

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE SISAL*

Edwillson Gonçalves de Oliveira Filho¹

Roberto Tetsuo Fujiyama²

Alisson Clay Rios da Silva³

Verônica Scarpini Candido⁴

Sergio Neves Monteiro⁵

Resumo

A utilização de fibras naturais como reforço para compósitos poliméricos substituindo fibras sintéticas vem crescendo nas últimas décadas para diferentes setores industriais devido apresentarem propriedades únicas. Com isso, avaliou-se a produção de materiais compósitos reforçados com fibras vegetais em uma matriz polimérica constituída de resina poliéster insaturada tereftálica. O processo de fabricação realizado foi o manual (hand lay-up), utilizando molde de silicone, na presença das fibras de sisal (*Agave Sisalana*). Foram determinadas as dimensões e as distribuições de frequência das fibras naturais. A caracterização mecânica dos compósitos foi estudada por meio da realização de ensaios de tração. As fibras utilizadas no experimento estavam na condição *in natura* e tratadas quimicamente. Para a verificação da resistência e rigidez das amostras, foram utilizadas máquinas de ensaio universal AROTEC. Fez-se o ensaio de tração dos corpos-de-prova reforçados com fibras descontínuas e orientadas aleatoriamente, utilizando comprimentos de 5, 10, 15 mm, para frações mássicas variando conforme a capacidade volumétrica do molde. Além disso, foi realizada uma análise fractográfica no microscópio eletrônico de varredura (MEV), para analisar detalhadamente as superfícies de fratura das amostras ensaiadas e entender os mecanismos de falha de cada material. Observou-se uma adesão interfacial muito fraca e não apresentando uma fração mássica apropriada para maximizar as propriedades mecânicas dos mesmos. Os resultados também foram comparados com dados encontrados na literatura, correlacionando com outros trabalhos com fibras vegetais e sintéticas.

Palavras-chave: Compósitos, Fibras naturais, Tratamento superficial, Ensaio de tração, Fractografia, Sustentabilidade.

EVALUATION OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF POLYMERIC COMPOSITES REINFORCED WITH SISAL FIBERS

Abstract

The use of natural fibers as reinforcement for polymeric composites replacing synthetic fibers has been growing in the last decades for different industrial sectors because they have unique properties. Thus, the production of composite materials reinforced with vegetable fibers was evaluated in a polymer matrix constituted of terephthalic unsaturated polyester resin. The manufacturing process was hand-drawn using a silicone mold in the presence of sisal fibers (*Agave Sisalana*). The dimensions and frequency distributions of the natural fibers were determined. The mechanical characterization of the composites was studied through tensile tests. The fibers used in the experiment were in the *in natura* condition and chemically treated. For the verification of the strength and stiffness of the samples, AROTEC universal test machines were used. The tensile test of specimens reinforced with discontinuous fibers and randomly oriented fibers was used, using lengths of 5, 10, 15 mm, for mass fractions varying according to the volumetric capacity of the mold. In addition, a

fractographic analysis was performed in the scanning electron microscope (SEM), to analyze in detail the fracture surfaces of the samples tested, in order to understand the fault mechanisms of each material. Very poor interfacial adhesion was observed and did not exhibit an appropriate mass fraction to maximize the mechanical properties thereof. The results were also compared with data found in the literature, correlating with other works with vegetal and synthetic fibers.

Keywords: Composites, Natural fibers, Surface treatment, Tensile test, Fractography, Sustainability.

¹ *Doutorando, Pesquisador, Pós-graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, UFPA, Belém, Pará, Brasil.*

² *Doutor, Professor, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFPA, Belém, Pará, Brasil.*

³ *Doutor, Professor, Faculdade de Engenharia de Materiais, UFPA, Belém, Pará, Brasil.*

⁴ *Doutora, Professora, Faculdade de Engenharia de Materiais, UFPA, Belém, Pará, Brasil*

⁵ *Doutor, Professor, Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais, IME, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

A utilização de materiais renováveis e biodegradáveis são algumas das opções para melhorar a qualidade de vida em nosso planeta. Entre os diversos recursos naturais estão os materiais lignocelulósicos, dos quais cerca de 2,5 bilhões de toneladas estão disponíveis em nosso planeta, e têm sido usados desde 6000 a.C. [1]. As fibras lignocelulósicas estão disponíveis em muitos desses materiais, que são chamados também de fibras naturais ou fibras vegetais.

O Brasil é grande produtor dessas fibras, assumindo uma posição única entre países sul-americanos, tendo uma área de aproximadamente 8,5 milhões de km², dos quais cerca de 6% são terras aráveis, 22% pastagens permanentes e 58% florestas e bosques [2]. O país também é privilegiado geograficamente por possuir condições climáticas excepcionais e solo fértil para o cultivo de uma grande variedade de espécies de plantas [2].

Diante disso, a utilização de fibras naturais, como reforço para compósitos poliméricos substituindo fibras sintéticas, especialmente fibras de vidro, vem crescendo nas últimas décadas para diferentes setores industriais, tais como embalagens, automóveis e até mesmo no setor da construção [3]. Isto acontece devido, principalmente, às suas características únicas, como abundância, biodegradabilidade, baixa densidade, natureza não tóxica, menos abrasividade aos equipamentos de transformação e propriedades mecânicas úteis, bem como baixo custo [4].

Contudo, as fibras naturais não são uma alternativa livre de desafios. Na prática, existem deficiências que estão relacionadas ao seu elevado grau de absorção de umidade e sua baixa estabilidade dimensional [5]. Por isso, um conhecimento cada vez mais aprofundado sobre todas as características das fibras naturais, tem possibilitado o desenvolvimento de técnicas de tratamentos que permitem solucionar as principais limitações do uso de fibras naturais em materiais compósitos [6]. O tratamento superficial da fibra, por exemplo, visa melhorar as propriedades da interface fibra/matriz de modo a garantir a efetividade desta no desempenho mecânico do compósito.

Para esses materiais, a adesão adequada da interface reforço/matriz é muito importante, já que o reforço irá receber as tensões que irão atuar na sua estrutura. Devido isso, muitos processamentos físico-químicos podem ser utilizados para modificar a superfície do reforço e melhorar sua interface com a fase contínua [7]. Logo, a principal meta dos tratamentos superficiais sobre as fibras naturais é superestimar a força de adesão, para obter uma boa molhabilidade e melhorar a delegação de forças no compósito [8].

ANDRADE [9] analisou em sua pesquisa materiais compósitos de matriz de poliéster na presença de fibras de sisal. As frações mássicas testadas na pesquisa foram de 3,90% e 5,41%, para os comprimentos de 5 e 15 mm. Os resultados demonstraram que os compósitos de sisal 5 mm (5,41%) e 15 mm (3,90%) obtiveram resistências a tração de 16,98 e 27,05 MPa, respectivamente.

COSTA [10] desenvolveu pesquisa de materiais compósitos de matriz de poliéster na presença de fibras de sisal de comprimentos 5 mm, 10 mm e 15 mm. Os materiais compósitos da pesquisa foram fabricados com as frações mássicas de 5,41%, 4,87% e 3,90% para os comprimentos de fibras de 5 mm, 10 mm e 15 mm, respectivamente. Após ensaios de tração dos materiais compósitos, obteve-se os resultados de resistência a tração para o compósito de fibras de sisal para cada comprimento: sendo 16,98 MPa para 5 mm, 22,78 MPa para 10 mm e 27,05 MPa para o comprimento 15 mm.

RODRIGUES [11] analisou compósitos de matriz de poliéster reforçados com sisal utilizando a fração mássica de 3,90 % para comprimentos de 15 mm, e fração mássica de 4,87 % para comprimentos de 10 mm e fração mássica 5,41 % para comprimentos de 5 mm. Encontrou os resultados de resistência a tração para o compósito de fibras de sisal de comprimento 5 mm, 10 mm e 15 mm, apresentaram resistência a tração de 15,27 MPa, 23,48 MPa e 26,16 MPa, respectivamente. Eles indicaram que a resistência do compósito produzido aumentou com o aumento do comprimento da fibra.

SREEKUMAR [12] apresentaram em seu estudo o comportamento na tração (ASTM D 638M) e flexão (ASTM 790) de compósitos de matriz poliéster reforçado por fibras de sisal curtas de 10, 20, 30 e 40 mm de comprimento e fração volumétrica de 20, 30, 40 e 50% de fibra. Como exemplo, observou-se que a resistência à flexão para os comprimentos de 10 mm e 20 mm na fração volumétrica de 30%, foi de 54 ($\pm 3,50$) MPa e 60 ($\pm 0,60$) MPa.

VENKATESHWARAN [13] pesquisaram materiais compósitos puros e híbridos usando como matriz uma resina epóxi e como reforço fibras de banana / sisal de comprimento de 15 mm. Após ensaio de tração foram encontrados os resultados para materiais compósitos puros de banana 16,12 MPa e para o material compósito de sisal a resistência a tração foi de 21,20 MPa. Já para os híbridos banana / sisal apresentaram na razão (75/25) a tração de 17,39 MPa. Já para o sistema híbrido banana / sisal na razão (50/50) a resistência a tração foi de 18,66 MPa. Para o sistema híbrido banana / sisal na razão (25/75) a resistência a tração foi de 19,93 MPa. Como conclusão o estudo mostrou que a adição da fibra de sisal e banana nos materiais compósitos epóxi de até 50% em peso resulta no aumento das propriedades mecânicas em tração dos mesmos.

ALVAREZ e VASQUEZ [14] estudaram e avaliaram o tratamento alcalino e acetilação em função do tempo e temperatura de compósitos com fibra de sisal / Mater Bi-y. Observou-se que o tratamento muda a morfologia da fibra, removendo celulose e materiais não celulósicos, criando vazios e produzindo fibrilação da fibra. Observou-se também, que o tratamento melhora a adesão entre fibra e matriz.

KHANAM [15] desenvolveram pesquisas envolvendo materiais compósitos híbridos de poliéster insaturado reforçados com fibras curtas de sisal / seda com comprimentos de 10, 20 e 30 mm. Estas fibras usadas não sofreram nenhum tipo de tratamento. Após os ensaios foi obtiveram resultados de resistência a tração para os compósitos híbridos nos comprimentos de fibras de 10, 20 e 30 mm de 16,57 MPa, 18,94 MPa e 17,54 MPa. E para compósitos híbridos de fibras (10, 20 e 30 mm) tratadas quimicamente, obtiveram o valor de tração 20,86 MPa, 23,60 MPa e 21,31 MPa, respectivamente. A melhora das propriedades mecânicas dos materiais compósitos foi atribuída aos tratamentos químicos.

Neste trabalho, para a verificação da resistência a tração das amostras, foram utilizadas máquinas de ensaio universal AROTEC. Fez-se o ensaio de tração das amostras reforçadas com fibras descontínuas e orientadas aleatoriamente, utilizando comprimentos de 5, 10, 15 mm. Além disso, foi realizada uma análise fractográfica no microscópio eletrônico de varredura (MEV), para analisar detalhadamente as superfícies de fratura das amostras ensaiadas. Os resultados também foram comparados com dados encontrados na literatura, correlacionando com outros trabalhos com fibras vegetais e sintéticas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

2.1.1 Resina Poliéster

O polímero utilizado no desenvolvimento do trabalho foi a resina poliéster tereftálica insaturada fabricada pela Ara Química S.A. sob a denominação comercial de Arazyn AZ 1.0 # 34. O agente de cura utilizado foi o peróxido de MEK (PERMEC D-45), nas proporções de 1% (v/v).

2.1.2 Fibras Naturais

As fibras vegetais de sisal foram obtidas no comércio da cidade de Belém-PA. Inicialmente, as fibras naturais foram utilizadas na forma como foram adquiridas, na condição *in natura*, sem tratamento químico. Foram cortadas em três comprimentos diferentes: 5 mm, 10 mm e 15 mm. Os comprimentos desejados foram obtidos através do corte manual (com tesoura) a partir dos feixes de fibra.

2.2 Procedimento experimental

2.2.1 Tratamento químico das fibras naturais

Utilizou-se para o tratamento de mercerização em solução em água destilada de 10% de hidróxido de sódio (NaOH), inserida numa cuba ultrassônica, durante um período de 1h, à temperatura ambiente. Após os tratamentos, as fibras foram neutralizadas com sucessivas lavagens em água destilada e secas a temperatura ambiente (25,8°C) e umidade de 50% por 48 horas. Nessas condições, a secagem aconteceu naturalmente e a estufa não foi necessária devido à pequena quantidade de fibras tratadas. Durante o tratamento, a razão entre massa de fibras (g) por volume de solução (mL) foi em média de 0,1 à 0,075 g/mL.

2.2.2 Fabricação dos corpos de prova

Os corpos de prova foram fabricados por moldagem manual utilizando-se moldes de silicone e sem pressão. O processo se iniciou pelo tratamento da superfície do molde pela aplicação de um produto desmoldante, para remoção da peça após o processo de cura. A fração mássica de cada tipo de reforço utilizado na fabricação dos corpos de prova desta pesquisa foi definida pela capacidade volumétrica do molde em acomodar o reforço sem pressão ou compactação e na ausência da matriz. Para cada tipo de reforço, com comprimento de fibra de 5, 10 e 15 mm, os moldes de tração foram cheios com o reforço até o limite de sua capacidade volumétrica, sem pressão ou vibração mecânica.

Em seguida, cada quantidade de reforço foi devidamente pesada e o valor da massa obtida, convertida em fração mássica, estabeleceu-se como sendo a referência de incorporação e trabalhabilidade para a fabricação de compósitos sem pressão. A partir deste valor de referência, foram prescritas as proporções a serem utilizadas nos compósitos. Determinados os valores de referência para a fração mássica, os corpos de prova foram fabricados para a avaliação da trabalhabilidade da mistura no estado líquido, estimando sua moldabilidade e a molhabilidade da matriz sobre os reforços envolvidos (Figura 1).

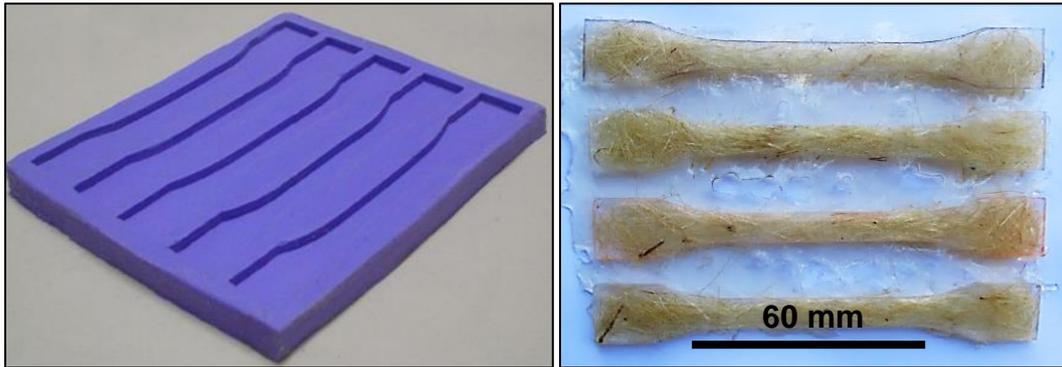


Figura 1. (a) Molde de silicone para moldagem dos corpos de prova de tração; (b) corpos de prova confeccionados.

A partir deste procedimento, foram estabelecidas as proporções do compósito de reforço das fibras com as frações mássicas apresentadas na Tabela 1. Para quatro corpos de prova (capacidade máxima de cada molde), foi utilizado 63,905 g de matriz (resina poliéster e 1% de MEK). Momentos antes da fabricação dos corpos de prova, as fibras foram submetidas em estufas com temperatura de 60°C durante 10 minutos.

Tabela 1. Frações mássicas das fibras naturais utilizadas nas confecções dos corpos de prova.

Comprimento de fibras (mm)	5	10	15
Tipos de fibras naturais	Fração mássica (%)		
Sisal	5,41	4,87	3,90

2.2.3 Caracterização Mecânica

Os ensaios de tração foram realizados de acordo com a norma ASTM D638 [16] e seguiram as medidas como pode ser observado no desenho na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** 2. Os corpos de prova foram fabricados a partir de moldes de silicone para os ensaios com matriz pura e matriz reforçada com fibras curtas. Foram produzidos 8 corpos de prova para cada comprimento e condição da fibra.

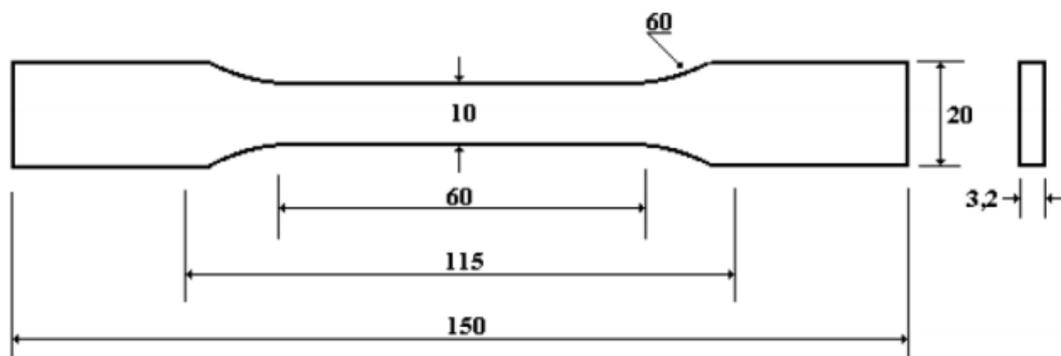


Figura 2. Dimensões (em mm) dos corpos de prova para ensaio de tração (sem escala) segundo a norma ASTM D638 tipo 1.

Os ensaios foram realizados em uma máquina de ensaio universal AROTEC com célula de carga de 5kN, a uma velocidade de ensaio de 5 mm/min.

2.2.4 Análise microscópica e fractográfica

Foram determinadas as dimensões equivalentes da fibra natural e as suas distribuições de frequência através de um microscópio óptico, proporcionando a visualização de tamanhos diferentes em diversos pontos ao longo da fibra.

Após a realização dos ensaios mecânicos, as superfícies de fratura dos corpos de prova foram metalizadas e analisadas de forma a se estudar os mecanismos de falha de cada composição fabricada. A morfologia da superfície de fratura foi feita por microscopia eletrônica de varredura (MEV) modelo VEJA 3 SBU da TESCAN.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Corpos de prova de matriz plena

Pode-se observar com os resultados de ensaios de tração das amostras de poliéster sem reforço, que as variações dos percentuais dos agentes de cura influenciaram nas propriedades mecânicas dos mesmos. Os percentuais de 1,0% (v/v) de agente de cura (recomendação do fabricante) apresentou maior rigidez comparado com os de 0,7% (v/v). Contudo, os valores de resistência a tração e deformação foram maiores das amostras com percentuais de MEK de 0,7%. As curvas apresentadas na Figura 3 mostram que a matriz de poliéster apresenta um comportamento relativamente dúctil quando ensaiada em tração, porém com fratura brusca, sem capacidade de absorção de energia após a fissura da matriz.

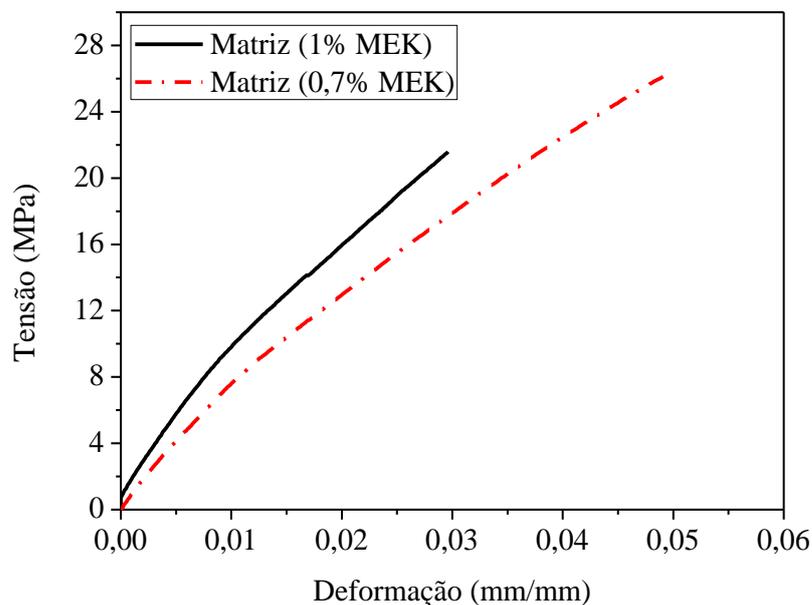


Figura 3.1 Gráfico comparativo (tensão versus deformação) que ilustra o comportamento mecânico da matriz de poliéster insaturada teraftálica com agente de cura (MEK) nas proporções de 1% e 0,7% (v/v).

3.2 Compósitos de poliéster reforçados com fibras de sisal

Com os resultados apresentados, podemos observar que o comportamento mecânico dos compósitos reforçados com sisal, comprimento de 10 mm apresentaram maiores desempenhos mecânicos médios relativos. O compósito

reforçado com sisal (in natura) apresentou maior resistência média a tração dentre todos os materiais de sisal, superando inclusive em 18,71% a matriz pura. Ainda sobre o reforço de 10 mm, porém com o tratamento químico, a rigidez do compósito reforçado com sisal foi maior 11,12% e 19,95% do que o in natura e da matriz pura, respectivamente (Tabela 2).

Tabela 2. Resultado dos ensaios de tração das amostras de compósitos de poliéster reforçados com fibras de sisal

Matriz	Temp. de fabricação (°C)	Fração mássica (%)	Comp. da fibra (mm)	Resistência a tração (MPa)	Fonte
Poliéster	25	5,41	5	16,98	ANDRADE [09]
				16,98	COSTA [10]
				15,27	RODRIGUES [11]
		4,87	10	22,78	COSTA [10]
				23,48	RODRIGUES [11]
				54 (\pm 3,50)	SREEKUMAR et al. [12]
Poliéster - Híbrido sisal / seda		sem tratamento		16,57	KHANAM et al. [15]
				com tratamento	20,86
Polipropileno isostático	165	-		28,70	JOSEPH et al. [17]
Poliéster	25	3,90	15	27,05	ANDRADE [09]
				27,05	COSTA [10]
				26,16	RODRIGUES [11]
Epóxi		-		21,20	VENKATESHWARAN et al. [13]
				20 (Fração volumérica)	-
Poliéster	In natura	5,41	5	16,88 \pm 1,86	Autor
				Tratada	
	In natura	4,87	10	23,72 \pm 3,42	
				Tratada	
	In natura	3,90	15	21,86 \pm 3,86	
				Tratada	

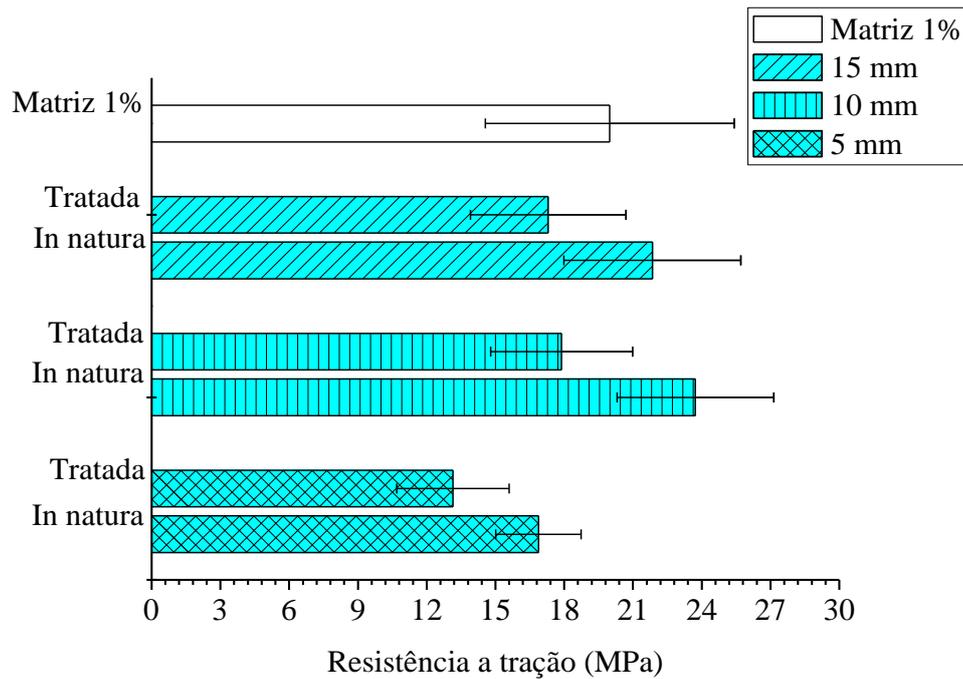


Figura 4. Gráfico comparativo que ilustra o comportamento mecânico da matriz e dos compósitos poliméricos reforçados com fibras de sisal nas condições in natura e tratadas quimicamente, com comprimento 5 mm, 10 mm e 15 mm.

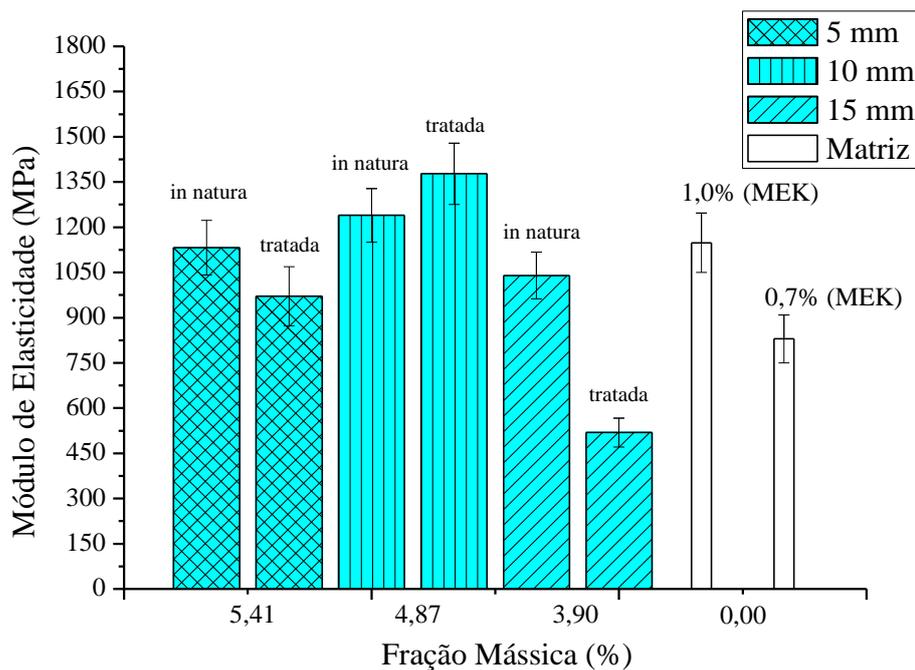
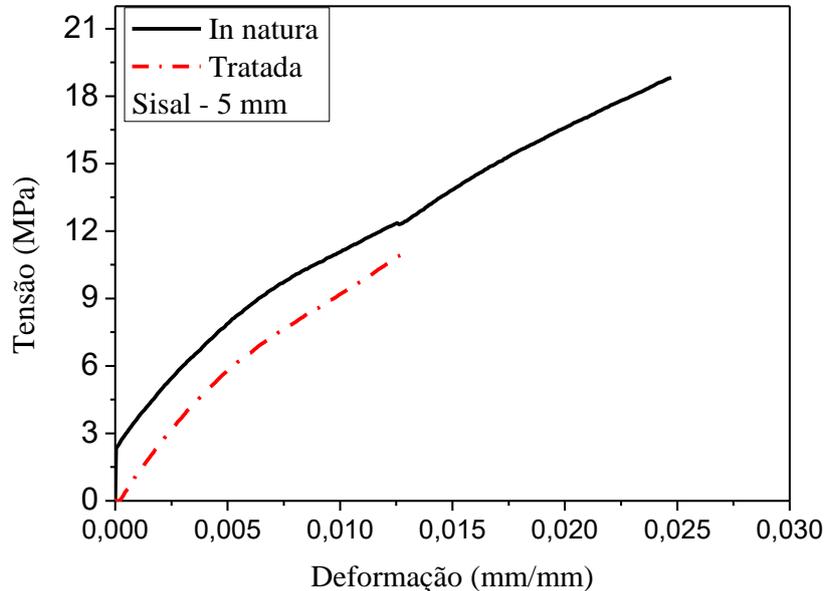


Figura 5. Gráfico comparativo que ilustra a relação módulo de elasticidade (MPa) versus fração mássica (%) dos compósitos poliméricos reforçados com fibras de sisal nas condições in natura e tratadas quimicamente, com comprimento 5 mm, 10 mm e 15 mm.

Referentes a literatura, o compósito com comprimento de reforço de 5 mm (Figura 6), apresentou menores valores médios de tensão em relação a ANDRADE [09] e COSTA [10], os quais apresentaram valores de tensão de 22,23 e 16,98, respectivamente, porém, maiores que RODRIGUES [11] que apresentou uma resistência a tração de 15,27 MPa, apesar de utilizarem as mesmas frações

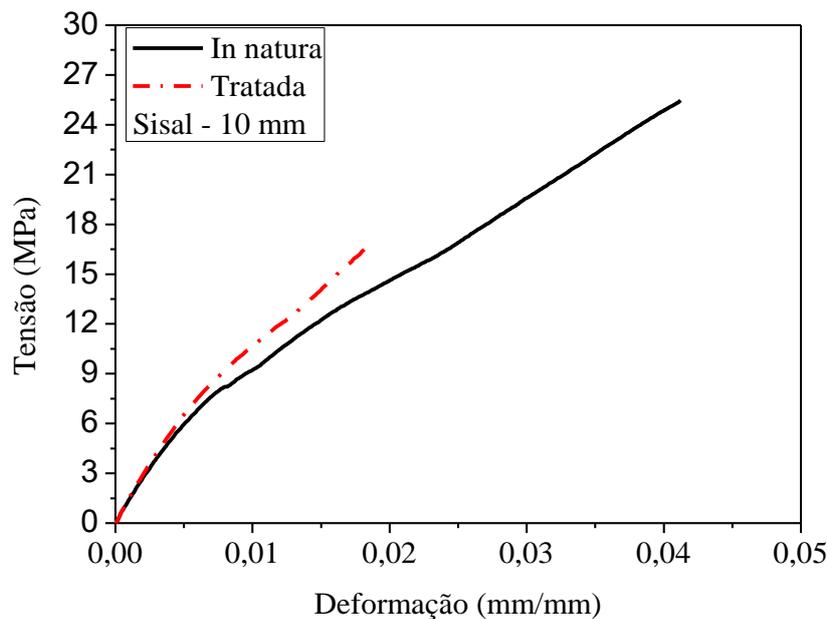
mássicas do experimento. Todavia, os resultados foram muito próximos de outros trabalhos.

Figura 6. Gráfico comparativo (tensão versus deformação) que ilustra o comportamento mecânico do compósito polimérico reforçado com fibras de sisal nas condições in natura e tratadas quimicamente, orientadas aleatoriamente com comprimento de 5 mm.



Para compósito de sisal com comprimento de reforço de 10 mm, apresentou valores de tensão média aproximados de COSTA [10] e RODRIGUES [11], os quais usaram as mesmas frações mássicas (Figura 7). Contudo, para este mesmo comprimento de reforço, JOSEPH *et al.* [17] que utilizou o mesmo comprimento de fibra de sisal e uma matriz de polipropileno isostático, apresentou uma resistência a tração de 28,70 MPa. Ainda para esse mesmo comprimento, SREEKUMAR *et al.* [12] apresentou uma resistência a flexão de 54 MPa.

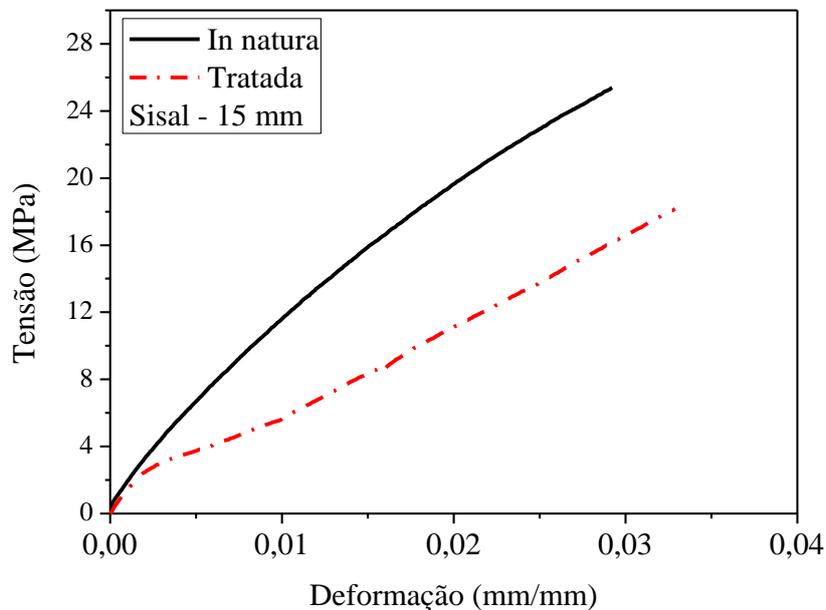
Figura 7. Gráfico comparativo (tensão versus deformação) que ilustra o comportamento mecânico do compósito polimérico reforçado com fibras de sisal nas condições in natura e tratadas quimicamente, orientadas aleatoriamente com comprimento de 10 mm.



Para compósito com comprimento de reforço de 15 mm, a tensão de ruptura apresentou menores valores médios em relação a COSTA [10] e RODRIGUES *et al.* [11], com 27,05 e 26,16 MPa, respectivamente (Figura 8). Contudo, foi muito próxima da resistência a tração de VENKATESHWARAN *et al.* [13] que utilizou esse mesmo comprimento para confeccionar um compósito utilizando uma matriz de epóxi, obtendo uma resistência de 21,20 MPa. Esta resistência a tração apresentou maiores que todos os seus outros compósitos híbridos de banana / sisal.

Em relação aos compósitos reforçados com fibras de sisal tratadas quimicamente, para todos os comprimentos, os resultados apresentaram menores valores médios que os compósitos reforçados com fibras in natura, diferentemente de KHANAM *et al.* [15] o qual apresentou uma resistência a tração melhorada com o tratamento químico de seus compósitos híbridos sisal/seda, com comprimentos de fibras de 10, 20 e 30 mm. ALVAREZ e VASQUEZ [14] obtiveram melhorias na adesão interfacial reforço / matriz trabalhando com compósitos sisal / Mater Bi-y.

Figura 8. Gráfico comparativo (tensão versus deformação) que ilustra o comportamento mecânico do compósito polimérico reforçado com fibras de sisal nas condições in natura e tratadas quimicamente, orientadas aleatoriamente com comprimento de 15 mm.



Segundo MAIA [19] e FERNANDES *et al.* [20], uma das características dos compósitos de sisal é a baixa adesão interfacial reforço / matriz. Com os resultados do experimento, observou-se que com ou sem o tratamento químico nas fibras de sisal, ocorreu uma considerável presença de *pull out* e a ocorrência de região com aglomerados de fibras, o que pode justificar a redução considerável da resistência média do material compósito (Figura 9).

Isso pode ser explicado pela fraca adesão na interface fibra/matriz. Apesar da fibra de sisal tratada quimicamente ter apresentado um aspecto de adesão interfacial melhorado em relação a fibra in natura, é bem provável que o tratamento alcalino tenha causado uma acentuada quebra de cadeias de celulose da fibra, diminuindo as suas propriedades de resistência mecânica e refletindo nas baixas propriedades mecânicas dos compósitos (Figura 10).

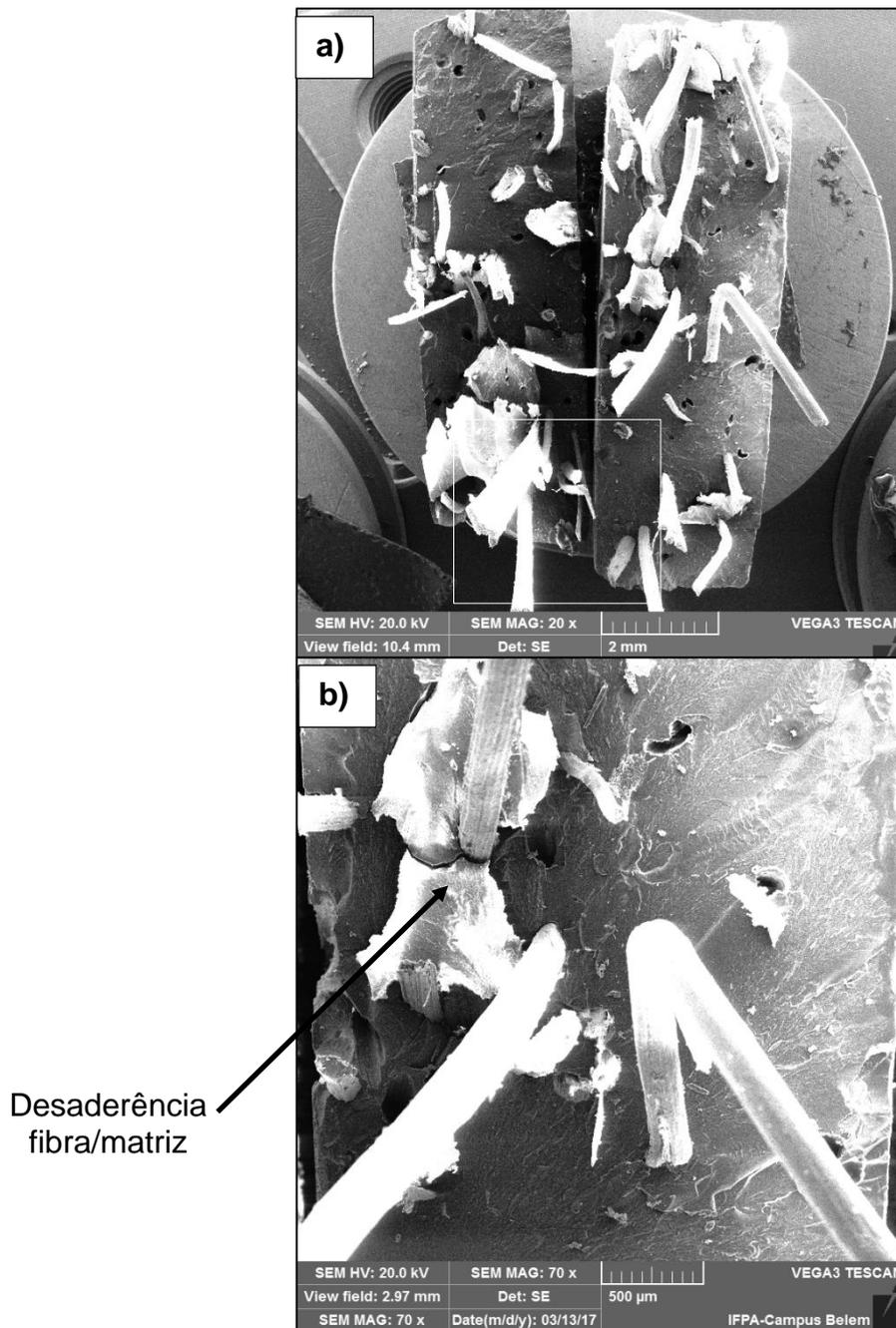


Figura 09. Micrografias das superfícies de fratura das amostras de compósitos poliméricos reforçados com fibras de Sisal (in natura) orientados aleatoriamente com comprimento de 15 mm: (a) ampliação de 20x, (b) ampliação de 70x.

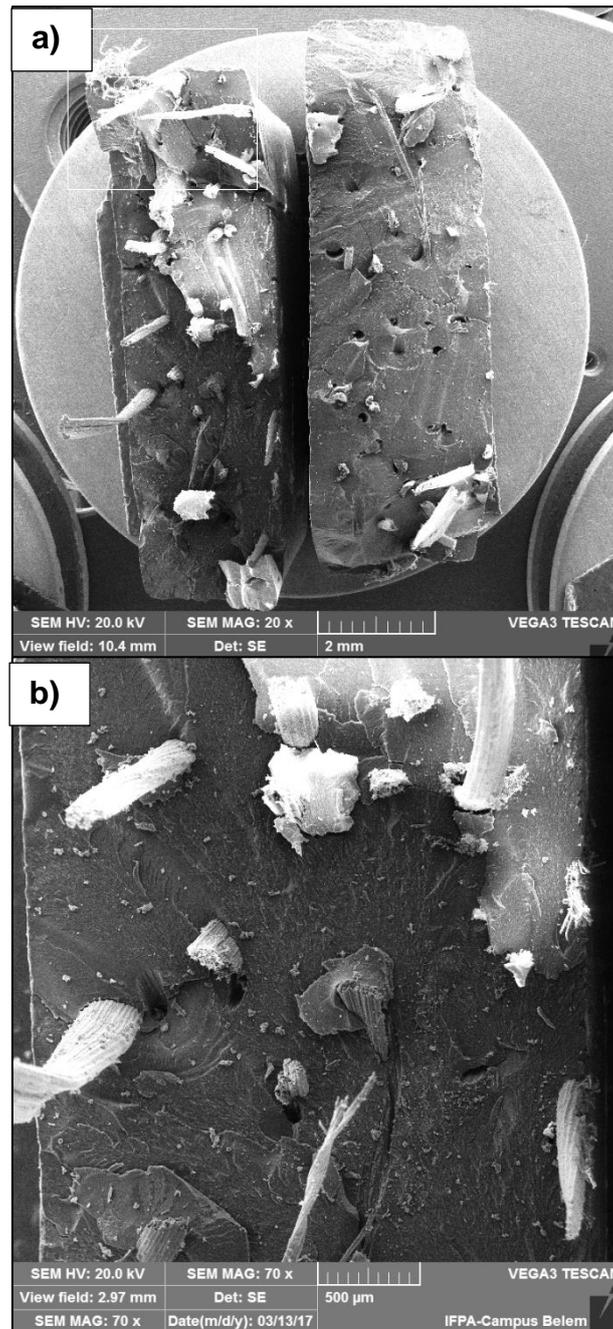


Figura 10. Micrografias das superfícies de fratura das amostras de compósitos poliméricos reforçados com fibras de Sisal (tratamento alcalino) orientados aleatoriamente com comprimento de 15 mm: (a) ampliação de 20x, (b) ampliação de 70x.

3 CONCLUSÃO

Os compósitos poliméricos reforçados com fibras de sisal, para o comprimento de 10 mm apresentaram maiores desempenhos mecânicos médios relativos. O compósito reforçado com sisal (in natura) apresentou maior resistência média a tração dentre todos os materiais de sisal, superando inclusive em 18,71% a matriz pura. Ainda sobre o reforço de 10 mm, porém com o tratamento químico, a rigidez do compósito reforçado com sisal foi maior 11,12% e 19,95% do que o in natura e da matriz pura, respectivamente.

Com os resultados do experimento, observou-se que com ou sem o tratamento químico nas fibras de sisal, ocorreu uma considerável presença de *pull out* e a ocorrência de região com aglomerados de fibras, o que pode justificar a redução considerável da resistência média do material compósito. Isso pode ser explicado pela fraca adesão na interface fibra/matriz.

Agradecimentos

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pelo auxílio financeiro e ao Instituto Federal do Pará (IFPA) por permitir a utilização dos laboratórios.

REFERÊNCIAS

- 1 KOZLOWSKI, R.; RAWLUK, M.; BARRIGA, J.; State of the art-production, processing and applications of fibrous plants. In: Sivam RL, Araújo RC, editors. 2nd international conference on textile engineering (SINTEX-2004) Proceedings, September 7–11; Natal, in CD-ROM, Paper No.TIP-1-007. 2004.
- 2 SATYANARAYANA, K. G.; GUIMARÃES, J. L.; WYPYCH, F. Studies on Lignocellulosic fibers of Brazil.Part I: Source, producton, morphology, properties and applications. Composites. Part A: applied science and manufacturing. 38, 1694-1709, 2007.
- 3 WAMBUA, P.; VANGRIMDE, B.; LOMOV, S.; & VERPOEST, I. The response of natural fibre composites to ballistic by fragment simulating projectiles. Composite structures. 77, 232-240, (2007).
- 4 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. Matéria vol.11 no. 3. Rio de Janeiro – RJ. July / Sept. 2006.
- 5 LEVI NETO, F. PARDINI, L. C. Compósitos estruturais: ciência e tecnologia.1. Ed. São Paulo: Blucher, 2006.
- 6 CASTRO, B. F. M. Estudo e Caracterização Mecânica de Compósitos Reforçados com Fibras Naturais. Dissertação de mestrado. Instituto Superior de engenharia do Porto. Porto - Portugal. 2013.
- 7 D'ALMEIDA, A.L.F.; D'ALMEIDA, S, J. R. M.; D. W. BARRETO; V. CALADO. Effect of surface treatments on the thermal behavior and tensile strength of piassava fibers. Journal of Applied Polymer Science, Vol. 120, 2508–2515. 2011.
- 8 KABIR, M., WANG, H., LAU, K., & CARDONA, F. Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview. Composites Part B: Engineering, 43, 2883–2892, 2012.
- 9 ANDRADE, J. S.; SILVA, D. S.; GOMES, I. S.; ROCHA, T. O.; PEREIRA, A. I.; DA SILVA, I. S.; DA SILVA LIMA, F. X.; PEREIRA, L. C. O.; RIBEIRO, M. M.; FUJIYAMA R. T. Propriedades mecânicas de material compósito: um estudo de materiais poliésteres reforçados com fibras de sisal. 23º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais 04 a 08 de Novembro de 2018, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.
- 10 COSTA, D. S. Caracterização de Materiais Compósitos de Matriz Poliéster e Fibras de Bambu, Sisal e Vidro e Híbridos Bambu/Sisal, Bambu/Vidro e Sisal/Vidro. Dissertação (Mestrado) – 104f. il. Universidade Federal do Pará. PPGEM, Belém, 2012.
- 11 RODRIGUES, J.S.; FUJIYAMA, R.T.; OLIVEIRA, D.R.C. Fractography Analysis of Matrix Composite Polyester and Waste of Wood. VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2010.
- 12 SREEKUMAR, P.A.; JOSEPH, K.; UNNIKRISHNAN, G.; THOMAS, S. A. Comparative study on mechanical properties of sisal-leaf fibre-reinforced polyester composites prepared by resin transfer and compression moulding techniques. Composites Science and Technology, n. 67, p. 453–461, 2007.

- 13 VENKATESHWARAN, N. *et al.* Effect of fiber length and fiber content on mechanical properties of banana fiber/epoxy composite. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, n. 30, p. 1621-1635, 2011.
- 14 ALVAREZ A. V.; VASQUEZ, A. Influence of fiber chemical modification procedure on the mechanical properties and water absorption of MaterBiY/sisal fiber composites. *Composites: Part A*. v. 37. v. 36, p.1672-1680, 2006.
- 15 KHANAM, P. N. *et al.* Tensile, Flexural and Compressive Properties of Sisal/Silk Hybrid Composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, v. 26, n. 10, 2007.
- 16 ASTM D 638 – 89. “Standard Test Method for Tensile Properties of Plastic (Metric).” *Annual Book of ASTM Standards*, American Society for Testing and Materials
- 17 JOSEPH, P. V.; JOSEPH, K.; THOMAS, S. Effect of processing variables on the mechanical properties of sisal-fiber-reinforced polypropylene composites. *Composites Science and Technology*, n. 59, p. 1625-1640, 1999.
- 18 BRAGA, R. A., Análise da utilização de fibras naturais aglutinadas com resina epóxi, para fabricação de uma cobertura central do porta-malas de automóvel de passageiros. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia Mecânica, Pontifca Universidade Católica de Minas Gerais. 2010.
- 19 MAIA, M. R. Comportamento em tração / flexão e aspecto fractográfico de matriz poliéster com pó de aerosil e de madeira com a inclusão de fibras curtas de sisal e juta. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM), Belém-PA, 2015.
- 20 FERNANDES, E.M.; MANO, J.F.; R.L. REIS. Hybrid cork–polymer composites containing sisal fibre: Morphology, effect of the fibre treatment on the mechanical properties and tensile failure prediction. *Composite Structures* n. 105, p. 153–162, 20.
- 21