

CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS E COMPORTAMENTO MECÂNICO DE COMPÓSITOS EPOXÍDICOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE CURAUÁ ¹

Ailton da Silva Ferreira²

Sergio Neves Monteiro³

Felipe Perissé Duarte Lopes⁴

Regina Coeli Martins Paes Aquino⁵

Resumo

Foram investigadas as propriedades mecânicas, através de ensaios de flexão, e as características estruturais, por microscopia eletrônica de varredura, de compósitos com matriz epoxídica estequiométrica reforçada com diferentes quantidades, até 30% em peso, de fibras contínuas e alinhadas de curauá. Os resultados mostraram que a introdução destas fibras aumenta o nível de resistência da matriz epoxídica, embora se tenha uma grande dispersão nos valores da resistência dos compósitos, com tendência a diminuir no acaso daqueles com 30% de fibras. Estes resultados podem ser interpretados com base no duplo papel das fibras na fratura, tanto contribuindo com ruptura interfacial, quanto por ruptura dos seus próprios filamentos.

Palavras-chave: Fibras contínuas de curauá; Compósitos de matriz epóxi; Ensaios de flexão; Fractografia MEV.

STRUCTURAL CHARACTERISTICS AND MECHANICAL BEHAVIOR OF EPOXY COMPOSITES REINFORCED WITH CURAUUA FIBERS

Abstract

The mechanical properties, obtained by bend tests, and structural characteristics, analyzed by scanning electron microscopy, of stoichiometric epoxy composites reinforced with different amounts up to 30 wt.% of continuous and aligned curauua fibers were investigated. The results showed that the introduction of these fibers increases the level of mechanical resistance of the epoxy matrix, in association with a large dispersion of the values and a tendency of relatively lower increase for the 30 wt.% fiber composite. These results can be interpreted in terms of the dual role played by the fiber contribution to the fracture of the composite. In one side, by crack propagation in the weak fiber/matrix interface. In another side, by the rupture of the fiber through the tensile break of its own filaments.

Key words: Continuous curauua fibers; Epoxy matrix composites; Bend test; SEM fractography.

¹ *Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil*

² *Doutorando, 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. ailtonsilvaferreira@yahoo.com.br*

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

⁴ *Graduando, LAMAV – CCT/UENF.*

⁵ *D.Sc., Professora, CEFET – Campos, Campos dos Goytacazes -RJ.*

1 INTRODUÇÃO

Compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais lignocelulósicas, ou seja, fibras extraídas de diferentes partes de plantas, vêm sendo cada vez mais investigados⁽¹⁻³⁾ e até mesmo empregados industrialmente⁽⁴⁻⁶⁾ por suas vantagens técnicas e econômicas. Além disto, estas fibras lignocelulósicas são alternativas ambientalmente corretas, em comparação com as tradicionais fibras sintéticas, como as de vidro, carbono, náilon e aramida, entre outras razões, por seus aspectos biodegradáveis e renováveis. No Brasil, a variedade de fibras naturais é uma motivação adicional para as pesquisas de novos compósitos com estas fibras,^(7,8) denominados compósitos verdes.

A fibra de curauá extraída das folhas de uma espécie amazônica, cujo nome científico (*Ananas erectifolius*) correspondente ao mesmo gênero do abacaxi, tem grande potencial como um novo material para aplicações em engenharia.⁽⁹⁻¹⁴⁾ Pesquisas iniciadas há cerca de 10 anos⁽¹⁵⁻¹⁸⁾ revelaram propriedades físicas e mecânicas bem como características estruturais propícias para incorporação da fibra de curauá em compósitos poliméricos. Em particular, constataram-se resistências mecânicas de compósitos de fibra de curauá reforçando matriz de poliéster⁽¹⁷⁾ comparáveis aos maiores valores obtidos em compósitos reforçados por fibras naturais como os de juta na matriz de poliéster.⁽¹⁹⁾ Outra matriz polimérica termofixa que também apresenta resultados mecânicos superiores quando reforçada com fibras lignocelulósicas de alta resistência é a epoxídica.⁽²⁰⁾

Assim, o objetivo do presente trabalho foi realizar uma investigação preliminar sobre o comportamento mecânico e as características estruturais da fratura por flexão de compósitos epoxídicos reforçados com fibras contínuas e alinhadas de curauá.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

As fibras de curauá foram adquiridas da empresa Itauá Agroindustrial. Uma análise estatística efetuada com 100 fibras individuais revelou uma distribuição de comprimentos e diâmetros apresentados na Figura 1. Estas distribuições correspondem a um comprimento médio de 846 mm e um diâmetro médio de 70 μm .

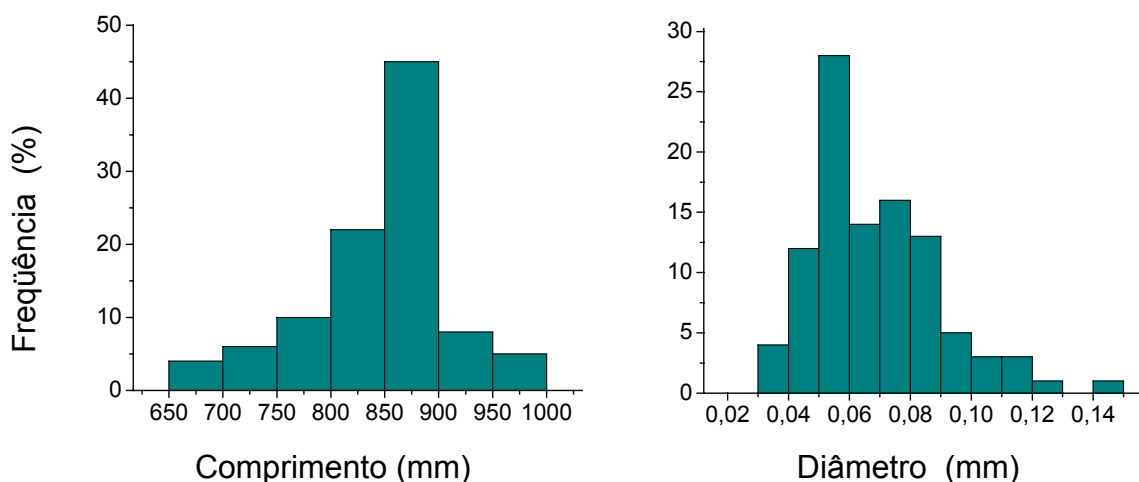


Figura 1 - Distribuição estatística do comprimento (a) e do diâmetro (b) das fibras.

Após um processo de limpeza e secagem em estufa a 60°C, as fibras foram individualmente separadas e colocadas de forma contínua em toda a extensão de 122 mm do comprimento de um molde retangular de aço com dimensões de 152 x 122 mm. Resina epoxídica do tipo éter diglicídico do bisfenol A (DGEBA) misturada ao endurecedor trietileno tetramina (TETA) na proporção estequiométrica correspondente ao phr =13 (13 partes de endurecedor por 100 partes de resina), foi adicionada ao molde juntamente com diferentes frações em peso de fibras de curauá de 0%, 10%, 20% e 30%. Os compósitos fabricados foram deixados curar por 24 horas à temperatura ambiente de aproximadamente 25°C. Durante a cura aplicou-se pressão através de uma carga sobre a tampa do molde para facilitar a impregnação da resina por entre as fibras.

Individualmente, as placas correspondentes a cada fração de fibra de curauá foram então cortadas, segundo a direção de alinhamento das fibras, em seis corpos de prova retangulares com dimensões nominais de 122 x 25 x 10 mm. Antes dos ensaios, cada corpo de prova foi medido com paquímetro em dez posições tanto na largura quanto na espessura.

Os corpos de prova foram 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 $3,3 \times 10^{-5}$ m/s. Tendo em vista ser 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 20 kV em um microscópio Jeol, modelo JSM-460 LV do Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, PEMM/COPPE/UFRJ.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 ilustra o aspecto típico das curvas de carga vs. deslocamento, obtidas nos ensaios de flexão de três pontos, para corpos de prova representativos das diferentes frações de fibras de curauá. Nesta figura observa-se que, como esperado, a curva de flexão da epóxi pura é linear, correspondendo ao regime elástico até a ruptura, o que caracteriza um comportamento frágil. O mesmo acontece com a maioria das curvas dos compósitos com 10% e 20% de fibras de curauá, como exemplificado na Figura 2, que também apresentam características frágeis. Isto significa que, ao se atingir o ponto de máxima resistência, a ruptura é súbita com imediata queda de praticamente toda a carga aplicada.

Nos compósitos com 30% de fibra, como o exemplo da Figura 2, após um início linear, as curvas apresentam um trecho parabólico com suave inclinação característica de uma certa plasticidade. Além disto, ao se atingir o máximo não ocorre uma fratura súbita e a carga oscila no seu lento decréscimo. Isto se deve à efetiva resistência que o maior número de fibras oferece à propagação de trincas através da frágil matriz epoxídica. Ou seja, com 30% de fibra, não existirá mais um percurso fácil através das fibras que permita uma única trinca propagar-se imediatamente por toda a seção do corpo de prova para súbita ruptura, como

acontece com os compósitos com 10% e 20% de fibra na Figura 2. Em conseqüência, a total ruptura dos corpos de prova com 30% de fibra de curauá só ocorre após extensa deflexão plástica dos mesmos. Isto está associado a uma elevada tenacidade destes compósitos.

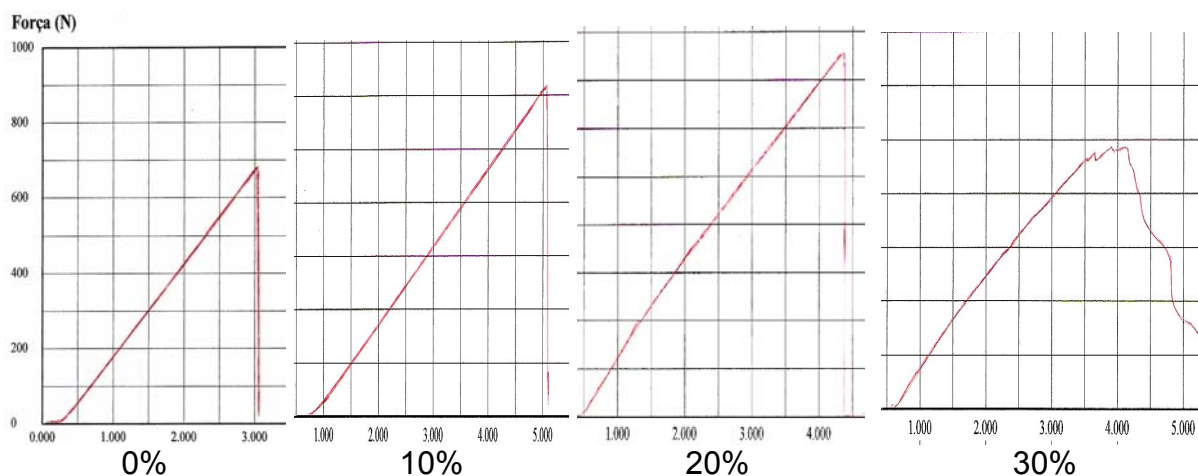


Figura 2 – Curvas de carga vs. deslocamento dos ensaios de flexão de compósitos epoxídicos reforçados com diferentes frações de fibras de curauá.

A partir de curvas como as da Figura 2, obteve-se o valor das cargas máximas, Q_m , e calculou-se, pela Eq. [1], a tensão máxima, σ_m , também conhecida como módulo de ruptura em flexão. Com base nestes valores, construiu-se o gráfico de variação da resistência a flexão dos compósitos em função da fração em peso de fibras de curauá, como mostrado na Figura 3.

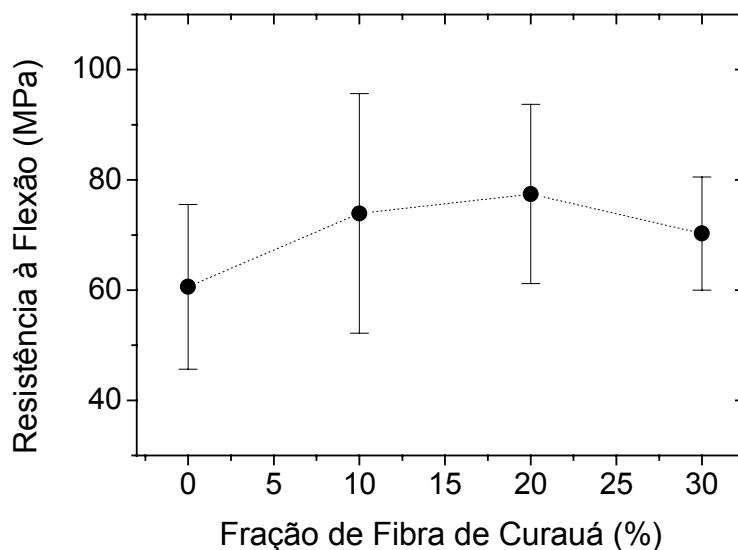


Figura 3 – Variação da resistência à flexão dos compósitos epoxídicos com quantidade incorporada de fibras de curauá.

No gráfico da Figura 3 nota-se um aumento na resistência dos compósitos relativamente à epóxi pura, 0% de fibra. Com a incorporação de fibras de curauá, a matriz epoxídica atinge, em média, resistências superiores a 70 MPa. É importante mencionar que existe uma grande dispersão nos valores, o que, em princípio, poderia suscitar dúvida quanto à eficácia do reforço das fibras de curauá na matriz

epoxídica. Entretanto, alguns valores individuais obtidos para a resistência dos compósitos, como 106 MPa, correspondem a um nível superior ao máximo esperado de 90 MPa para as resinas epoxídicas.⁽²¹⁾ Isto sugere que uma investigação com um número de corpos de prova bem maior do que os seis (para cada fração) do presente trabalho, deve ser realizada.

Os resultados da Figura 3 estão coerentes com os obtidos para compósitos de poliéster reforçados com fibras contínuas e alinhadas de curauá.⁽¹⁷⁾ Na realidade, em decorrência da elevada resistência à tração das fibras de curauá,^(12,14) é natural que compósitos com fibras longas de curauá apresentem um aumento na resistência à flexão em virtude dos esforços aplicados sobre a matriz serem transferidos para as fibras.^(22,23) Além destas questões fundamentais, existem importantes aspectos microestruturais da interação da fibra de curauá com a matriz epoxídica a serem analisados. A Figura 4 apresenta uma micrografia por MEV da superfície de fratura de um corpo de prova de resina epóxi pura

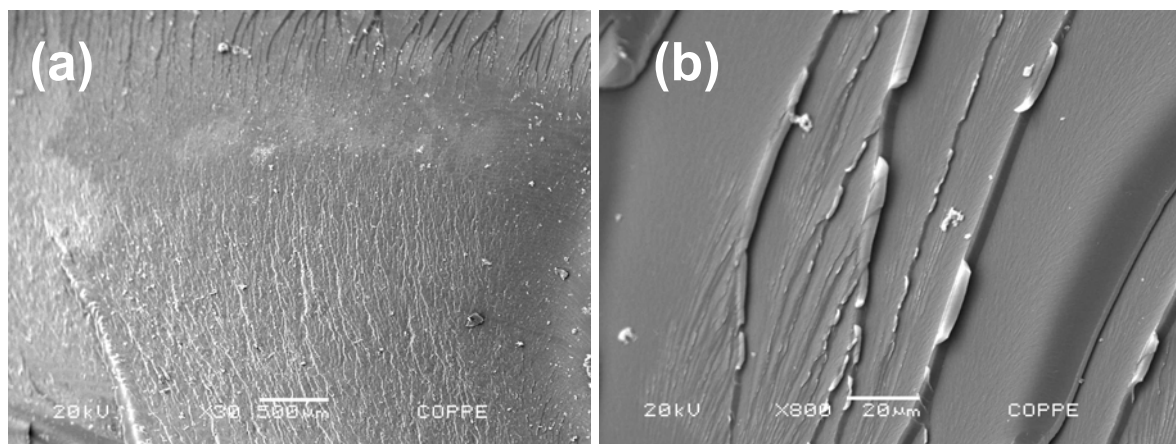


Figura 4 – Micrografia da fratura em flexão da resina epóxi pura. (a) 30 x; (b) 800 x.

Com menor aumento, observa-se na Figura 4(a) uma superfície relativamente lisa, típica da ruptura por propagação transversal de uma única trinca. Com maior aumento, Figura 4(b), observam-se regiões onde a trinca deixou marcas ramificadas (*river patterns*) características deste tipo de propagação frágil.

A Figura 5 apresenta os aspectos gerais da superfície de fratura dos três tipos de compósitos (10%, 20% e 30% de fibras de curauá) investigados. Nestes três tipos de compósitos nota-se que fibras de curauá estão ligadas à matriz epoxídica e projetam um certo comprimento além da superfície de ruptura da resina DGEBA/TETA. Isto indica que parte das fibras foi destacada da matriz, ou seja, trincas também se propagaram na interface fibra/matriz. Além disto, as pontas rompidas de cada fibra revelam a contribuição individual no processo de ruptura.

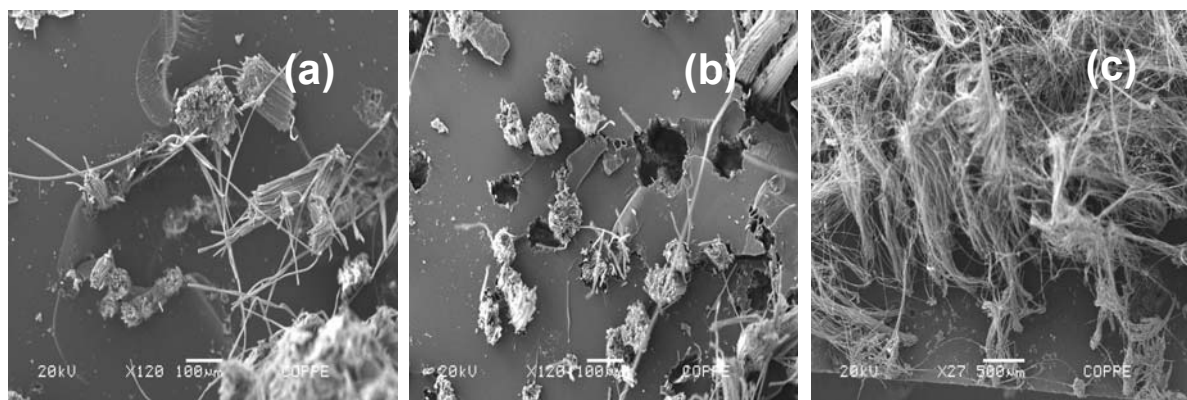


Figura 5 – Aspecto geral da superfície de fratura dos compósitos com diferentes frações de fibras de curauá. (a) 10%; (b) 20% e (c) 30%.

Outro aspecto importante de ser notado na Figura 5 é o desdobramento das fibras em filamentos, muito acentuado na Figura 5(c), correspondente ao compósito com 30% em peso de fibra de curauá. A estrutura filamentar das fibras de curauá foi estudada em outra publicação⁽²⁴⁾ que revelou este fenômeno de desdobramento no processo de ruptura.

A Figura 6 exemplifica, em um compósito com fração de 20%, a estrutura filamentar de uma fibra aderida à superfície de ruptura da matriz epoxídica. Nesta figura, nota-se que alguns filamentos já estão desprendidos da fibra. Este processo de desdobramento filamentar, com possibilidade subsequente de ruptura independente de cada filamento (Figura 5(c)), contribui para a extensa deformação do compósito com 30% de fibra de curauá na Figura 2.

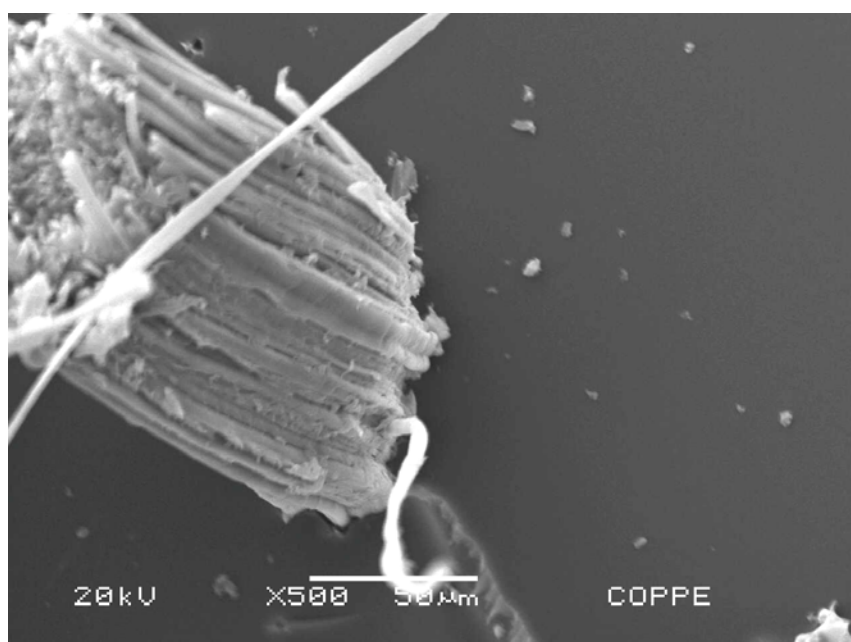


Figura 6 – Detalhe de uma fibra de curauá formada por filamentos, que se projeta da matriz onde está aderida.

Os dois aspectos acima mencionados, de ruptura da interface fibra/matriz e ruptura na própria fibra, possuem papéis distintos na fratura do compósito. Uma baixa tensão cisalhante interfacial, como no caso das fibras de curauá em matriz polimérica,⁽¹⁴⁾ tende a facilitar o início do processo de ruptura devido à formação de falhas na matriz epoxídica, como mostrado na Figura 7. Em consequência, a tensão

máxima na fratura é reduzida. Isto explicaria o decréscimo ocorrido na resistência do compósito com 30% de fibra (Figura 3), em comparação com os outros, já que existe quantidade relativamente maior de interface fibra/matriz para maior fração de fibra.

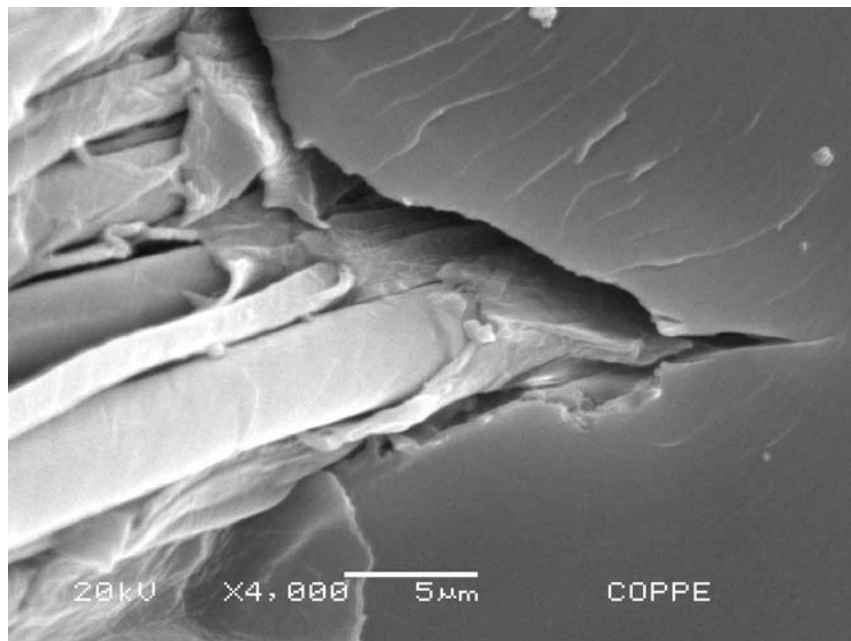


Figura 7 – Descolamento dos filamentos de uma fibra da matriz formando uma falha na resina epóxi.

Por outro lado, a fibra de curauá é das mais resistentes lignocelulósicas⁽⁷⁻¹²⁾ e assim contribui para retardar o processo de ruptura no compósito. Em decorrência, a tensão máxima na fratura (Figuras 2 e 3) é aumentada relativamente à da matriz epoxídica.

4 CONCLUSÕES

Compósitos de matriz epoxídica estequiométrica DGEBA/TETA reforçada com fibras contínuas e alinhadas de curauá apresentam resistência à flexão em nível superior ao da matriz epoxídica pura.

Para 30% em peso de fibra, cai a eficiência do reforço na resistência do compósito mas aumenta substancialmente sua capacidade de deformação após o início da ruptura.

O papel das fibras de curauá está associado não só à ruptura através da interface fibra/matriz, o que contribui para diminuir a resistência, mas também à ruptura individual das fibras e de seus filamentos, o que garante maior resistência ao 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 BLEDZKI, A.K.; GASSAN, J. Composites reinforced with cellulose-based fibres. **Prog. Polym. Sci**, v. 24, p. 221-274, 1999.
- 2 NABI SAHEB, D.; JOG, J.P. Natural fiber polymer composites: A review. **Advances in Polymer Technology**, v. 18, p. 351-363, 1999.
- 3 EICHHORN, S. J.; BAILLIE, C.A.; ZAFEIROPOULOS, N.; MWAKAMBO, L.Y.; ANSELL, M.P.; DUFRESNE, A. Review of current international research into cellulosic fibres and composites. **J. Mater. Science**, v. 36, p. 2107-2113, 2001.
- 4 HILL, S. Cars that grow on trees. **New Scientists**, v. 153(2067), p. 36-39, 1997.
- 5 MARSH, G. Next step for automotive materials. **Mater. Today**, v. 6(4), p.36-43, 2003.
- 6 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.
- 7 SATYANARAYANA, K.G.; WYPYCH, F.; GUIMARÃES, J.L.; AMICO, C.S.; SYDENSTRICKER, T.H.D.; RAMOS, L.P. Studies on natural fibers of Brazil and green composites. **Met. Mater. Proc.**, v. 17(3-4), p. 183-194, 2005.
- 8 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.
- 9 CARASCHI, J.C.; LEÃO, A.L. Chemical and thermal characterization of curaua fiber. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FRONTIERS OF POLYMERS AND ADVANCED MATERIALS, Poznan, Polonia, 1999, p. 13-14.
- 10 CARASCHI, J.C.; LEÃO, A.L. Characterization of curaua fiber. **Mol. Cryst. Liq. Cryst.**, v. 353, p. 149-152, 2000.
- 11 MONTEIRO S.N.; DE DEUS, J.F.; d'ALMEIDA, J.R.M. Mechanical and structural characterization of curaua fibers. In: PROCEEDINGS OF CHARACTERIZATION OF MINERALS, METALS & MATERIALS - TMS CONFERENCE, San Antonio, EUA, Março, 2006, p. 1-7.
- 12 TOMCZAK, F.; SATYANARAYANA, K.G.; SYDENSTRICKER, T.H.D. Studies on lignocellulosic fibers of Brazil: Part III – Morphology and properties of Brazilian curaua fibers. **Composites: Part A**. v. 38, p. 2227-2236, 2007.
- 13 MARQUES, G.; GUTIERREZ, A.; DEL RIO, J.C. Chemical characterization of lignin and lipophilic fractions from leaf fibers of curaua (*Ananas erectifolius*). **J. Agric. Food Chem.** v. 55, p. 1327-1336, 2007.
- 14 MONTEIRO, S.N.; AQUINO, R.C.M.P.; LOPES, F.P.D. Performance of curaua fibers in pullout tests. **J. Mater. Sci.** v. 43, p.489-493, 2008.
- 15 LEÃO, A.L.; TAN, I.H.; CARASCHI, J.C. Curaua fiber – A tropical natural fiber from Amazon – Potential and applications in composites. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED COMPOSITES, Hurgada, Egito, Maio, 1998, p. 557-564.
- 16 DE ARAUJO, C.R.; PERLAZA, L.C.; MOTHÉ, C.G. Thermal properties of commercial and castor oil polyurethane composites with curaua fiber. **Natural Polym. and Composites**, v. 4, p. 547-550, 2002.
- 17 MONTEIRO, S.N.; AQUINO, R.C.M.P.; LOPES, F.P.D.; CARVALHO, E.A.; D'ALMEIDA, J.R.M. Comportamento mecânico e características estruturais de compósitos poliméricos reforçados com fibras contínuas e alinhadas de curauá. **Revista Matéria**, v. 11, n. 3, p. 197-203, 2006.

- 18 MONTEIRO, S.N.; FERREIRA, A. S.; AQUINO, R.C.M.P.; LOPES, F.P.D.; d'ALMEIDA, J.R.M. Fracture behavior of curaua fiber reinforced polyester composites, In: PROCEEDINGS OF CHARACTERIZATION OF MINERALS, METALS & MATERIALS - TMS CONFERENCE, Orlando, EUA, Fevereiro, 2007, p. 1-6.
- 19 MOHANTY, A.K.; MISRA, M. Studies on jute composites - A literature review. **Polym.-Plast. Technol. & Eng.**, v. 34, p.729-792, 1995.
- 20 SHAH, A.N.; LAKKAD, S.C. Mechanical Properties of Jute Reinforced Plastics, **Fiber Sci. & Technol.** vol.15, p. 41-46, 1981.
- 21 CALLISTER Jr., W.D. **Materials Science and Engineering – An Introduction**, 5ª Edição, Nova York : John Wiley & Sons, 2000, p. 770.
- 22 AGARWAL, B.D.; BROUTMAN, L.J. **Analysis and Performance of Fiber Composites**, Nova York: John Wiley & Sons, 1990.
- 23 ASHBEE, K.H.G. **Fundamental Principles of Fiber Reinforced Composites**, Lancaster, Inglaterra: Technomic Pub. Co. Inc., 1993.
- 24 MONTEIRO, S.N.; RANGEL, J.J.A. Efeito da micromorfologia das fibras de curauá como reforço em compósitos de matriz polimérica. In: 62º CONGRESSO ANUAL DA ABM, Julho de 2007, Vitória, ES, p. 748-756.