

COMPÓSITOS DE RESINA EPÓXI INCORPORADA COM FIBRA DE COCO – PROPRIEDADES MECÂNICAS E CARACTERÍSTICAS DA FRATURA ¹

*Helvio Pessanha Guimarães Santafé Júnior²
Sergio Neves Monteiro³
Lucas Lopes da Costa⁴*

Resumo

Compósitos poliméricos incorporados com fibras extraídas da casca de coco vêm tendo uma crescente utilização, inclusive como componentes com elevado valor agregado na indústria automobilística. Apesar do grande número de trabalhos científicos e tecnológicos dedicados a este tipo de compósitos, o emprego de matrizes epoxídicas ainda foi estudado. Assim, o objetivo deste trabalho foi investigar as propriedades mecânicas e as características da fratura de compósitos com matriz de resina epóxi estequiométrica incorporada com até 30% em volume de fibras longas e alinhadas de casca de coco verde. Ensaio de flexão e análise por microscopia eletrônica de varredura deram suporte experimental a esta investigação. Os resultados mostraram que a fibra de coco, mesmo longa e alinhada, não causa efeito de reforço já que diminui a resistência à flexão da matriz epoxídica. Por outro lado, a incorporação destas fibras acima de 10% aumenta significativamente o nível de deformação do compósito, contribuindo para maior tenacidade. Os mecanismos de nucleação de trincas na fraca interface fibra/ matriz bem como o obstáculo causado pelas longas fibras de coco à propagação destas trincas são responsáveis pelo comportamento mecânico e características da fratura dos compósitos.

Palavras-chave: Fibra de coco; Compósito epoxídico; Ensaio de flexão; Características da fratura.

COIR FIBER INCORPORATED EPOXY COMPOSITES – MECHANICAL PROPERTIES AND FRACTURE CHARACTERISTICS

Abstract

Polymeric Composites incorporated with fibers extracted from the coconut husk, also known as coir fibers, are being increasingly used in many applications that include high value components for the automobile industry. In spite of the great number of both scientific and technological works on this type of composites, studies regarding coir fiber incorporated into epoxy matrix are still to be done. Therefore, the objective of this work was to investigate the mechanical properties and fracture characteristics of stoichiometric epoxy composites incorporated with up to 30% in volume of long and aligned coir fibers from green coconut husks. Bend testes and scanning electron microscopy analysis were carried out to support this investigation. The results showed that, even though the coir fibers were long and aligned, no reinforcement effect was obtained in the flexural strength. By contrast, the addition of coir fiber increases significantly the deformation attained by composites with more than 10%, which contributes to an elevated toughness. Experimentally observed crack nucleation at the weak fiber/matrix interface and the obstacle caused by the long coir fiber to crack propagation are the mechanisms responsible for the mechanical behavior and fracture characteristics of these composites.

Key words: Coir fiber; Epoxy composite; Bend test; Fracture characteristics.

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

² *M.Sc., 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. santafejr@uenf.br*

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

⁴ *Graduando, LAMAV – CCT/UENF.*

INTRODUÇÃO

O coco é um dos frutos mais consumidos nas regiões tropicais costeiras do planeta, sobretudo por seus atributos nutritivos e gastronômicos associados à água, leite e polpa. As facilidades de reprodução natural e o cultivo em larga escala contribuem para o reconhecimento do coqueiro (*Cocos nucifera*) como um importante recurso econômico para muitos países em desenvolvimento. No caso da Índia, além da parte alimentícia do fruto, outras partes como o tronco, as folhas e até as cascas do coco vêm sendo, de longa data, utilizadas como fonte de energia, material de construção e artesanato.⁽¹⁻³⁾

No Brasil, o crescimento do consumo de coco tornou insuficiente a produção anual de cerca de 1,5 bilhões de frutos, resultando em importações cada vez maiores.⁽⁴⁾ Isto gerou também interesse no aproveitamento das cascas, particularmente as dos cocos verdes, que podem ser utilizadas tanto para a fabricação de carvão⁽⁵⁾ quanto como matéria prima para a extração de fibras lignocelulósicas.⁽⁶⁾ Estas fibras de coco, extraídas do mesocarpo, correspondem hoje a um potencial de cerca de 400 mil toneladas disponíveis anualmente. Boa parte destas fibras é atualmente descartada no meio ambiente e, embora biodegradáveis, contribuem para a poluição e a expansão dos lixões.

Muitas iniciativas já reconhecem a fibra da casca do coco verde como um importante material natural que apresenta vantagens técnicas, econômicas e ambientais. Por estas razões, as fibras de coco no Brasil já estão sendo industrialmente incorporadas em compósitos para usos que vão desde a substituição do xaxim extraído de uma palmeira em extinção na mata atlântica⁽⁷⁾ até componentes para veículos.⁽⁸⁾ Paralelamente a esses esforços tecnológicos visando o emprego industrial das fibras de coco, muitos trabalhos científicos vêm sendo dedicados ao emprego destas fibras, com maior valor agregado, em compósitos poliméricos.⁽⁹⁻¹⁴⁾

Trabalhos sobre o efeito da incorporação de fibras de coco, tanto na forma de mantas quanto de aglomerados, em compósitos com matriz poliéster^(12,13) mostraram que a resistência à flexão da matriz é reduzida à medida que aumenta a quantidade de fibra incorporada. Este fato havia sido atribuído⁽⁹⁾ ao baixo módulo de elasticidade das fibras de coco em comparação com a resina poliéster. Isto, em princípio, comprometeria uma eficiente transferência de cargas mecânicas para a fibra de coco, anulando seu efeito de reforço. Entretanto, o módulo de elasticidade da fibra de coco, 2,5 a 4,5 GPa,⁽⁶⁾ é da mesma ordem da resina poliéster, 2 a 4 GPa.⁽¹⁵⁾ Assim, levanta-se uma questão relativa a qual seria o mecanismo que impediria a fibra de coco de reforçar um compósito polimérico, o que vem sendo investigado em diversos trabalhos⁽⁹⁻¹⁴⁾ realizados sobre este assunto.

Apesar destes trabalhos, ainda não foi realizada uma investigação sistemática sobre a incorporação de fibras longas e alinhadas de coco em compósitos com matriz de resina epóxi. Baseado nessas considerações, o objetivo do presente trabalho foi realizar uma avaliação preliminar das propriedades mecânicas em flexão, juntamente com as características microestruturais associadas à fratura, de compósitos de matriz epóxi incorporada com fibras longas e alinhadas de coco.

MATERIAIS E MÉTODOS

As fibras de coco deste trabalho foram cedidas pela empresa Coco Verde Reciclado.⁽⁷⁾ Do lote destas fibras foram retiradas aleatoriamente 100 amostras para

uma avaliação estatística do comprimento e do diâmetro como mostrado nos histogramas da Figura 1. A partir destes histogramas obteve-se um comprimento médio de 178,80 mm e um diâmetro médio de 0,28 mm.

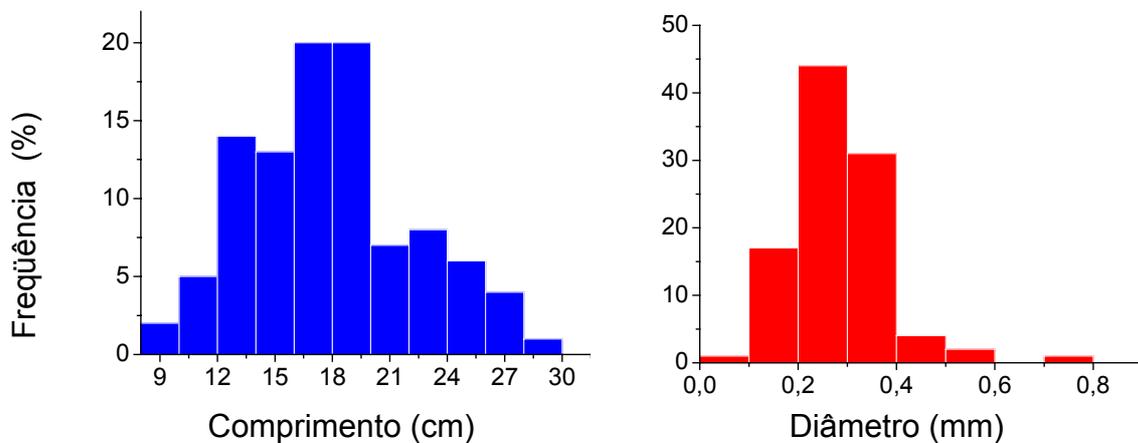


Figura 1 - Distribuição estatística do comprimento (a) e diâmetro (b) das fibras de coco.

Antes de serem usadas as fibras de coco passaram por um processo de limpeza e secagem. Na etapa seguinte, feixes contendo separadamente 10%, 20% e 30% em volume destas fibras foram alinhados ao longo de toda a extensão de um molde de aço com dimensões de 152 x 122 mm. Vazou-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 parte de resina, ou seja, phr 13.

As placas moldadas destes compósitos foram curadas à temperatura ambiente, cerca de 25°C por 24 horas, mantendo-se uma carga constante de uma tonelada sobre a tampa do molde para facilitar a impregnação da resina DGEBA/TETA por entre as fibras de coco.

Após a cura, cada placa correspondente a uma determinada fração de fibra de coco foi cortada segundo a direção de alinhamento das fibras em 6 corpos de prova retangulares com dimensões nominais de 122 x 25 x 8 mm. Antes dos ensaios, cada corpo de prova foi medido com paquímetro em dez posições, tanto na largura, quanto na espessura, para um cálculo preciso da resistência dos compósitos.

Os corpos de prova foram submetidos a ensaios de flexão em 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) limite de resistência à flexão foi obtida diretamente da carga Q (N) máxima pela relação:

$$\sigma_m = \frac{135}{2bd^2} \times Q_m \quad [1]$$

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.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Curvas de carga vs. deslocamento, obtidas nos ensaios de flexão em três pontos, estão mostradas na Figura 2 para corpos de prova representativos das diferentes frações volumétricas de fibras de coco.

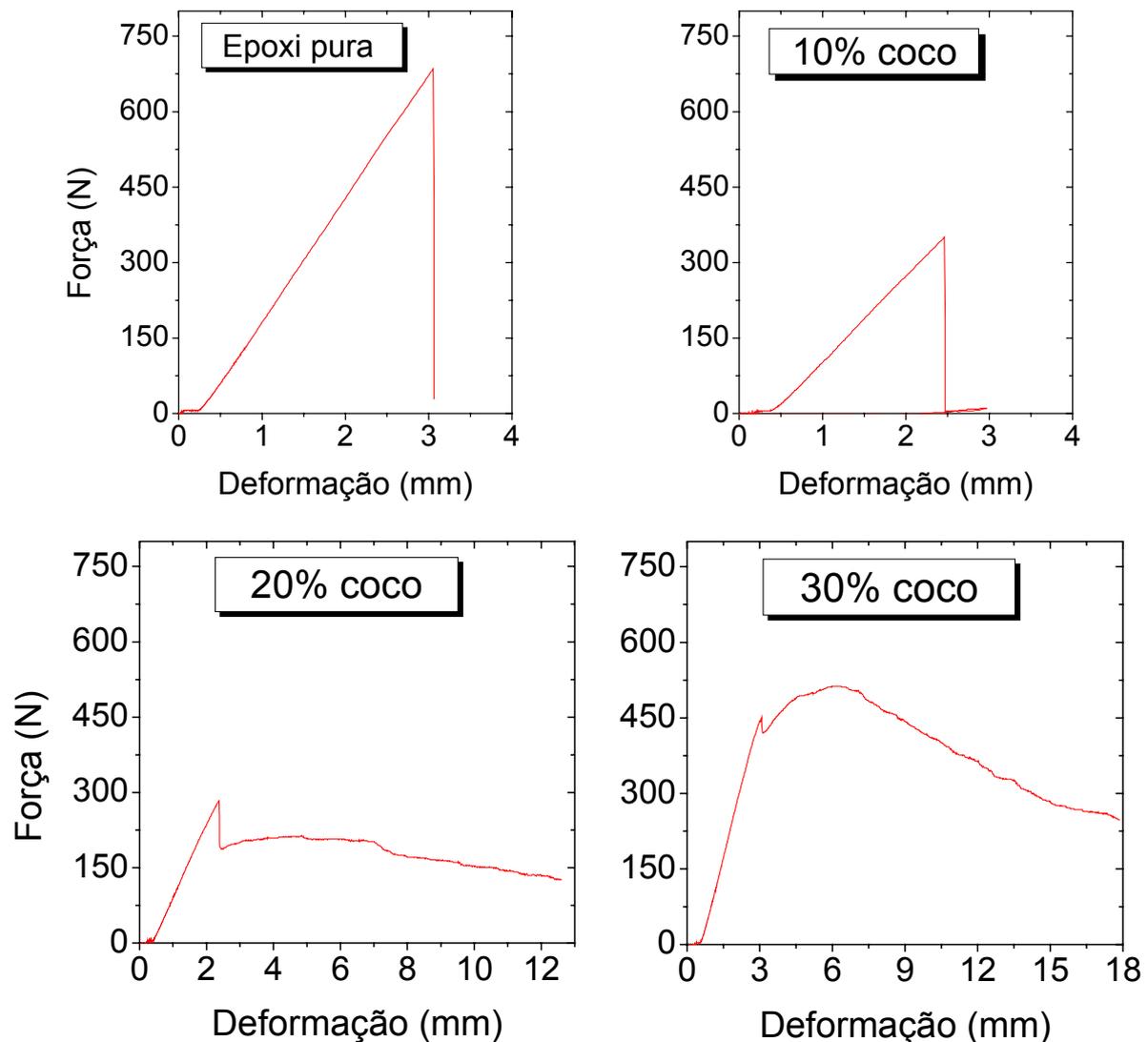


Figura 2 - Curvas de carga vs. deslocamento dos ensaios de flexão de compósitos epoxídicos incorporados com diferentes frações de fibras de coco.

Na Figura 2 é importante notar que a curva de flexão da epóxi pura encontra-se em um nível superior à de todos os compósitos, ou seja, a incorporação da fibra de coco não acarretou um reforço na matriz epoxídica, mas sim um decréscimo sensível na resistência à flexão. Outro aspecto de destaque na Figura 2 é o formato das curvas. A curva da resina epóxi pura caracteriza um comportamento frágil com fratura ao término da reta elástica. Este comportamento é esperado para a resina DGEBA/TETA estequiométrica.⁽¹⁶⁾ O mesmo acontece com o compósito com 10% de fibra de coco na Figura 2, no qual a ruptura é súbita com queda imediata da carga de flexão aplicada. Por outro lado, os compósitos com 20 e 30% de fibra (Figura 2), sofrem uma pequena queda ao final do regime elástico, mas ainda continuam resistindo à carga aplicada por uma extensa deformação plástica.

Com base em curvas como as da Figura 2, determinou-se o valor das cargas máximas, Q_m , atingidas nos ensaios e calculou-se, pela Eq. [1], a tensão máxima de resistência à flexão σ_m . A Figura 3 apresenta a variação desta tensão máxima, ou seja, da resistência à flexão, com a fração volumétrica de fibras de coco.

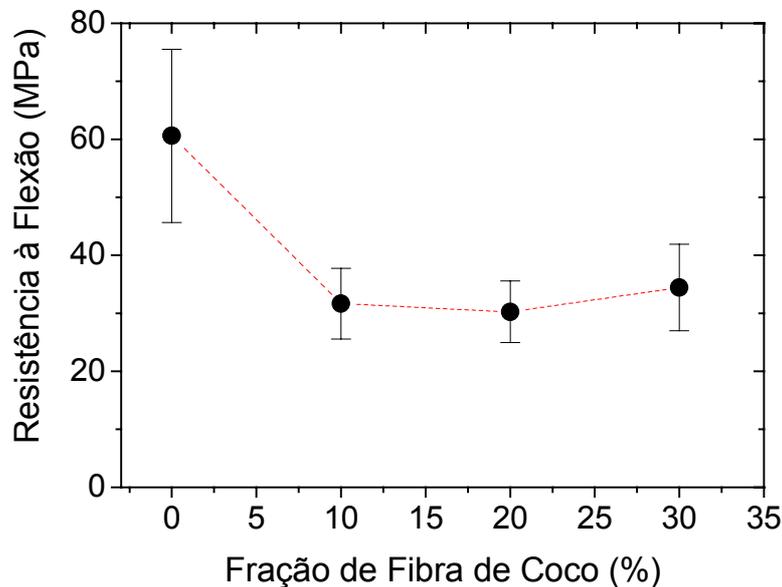


Figura 3 – Variação da resistência à flexão dos compósitos epoxídicos com a fração volumétrica de fibras de coco.

No gráfico da Figura 3, como já havia sido verificado nas curvas da Fig. 2, nota-se que a incorporação das fibras de coco na matriz epoxídica, reduz de quase à metade a resistência dos compósitos. Este resultado indica que as fibras de coco, mesmo sendo longas e alinhadas, de maneira a melhor resistirem ao teste de flexão, não reforçam a matriz epoxídica. Decréscimo na resistência à flexão também foi constatado^(12,13) em compósitos de matriz poliéster incorporada com fibras de coco similares às do presente trabalho. Na realidade, as fibras de coco não possuem resistência à tração tão elevada quanto as de sisal, curauá ou piaçava.⁽⁶⁾ Ainda assim, sua resistência à tração, 95 a 174 MPa⁽⁶⁾ é superior à da matriz epoxídica, da ordem de 27,6 a 90 MPa.⁽¹⁵⁾

Como foi comentado na introdução, a diferença entre os módulos de elasticidade da fibra de coco e da resina poliéster, não justifica o decréscimo na resistência do compósito mostrado na Figura 3. A razão das fibras de coco não reforçarem matrizes poliméricas esta relacionada com a fraca interface fibra/matriz, que se torna local preferencial de nucleação de trincas durante solicitações mecânicas do compósito, como no caso de um ensaio de flexão. Estas questões podem ser mais bem esclarecidas através da análise de aspectos microestruturais da fratura dos compósitos.

A Figura 4 apresenta a micrografia típica da superfície de fratura em flexão de um corpo de prova de epóxi pura. Com menor aumento, a Figura 4(a) revela uma superfície de fratura uniforme e característica da súbita ruptura por propagação transversal de uma única trinca. Com maior aumento, Figura 4(b), notam-se marcas ramificadas conhecidas como *river patterns*, associadas à passagem da trinca inicial pela estrutura frágil da resina DGEBA/TETA estequiométrica.

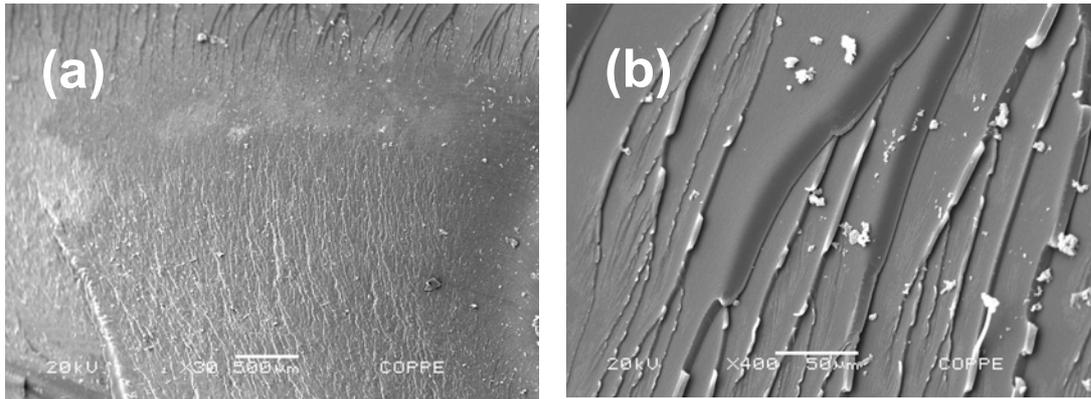
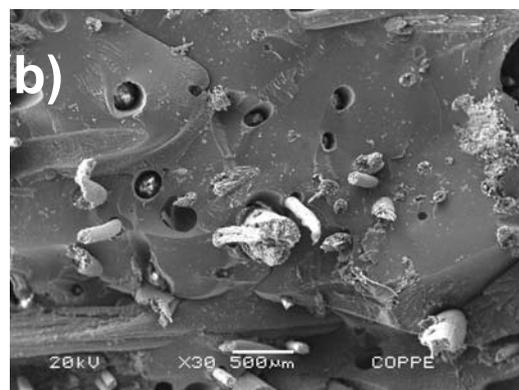
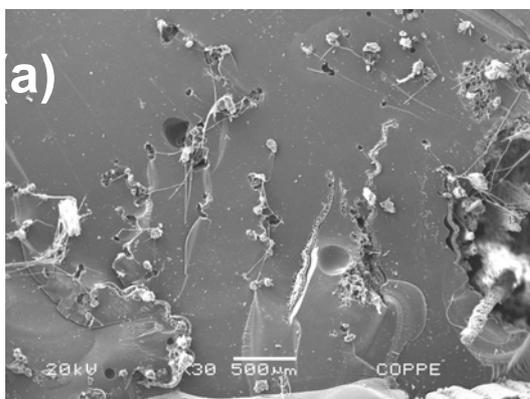


Figura 4 – Fractografia por MEV da resina epóxi pura: (a) 30x; (b) 400x.

A Figura 5 apresenta as fractografias por MEV dos compósitos, de matriz epoxídica, incorporados com fibras longas e alinhadas de coco. Verifica-se que para o compósito com 10% de fibra, Figura 5(a), a superfície de fratura esta basicamente associada ao um plano liso na matriz. Ou seja, possivelmente uma única trinca transversal rompeu o compósito cortando as poucas fibras de coco existentes. Deste modo, a fratura tem um aspecto frágil como a da epóxi pura na Figura 4. A razão para a resistência do compósito ser menor que a da epóxi pura (Figuras 2 e 3), deve-se à nucleação da trinca ter ocorrido em falhas de descolamento na fraca interface fibra/matriz como mostrado na Figura 5(d). O mesmo mecanismo de nucleação de trinca ocorre para os compósitos com 20%, (Figura 5(b) e 30% (Figura 5(c)). Entretanto, nestes dois últimos casos, aparentemente várias trincas participam da fratura, como pode ser verificado pelas superfícies mais onduladas e irregulares no rompimento da matriz.

Sugere-se que a maior quantidade de fibras de coco nos compósitos com 20% e 30% dificulte a propagação de uma trinca inicial. Isto obriga que outras trincas sejam nucleadas em falhas nos descolamentos das interfaces fibra/matriz, permitindo, inclusive, que fibras sejam sacadas da matriz antes de se romperem, como pode ser observado nas Figuras 5(b) e (c). Esta diferença de mecanismo de fratura, até 10% e a partir de 20% em volume de fibra de coco, aparentemente não afeta a resistência do compósito, como mostram os valores da Figura 3. Entretanto, ocorre uma grande mudança na capacidade de deformação do compósito.



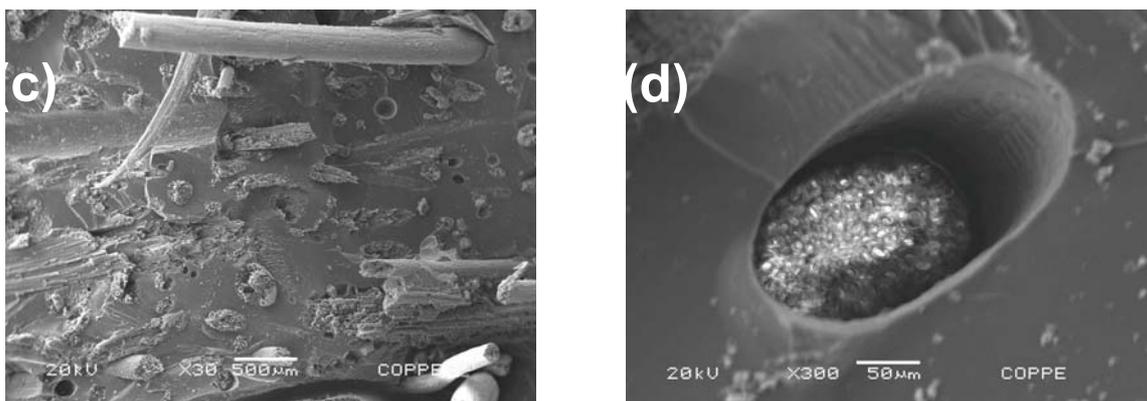


Figura 5 – Fractografia por MEV dos compósitos de matriz epoxídica com diferentes frações volumétricas de fibras de coco: (a) 10%; (b) 20%; (c) 30%.

Como indica a Figura 2, até 10% de fibra incorporada o comportamento do compósito é frágil, sem qualquer deformação plástica, o que corresponde a uma baixa tenacidade. A partir de 20% (Figura 2) tem-se extensa deformação plástica após a propagação da primeira trinca. Na verdade, o bloqueio desta primeira trinca exige que outras sejam nucleadas nas falhas interfaciais fibra/matriz (Figura 5(d)), para então, gradativamente, prosseguirem com o processo de ruptura. A deformação então continua, curvas de 20% e 30% na Figura 2, até que as últimas fibras tenham sido sacadas da matriz e rompidas pela propagação de trincas (Figuras 5(b) e (c)). Esses compósitos com maior volume de fibras apresentam elevada tenacidade, isto é energia mecânica medida pela área sobre suas extensas curvas de força vs. deformação.

CONCLUSÕES

A incorporação de fibras longas e alinhadas de coco não aumenta a resistência à flexão de compósitos com matriz epoxídica DGEBA/TETA estequiométrica.

O decréscimo na resistência destes compósitos em relação à matriz epoxídica é, sobretudo, devido à fraca interface fibra/matriz na qual falhas ocasionadas pelo descolamento interfacial atuam como locais preferenciais para a nucleação de trincas.

Embora menos resistente à flexão, os compósitos com frações volumétricas de fibras de coco superiores a 10% apresentam grande deformação plástica, o que está associada a uma elevada tenacidade.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPERJ, CNPq, CAPES e FENORTE/TECNORTE. É também motivo de agradecimento a permissão para o uso MEV, por parte da Prof Luiz Henrique de Almeida do PEMM/COPPE/UFRJ.

REFERÊNCIAS

- 1 SATYANARAYANA, K.G.; PILLAI, C.K.S.; SUKUMARAN, K.; PILLAI, S.C.K.; ROHATGI, P. K.; VIJAYAN, K. J. Structure property studies of fibres from various parts of the coconut tree, **J. Mater. Sci.**, v. 17, p. 2453–2462, 1982.

- 2 VENKATASWAMY, K.G.; PILLAI, C.K.S.; PRASAD, V.S.; SATYANARAYANA, K.G. Effect of weathering on the mechanical properties of midribs of coconut leaves, **J. Mater. Sci.**, v. 22, p. 3167–3173, 1987.
- 3 CALADO, V.; BARRETO, D.W.; D'ALMEIDA, J.R.M. The effect of chemical treatment on the structure and morphology of coir fibers, **J. Mater. Sci. Letters**, v. 19, p. 2151–2154, 2000.
- 4 http://www2.uol.com.br/JC/_2000/2109/ec2109g.htm. Acesso em: 20 fev. 2008.
- 5 MONTEIRO, S N.; OLIVEIRA, L.B.; BENTES, M.A.G.; DA SILVA, R C L ; VIEIRA, C.M.F. Carbonização de cascas de coco. In: 62º CONGRESSO ANUAL DA ABM / 62nd ABM INTERNATIONAL ANNUAL CONGRESS, Julho de 2007, Vitória - ES. p. 944-952.
- 6 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.
- 7 <http://www.cocoverderj.com.br/> , Acesso em: 07 fev. 2008.
- 8 http://www.mecanicaonline.com.br/2005/01_janeiro/engenharia/daimler_chrysler_meio_ambiente.htm, Acesso em: 07 fev. 2008.
- 9 PRASAD, S.V.; PAVITHRAM, P.K.; ROHATIGI, P.K. Alkali treatment of coir fibres for coir-polyester composites. **J. Mater Sci.** v. 18, p. 1443-1454, 1983.
- 10 HILL, C.A.S.; KHALIL, H.P.S.A. The effect of environmental exposure upon the mechanical properties of coir or palm fiber reinforced composites. **J. Appl Polym. Sci.** v. 77, p 1322–1330, 2000.
- 11 ROUT, J.; MISRA, M.; TRIPATHY, S.S.; NAYAK, S.K.; MOHANTY, A.K. The influence of fibre treatment on the performance of coir-polyester composites. **Comp. Sci. Technol.** v. 61, p. 1303 – 1310, 2001.
- 12 MONTEIRO, S.N.; TERRONES, L.A.H.; LOPES, F.P.D.; D'ALMEIDA, J.R.M. Mechanical Strength of Polyester Matrix Composites Reinforced with Coconut Fiber Wastes, **Rev. Mater.**, v.10(4), p.571-576, 2005.
- 13 MONTEIRO, S.N.; TERRONES, L.A.H.; LOPES, F.P.D.; D'ALMEIDA, J.R.M., Structural characteristics and properties of coir fiber wastes reinforced polymeric composites, In: III INTERNATIONAL CONGRESS ON MATERIALS, Cartagena, Colombia, 2005, p. 1-6.
- 14 MONTEIRO, S.N.; TERRONES, L.A.H.; CARVALHO, E.A.; D'ALMEIDA, J.R.M. Efeito da interface fibra/matriz sobre a resistência de compósitos poliméricos reforçados com fibras de coco. **Rev. Mater.** v. 11(4), p.395-402, 2006.
- 15 CALLISTER Jr., W.D. **Materials Science and Engineering – An Introduction**, 5^a Edição, Nova York : John Wiley & Sons, 2000.
- 16 DALMEIDA, J.R.; MONTEIRO, S.N. Effect of the resin/hardener ratio on the compressive behavior of an epoxy system. **Polymer Testing**, v. 15, p. 329-339, 1996.