

ANÁLISE MECÂNICA E MICROESTRUTURAL DE COMPÓSITOS DE MATRIZ EPÓXI REFORÇADOS COM FIBRAS DE GUARUMÃ*

Miriane Alexandrino Pinheiro¹
Sergio Neves Monteiro²
Laércio Gouvêa Gome³
Alisson Clay Rios da Silva⁴
Verônica Scarpini Candido⁵

Resumo

Atualmente, tem sido crescente a busca por novos materiais que associem boas características tecnológicas, ambientais e que sejam ecologicamente corretos. Neste contexto, pode-se destacar o desenvolvimento de compósitos de matriz polimérica reforçados por fibras naturais. Estas fibras, possuem uma grande importância ambiental, pois são biodegradáveis, de baixo custo e encontradas em abundância na natureza, como é o caso do guarumã (*Ischinosiphonkoern*) uma espécie abundante em regiões de várzeas do estado do Pará. Neste trabalho, materiais compósitos de matriz epóxi reforçados por fibras de guarumã, foram analisados mecanicamente e microestruturalmente. Os corpos de prova foram produzidos em moldes de silicone e lixados para atender as especificações da norma ASTM D638, e para realização de ensaios de resistência à tração, e posteriormente de microscopia eletrônica de varredura para analisar a microestrutura do material fraturado. A partir dos valores obtidos após o ensaio de tração, observou-se que, apesar do baixo desempenho mecânico quando relacionado com a matriz, a adição de fibras de guarumã tende a um ligeiro reforço na matriz epoxídica. A caracterização microestrutural, revelou que os compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras de guarumã, possuem um grande potencial, quando comparados a compósitos que possuem outras fibras naturais como reforço.

Palavras-chave: Materiais compósitos; Fibra de guarumã; Caracterização mecânica; Caracterização microestrutural.

MECHANICAL AND MICROSTRUCTURAL ANALYSIS OF EPOXY MATRIX COMPOSITES REINFORCED WITH GUARUMÃ FIBERS

Abstract

Nowadays, the search for new materials that associate good technological, environmental and ecologically correct characteristics has been increasing. In this context, the development of polymer matrix composites reinforced by natural fibers can be highlighted. These fibers, have a great environmental importance, because they are biodegradable, low cost and found in abundance in nature, as is the case of Guarumã (*Ischinosiphonkoern*) an abundant species in lowland regions of the state of Pará. In this work, epoxy matrix composite materials reinforced by guarumã fibers have been analyzed mechanically and microstructurally. The test bodies were produced in silicone and sanded moulds to meet the specifications of ASTM D638, and for the conduct of tensile strength tests, and subsequently scanning electron microscopy to analyze the microstructure of the fractured material. From the values obtained after the traction test, it was observed that, despite the low mechanical performance when related to the matrix, the addition of guarumã fibers tends to a

slight reinforcement in the epoxy matrix. The microstructure characterization revealed that epoxy matrix composites reinforced with guarumã fibers have great potential when compared to composites that have other natural fibers as reinforcement.

Keywords: Composite materials; Guarumã fiber; Mechanical characterization; Microstructure characterization.

¹ *Bacharel em Ciência e Tecnologia. Mestranda em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém - PA, Brasil.*

² *Engenheiro de Materiais, PhD em Engenharia e Ciência dos Materiais, Professor, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais/Departamento de Engenharia mecânica e Materiais, Instituto Militar de Engenharia (IME), Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.*

³ *Engenheiro Civil, Doutor em Engenharia Mecânica, Professor do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico, Instituto Federal de Ciência e Tecnologia (IFPA), Belém-PA, Brasil.*

⁴ *Químico industrial, Doutor em Ciência dos Materiais, Professor Adjunto I, Faculdade de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará (UFPA), Ananindeua-PA, Brasil.*

⁵ *Bióloga, Doutora em Ciência dos Materiais, Professora Adjunta I, Faculdade de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará (UFPA), Ananindeua-PA, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Com o surgimento de novas tecnologias, torna-se necessário o uso de materiais com características específicas, para serem utilizados em diversas aplicações, como nas indústrias automobilística, aeroespacial, construção civil e esportiva [1]. Nesse contexto, encontram-se os compósitos, um material multifásico, produzido artificialmente e que combina as principais propriedades de suas fases constituintes, geralmente essas fases são: a fase matriz e a fase de reforço. A matriz é a fase contínua que envolve completamente o reforço e tem função de proteger, dar forma e transferir as cargas da superfície para a fase de reforço, que por sua vez é a fase dispersa, e sua forma, tamanho, distribuição e orientação, influenciam diretamente nas propriedades dos compósitos[2].

Os compósitos possuem três divisões principais: os compósitos reforçados com partículas, reforçados com fibras e compósitos estruturais [1]. Neste trabalho utilizou-se compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras que possuem um elevado potencial, pois a carga aplicada neste tipo de compósito é transmitida e distribuída entre as fibras pela fase matriz. As resinas são materiais utilizados como matriz nesses compósitos. A resina epoxídica é um material termorrígido muito utilizados como adesivo, revestimento, matriz para compósitos, dentre outros. Isto é resultado de suas excelentes propriedades adesivas, mecânicas, térmicas e elétricas [3].

O uso de fibras naturais como agente de reforço neste tipo de compósito apresenta inúmeras vantagens quando relacionadas a fibras sintéticas, podendo se destacar a importância ambiental, pois são encontradas em grandes quantidades e com facilidade, além de serem fontes renováveis, biodegradáveis e de natureza não tóxicas, além de possuírem boas propriedades mecânicas [4].

A fibra de guarumã (*Ischinosiphonkoern*) é um exemplo de fibra natural, abundante em regiões de várzea do estado do Pará [5]. A utilização desta fibra para confecção de compósitos apresenta vantagens comuns às outras fibras naturais e contribui para o desenvolvimento de novos materiais utilizando uma matéria-prima pouco explorada na área da ciência dos materiais, tornando-se assim um material com grande potencial.

Assim, objetiva-se avaliar o comportamento mecânico por meio de ensaio de tração e estudar a morfologia da região de fratura dos compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras contínuas e alinhadas de guarumã.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Materiais e Métodos

As fibras de guarumã utilizadas neste trabalho foram coletadas na região metropolitana de Belém. A matriz polimérica utilizada para a fabricação dos compósitos foi a resina epóxi a base de Bisfenol A (SQ 2001) e o catalisador a base de poliamina (SQ 3154), utilizados em uma proporção de 2:1, duas partes de resina para uma parte de catalisador.

Inicialmente o caule da planta do guarumã foi cortado em pedaços de aproximadamente 30 cm, em seguida foram colocados em estufa por 2 horas a 60°C, para que ocorresse o processo de secagem, posteriormente as fibras foram desfiadas e cortadas em um comprimento médio de 10 cm, as medidas foram feitas com o auxílio de uma régua graduada, em seguida foram separadas de acordo com

suas espessuras, em fibras finas, médias e grossas. De cada espessura foram tiradas 3 amostras para a medição do diâmetro fibrilar, realizada em microscópio ótico da marca NIKON, modelo ECLIPSE LV150/LV150A no laboratório de microscopia do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia (PRODERNA) da Universidade Federal do Pará (UFPA). As medidas foram realizadas em 5 posições ao longo da fibra, em cada posição obteve-se uma segunda medida girando a fibra em noventa graus. O valor do diâmetro foi obtido considerando a média dos valores encontrados ao longo da fibra.

O valor da massa específica foi obtido a partir da relação entre a massa e o volume da fibra. O valor da massa foi verificado com o auxílio de uma balança analítica e o valor do volume foi obtido levando em consideração que a fibra possui uma geometria cilíndrica perfeita.

No processo de preparação dos corpos de prova que foram fabricados em molde de silicone, a resina foi inicialmente pesada para que se obtivesse a proporção exata da adição de seu catalizador. Após este procedimento, ambos foram misturados e essa mistura foi vertida no molde onde foram colocadas as fibras de forma contínua e alinhada. Os corpos de prova ficaram por 24 horas no molde para que ocorresse o processo de cura. Foram produzidos corpos de prova com 0, 10, 20 e 30% em volume de fibra, essas porcentagens foram baseadas em pesquisas realizadas por Barbosa (2011), Margem (2013) e Candido (2014) que utilizaram diferentes tipos de fibras naturais, dispostas de forma contínua e alinhadas em moldes de silicone, a proporção de massa de fibra utilizada em cada corpo de prova foi obtida pela regra da mistura, apresentada na equação 1. Após essa etapa os corpos de prova foram lixados e medidos.

$$\% f = \frac{\frac{mf}{\rho f}}{\frac{mf}{\rho f} + \frac{mr}{\rho r}} \quad (1)$$

Onde:

$\% f$ é a porcentagem de fibra

mf é a massa da fibra

ρf é a densidade da fibra

mr é a massa da resina

ρr é a densidade da resina

A caracterização mecânica foi realizada por meio de ensaios de tração, seguindo as diretrizes da norma ASTM D 638. Para este ensaio foi utilizada a máquina fabricada pela KRATOS modelo IKCL3-USB do Laboratório de Ensaios Mecânicos (LABEM) da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM) da UFPA. O corpo de prova foi posicionado para aplicação de uma carga de 5 kN em seu centro, com uma célula de carga de 3 kN a uma velocidade de ensaio de 2 mm/min.

A análise microestrutural e a composição química das fibras foram realizadas em microscópio eletrônico de varredura da marca Oxford instruments modelo x-maxN, no laboratório de metalografia do Instituto Federal do Pará (IFPA).

A análise morfológica da região da fratura foi realizada em microscópio eletrônico de varredura da marca HITACHI modelo TM3000, no laboratório de microscopia do programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia (PRODERNA) da Universidade Federal do Pará (UFPA).

2.2 Resultados e Discussão

A análise da distribuição do número de fibras de guarumã por intervalo de diâmetro, foi feita a partir da medição de 300 fibras aleatórias e individuais. Na figura 1 está apresentado o padrão de distribuição diametral.

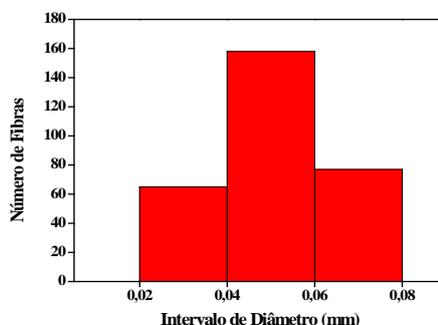


Figura 1. Padrão de distribuição diametral.

Observa-se que o maior número de fibras está no intervalo de 0,04 a 0,06mm. Este fato pode estar associado à natureza das fibras que geralmente é mais compacta e de menor diâmetro. Os valores médios de diâmetros encontrados neste trabalho podem ser comparados com os valores obtidos por Margem [6], que ao realizar a medição do diâmetro de fibras de malva, observou um maior número de fibras no intervalo de 0,035 a 0,05mm.

Na Tabela 1 estão apresentados os valores de massa específica das fibras em função da distribuição do intervalo diametral.

Tabela 1 . Massa específica em função do diâmetro médio

Espessura da fibra	Diâmetro médio (mm)	Massa específica (g/cm³)
Fibras finas	0,03	0,44
Fibras médias	0,05	0,17
Fibras grossas	0,07	0,15

A partir da Tabela 1, observa-se que quanto maior o diâmetro, menor a massa específica aparente, pois as fibras de menor diâmetro são mais compactas, e possuem menos espaços vazios em sua microestrutura. Esse padrão está associado ao fato dessas fibras possuírem menos poros para a passagem das seivas bruta e elaborada, o que sugere que fibras finas, sejam mais resistentes que as fibras grossas, este mesmo padrão foi observado por Nascimento [7] ao caracterizar de fibras de buriti.

A microscopia eletrônica de varredura foi realizada em três grupos de fibras selecionadas de acordo com suas espessuras em: fibras finas, fibras médias e fibras grossas. Na Figura 2 estão apresentadas as micrografias das fibras de guarumã com aumento de 150x.

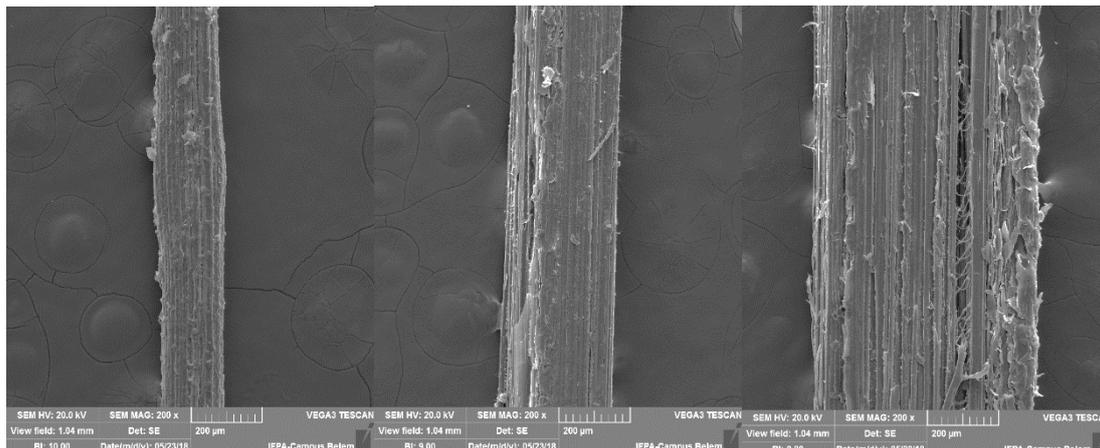


Figura 2. Micrografias obtidas por MEV das fibras fina, média e grossa de guarumã, com aumento 200x.

Pode-se observar que a fibra fina, ao longo de todo seu comprimento, apresenta áreas rugosas e espaços vazios entre as microfibrilas, as fibras com diâmetro médio apresentam poucas imperfeições e superfície lisa com poucas áreas rugosas, já as fibras mais grossas apresentam muitas áreas rugosas e poucas áreas lisas quando comparado com as fibras finas e médias, além de apresentarem mais defeitos em sua estrutura, sugerindo que as fibras grossas apresentem menor resistência mecânica que as demais. Ao realizar a caracterização de fibras de bagaço de cana-de-açúcar, Candido [8] verificou que as fibras mais grossas quando comparadas a fibras mais finas, apresentaram menor resistência, maior quantidade de poros e mais defeitos ao longo de seu comprimento.

A composição química da fibra de guarumã obtida em EDS, está apresentada na tabela 2.

Tabela 2 – Resultados das propriedades mecânicas obtidas a partir do ensaio de tração.

Elemento	Concentração Aparente	Peso (%)
C	22,54	60,15
O	14,87	38,39
Na	0,36	0,44
Mg	0,04	0,05
Al	0,04	0,05
Si	0,09	0,09
Cl	0,25	0,25
K	0,33	0,31
Ca	0,15	0,14
Cu	0,11	0,13

Nota-se, como já era esperado, maiores concentrações de carbono e oxigênio, uma vez que esses átomos compõem a cadeia polimérica que forma as fibras de Guarumã.

A caracterização mecânica dos compósitos, foi realizada por meio de ensaio de tração. Na Figura 3 está apresentado o aspecto macroscópico da fratura dos compósitos ensaiados em tração.



Figura 3. Aspecto macroscópico da fratura dos compósitos ensaiados em tração.

Observa-se que os corpos de prova em geral apresentaram fratura dentro do comprimento útil, isto é característica dos compósitos reforçados com fibras naturais. Além disso, não é possível identificar deformação a olho nu, indicando que os corpos de prova apresentaram um comportamento frágil.

Na figura 4 está apresentado o gráfico da propriedade de resistência à tração em relação a fração volumétrica e a média de desvio padrão, obtidos a partir das curvas de Forças versus Alongamento.

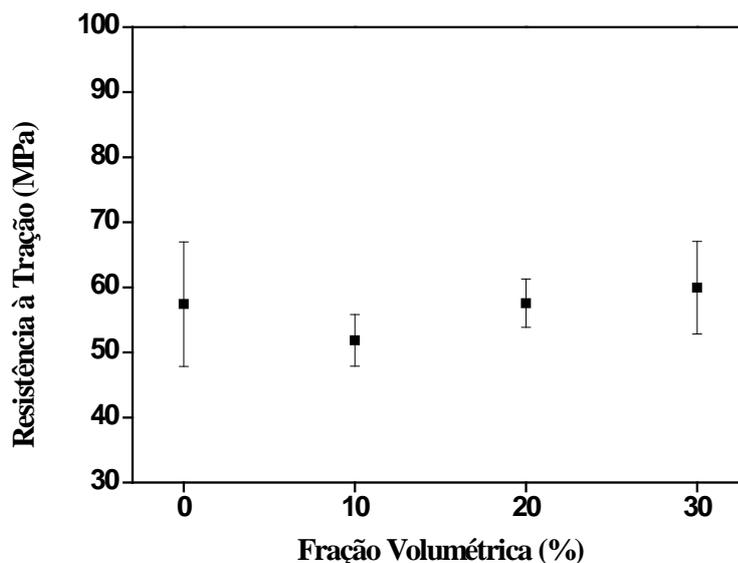


Figura 4. Resistência à tração.

De acordo com o gráfico de resistência à tração, observa-se que os valores desta propriedade de maneira geral não apresentaram variação estatística significativa, entretanto quando são observados os valores médios de resistência nota-se que incorporação das fibras de guarumã induziu a um ligeiro aumento de resistência, sendo a composição com 30% em volume de fibra, a que apresentou maior valor para resistência à tração, isso mostra que o maior número de fibras incorporadas a matriz induz a um melhor reforço dessa matriz.

Os valores referentes à resistência à tração, ao módulo de elasticidade e à deformação dos compósitos, estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados das propriedades mecânicas obtidas a partir do ensaio de tração.

Composição	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação Média (%)
CEF0	57,42 ± 9,57	0,25 ± 0,02	0,24 ± 0,05
CEF10	51,87 ± 3,97	0,29 ± 0,01	0,18 ± 0,02
CEF20	57,07 ± 3,73	0,31 ± 0,03	0,19 ± 0,03
CEF30	59,94 ± 7,13	0,29 ± 0,02	0,21 ± 0,03

Onde: CEF0- resina pura; CEF10- compósito epóxi-fibra com 10% em volume de fibra; CEF20- compósito epóxi-fibra com 20% em volume de fibra; CEF30 - compósito epóxi-fibra com 30% em volume de fibra.

De acordo com a tabela 2, em relação a resistência à tração, a composição com incorporação de 30% em volume de fibra de guarumã, apresentou um maior valor médio para esta propriedade. Costa et al [5] ao incorporar fibras curtas e aleatórias de guarumã em matriz poliéster, observou valores relacionados a resistência a tração menores que os observados neste trabalho, que estão próximos de 60 MPa. Este comportamento pode estar associado ao fato de neste trabalho serem utilizadas fibras longas e alinhadas na matriz. Essa disposição favorece a transferência de carga ao logo do comprimento da fibra e contribui para o maior valor de resistência mecânica. Ao incorporar fibras de bagaço de cana-de-açúcar em matriz epóxi Candido [8], obteve menores valores para essa propriedade, em todas as porcentagens de volume de fibras incorporadas. Margem [6], ao avaliar as propriedades em tração de compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras de malva, destacou que quando as fibras são acrescentadas a matriz, há uma melhora significativa nas propriedades. O valor observado pelo autor foi de 56,2 MPa para fração volumétrica de 30% que é menor que o obtido neste trabalho para a mesma fração volumétrica.

De acordo com os valores obtidos para a propriedade de módulo de elasticidade, pode-se observar que a adição das fibras gerou um aumento nessa propriedade quando comparado à resina pura. Porém o compósito CEF30 apresentou uma diminuição nessa propriedade quando comparado ao compósito CEF20. De acordo com Callister[1], o módulo de elasticidade está relacionado com a rigidez do material, quanto maior o módulo de elasticidade mais rígido é o material. Assim, levando em consideração a margem de erro estatístico, o CEF0 obteve o menor valor para esta propriedade e entre os compósitos reforçados por fibras, o CEF30 obteve o menor valor, e dentre todas as composições o CEF20 é o material mais rígido. Os valores obtidos neste trabalho, foram menores quando comparados com a incorporação das fibras de buriti, bagaço de cana-de-açúcar e malva, assim o compósito produzido com matriz epóxi reforçado com fibras de guarumã é o menos rígido dentre estes.

Em relação à deformação dos compósitos, o maior valor está associado à resina epóxi, porém na medida em que fibras são adicionadas a matriz, o material torna-se mais rígido, confirmando o resultado obtido para o módulo de elasticidade.

A caracterização microestrutural realizada por MEV dos corpos de prova ensaiados em tração, para a resina epóxi e para os compósitos reforçados com 10, 20 e 30% em volume de fibras de guarumã estão apresentados na Figura 5.

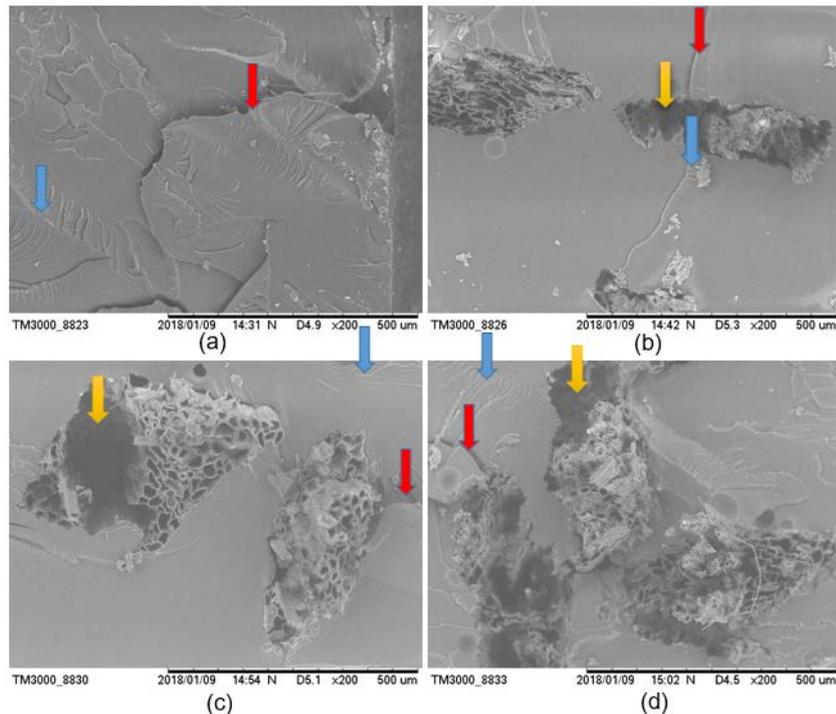


Figura 5 .Micrografias obtidas por MEV da resina epóxi (a) e dos compósitos reforçados com 10 (a), 20 (b) e 30% (d) em volume de fibras de guarumã. Com aumento de 200x.

As micrografias obtidas por MEV revelam que todas as composições apresentam aspecto de fratura frágil, comprovadas pela presença de marcas de rio, que podem ser identificadas na figura pelas setas azuis. Identifica-se ainda a presença de franjas de fratura indicadas pelas setas em vermelho, indicando que a fratura não ocorreu de forma plana. Observar-se ainda que, as composições com 10, 20 e 30% em volume de fibra, apresentam regiões em que fibras foram arrancadas da matriz identificadas pelas setas em amarelo, indicando baixa adesão entre matriz e fibra, que pode estar associada a presença de lignina e celulose, que diminuem a aderência de fibras na matriz, por isso essas fibras foram arrancadas, e talvez um tratamento químico das fibras possa melhorar esta adesão.

3 CONCLUSÃO

A caracterização das fibras de Guarumã revelou que, o maior número de fibras apresentou-se no intervalo de 0,04 a 0,06 mm. A massa específica diminuiu com o aumento do diâmetro, pois fibras de menor diâmetro são mais compactas e possuem menos defeitos em sua microestrutura.

A microscopia eletrônica de varredura mostrou que as fibras mais grossas apresentam maior quantidade de defeitos em sua estrutura, com muitas áreas rugosas e poucas áreas lisas. Esse padrão morfológico sugere que as fibras mais grossas podem apresentar menor resistência mecânica.

Com a caracterização mecânica dos compósitos observou-se que, a adição das fibras em matriz epóxi aumentou a resistência à tração apenas na composição com 30% em volume de fibra. No que se refere ao módulo de elasticidade, a resina obteve o menor valor e a composição CEF20 obteve o maior valor sugerindo que a adição de 20% em volume de fibra induz a um aumento da rigidez do compósito. A

utilização das fibras como agente de reforço da matriz epoxídica, levou a um aumento da deformação na medida em que fibras foram adicionadas a matriz.

A caracterização microestrutural revelou que todos os materiais apresentaram aspecto de fratura frágil, comprovada pela presença de marcas de rio. Além disso, as composições com 10, 20 e 30% em volume de fibra, apresentaram regiões em que as fibras foram arrancadas da matriz, comprovando baixa aderência entre a fibra e a matriz.

A incorporação da fibra de Guarumã em matriz epóxi mostrou-se eficiente, pois os compósitos produzidos obtiveram uma resistência à tração com valor superior a outros compósitos que foram pesquisados na literatura, e que utilizaram o mesmo tipo de fibra ou a mesma matriz. Assim, sugere-se que o percentual de fibra mais indicado para incorporação à matriz é o de 30%, pois apresentou os maiores valores de resistência à tração e melhor aderência interfacial.

REFERÊNCIAS

- 1 Callister, W. D. Jr. *Ciência e Tecnologia de Materiais: uma introdução*. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- 2 Askeland, Donald R. *Ciência e engenharia dos materiais*. 3. ed. São Paulo: Cengage learning, 2014.
- 3 Marinucci, Gerson. *Materiais compósitos poliéricos*. São Paulo: Artiliber, 2011.
- 4 Barbosa, A. de P. *Características estruturais e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de buriti*. 2011. 159 p. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2011.
- 5 Costa, M. O.; Sousa, F. S. de; Sousa, F. V. A. de; Andrade, S.M.C. *Ensaio de tração e de absorção de água em compósitos de resina poliéster e fibra da tala de guarumã*. In: Cbecimat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 21, Cuiabá, 2014. Anais. São Paulo: Metallum, 2014. p.3736-3741.
- 6 Margem, J. I. *Estudo das características estruturais e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de malva*. 2013. 134 p. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) -- Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2013.
- 7 Nascimento, D. C. de O. *Análise das propriedades de compósitos de fibras de piaçava e matriz de resina epóxi*. 2009. 136 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2009.
- 8 Candido, V. S. *Caracterização e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de bagaço de cana-de-açúcar*. 2014. 188 p. Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais) - Instituto Militar de Engenharia, 2014.