

COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADO POR FIBRAS DE CARNAÚBA (*Copernica prunifera*)¹

Deibson Silva da Costa²

Wassim Raja El Banna²

Lírian Said de Lima³

Luciano Monteiro Almeida⁴

Eduardo de Jesus Silva dos Santos⁴

Carlos Eduardo Pinto Lopes⁴

Roberto Tetsuo Fujiyama⁵

Resumo

Este trabalho tem como objetivo analisar características mecânicas e microestruturais dos compósitos de fibras de carnaúba (*Corpenica prunifera*). As fibras de carnaúba foram adquiridas no comércio de Belém do Pará. As fibras foram cortadas nos comprimentos determinados de 5 mm, 10 mm e 15 mm. Foram fabricados oito corpos de prova para cada comprimento de fibra. O ensaio de tração realizado caracterizou o aspecto mecânico do material que estava de acordo com as exigências da norma ASTM D 638M. Verificou-se que os valores médios da força máxima suportada e resistência à tração apresentaram melhor desempenho nos materiais compósitos reforçados com a fibra de 15 mm, com 504,02 N e 15,75 MPa em relação de 10 mm, com 380,01 N e 11,87 MPa e de 5 mm com 331,29 N e 10,44 MPa, respectivamente. Além disso, notou-se a superfície fraturada dos corpos de provas através da microscopia estereoscópica a fim de verificar os mecanismos de falha presentes.

Palavras-chave: Materiais compósitos; Fibra de carnaúba; Resina poliéster.

COMPOSITE POLYMERIC REINFORCED BY FIBER CARNAUBA (*Copernica prunifera*)

Abstract

This paper aims to analyze mechanical and microstructural characteristics of fiber composites carnauba (*Corpenica prunifera*). The fibers were carnauba and sold in Belem of Para fibers were cut in length or 5 mm, 10 mm and 15 mm. Were made eight specimens for each fiber length. The tensile test conducted characterized the mechanical aspect of the material which was in accordance with the requirements of ASTM D 638M. It was found that the mean values of the maximum strength supported and tensile strength showed better performance in composite materials reinforced with fiber 15 mm, 504.02 N and 15.75 MPa compared to 10 mm, with 380.01 N and 11.87 MPa and 5 mm and 331.29 N 10.44 MPa, respectively. Furthermore, it was observed the fractured surface of the test samples through the stereoscopic microscope to check failure mechanisms present.

Key words: Composite materials; Carnauba fiber; Polyester resin.

¹ Contribuição técnica ao 68^o Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Me, Professor, Faculdade de Engenharia Mecânica, ITEC, Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém, Pará, Brasil; deibsonsc@yahoo.com.br.

³ Me, Professor, Faculdade de Engenharia Mecânica, ITEC, UFPA, Belém, PA, Brasil.

⁴ Graduando, Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM), ITEC, UFPA, Belém, PA, Brasil.

⁵ Dr, Professor Adjunto, PPGEM, ITEC, UFPA, Belém, PA, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Compósitos de polímeros com fibras naturais vêm sendo apontados como alternativas potenciais economicamente rentáveis para a fixação de carbono na natureza, reduzindo também a emissão de CO₂ na atmosfera durante o seu ciclo de produção, processamento e utilização, ganhando assim um incremento de seu potencial econômico devido à possibilidade de comércio de créditos carbonos para a cadeia produtiva.⁽¹⁾ A carnaúba ou carnaubeira é uma árvore detentora de características exuberantes. Seu nome tem origens indígenas, especificamente da língua tupi, significando ‘árvore que arranha’, isto se deve ao fato deste vegetal possuir uma camada espinhosa resultante da queda das folhas na parte inferior do caule. Historicamente a primeira indicação com o nome ‘carnaúba’ se deu por Marcgrave e Piso em 1648 em ‘História Naturalis Brasilliae’. Consequentemente em 1688, levou a inclusão na narrativa a respeito da carnaúba por História Plantarum de Ray contribuindo para Miller designá-la de Palma prunifera no The Gardeners Dictionary, no ano de 1768. No Brasil, depois do esforço de classificação do Padre Veloso, em 1790, o botânico Arruda Câmara classificou-a como Corypha cerifera em 1810, incluindo-a na ordem das Hexândrias monogínicas, de Linneu. Em 1819, Martius classificou-a como Copernicia cerifera.⁽²⁾ O nome *Copernicia prunifera* foi estabelecido por Moore, em 1963 e atualmente é utilizado para definir sua nomenclatura binomial. Ela possui estratégia adaptativa ao clima seco principalmente de forma espaçada em solos arenosos e alagadiços, várzeas e margens dos rios de regiões de clima quente. Produz um material ceroso ou cutícula através das folhas, resultado de uma condição genética da planta, um mecanismo natural de defesa contra agentes externos, principalmente, incidência de elevadas temperaturas, típicas dos períodos secos. A cutícula gera uma camada protetora que evita a perda excessiva de água, mantendo o equilíbrio de água no interior da planta.⁽³⁾ Neste contexto, a palha da carnaúba é muito utilizada para desenvolver peças artesanais como cestas, trançados, bolsas, chapéus e caixas de beleza inigualável e muito apreciada por turistas que visitam a região, tornando-a também em fonte de renda da população local. A palha da carnaúba também é usada como alimentação animal, estes, em tempo de escassez come as folhas (palhas) das carnaubeirinhas pequenas, chamada pindoba. A Figura 1 ilustra a carnaúba (*Copernicia prunifera*).



Figura 1. A carnaúba (*Copernicia prunifera*).

Este trabalho se propõe a abordar a resistência à tração de compósitos poliméricos reforçados com fibras da carnaúba através do ensaio de tração e avaliação da fratura nos materiais compósitos pelo processo da microscopia estereoscópica.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

2.1.1 Fibra de carnaúba (*Copernicia prunifera*)

As fibras de carnaúba utilizada neste trabalho foram obtidas no comércio da cidade de Belém sem tratamento químico superficial e em condições ambientais. As fibras foram manualmente cortadas (com tesoura) em três comprimentos diferentes: 5 mm, 10 mm e 15 mm.

2.1.2 Resina poliéster

A resina polimérica utilizada para o desenvolvimento deste trabalho foi comprada no comércio de Belém-Pa. O polímero utilizado foi a resina poliéster tereftálica insaturada, fabricada pela Royal Polímeros sob a denominação comercial de Denverpoly 754. O agente de cura utilizado foi o peróxido de MEK (Butanox M-50), nas proporções de 0,33% (v/v).⁽⁴⁾

2.2 Métodos

2.2.1 Aquisição e preparo das fibras de carnaúba

As fibras de carnaúba foram obtidas através de um processo totalmente manual, assim o processo de aquisição das fibras, realizou-se, inicialmente, através do desmanchamento do chapéu de palha da fibra. Logo foi necessária a diminuição de sua espessura através do corte manual (faca doméstica) em espessuras menores. A Figura 2 indica este processo passando por (a) Chapéu de Palha, (b) Fibras desmanchadas e (c) Fibras com espessura reduzida.



Figura 2. (a) Chapéu de Palha, (b) Fibras desmanchadas e (c) Fibras com espessura reduzida.

Como as fibras possuem certa irregularidade foi necessário o corte padronizado de cerca de 20 cm de comprimento para cada fibra extraída e armazenas dentro do recipiente para que seja evitado o contato da fibra com a umidade para não afetar nas propriedades dos compósitos. As fibras posteriormente foram cortadas em três comprimentos de 5 mm, 10 mm e 15 mm. Assim foi utilizado papel graduado com tamanho desejado e corta-se o feixe e a tira em conjunto na direção de cada graduação.

2.2.2 Produção dos compósitos

As frações mássicas das fibras de carnaúba de 5 mm, 10 mm e 15 mm para cada corpo de prova foram definidas pela máxima capacidade volumétrica do molde de silicone em acomodar o reforço sem pressão ou compactação na ausência da matriz. Os moldes de silicone foram cheios até a sua capacidade máxima, depois pesada e o valor da massa obtida convertida em frações mássicas. A Tabela 1 mostra o tamanho de todas as fibras e a fração mássica que o molde comporta.

Tabela 1. Relação entre o tamanho das fibras e a percentagem destas nos compósitos

Tamanho das Fibras (mm)	Fração mássica (%)
5	6,72
10	5,75
15	5,26

2.2.3 Preparação dos corpos de prova

No processo de homogeneização da mistura (fibras/resina) utilizou-se molde de silicone para vaziar a mistura. Este molde facilita a desmoldagem dos corpos prova. A Figura 3 evidencia os moldes preenchidos, com a mistura fibras/resina.

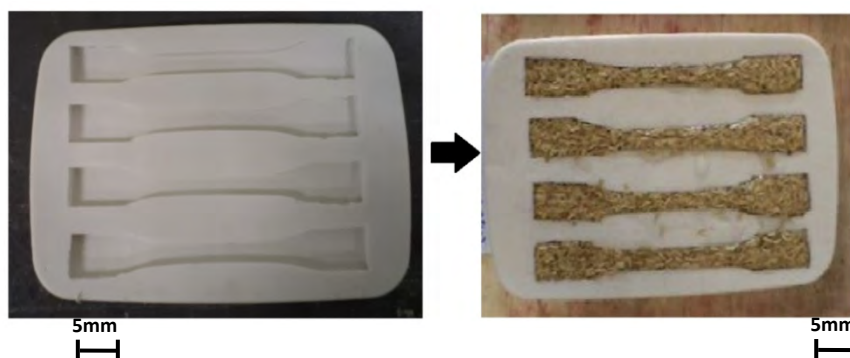


Figura 3. Molde de silicone utilizado para vaziar a mistura de componentes dos compósitos.

Depois de vazados nos molde de silicones todos os compósitos tiveram um tempo de cura de sete dias. Após este período os materiais compósitos foram lixados para poderem atingir as dimensões da norma especificada ASTM D 638M⁽⁵⁾ e tirar imperfeições devidas ao processo de moldagem que possam gerar concentração de tensão.

2.2.4 Realização dos ensaios de tração

Os corpos de provas foram demarcados e realizaram-se os ensaios de tração conforme a norma ASTM D 638M e seguiram as medidas recomendadas.

Deste modo, os corpos de prova foram fabricados a partir de moldes de silicone em número mínimo de oito para os ensaios com matriz reforçada com fibras de carnaúba de 5 mm, 10 mm, e 15 mm. Os ensaios foram realizados em uma máquina de ensaio Kratos COF modelo MKCA-KE com carga de 5 kN, a uma velocidade de ensaio de 5 mm/min., a temperatura ambiente registrada pela máquina foi de 25°C e a umidade relativa de 50%. A Figura 4 mostra a máquina de ensaio de tração com corpo de prova.

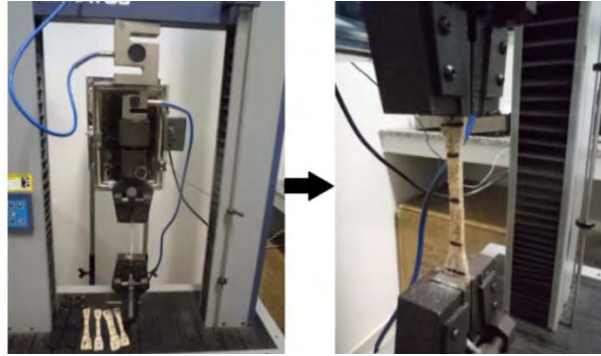


Figura 4. Máquina de ensaio Kratos COF modelo MKCA-KE.

2.2.5 Análise de fratura

Após a realização do ensaio de tração foram obtidas imagens da superfície da seção fraturada dos corpos através microscopia estereoscópica com intuito de analisar e estudar os mecanismos de falha de cada composição fabricada.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Fibras de Carnaúba

A Figura 5 evidencia o processo manual de extração da fibra de carnaúba. Observa-se na Figura 5a o chapéu de palha encontrado no comércio de Belém do Pará, na Figura 5b a fibra extraída com comprimento de 20 cm a 40 cm, na Figura 5c as tiras das fibras cortadas com tamanhos menores de 20 cm, e na Figura 5d as fibras cortadas com o comprimento graduado desejado de 5 mm, 10 mm e 15 mm.



Figura 5. (a) Chapéu de palha da fibra de carnaúba, (b) e (c) Tamanho de espessura reduzido e (d) Fibras cortadas com tamanho reduzido desejado para a fabricação do compósito.

3.2 Produção e Confeção dos Materiais Compósitos

Após a etapa de cura do material compósito iniciou-se uma nova etapa do processo que se deu com lixamento dos determinados corpos de provas das superfícies irregulares por conta de sua má formação de superfície dentro dos moldes. Na Figura 6 mostram-se os compósitos de fibras de carnaúba desbastados e polidos e devidamente marcados, prontos para serem ensaiados.

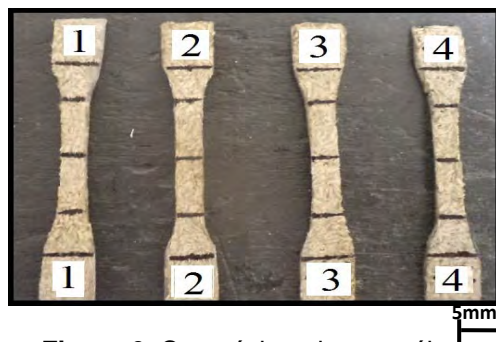


Figura 6. Compósitos de carnaúba.

Observou-se a presença de alguns vazios, que provavelmente indicaria o fenômeno físico de extração e evidenciaria a fraca adesão entre fibra e matriz sendo. Fatores decorrentes da elevada umidade da região, elevada temperatura, descontinuidades das fibras, áreas pobres ou ricas em resina, podem influenciar no processo de fabricação destes componentes significativamente.

3.3 Ensaio de Tração dos Corpos de Prova

Evidenciou-se ruptura dos corpos de prova no meio do comprimento ou próximo à extremidade. Nos casos onde a ruptura ocorreu próxima as garras, os resultados do teste não foram considerados. Observou-se que os compósitos reforçados com a fibra de carnaúba com comprimento de 15 mm obteve o melhor desempenho em relação à força máxima média suportada (Figura 7). Este comportamento provavelmente, se deve ao fato de que compósitos com fibras longas comparado aos compósitos com fibras menores, garantem melhores efeitos de reforçamento devido à maior razão de aspecto (relação entre comprimento e diâmetro) das fibras. Na Figura 7 mostra-se a força máxima média aplicada nos ensaios de tração para os diversos comprimentos de fibras (5 mm, 10 mm e 15 mm).

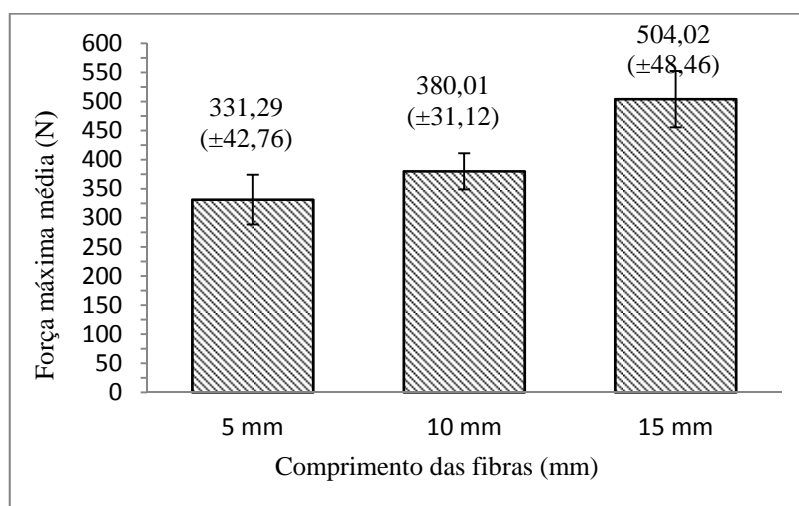


Figura 7. Gráfico da força máxima suportada média pelo compósito de carnaúba para diferentes comprimentos.

A Figura 8 ilustra a relação entre a força (N) máxima suportada aplicada x deslocamento dos corpos de prova com comprimentos de fibra de 5 mm, 10 mm e 15 mm.

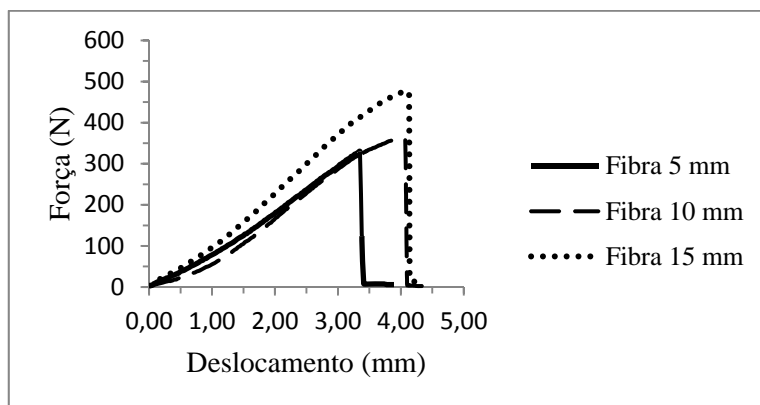


Figura 8. Gráfico força máxima aplicada e deslocamento nos compósitos reforçados com a fibra de carnaúba.

A Figura 9 mostra a comparação entre os diversos comprimentos de fibras, mostrando que o compósito com reforço de 15 mm apresenta um desempenho melhor da propriedade mecânica de tração e alongamento.

A Tabela 2 evidencia os resultados da resistência à tração média dos compósitos reforçados com a fibra de carnaúba com os diferentes comprimentos.

Tabela 2. Resistência dos compósitos reforçados com carnaúba

Comprimento da Fibra de carnaúba (mm)	Fração Mássica (%)	Resistência à tração (MPa)		Alongamento (%)	
		Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
5	6,72	10,44	1,22	6,64	0,28
10	5,75	11,87	0,97	8,41	2,07
15	5,26	15,75	1,51	9,37	1,47

Com os dados obtidos observa-se na Tabela 2 e na Figura 9 que as resistências à tração média obtiveram o melhor desempenho para o compósito reforçado com fibra de 15 mm. Este desempenho é traduzido em termos percentuais com 50,86% maior em comparação a fibra de 5 mm e equivalente a 32,69% maior em relação a fibra de 10 mm.

A Figura 9 ilustra a resistência à tração média dos compósitos de carnaúba para os comprimentos de 5 mm, 10 mm e 15 mm, respectivamente.

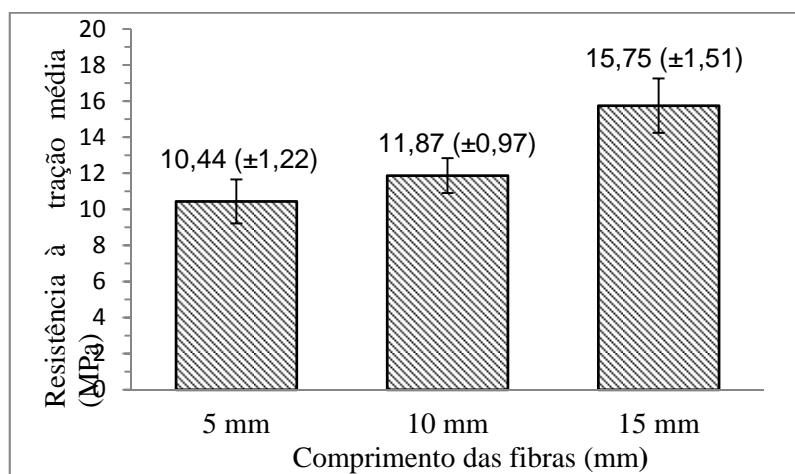


Figura 9. Gráfico de resistência à tração dos compósitos de carnaúba para diferentes comprimentos.

A Figura 10 ilustra os resultados do teste de tração em função do diagrama tensão-deformação para materiais compósitos reforçados com as fibras de 5, 10 e 15 mm.

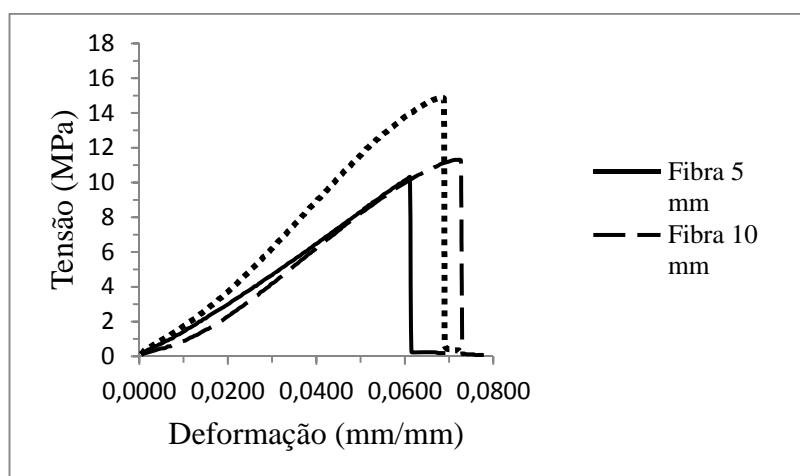


Figura 10. Gráfico de tensão-deformação para os compósitos reforçados com carnaúba.

Este acréscimo substancial da resistência à tração nestes materiais compósitos está provavelmente associado à distribuição das fibras na matriz. Assim, nos compósitos de fibras aleatórias, as fibras posicionadas na direção transversal ao carregamento atuam negativamente na resistência do compósito e neste caso específico deste tipo de material, a resistência do compósito é dominada pela resistência da matriz. Outro fator também fortemente influenciado é o comprimento da fibra, a maior concentração de tensão ao longo da interface fibra/matriz ocorre nas extremidades das fibras e quanto menor este comprimento, maior é o número destas extremidades, o que caracteriza a diminuição da propriedade mecânica de tração do compósito.

A Tabela 3 ilustra a comparação entre os diversos compósitos reforçados de diferentes fibras vegetais obtidos na literatura com os diversos comprimentos de fibras 5 mm, 10 mm e 15 mm referentes à resistência à tração. Percebe-se que para Lourinho (2012)⁽⁸⁾ não se tem o compósito reforçado para as fibras de 10 mm e 15 mm, haja vista que o trabalho fora desenvolvido para o reforço de 5 mm.

Tabela 3. Comparativo entre os compósitos reforçados com fibras vegetais

		Comprimento das Fibras (mm)		
		Resistência à tração (MPa)		
Referências	Reforço	5	10	15
Santos, ⁽⁶⁾ 2013	Timbó-açu	15,66	20,79	24,14
Reis, ⁽⁷⁾ 2012	Fibra de bambu e pó de açaí	19,67	20,13	20,43
Neste Trabalho	Carnaúba	10,44	11,87	15,75
Lourinho, ⁽⁸⁾ 2012	Fibra de sisal e pó de açaí	12,89	-	-
Rodrigues, ⁽⁴⁾ 2008	Sisal	15,27	23,48	26,16

A Figura 11 ilustra o aspecto comparativo entre os diversos compósitos reforçados de diferentes fibras vegetais com os comprimentos de fibras de 5 mm, 10 mm e 15 mm.

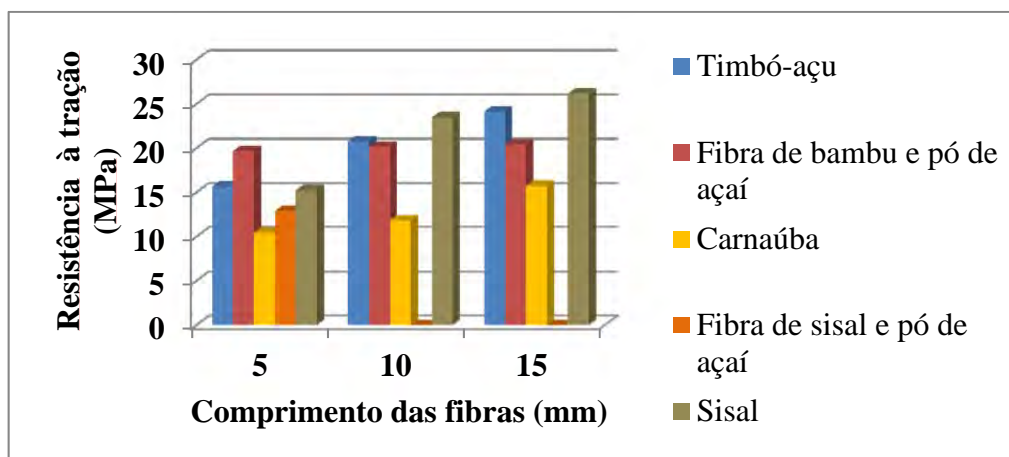


Figura 11. Comparativo entre os compósitos reforçados com fibras vegetais.

3.4 Análises da Fratura dos Compósitos

Observaram-se as imagens da superfície fraturada da seção transversal dos compósitos reforçados com a fibra de carnaúba. Assim a análise microestrutural por microscopia estereoscópica se fez presente na visualização nos mecanismos de falhas nos materiais compósitos, após serem submetidos ao ensaio de tração. Na Figura 12 ilustra a superfície de fratura de compósito poliéster reforçado com fibras de carnaúba de 5 mm.



Figura 12. Superfície fraturada de compósito poliéster reforçado com fibras de carnaúba de 5 mm.

Nota-se na Figura 12 a superfície fraturada do compósito reforçado com a fibra de carnaúba de 5 mm pelas setas brancas que as fibras foram rompidas indicando provavelmente, transferência de carga da matriz para a fibras. As setas vermelhas ilustram o fenômeno de extração ou arrancamento das fibras evidenciando a união fraca, as fibras descoladas da matriz refletindo na redução da resistência mecânica do material. A seta preta neste material compósito ilustra o fenômeno de descolamento da fibra (*debonding*) na matriz originando novas superfícies no material reforçado. Na Figura 13 ilustra a superfície fraturada da seção transversal do compósito de poliéster reforçado com fibras de carnaúba de 10 mm. Na imagem dos corpos de provas reforçados com fibra de carnaúba de 10 mm nota-se através das setas vermelhas presença de micro vazios ou crateras decorrentes do fenômeno do arrancamento da fibra (*fiber pull out*) mostrando a fraca adesão ente fibra e matriz. Além disso, pode-se observar a pelas setas verdes a presença de bolhas.

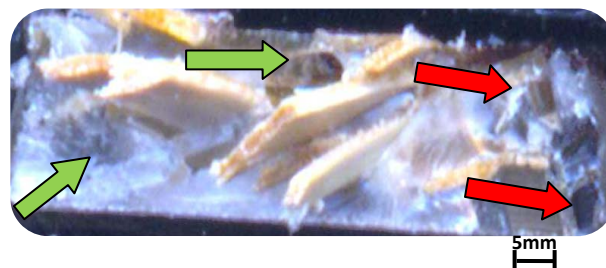


Figura 13. Superfície fraturada de compósito poliéster reforçado com fibras de carnaúba de 10 mm

Pode-se inferir que nos materiais compósitos reforçados com as fibras de 5 mm e 10 mm por terem o menor comprimento de fibras elas estão dispostas aleatoriamente no molde diminuindo a área de contato na interface fibra/matriz. Assim, as fibras distribuídas na direção transversal na matriz, o reforço é virtualmente inexistente e, portanto, o material falha a tensões mecânicas muito baixas. A presença de vazios ou crateras nos corpos de prova foi defeito predominante nos compósitos fraturados influenciando na fraca união entre os elementos constituintes fibra-matriz. Na Figura 14 ilustra a superfície fraturada da seção transversal do compósito de poliéster reforçado com fibras de carnaúba de 15 mm.

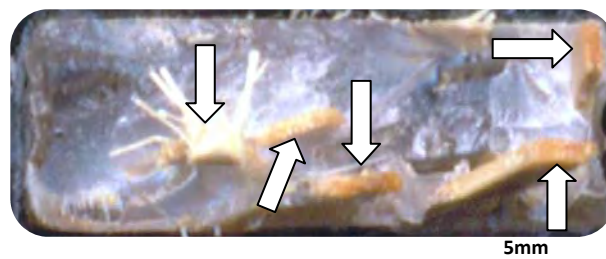


Figura 14. Superfície fraturada de compósito poliéster reforçado com fibras de carnaúba de 15 mm

Nos corpos de provas reforçados com fibras de 15 mm nota-se pelas setas brancas o processo de ruptura da fibra, refletindo-se na transferência de carga da matriz para as fibras. Os compósitos reforçados com este tamanho de fibras, o efeito de compactação teve um desempenho melhor e a resistência do compósito aumentou significativamente. Os compósitos reforçados com as fibras de 15 mm na matriz polimérica obtiveram melhor comportamento mecânico de tração em relação aos outros comprimentos de fibras com comprimentos menores de 5 mm e 10 mm. Apesar das fibras de 15 mm estarem dispostas no molde aleatoriamente o aumento do comprimento de fibras aumentou a área de contato na interface fibra-matriz diminuindo o fenômeno de arrancamento de fibras. Outro aspecto relevante já que, o compósito com reforço de fibra maior aumentou a região de contato entre a matriz e a fibra, refletindo na elevação da aderência. Assim necessitou-se maior gasto energético para o arrancamento das fibras (*fiber pull out*) com comprimentos maiores, devido ao embutimento de seu comprimento na matriz polimérica ser elevado.

4 CONCLUSÕES

Em relação ao comportamento mecânico dos compósitos. Observou-se que os reforçados com a fibra de carnaúba de 15 mm de comprimento tiveram desempenho melhores em relação a outros compósitos reforçados com fibras de 5 mm e 10 mm.

Verificou-se que a força máxima média suportada pelo material compósito teve desempenho satisfatório para o reforço de 15 mm.

O mecanismo predominante nos materiais compósitos reforçados com as fibras de 5 mm e 10 mm foi o fenômeno do descolamento da fibra da matriz polimérica, conhecido na literatura como *fiber pull out*, que provavelmente se traduz em uma interface baixa da matriz-fibra. Notou-se para o material compósito reforçado com a fibra de carnaúba com tamanho de 5 mm o fenômeno de descolamento da fibra, conhecido como *fiber debonding*, resultando em uma nova superfície no corpo de prova. Nos compósitos com fibras de 15 mm ruptura ou rompimento das fibras, refletindo-se na transferência de carga da matriz para as fibras aumentando a resistência mecânica dos compósitos.

Agradecimentos

Aos órgãos de pesquisas CNPQ e Proint pelas bolsas concedidas aos alunos de graduação, ao Laboratório de Engenharia Mecânica (Labem) da Universidade Federal do Pará pelas realizações dos experimentos deste trabalho e ao Itegam – Instituto de Tecnologia Galileo da Amazônia.

REFERÊNCIAS

- 1 MARINELLI, L. A. et al. Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras vegetais naturais da biodiversidade. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 28, n. 2, p. 95, jan./dez. 2008.
- 2 CARVALHO, J. B. de M. **Ensaio sobre a carnaubeira**. Rio de Janeiro: Serviço de Informação Agrícola, Ministério da Agricultura, 1942.
- 3 CARVALHO, F. P. A. de. **Eco-eficiência na produção de pó e cera de carnaúba no município de Campo Maior (PI)**. Teresina: 2005, 157f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Programa Regional de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2005.
- 4 RODRIGUES, J. da S. **Comportamento mecânico de material compósito de matriz poliéster reforçado por sistema híbrido fibras naturais e resíduos da indústria Madeireira**. Belém: 2008, 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia: Materiais e processos de Fabricação) - Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2008.
- 5 ASTM D 638 - 1989, “**Standard Test Method for Tensile Properties of Plastic (metric)**”, Annual Book of ASTM Standards”, American Society for Testing and Materials, 1989.
- 6 LOURINHO, R. G. **Resistência à tração de compósitos poliméricos reforçados com híbrido de fibras de sisal e carga de açaí**. Belém: 2012, 44 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2012.
- 7 SANTOS, A. J. G. dos. **Materiais compósitos de poliéster reforçados por fibras curtas de timbó-açu (*Derrisguianensis*): Avaliação mecânica**. Belém: 2013, 51 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2013.
- 8 REIS, E. F. dos. **Resistência à tração de compósitos poliméricos híbridos com fibras de bambu e pó do caroço de açaí**. Belém: 2012, 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2012.