

# PROPRIEDADE MECÂNICA EM FLEXÃO DE COMPÓSITO EPOXÍDICO REFORÇADO COM FIBRAS DE BAMBU<sup>1</sup>

Lucas Lopes da Costa<sup>2</sup>  
Sergio Neves Monteiro<sup>3</sup>  
Rômulo Leite Loiola<sup>4</sup>

## Resumo

Compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais vêm ganhando importância sobre os compósitos de fibras sintéticas, não apenas pelo fator econômico, mas principalmente por serem biodegradáveis, provenientes de fontes renováveis e por não contribuir com o aquecimento global. Fibras extraídas do caule do bambu estão sendo agora investigadas como reforço de compósitos poliméricos. Assim o objetivo deste trabalho foi investigar as propriedades mecânicas em flexão de compósitos epoxídicos reforçados com diferentes porcentagens de fibras de bambu. Compósitos de matriz epóxi DGEBA/TETA reforçados com 0, 10, 20 e 30% em volume de fibras de bambu foram confeccionados em temperatura ambiente e pós-curados à 60°C. Em seguida, os corpos de prova foram ensaiados em flexão de acordo com a norma ASTM D 790-03. As superfícies fraturadas foram então metalizadas e analisadas por microscopia eletrônica de varredura – MEV. Os resultados revelaram uma boa interação fibra/matriz, bem como um significativo aumento na resistência à flexão com a incorporação das fibras de bambu.

**Palavras-chave:** Resistência à flexão; Compósito epoxídico; Fibra de bambu.

## MECHANICAL PROPERTIES IN FLEXURAL OF BAMBOO FIBER REINFORCED EPOXY MATRIX COMPOSITES

### Abstract

Natural fiber reinforced polymeric composites come earning importance above synthetic fibers composites, not only on economical aspect, but mainly for being biodegradable, provided from renewable fonts and for not to contribute to global warming. Extracted fibers from bamboo culm are now being investigated as reinforcement to polymeric composites. Therefore, the objective of this work was to investigate the mechanical properties in flexural of epoxy matrix composites reinforced with different amounts of bamboo fibers. Composites using DGEBA/TETA matrix epoxy reinforced up to 30% in volume of bamboo fibers were made at room temperature and after-cured at 60°C. In sequence, the specimens were three points bend-tested according to ASTM D 790-03. Fracture surfaces were then gold sputtered and analyzed by scanning electron microscopy – SEM. The results revealed a good fiber/matrix interaction, such as a significant increasing to the flexural strength with the incorporated bamboo fibers.

**Keywords:** Flexural strength; Epoxy matrix composite; Bamboo fiber.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

<sup>2</sup> *Graduando, Laboratório de Materiais Avançados – LAMAV, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense, CCT/UENF, Av. Alberto Lamego, 2000, 28015-620, Campos dos Goytacazes, RJ – Brasil. lucas.uenf@gmail.com*

<sup>3</sup> *PhD, Professor Titular, LAMAV – CCT/UENF.*

<sup>4</sup> *Técnico, LAMAV – CCT/UENF.*

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos nota-se um crescente aumento de pesquisas voltadas para o desenvolvimento de materiais que combinem propriedades distintas. Surgiram então os materiais compósitos que cada vez mais vem ganhando espaço no mercado. Entre os compósitos com melhores propriedades estão os compósitos poliméricos reforçados com fibras sintéticas. Entretanto, o uso destas fibras em compósitos poliméricos<sup>(1-4)</sup> está associado a um maior desgaste dos equipamentos, alto custo de processamento e elevada densidade.

Em um mundo no qual as mudanças climáticas provocadas pela atividade industrial são o principal problema ambiental, a possibilidade de utilizar fibras naturais como substitutas das fibras sintéticas, como vidro e carbono, é uma solução ambientalmente correta.

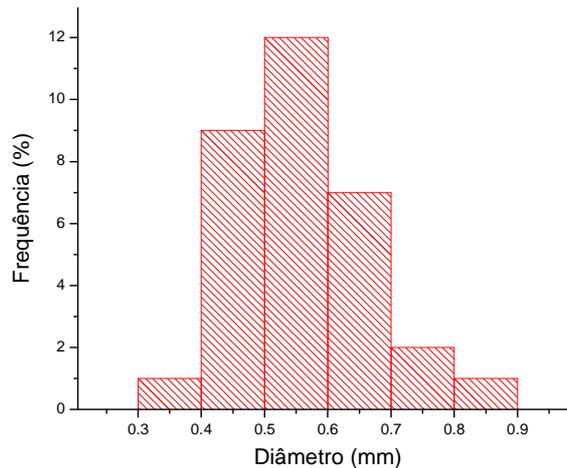
As fibras naturais, também conhecidas como lignocelulósicas, apresentam vantagens em comparação às fibras sintéticas, por serem mais baratas, renováveis, recicláveis, biodegradáveis, de baixo consumo energético na produção e neutras em relação à emissão de CO<sub>2</sub>.<sup>(3)</sup> Entre as fibras naturais mais resistentes está a fibra de bambu, ainda não comercializada no Brasil e por isso pouco investigada. Muitas são as aplicações do bambu, sobretudo como peças de artesanato e mobílias para casa. O bambu também é utilizado para fabricação de papel cartolina reciclável a partir de sua polpa e também para produção de carvão de alta qualidade a partir de seu caule.<sup>(5)</sup> No entanto, ainda são mínimas as tentativas de incorporar a fibra de bambu a uma resina polimérica.

Em termos de reforço de compósitos poliméricos, o principal inconveniente das fibras lignocelulósicas é sua natureza hidrofílica, que impede a compatibilidade com os polímeros hidrofóbicos. Contudo, tratamentos na fibra que eventualmente melhorasse a interface fibra/matriz seria uma solução. Em compensação aumentaria os gastos de processamento do compósito, que resultaria em uma menor competitividade econômica da fibra, e conseqüentemente, do compósito.<sup>(6)</sup>

Em trabalho anterior investigou-se o efeito que a incorporação das fibras de bambu provocaria na matriz poliéster submetido à flexão.<sup>(7)</sup> Os resultados revelaram um acréscimo na resistência desses compósitos. A fim de continuar o estudo sobre compósitos poliméricos com fibras de bambu, o objetivo desse trabalho foi investigar as propriedades mecânicas em flexão, juntamente com as características microestruturais associadas à fratura, de compósitos de matriz epóxi reforçada com de bambu pós-curados à 60°C.

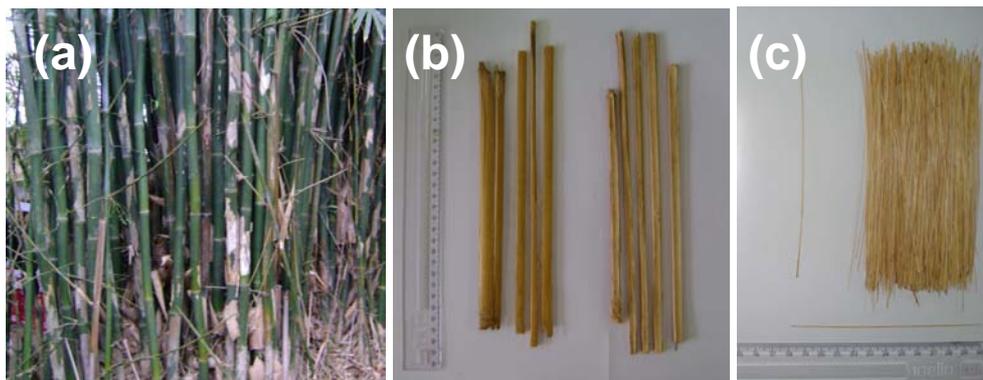
## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

As fibras de bambu foram fornecidas por uma fazenda produtora em Campos dos Goytacazes, região norte do estado do Rio de Janeiro. Do lote destas fibras foram retiradas aleatoriamente 32 amostras para uma avaliação estatística do diâmetro, como mostrado nos histogramas da Figura 1. A partir de medidas realizadas em um projetor de perfil obteve-se o seguinte histograma e um diâmetro médio de 0,56 mm.



**Figura 1** – Distribuição estatística do diâmetro das fibras de bambu.

Em seguida, as fibras foram manualmente extraídas de gomos secos de bambu, seguindo a direção natural de crescimento das fibrilas. A Figura 2 mostra o típico aspecto dos gomos de bambu *in natura*, durante o processamento de extração das fibras e as fibras prontas para utilização.



**Figura 2** – Plantação de bambu (a) e suas fibras antes (b) e após (c) serem separadas manualmente.

Antes de serem usadas as fibras de bambu passaram por um processo de limpeza e secagem em estufa a 60°C. Esta temperatura foi escolhida pelo fato da análise termogravimétrica ter mostrado que à 60°C a umidade, sempre existentes nestas fibras hidrofílicas, ser liberada sem causar degradação térmica.<sup>(8)</sup> Na etapa seguinte, feixes contendo separadamente 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30% em volume destas fibras foram alinhados de acordo com a extensão de um molde de silicone com dimensões de 57 x 13 mm. Verteu-se então, por sobre as fibras, resina epóxi do tipo éter diglicídico do bisfenol A (DGEBA), ainda líquida, mas já misturada estequiometricamente com 13 partes de endurecedor trietileno tetramina (TETA) para 100 partes de resina, ou seja, phr 13.

Os compósitos foram curados à temperatura ambiente, cerca de 25°C por 24 horas dentro do próprio molde de silicone. Foram confeccionados 3 corpos de prova para cada porcentagem de fibra de bambu, inclusive para a resina pura, sem reforço das fibras. Em seguida, os corpos de prova foram pós-curados a uma temperatura de 60°C, a fim de obter melhores propriedades da matriz epoxídica. Realizou-se um acabamento superficial com lixa, somente para eliminação das rebarbas, e posteriormente os corpos de prova foram marcados e ensaiados em



flexão de três pontos, segundo a norma ASTM D 790-03<sup>(9)</sup> em máquina Instron modelo 5582 com capacidade de 100 kN a uma velocidade de deformação de  $3,3 \times 10^{-5}$  m/s. Sendo a distância entre os suportes constante e igual a 40 mm, correspondendo a uma relação de abertura para profundidade (*span-to-depth ratio*) de aproximadamente 4, a tensão (MPa) foi obtida diretamente da carga Q (N) pela relação:

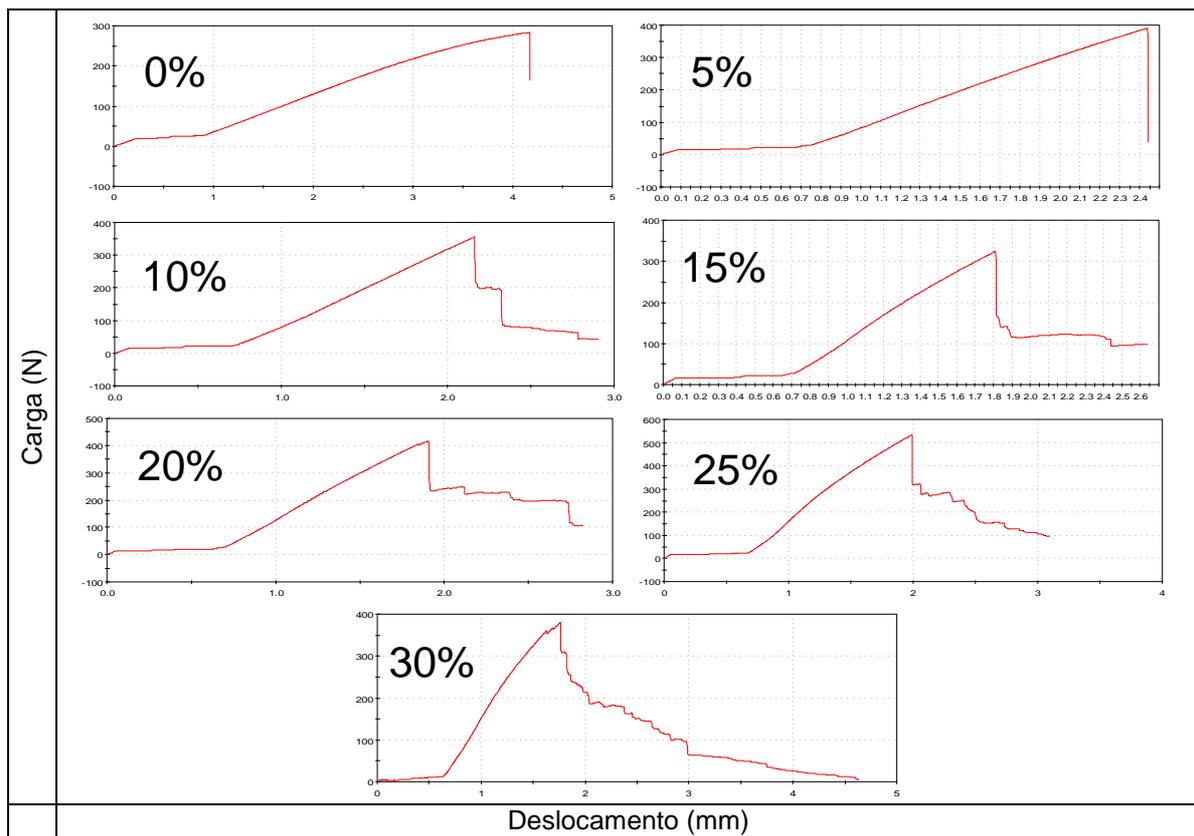
$$\sigma = \frac{120}{2bd^2} \times Q \quad [1]$$

onde **b** é a largura e **d** a espessura do corpo de prova, ambas em milímetros.

Amostras da superfície fraturada dos corpos de prova foram metalizadas com ouro, para análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) utilizando imagens geradas por elétrons secundários a 15 kV em um microscópio Shimadzu, modelo SSX-550 do Laboratório de Materiais Avançados, Lamav/CCT/UENF.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Exemplos das curvas de carga aplicada pela máquina de flexão vs. a deflexão acarretada no corpo de prova estão ilustrados na Figura 3 para cada fração incorporada de fibra de bambu.

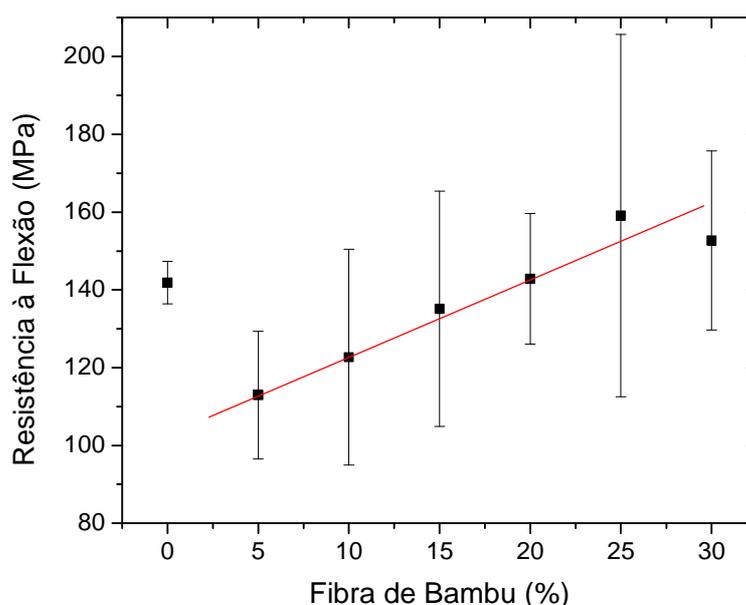


**Figura 3** - Curvas de carga vs. deslocamento dos ensaios de flexão de compósitos epoxídicos reforçados com diferentes frações de fibras de bambu.

Na Figura 3 observa-se que a curva da resina epóxi pura e a curva de 5% de fibra apresentaram similar aspecto, típicas de um comportamento frágil. Ou seja, a fratura ocorre de maneira abrupta logo após o regime elástico, isto é, ao fim do trecho linear do gráfico. A partir da curva referente a 10% de fibra, após uma repentina queda de parte da carga na fratura, desenvolve-se um longo trecho de deformação plástica do

corpo de prova, até a ruptura total. Isto significa que quantidades maiores de fibras de bambu incorporadas à matriz epóxi resistem à propagação das trincas inicialmente nucleadas na frágil matriz. Este fato é fundamental para o comportamento mecânico do compósito e será discutido com mais detalhes a seguir.

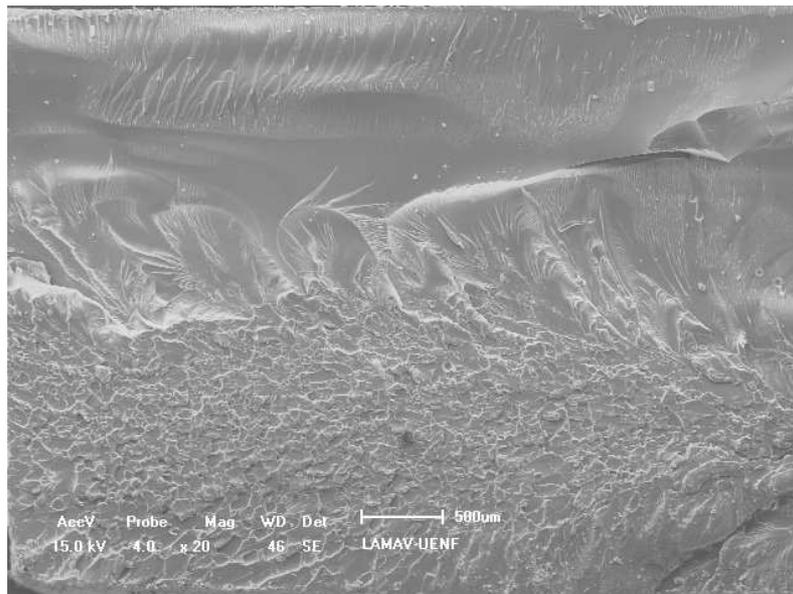
Através de gráficos como os da Figura 3, obteve-se a carga máxima de cada ensaio de flexão e, através da Eq. [1], calculou-se a máxima resistência à flexão para os compósitos pós-curados. Assim, a Figura 4 apresenta a variação da resistência à flexão com a porcentagem em volume de fibras de bambu incorporadas à matriz polimérica.



**Figura 4** – Variação da resistência à flexão dos compósitos epoxídicos com quantidade incorporada de fibras de bambu.

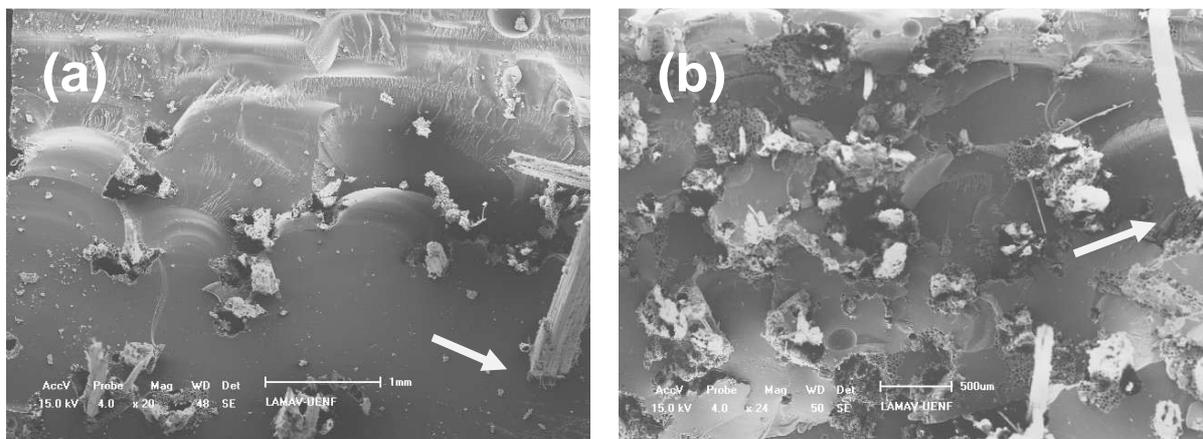
Na Figura 4 verifica-se o fato de que, após um decréscimo na resistência para o compósito com 5% de fibra, segue-se um aumento praticamente linear. Em conseqüência, para as demais frações na Figura 4 ocorre um efetivo reforço já que a resistência dos compósitos com percentual de fibra acima de 15% ultrapassa a da resina pura. Vale ressaltar que devido a heterogeneidade das fibras de bambu, apresentadas na Figura 1, os compósitos apresentaram uma grande variação na propriedade investigadas, neste caso, resistência à flexão. A variação da resistência mostrada na Figura 4 pode ser explicada com base nas curvas da Figura 3 juntamente com a análise por MEV da superfície de fratura.

A seguir será analisada uma micrografia da superfície de fratura de um corpo de prova de epóxi pura pós-curada (Figura 5). Nesta figura tem-se uma superfície homogênea característica da ruptura frágil por propagação abrupta de uma única trinca. A incorporação de fibras de bambu na matriz epoxídica pós-curada traz importantes modificações.



**Figura 5** – Micrografia por MEV da resina epóxi pura pós-curada.

A Figura 6 apresenta as superfícies de fratura dos compósitos com menor e maior incorporação de fibras de bambu. Nesta figura, tanto em (a) com 10% quanto em (b) com 30% de fibra observa-se sinais de descolamento (setas) na interface fibra/matriz. Isto é esperado, tendo em vista a fraca interação entre a fibra de bambu e a resina epoxídica. Por outro lado, a resistência à tração relativamente alta das fibras de bambu<sup>(10)</sup> contribui para a complexa situação de reforço destas fibras e permite explicar o comportamento mecânico do compósito na Figura 4.

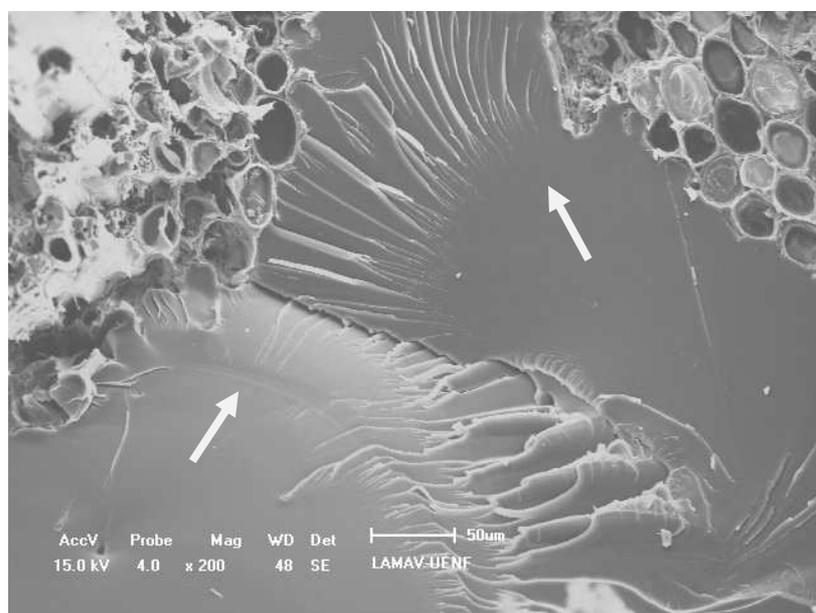


**Figura 6** – Aspecto geral da superfície de fratura dos compósitos com diferentes frações de fibras de bambu. (a) 10% e (b) 30%

Assim, diferente da epóxi pura pós-curada na Figura 5, as trincas nos compósitos são nucleadas preferencialmente nos pontos de descolamento interfaciais, setas na Figura 6, em níveis de tensões inferiores à da ruptura da matriz. No caso do compósito com 10% de fibra (Figura 6 a), esta tensão é da ordem de 120 MPa, abaixo, pois, da resistência da matriz epoxídica pós-curada, por volta de 140 MPa na Figura 4. A baixa fração de fibras não impede, neste caso, da trinca nucleada propagar-se pela matriz e romper com facilidade o compósito. Acima de 15%, no entanto, as fibras já estão em quantidade suficiente para impedir a propagação da primeira trinca nucleada. Outras trincas, porém, deverão ser nucleadas a tensões mais elevadas para prosseguirem com a ruptura do compósito.

Isto pode ser visto no gráfico da Figura 3 para 30% de fibra no qual se observam várias serrilhações correspondentes à nucleação e propagação de muitas trincas que param nas fibras como obstáculos.

A Figura 7 mostra, com maior aumento, as marcas deixadas por uma trinca bloqueada pela fibra de bambu em um compósito com 30%. Nota-se que as trincas bloqueadas pelas fibras de bambu se aglomeram próximo as fibras (setas) até atingirem energia suficiente para continuar o processo de propagação. Sugere-se, pois, que as fibras de bambu tenham um duplo papel na resistência do compósito. Ainda no estágio linear de deformação, os descolamentos da fraca interface fibra/matriz acarretam micro-trincas que permitem o início da ruptura a tensões relativamente baixas. A predominância deste papel negativo é o que aparentemente ocorre com o compósitos com 5% e 10% de fibra (Figura 4), e no qual a propagação da primeira trinca prossegue pela matriz, quase sem obstáculo, acarretando súbita ruptura.



**Figura 7** – Interação de uma trinca com a fibra de bambu.

Com maiores quantidades de fibra, o papel de reforço torna-se evidente e cada trinca que inicia propagação a partir da interface, esbarra logo com uma fibra, como mostrado na Figura 7. Até que a fibra se rompa a trinca não poderá prosseguir. Quanto maior a fração de fibra (Figura 4), maior esse papel positivo da resistência do compósito.

#### 4 CONCLUSÕES

Compósitos de matriz epoxídica DGEBA/TETA incorporada com fibras de bambu pós-curados à 60°C apresentaram elevada resistência à flexão, superior a de outros compósitos poliméricos reforçados com fibras lignocelulósicas.

A partir de 20% em volume de fibra de bambu incorporada, os compósitos pós-curados atingiram resistência superior à matriz epóxi pura, da ordem de 160MPa.

As fibras de bambu têm um duplo papel em relação à resistência mecânica do compósito. Por um lado, a fraca interface fibra/matriz permite que trincas iniciem propagação a tensões relativamente baixas podendo acarretar súbita ruptura no caso de frações de bambu até 10%. Por outro lado, a fibra também tem um papel de

obstáculo à propagação de trincas que, no caso de frações acima de 20%, contribui para um efetivo reforço no compósito.

### Agradecimentos

Os autores agradecem à CNPq, CAPES, FAPERJ e FENORTE/TECNORTE.

### REFERÊNCIAS

- 1 BLEZKI, A.K.; GASSAN, J. Composites reinforced with cellulose-based fibres. **Prog. Polym. Sci.**, v. 24, p. 221-274, 1999.
- 2 MOHANTY, A.K.; MISRA, M.; HINRICHSEN, G. Biofibers, biodegradable polymers and biocomposites: An overview. **Macromol. Mater. Eng.** v. 267-277, p. 1-24, 2000.
- 3 NETRAVALI, A.N.; CHABBA, S. Composites get greener. **Mater. Today.** v. 6, p. 22-29, 2003.
- 4 TORRES, F. G.; CUBILLAS, M.L. Study of the interfacial properties of natural fibre reinforced polyethylene. **Polym. Testing.** v. 24, p. 694-698, 2005.
- 5 Disponível em: <http://www.bambubrasileiro.com/info/util/3.html>, Acesso em: 11 fev. 2010.
- 6 MONTEIRO, S.N., LOPES, F.P.D., FERREIRA, A.S., NASCIMENTO, D.C.O., Natural fiber polymer matrix composites: cheaper, tougher and environmentally friendly, **JOM**, v. 61, p. 17-22, 2009.
- 7 COSTA, L.L.; MONTEIRO, S.N.; LOIOLA, R.L., Mechanical behavior of polyester composites reinforced with continuous bamboo fibers. **Proceedings of TMS 2010**, v. 1, p. 1-8, 2010.
- 8 D'ALMEIDA, J.R.M.; AQUINO, R.C.M.P.; MONTEIRO, S.N. Tensile mechanical properties, morphological aspects and chemical characterization of piassava (*Attalea funifera*) fibers. **Composites. Part A, Applied Science and Manufacturing**, v. 37(9), p.1473-1479, 2006.
- 9 ASTM D 790-03, "Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials", 2003.
- 10 COSTA, L.L.; LOIOLA, R.L.; MONTEIRO, S.N., Tensile strength of bamboo fibers: weibull analysis to characterize the diameter dependence. **Proceedings of TMS-ABM 2010**, v. 1, p. 1-8, 2010.