

# COMPORTAMENTO MECÂNICO DE COMPÓSITOS COM MATRIZ EPÓXI REFORÇADA COM FIBRA DE PIAÇAVA <sup>1</sup>

Ludy da Conceição Motta<sup>2</sup>  
Denise Cristina de Oliveira<sup>3</sup>  
Sergio Neves Monteiro<sup>4</sup>  
Felipe Perissé Duarte Lopes<sup>2</sup>  
Lucas Lopes da Costa<sup>2</sup>

## Resumo

A piaçava baiana da espécie *Attalea funifera* possui uma das fibras lignocelulósicas mais rígidas e duras, o que vem despertando interesse para seu uso como reforço de compósitos poliméricos. No presente trabalho avaliou-se o comportamento mecânico de compósitos com matriz de resina epóxi reforçada com diferentes quantidades relativas de fibras contínuas e alinhadas, até 40% em peso, desta piaçava. Os resultados obtidos em ensaios de flexão mostraram que somente a partir da incorporação de 20% de fibras de piaçava tem-se um efetivo reforço dos compósitos epoxídicos. A razão para este comportamento está relacionada com as características da interação fibra/matriz obtidas por análise realizada com microscópio eletrônico de varredura das superfícies de fratura dos compósitos.

**Palavras-chave:** Fibra de piaçava; Compósitos de matriz epóxi; Ensaios de flexão; Fractografia MEV.

## MECHANICAL BEHAVIOR OF PIASSAVA FIBER REINFORCED EPOXY MATRIX COMPOSITES

### Abstract

The piassava from the state of Bahia, Brazil, a palm tree of the specie *Attalea funifera* has one of the most rigid and hardest lignocellulosic fibers. In the present work, the mechanical behavior of composites with epoxy matrix reinforced with different relative amounts of continuous and aligned fibers, up to 40 wt.% was evaluated. Results obtained from bend tests showed that only above 20 wt.% of incorporated piassava fibers, the epoxy composite presents an effective reinforcement behavior. The reason for this is related to the fiber/matrix interaction characteristics that were analyzed by scanning electron microscopy images of the composites' fracture surfaces.

**Key words:** Piassava fiber; Epoxy matrix composite; Bend test; SEM fractograph.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, 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. ludymotta@yahoo.com.br

<sup>3</sup> M.Sc., Doutoranda, LAMAV – CCT/UENF.

<sup>4</sup> PhD, Professor Titular, LAMAV – CCT/UENF.

## 1 INTRODUÇÃO

Questões ambientais, como o aquecimento global, bem como considerações econômicas relacionadas à escalada do preço do petróleo, contribuíram para intensificar a aplicação em diversos setores de engenharia<sup>(1-5)</sup> de fibras naturais extraídas de plantas cultivadas. Estas fibras, também conhecidas como lignocelulósicas, apresentam vantagens comparativamente com as 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> Em particular, o uso destas fibras em compósitos poliméricos<sup>(6-9)</sup> está associado a um menor desgaste dos equipamentos, melhor acabamento em componentes moldados e propriedades superiores quando relacionadas com a densidade.

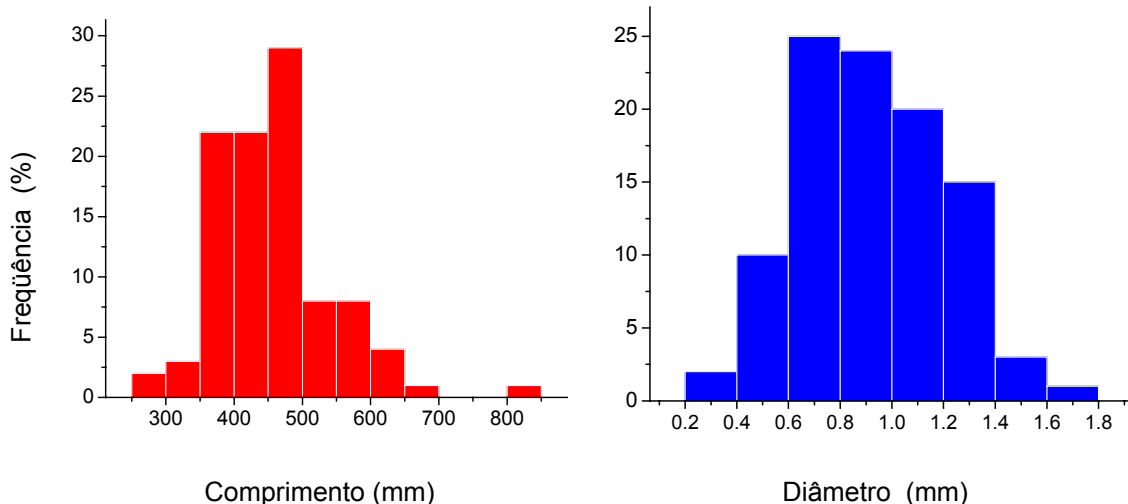
Além das fibras tradicionais como a juta, sisal, algodão, cânhamo, linho e coco, sobre as quais centenas de artigos já foram publicados, algumas novas variedades estão sendo pesquisadas, sobretudo no Brasil.<sup>(10)</sup> Uma destas fibras, em especial, a piaçava baiana extraída da palmeira, denominada cientificamente de *Attalea funifera*, é das mais rígidas e duras lignocelulósicas até agora conhecidas. Esta fibra vem sendo nos últimos anos extensivamente investigada, individualmente ou como reforço de compósitos poliméricos.<sup>(11-23)</sup> Através destas investigações mostrou-se um grande potencial em termos de aprimoramento da resistência mecânica do compósito, bem como facilidade de incorporação e moldagem até quantidades de 50% em peso.<sup>(12)</sup> Entretanto, do conhecimento dos autores do presente trabalho, ainda não foram realizados estudos sobre a incorporação da piaçava baiana em compósitos epoxídicos.

Assim, o objetivo deste trabalho é apresentar resultados preliminares da utilização da fibra de piaçava baiana como reforço contínuo e alinhado de uma resina epóxi para avaliação do comportamento mecânico, por meio de ensaios de flexão, e análise da interação fibra-matriz, através de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

As fibras de piaçava foram adquiridas como sobras residuais de uma indústria de vassouras em Campos dos Goytacazes, estado do Rio de Janeiro. A indústria comercializava estas fibras diretamente de revendedores no estado da Bahia. Embora consideradas como sobras industriais, as fibras escolhidas para este trabalho não apresentavam danos e, já em outra publicação<sup>(14)</sup> foram consideradas suficientemente compridas para serem utilizadas como reforço contínuo de corpos de prova compósitos com 122 mm de comprimento. De fato, a distribuição estatística do comprimento e do diâmetro para o lote de fibras de piaçava do presente trabalho, Fig.1, apresenta um comprimento médio de 450,25 mm e um diâmetro médio de 0,92 mm.

O comprimento médio na Figura 1 é muito superior ao comprimento crítico de 15 mm obtido em ensaios de pullout para a fibra de piaçava embutida em resina polimérica.<sup>(14)</sup> Assim, as fibras utilizadas neste trabalho são verdadeiramente longas.



**Figura 1** - Distribuição estatística do comprimento (a) e diâmetro (b) das fibras de piaçava.

As fibras de piaçava foram inicialmente limpas e secas em estufa a 60°C. Esta temperatura foi escolhida pelo fato da análise termogravimétrica ter mostrado que a 60°C a umidade, sempre existentes nestas fibras hidrofílicas, ser liberada sem causar degradação térmica.<sup>(19)</sup> Compósitos com fração em peso de 10%, 20%, 30% e 40% foram fabricados colocando-se as fibras alinhadas em um molde de aço e então vazando-se resina epóxi ainda líquida. Utilizou-se uma resina epóxi comercial do tipo éter diglicídico do bisfenol-A (DGEBA) com endurecedor trietilenotetramina (TETA) na proporção de 100 partes de resina para 15 partes de endurecedor, PHR-15, que apresenta propriedades mecânicas superiores à proporção estequiométrica.<sup>(24)</sup> A cura da matriz epoxídica dos compósitos foi realizada à temperatura ambiente, cerca de 25°C, por 24 horas dentro do próprio molde e com uma carga aplicada sobre a tampa para melhor impregnação das fibras com a resina.

Placas retangulares com dimensões médias de 152 x 122 x 8 mm foram extraídas dos moldes e cortadas em 6 corpos de prova com comprimento de 122 mm, largura de 25 mm e espessura de 8 mm. Após um acabamento superficial com lixa, somente para eliminar rebarbas, os corpos de prova foram marcados e ensaiados em flexão de três pontos, segundo a norma ASTM D 790-03 em máquina EMIC modelo DL10000 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 90 mm, correspondendo a uma relação de abertura para profundidade (*span-to-depth ratio*) de aproximadamente 9, a tensão (MPa) foi obtida diretamente da carga Q (N) pela relação:

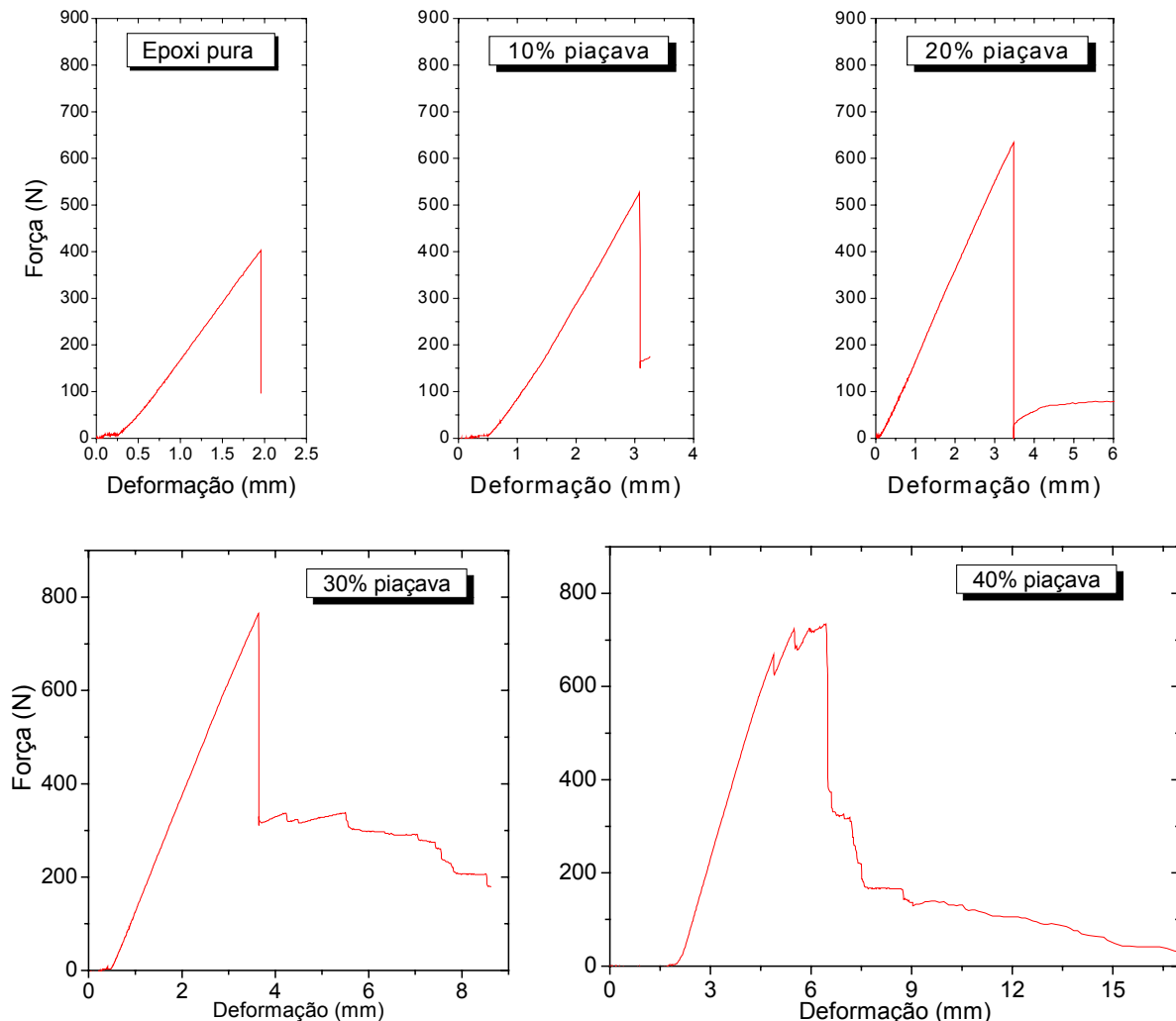
$$\sigma = \frac{135}{2bd^2} \times Q \quad [1]$$

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 Jeol, modelo JSM-460 LV do Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, PEMM/COPPE/UFRJ.

### 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 2 para cada fração incorporada de fibra de piaçava.

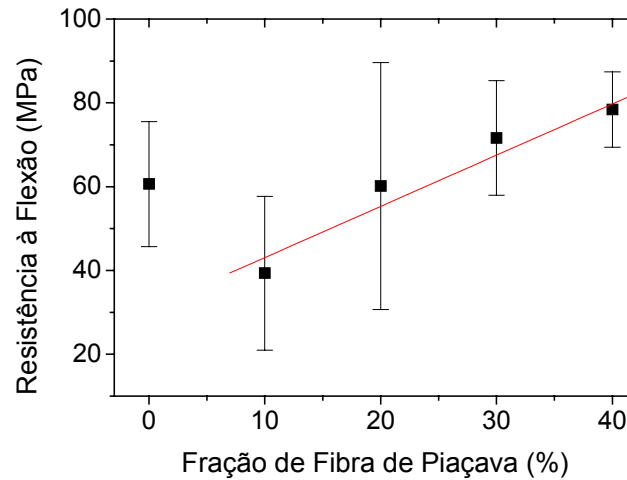


**Figura 2** - Curvas de carga vs. deslocamento dos ensaios de flexão de compósitos epoxídicos reforçados com diferentes frações de fibras de piaçava.

Na Figura 2 observa-se que, similar à curva da resina epóxi pura, as curvas de 10 e 20% de fibra são 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. Por outro lado, as curvas para 30% e 40% de fibra, após uma súbita queda de parte da carga na fratura, desenvolvem um longo trecho de deformação plástica do corpo de prova, até a ruptura total. Isto significa que quantidades maiores de fibras de piaçava incorporadas à matriz epoxídica resistem à propagação das trincas inicialmente nucleadas na frágil matriz. Este fato é fundamental para o comportamento mecânico do compósito como será discutido a seguir.

Por meio de gráficos como os da Figura 2, obteve-se a carga máxima em cada ensaio de flexão e, através da Eq. [1], calculou-se a máxima resistência à

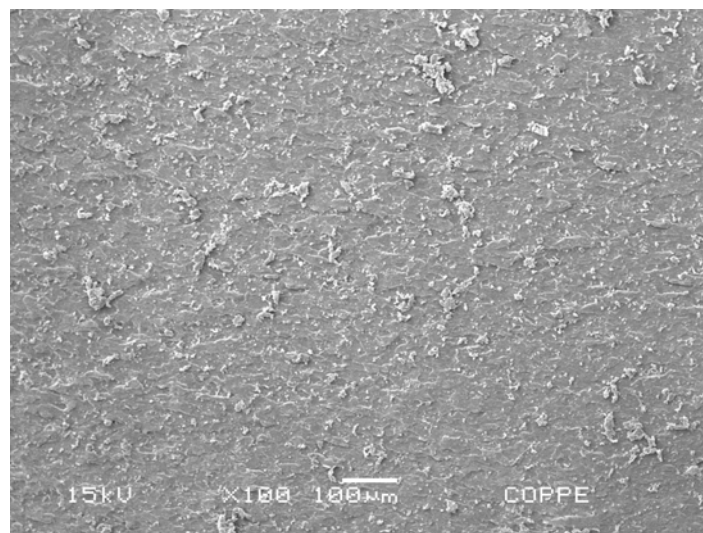
flexão dos compósitos. Assim, a Figura 3 apresenta a variação da resistência à flexão com a fração em peso das fibras de piaçava.



**Figura 3** – Variação da resistência à flexão dos compósitos epoxídicos com quantidade incorporada de fibras de piaçava.

Na Figura 3 destaca-se o fato de que, após um decréscimo na resistência para o compósito com 10% de fibra, segue-se um aumento praticamente linear. Em consequência, para as demais frações na Figura 3 ocorre um efetivo reforço já que a resistência destes compósitos ultrapassa a da resina pura. A variação da resistência mostrada na Figura 3 pode ser explicada com base nas curvas da Figura 2 juntamente com a análise por MEV da superfície de fratura.

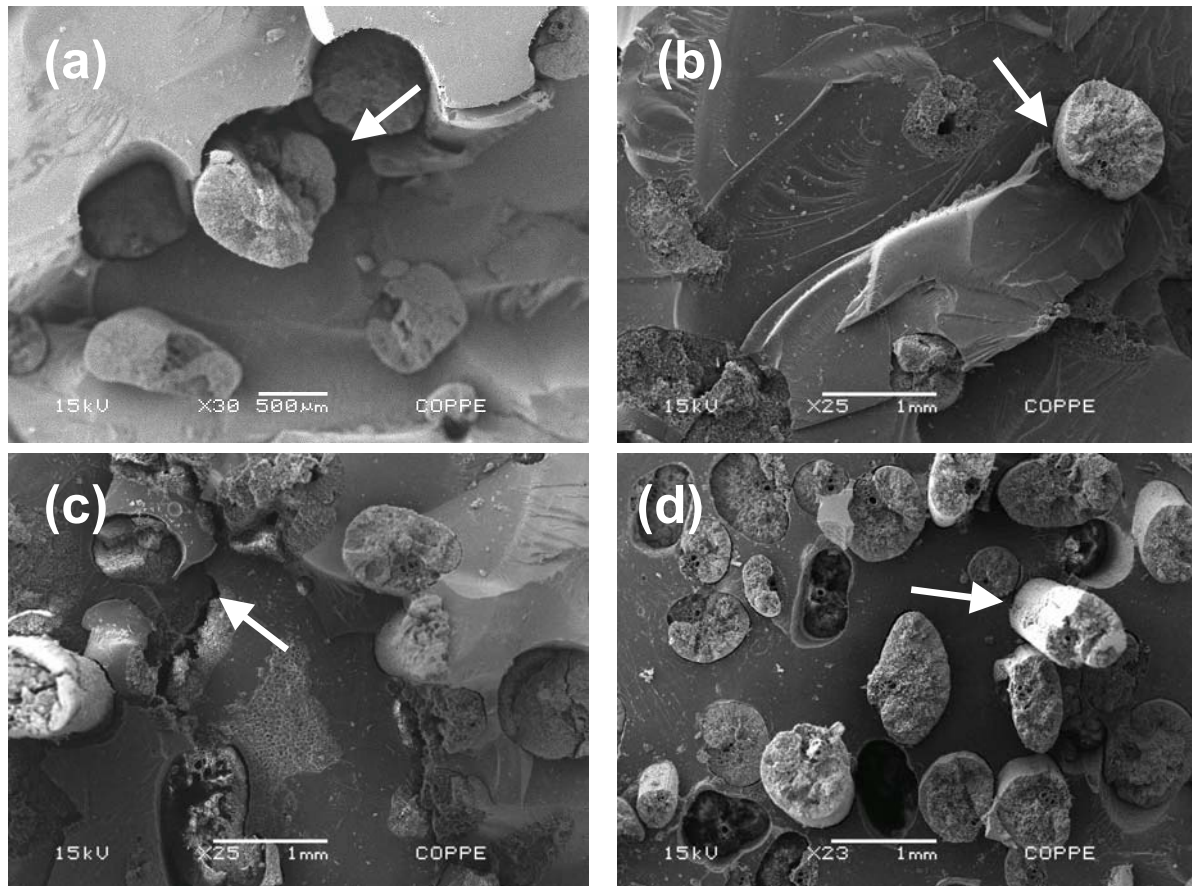
A Figura 4 apresenta a superfície de fratura em flexão de um corpo de prova de epóxi pura. Nesta figura tem-se uma superfície homogênea característica da ruptura frágil por propagação abrupta de uma única trinca. A incorporação de fibras de piaçava na matriz epoxídica traz importantes modificações.



**Figura 4** – Fractografia por MEV da resina epóxi pura.

A Figura 5 apresenta as típicas superfícies de fratura para os compósitos com diferentes frações de fibras de piaçava. Nesta figura, em todos os compósitos, observam-se sinais de descolamento (setas) na interface entre as fibras e a matriz. Isto é esperado tendo em vista a baixa tensão de cisalhamento interfacial obtida

para a fibra de piaçava em resina poliéster (14), o que é desvantajoso para o compósito. Por outro lado, a resistência à tração relativamente alta das fibras de piaçava<sup>(10,14)</sup> contribuem com vantagem para a complexa situação de reforço destas fibras e permite explicar o comportamento mecânico do compósito na Figura 3.

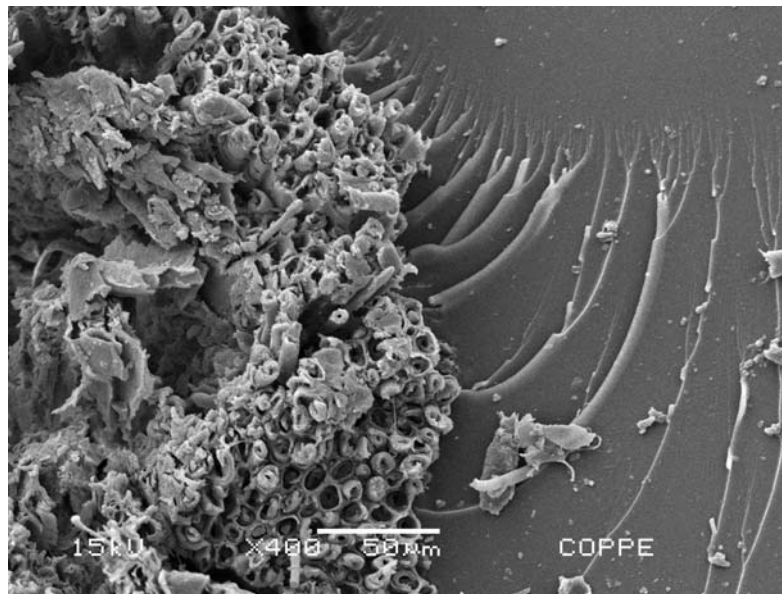


**Figura 5** – Aspecto geral da superfície de fratura dos compósitos com diferentes frações de fibras de piaçava. (a) 10%; (b) 20%; (c) 30% e (d) 40%

Assim, diferente da epóxi pura na Figura 4, as trincas nos compósitos são nucleadas preferencialmente nos pontos de descolamento interfaciais, setas na Fig. 5, em níveis de tensões inferiores à da ruptura da matriz. No caso do compósito com 10% de fibra (Figura 5(a)), esta tensão é da ordem de 40 MPa, abaixo, pois, da resistência da matriz epoxídica, por volta de 60 MPa na Figura 3. A baixa fração de fibras não impede, neste caso, da trinca nucleada propagar-se pela matriz e romper com facilidade o compósito. Acima de 20% , no entanto, as fibras já estão em quantidade suficiente para oferecerem obstáculo à propagação da primeira trinca nucleada. Outras trincas deverão ser nucleadas a tensões mais elevadas para prosseguirem com a ruptura do compósito. Isto pode ser visto no gráfico da Figura 2 para 40% de fibra no qual, antes do ponto máximo, ocorrem serrilhações correspondentes à nucleação e propagação de muitas trincas.

A Figura 6 mostra, com maior aumento, as marcas deixadas por uma trinca bloqueada pela fibra de piaçava, à esquerda, do compósito com 40%. Sugere-se, pois, que as fibras contínuas e alinhadas de piaçava tenham um duplo papel na resistência do compósito. Ainda no estágio linear de deformação, os descolamentos da fraca interface fibra/matriz acarretam microtrincas que permitem o início da ruptura a tensões relativamente baixas. A predominância deste papel negativo é o

que aparentemente ocorre com o compósito com somente 10% de fibra (Figura 3), e no qual a propagação da primeira trinca prossegue pela matriz, quase sem obstáculo, acarretando súbita ruptura.



**Figura 6** – Interação de uma trinca com a fibra de piaçava.

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 6. Até que a fibra se rompa a trinca não poderá prosseguir. Quanto maior a fração de fibra (Figura 3), maior esse papel positivo da resistência do compósito.

#### **4 CONCLUSÕES**

Compósitos de matriz epoxídica DGEBA/TETA incorporada com fibras contínuas e alinhadas de piaçava podem ser reforçados desde que a fração de fibras seja superior a 10% em peso.

As fibras de piaçava 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 piaçava 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 FAPERJ, CNPq, Capes e FENORTE/TECNORTE. É também motivo de agradecimento a permissão para uso do MEV, pelo Prof. Luiz Henrique de Almeida do PEMM/COPPE/UFRJ.

## REFERÊNCIAS

- 1 HILL, S. Cars that grow on trees. **New Scientists**, v. 153(2067), p. 36-39, 1997.
- 2 NABI SAHEB, D.; JOG, J.P. Natural fiber polymer composites: A review. **Advances in Polymer Technology**, v. 18, p. 351-363, 1999.
- 3 MOHANTY, A.K.; MISRA, M.; DRZAL, L.T. Sustainable biocomposites from renewable resources: Opportunities and challenges in the green materials world. **J. Polym. Environ.** v. 10, p. 19-26, 2002.
- 4 MARSH, G. Next step for automotive materials. **Mater. Today**, v. 6(4), p.36-43, 2003.
- 5 ZAH, R.; HISCHIER, R.; LEÃO, A.L.; BROWN, I. Curaua fibers in automobile industry – A sustainability assessment. **J. Cleaner Production**, v. 15, p. 1032-1040, 2007.
- 6 BLEDZKI, A.K.; GASSAN, J. Composites reinforced with cellulose-based fibres. **Prog. Polym. Sci**, v. 24, p. 221-274, 1999.
- 7 MOHANTY, A.K.; MISRA, M.; HINRICHSEN, G. Biofibers, biodegradable polymers and biocomposites: An overview. **Macromol. Mater. Eng.** v. 267-277, p. 1-24, 2000.
- 8 NETRAVALI, A.N.; CHABBA, S. Composites get greener. **Mater. Today**. v. 6, p. 22-29, 2003.
- 9 TORRES, F. G.; CUBILLAS, M.L. Study of the interfacial properties of natural fibre reinforced polyethylene. **Polym. Testing**. v. 24, p. 694-698, 2005.
- 10 SATYANARAYANA, K.G.; GUIMARÃES, J.L.; WYPYCH, F. Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part I: Source, production, morphology, properties and applications. **Composites: Part A**, v. 38, p. 1694-1709, 2007.
- 11 AQUINO, R.C.M.P.; D'ALMEIDA, J.R.M.; MONTEIRO, S.N. Analysis and characterization of piassava fibers. **Acta Microscopica**, v. 9(A), p. 3-4, 2000.
- 12 AQUINO, R.C.M.P.; D'ALMEIDA, J.R.M.; MONTEIRO, S.N. Flexural mechanical properties of piassava fibers (*Attalea funifera*) - resin matrix composites. **J. Mater. Sci. Letters**, v. 20, p. 1017-1019, 2001.
- 13 MONTEIRO, S.N.; AQUINO, R.C.M.P.; D'ALMEIDA, J.R.M. Propriedades de compósitos de piaçava com matriz polimérica. **M & M - Metalurgia e Materiais**, , v. 58(527), p. 97-101, 2002.
- 14 AQUINO, R.C.M.P.; MONTEIRO, S.N.; D'ALMEIDA, J.R.M. Evaluation of the critical fiber length of piassava (*Attalea funifera*) fibers using the pullout test. **J. Mater. Sci. Letters**, v. 22(21), p. 1495-1497, 2003.
- 15 AQUINO, R.C.M.P.; D'ALMEIDA, J.R.M.; MONTEIRO, S.N. Mechanical properties and microstructure of piassava fiber composites with polyester matrix. In: GLOBAL SYMPOSIUM ON RECYCLING, WASTE TREATMENT AND CLEAN TECHNOLOGY - REWAS'2004. Madrid, Espanha. p. 125-131.
- 16 DEUS, J.F.; MONTEIRO, S.N.; D'ALMEIDA, J.R.M. Effect of drying, molding pressure, and strain rate on the flexural mechanical behavior of piassava (*Attalea funifera Mart*) fiber-polyester composites. **Polymer Testing**, v. 24(6), p. 750-755, 2005.
- 17 BONELLI, C. M. C.; ELZUBAIR, A.; MIGUEZ SUAREZ, J. C.; MANO, E. B. . Comportamento térmico, mecânico e morfológico de compósitos de polietileno de alta densidade reciclado com fibra de piaçava. **Polímeros - Ciência e Tecnologia**, v. 15(4), p. 256-260, 2005.
- 18 ELZUBAIR, A.; BONELLI, C. M. C.; MIGUEZ SUAREZ, J. C.; MANO, E. B. SEM study of chemically treated piassava fibre surface. **Brazilian Journal of Morphological Sciences**, Supplement, p. 396-397, 2005.



- 19 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.
- 20 MONTEIRO, S.N.; D'ALMEIDA, J.R.M. Ensaio de pullout em fibras lignocelulósicas - Uma metodologia de análise. **Rev. Mater.** v. 11(3), p. 189-196, 2006.
- 21 MONTEIRO, S.N.; AQUINO, R.C.M.P.; LOPES, F.P.D.; D'ALMEIDA, J.R.M. Tenacidade ao entalhe por impacto Charpy de compósitos de poliéster reforçados com fibras de piaçava. **Rev. Mater.** v. 11(3), p. 204-210, 2006.
- 22 ELZUBAIR, A.; BONELLI, C.M.C.; SUAREZ, J.C.M.; MANO, E.B.. Morphological, structural, thermal and mechanical characterization of piassava fibers. **Journal of Natural Fibers**. V. 4(2), p. 13-31, 2007.
- 23 D'ALMEIDA, J.R.M.; AQUINO, R.C.M.P.; MONTEIRO, S.N. Dynamic mechanical behavior of piassava fibers (*Attalea funifera*) reinforced polyester composites. **Inter. J. Polym. Mater.** v. 56, p. 397-403, 2007.
- 24 D'ALMEIDA, J.R.M.; MONTEIRO, S.N. The influence of the hardener/resin ratio on the impact behavior of an epoxy system. **J. Polym. Eng.** v. 18, p. 235-248, 1998.