono, o de manta de fibra de vidro apresentou um ganho de 7% e um ganho de 16% em relação à manta de fibra de sisal. Esse resultado pode ser explicado em função das fibras de vidro serem menos flexíveis, portanto, mais rígidas que as fibras de carbono e de sisal, quando submetidas à flexão.

Como todos os resultados foram satisfatórios, dos três materiais ensaiados, a fibra de sisal pode ganhar um destaque em comentários, uma vez que, em função de ser um material pouco utilizado como reforço estrutural, apresentou-se competitivo às fibras de carbono e de vidro. Em relação à capacidade de força, a manta de fibra de sisal obteve o melhor resultado em relação à manta de fibra de carbono e de vidro. A manta de sisal teve um ganho de 1% em relação à manta de fibra de carbono e de 5% em relação à manta de fibra de vidro. Esse resultado foi inesperado mas, uma justificativa para tal resultado seria a diferença nos arranjos estruturais das três fibras, pois para as mantas de fibra de vidro e de carbono foi utilizado um tecido entrelaçado muito denso, onde a impregnação da resina pode ter sido prejudicada, enquanto que na estrutura com a fibra de sisal disposta com fios, a impregnação foi mais fácil e eficiente.

Ainda pode-se concluir que, do ponto de vista econômico a utilização da fibra de sisal como reforço é muito mais interessante do que suas concorrentes. Além da capacidade mecânica comprovada por meio dos ensaios, o fator principal que a faz ser enquadrada como a melhor alternativa, é o seu preço, custa aproximadamente 11% do valor de mercado da fibra de vidro e 0,07% da fibra de carbono, o que comprova o seu excelente custo benefício como reforço estrutural em vigas de madeira submetidas à ambientes úmidos.

E, finalmente, foi possível comprovar e verificar que quando a madeira é submetida à umidade, de fato perde capacidade de carga e rigidez. E, todas as vigas reforçadas, independentemente do tipo de reforço, apresentaram ganhos percentuais de até 33% em rigidez e de 24% em capacidade de carga.

### 13. Referências

- CARVALHO, A. **Fiberglass X Corrosão**. 1. ed. Paulistana. São Paulo, 1992.
- FIGLIOLI, J. **Estudo teórico e experimental de vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibra de vidro**. 108f. Tese (Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2005.
- NBR 7190 - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Projeto de estruturas de madeira**: 107p. Rio de Janeiro, 1997.
- FIGLIOLI, Walter; FIGLIOLI, Michele. **Estruturas de Madeira**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003, 224p.
- PUC RIO. **Reforço estrutural com tecidos de fibra de carbono**. Disponível em: <>. Acessado em 10 Out., 2007.
- FIGLIOLI, E. J. Patologia das obras de madeira. In. **Patologia das Edificações**. 1. ed. Porto Alegre: . p. 117-171. Sagra, 1991.