

Caracterização mecânica e morfológica de fibras de coco tratadas superficialmente para utilização como reforço em polímeros

Mechanical and morphological characterization of coconut fibers treated superficially for use as reinforcement in polymers

João Vitor da Silveira Nunes¹ , Edson Xavier Batista da Silva¹ 

Matheus Henrique Pires Miranda¹ , Alexandre de Souza Rios² , Enio Pontes de Deus¹ 

¹Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais. Campus do Pici, Bloco 729, 60.440-554, Fortaleza, CE, Brasil.

²Universidade de Fortaleza. Av. Washington Soares, 1321, Edson Queiroz, 60811-905, Fortaleza, CE, Brasil.

e-mail: jvitornune@gmail.com, edxabas@gmail.com, matheushpmiranda@gmail.com, alexandre.rios@unifor.br, epontes@ufc.br

RESUMO

Pela questão ambiental aumentou-se a procura por materiais que utilizem mais recursos naturais e renováveis, como os polímeros reforçados com fibras naturais. São realizados tratamentos superficiais para a melhor adesão da fibra na matriz polimérica, o mais comum é a merceirização através de solução de NaOH. A fibra de coco foi analisada em quatro condições: variando entre tratadas e não tratadas, seca em estufa e seca naturalmente. Em seguida foram analisadas por ensaio de tração, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e tomografia de raio x para estudar as características mecânicas, morfológicas e observar a adesão ao polímero. Após o tratamento químico ocorreu a remoção da lignina e hemicelulose da superfície da fibra. Nas fibras tratadas e secas surgiram microfissuras que podem comprometer as propriedades mecânicas. Através do processamento das imagens das seções transversais da fibra foi obtida uma área efetiva entre 39,6% e 43,3%. Para as fibras abaixo de 300 µm a resistência a tração converge para 20 a 60 MPa e o módulo de elasticidade entre 1 e 3 GPa. Os tratamentos aumentaram a resistência a tração e módulo de elasticidade das fibras, contribuindo para a utilização de fibra de coco como reforço em polímeros.

Palavras-chave: Fibra de Coco; Microscopia eletrônica de varredura; Tomografia de raio X; Ensaio de Tração; Polímeros reforçados com fibras naturais.

ABSTRACT

Due to the environmental issue, the demand for materials that use more natural and renewable resources increased, such as natural fibers reinforced polymers. Surface treatments are performed for better adhesion of the fiber to the polymer matrix, the most common is mercerization through NaOH solution. Coconut fiber was analyzed under four conditions: varying between treated and untreated, oven dried and naturally dried. Then they were analyzed by tensile test, scanning electron microscopy (SEM) and x-ray tomography to study the mechanical and morphological characteristics and observe the adhesion to the polymer. After the chemical treatment, lignin and hemicellulose were removed from the fiber surface. In the treated and dried fibers, micro-cracks appeared that could compromise the mechanical properties. By processing the images of the fiber cross-sections, an effective area between 39.6% and 43.3% was obtained. For fibers below 300 µm, the tensile strength converges to 20 to 60 MPa and the modulus of elasticity between 1 and 3 GPa. The treatments increased the tensile strength and modulus of elasticity of the fibers, contributing to the use of coconut fiber as reinforcement in polymers.

Keywords: Coconut fiber; Scanning electron microscopy; X-ray tomography; Tensile test; Natural fiber reinforced polymer.

1. INTRODUÇÃO

Os problemas ambientais têm trazido maior interesse em novos materiais que levem em conta a sustentabilidade e reciclabilidade e que utilizem ao máximo recursos naturais e renováveis como matéria prima [1, 2]. A diminuição da oferta global de petróleo, a preocupação com as questões ambientais e a falta de aterros sanitários tem estimulado a busca por materiais plásticos alternativos [3].

Nesse sentido, materiais renováveis, reciclados e reutilizados tem preferência em relação aos materiais virgens, visto que este último requer mais energia e emite mais CO₂ para sua produção. Além do uso de plásticos reciclados, também é possível utilizar fibras naturais junto aos polímeros. Esse tipo de compósito reduz o uso de plástico na fabricação, é mais barato e reduz o impacto no meio ambiente [4]. Além disso, compósitos de polímeros reforçados com fibras naturais podem ter propriedades mecânicas consideráveis [5].

Uma das fibras que têm sido estudadas são as fibras de coco, obtidas a partir de frutos de coco, um resíduo que possui um descarte significativo em aterros de cidades costeiras brasileiras. Assim, o aproveitamento desses materiais auxiliaria a diminuir a quantidade de resíduos descartados nas cidades. Mas, devido às características das fibras naturais, ainda é necessário realizar tratamentos superficiais para melhorar a adesão na matriz polimérica [6].

Assim, é preciso estudar as propriedades mecânicas e morfológicas da fibra de coco, incluindo a influência de tratamentos superficiais para verificar seu potencial de utilização como reforço em polímeros, de modo a identificar futuras aplicações comerciais e aumentar a aplicabilidade desse material.

Este trabalho objetiva caracterizar a fibra de coco através de análises morfológicas e mecânicas, utilizando a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), tomografia de raios X e ensaios de tração.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia consiste em quatro partes: a obtenção das fibras, o tratamento superficial aplicado nas fibras, a caracterização mecânica através de ensaio de tração e a caracterização morfológica através de microscopia eletrônica de varredura e tomografia de raio x.

2.1. Tratamento superficial nas fibras

As fibras foram extraídas de cascas de cocos verdes coletados com 6 a 7 meses de maturação, fornecidos pela Embrapa Agroindustrial Tropical (CE).

Para melhorar a adesão da fibra no compósitos, foi realizado um processo de mercerização no laboratório de Pesquisa em Corrosão da Universidade Federal do Ceará (UFC), para remover a lignina, hemicelulose, ceras, óleos e outras substâncias na superfície da fibra que possam dificultar com a adesão na matriz polimérica [6, 7].

Para a mercerização, as fibras foram imersas em solução de NaOH a 5% durante 1 hora sob agitação mecânica a temperatura ambiente ($25 \pm 5^\circ\text{C}$). Em seguida, as fibras foram lavadas em água destilada para remover o NaOH e posteriormente condicionadas à temperatura ambiente. As fibras foram separadas em quatro grupos de amostras:

- Como recebidas: fibras na condição *in natura* como foram recebidas pela Embrapa e condicionadas à temperatura ambiente;
- Tratadas por NaOH e condicionadas à temperatura ambiente durante 24 h;
- Não tratadas e secas em estufa a $60 \pm 10^\circ\text{C}$ por 24 h;
- Tratadas por NaOH e secas em estufa a $60 \pm 10^\circ\text{C}$ por 24 h.

Em seguida, os quatro grupos de fibras foram adaptados para as análises morfológicas e mecânicas.

2.2. Análise morfológica

2.2.1. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Os ensaios de MEV foram realizados no Laboratoire de Mécanique et Technologie (LMT) da Universidade de Paris-Saclay (LMT-Cachan), modelo Hitachi S-3400 N. Para observação dos principais constituintes das fibras de coco, foi utilizado uma tensão de aceleração de 20 kV. A distância entre a câmera do MEV e as amostras foi entre 8 e 10 mm. Como as amostras são não condutoras, as superfícies foram recobertas com ouro em vácuo utilizando o equipamento Balzers SCD004 Sputter Coater antes de serem observadas no MEV, para garantir a condutividade da superfície e assim evitar o acúmulo de cargas que poderiam afetar as imagens do MEV [8].

Uso da micrografia através do MEV teve por finalidade medir o diâmetro das fibras de coco. Devido à grande variação no diâmetro foi avaliado um grupo de 22 amostras escolhidas aleatoriamente, para assim

determinar a área da secção em corte da fibra de coco, já que uma grande variação do diâmetro ao longo do seu comprimento poderia influenciar no comportamento mecânico.

2.2.2. Tomografia de raios X

A caracterização morfológica das fibras de coco também foi realizada por meio de tomografia de raios X. Esta técnica permite visualizar internamente a amostra sem a necessidade de abri-la fisicamente.

O aparelho de raios X utilizado foi North Star Imaging Company. Inc. (NSI), model X 50 do LMT. Um pacote de software do fabricante gerencia a aquisição, processamento e reconstrução 3D de dados. Foi criado um *script* no software MATLAB capaz de representar os pixels relacionados aos constituintes da fibra através das imagens tomográficas. O *script* conseguia diferenciar o contraste entre os tons de cinza dos pixels, assim determinando quais pixels representavam a fibra ou as áreas vazias.

As análises foram realizadas em cinco fibras de coco em temperatura ambiente (25°C).

2.3. Análise Mecânica

2.3.1. Ensaio de tração

Os quatro grupos de fibras de coco foram caracterizados por ensaios mecânicos segundo a norma ASTM C1557-20 [9]. Os ensaios foram realizados em temperatura ambiente (25°C) no mesmo MEV utilizado anteriormente (modelo Hitachi S-3400N). Para a obtenção das imagens foram utilizadas as ampliações de 200x, 300x e 500x, com uma voltagem de aceleração de 5 kV e acoplado com uma célula de carga de 0,1 N de precisão que mede de 0 N a 500 N. As ampliações foram suficientes para gerar imagens para medir a deformação mecânica através da técnica de Correlação Digital de Imagem (CDI).

Essa técnica comparou as imagens da fibra não deformada (antes do ensaio) com as imagens das fibras deformadas, visando obter deformações longitudinais e transversais. Durante os ensaios, as pinças que fixavam as fibras se moveram em direções opostas, impondo uma taxa de deslocamento de 1µm/segundo no ensaio de tração, permitindo a captura de imagens estáveis para cada 0,5 N de aumento na carga aplicada. As imagens das fibras deformadas e não deformadas foram armazenadas e comparadas entre si e, então, inseridas no Software MATLAB que analisou a movimentação de cada pixel das imagens para informar as deformações. O tempo de interrupção para a captura das imagens foi de aproximadamente 30 segundos.

As fibras de coco foram avaliadas pela técnica CDI após o recobrimento com ouro descrita anteriormente. Assim, a textura externa da fibra recoberta foi responsável por monitorar os mecanismos de deformação dessas fibras [10–12].

Para cada teste a fibra foi fixada com cola instantânea (etilcianoacrilato) em um papel de 180 g/m² de gramatura. A Figura 1 mostra o recorte e preparação do corpo de prova.

Mota & Agopyan (2007) [13] estudaram a dispersão de diâmetro das fibras de coco. As áreas reais (medidas com micrômetro) e áreas elípticas (calculadas através da maior e da menor seções transversais observadas no microscópio ótico) foram comparadas e o coeficiente de correlação de 1,0062 que foi encontrado. Portanto, para essa pesquisa, os efeitos não circulares da fibra de coco foram desprezados.

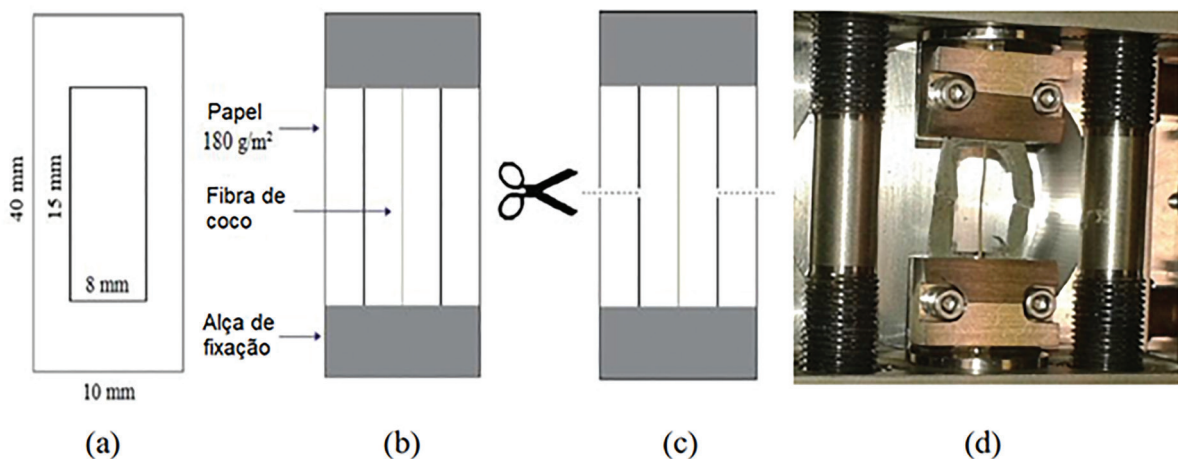


Figura 1: Preparação das fibras de coco para os ensaios de tração: Fibras fixadas em papel (a), fibras coladas em papel (b), cortes das laterais do papel (c) e fibras inseridas no MEV (d).

A Tensão Normal Nominal aplicada às fibras de coco foi calculada pela expressão: $\sigma = \vec{F} / A_0$, onde \vec{F} é a força aplicada e A_0 é a área da seção transversal não deformada da fibra. A área da seção transversal foi calculada a partir do diâmetro da fibra (ϕ) pela expressão $A_0 = (\pi\phi^2/4)$. Pelo menos cinco medidas de diâmetro foram realizadas ao longo do comprimento de cada fibra e foi utilizado o valor médio dessas medições no cálculo. No entanto, fibras naturais apresentam seções transversais não circulares e podem ser encontradas discrepâncias entre as propriedades mecânicas [13, 14].

Essa semelhança permitiu o cálculo da área de seção transversal como uma área circular, onde ϕ é o diâmetro médio de cada fibra, de acordo com pelo menos 5 medições realizadas no MEV. Através desse procedimento foi possível determinar limite de resistência a tração, módulo de elasticidade e modificações nas quatro condições de fibras de coco com diferentes diâmetros.

As deformações diametraes identificadas após ensaios de tração foram calculadas através da equação 1 mostrada abaixo:

$$\text{Deformação diametral} = \left(\frac{\phi_{inicial} - \phi_{final}}{\phi_{inicial}} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

3. RESULTADOS

3.1. Análise morfológica

3.1.1. Microscopia eletrônica de varredura

Foram feitas observações morfológicas das quatro condições da fibra de coco utilizando o MEV, permitindo a medição estatística do diâmetro e observação dos microconstituintes dessas fibras. A Figura 2(a) mostra a micrografia da superfície externa da fibra de coco na condição “como recebida”. Percebe-se que ela apresenta leve rugosidade devido à presença de impurezas, gorduras e resíduos orgânicos aderidos a superfície, o que se deve à sua origem vegetal e aos processos de extração.

Foi possível remover lignina, hemicelulose e outras ceras e óleos da superfície da fibra tratada em solução de NaOH a 5% como mostra a Figura 2(c). Essa modificação em torno da camada superficial também é verificada nas células do parênquima, favorecendo o ganho de área de contato pela maior exposição das fibrilas e traços globulares com polímeros.

Na Figura 2(d), a fibra seca e a tratada quimicamente apresentam a mesma morfologia, por outro lado o aquecimento remove a umidade remanescente do tratamento químico na solução de NaOH. Além disso, foi observado na literatura, por meio de micrografias de MEV e ensaios de resistência ao cisalhamento, que saliências e recortes encontrados após o tratamento químico superficial facilitariam a impregnação com uma matriz polimérica [12].

No entanto, microfissuras foram encontradas nas amostras de fibras secas e tratadas quimicamente.

Foram observadas microfissuras na faixa de 7 a 60 μm na direção transversal (Figura 3), bem como remoção parcial dos constituintes externos das fibras (lignina, hemicelulose e celulose). Essas discontinuidades podem ter sido originadas pelo aquecimento associado à modificação da rigidez imposta pelo tratamento químico. Essas discontinuidades comprometem as propriedades mecânicas das fibras.

O diâmetro de 22 amostras selecionadas aleatoriamente foi medido em seis regiões ao longo do comprimento de 1,5 mm nos 4 grupos de fibras, como mostra a Figura 4. Não houve grandes mudanças ao longo do comprimento da fibra na condição “como recebida” e para a condição seca. Já as fibras 4 e 5 que são quimicamente tratadas e as 1, 3 e 6 que são quimicamente tratadas e secas têm desvios padrão maiores que 30%. Isto deve-se a remoção desigual dos constituintes depois do tratamento químico com NaOH.

3.1.2. Tomografia de raio X

A Figura 5(a) mostra a imagem obtida pela tomografia de raio X de uma seção transversal da fibra de coco. Pode-se observar várias estruturas circulares, que são as células, formadas pela parede celular e uma cavidade no centro de cada célula, o lumen, que são regiões vazias na fibra. Também é possível observar uma região amorfa unindo as células, a lamela média, formada principalmente por lignina e hemicelulose [7, 13, 15, 16]. No caso da fibra de coco, as células são arranjas de modo concêntrico em torno de uma lacuna no centro da fibra.

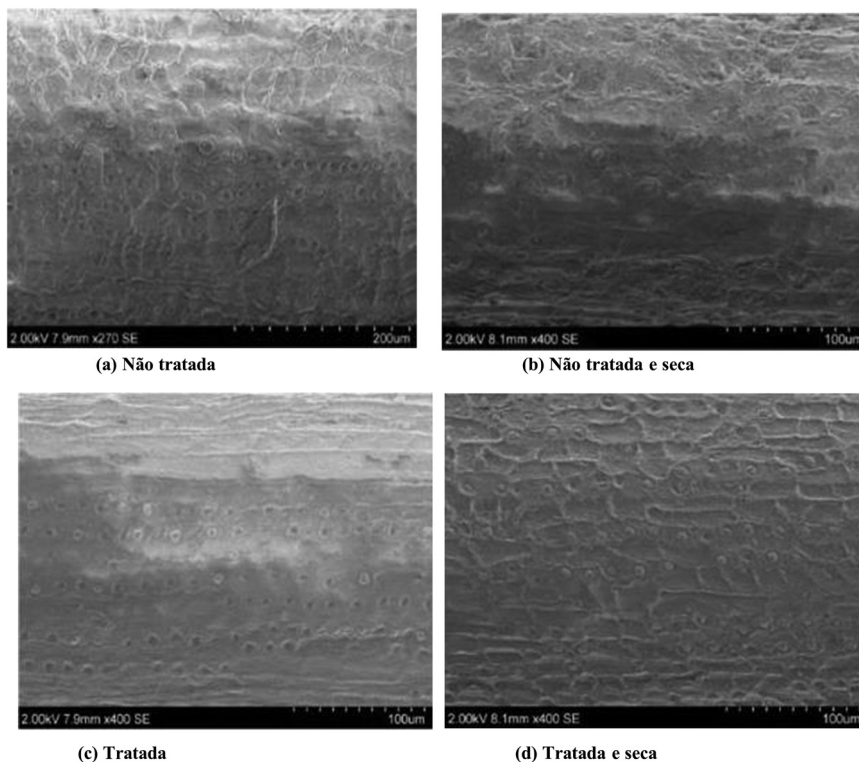


Figura 2: Superfície externa da fibra de coco “como recebida” (a), após seca (b); quimicamente tratada (c) e quimicamente tratada e seca (d).

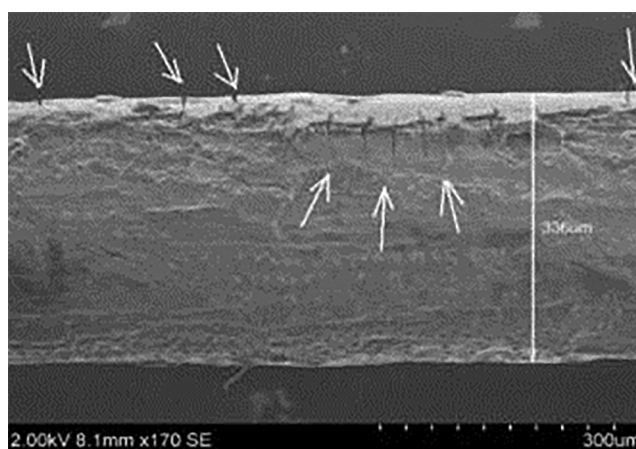


Figura 3: Microfissuras na fibra de coco seca e tratada quimicamente.

As Figuras 5 (a-e) mostram as tomografias ao longo das secções longitudinais, onde também é possível observar essa lacuna central que ocorre ao longo da fibra. Além disso, o contorno da secção transversal da fibra possui uma forma irregular e elíptica. Essas características em conformidade com outros trabalhos que também realizaram imagens de MEV de secções da fibra [10, 13].

Na Figura 5 é possível observar a estrutura cristalina da microfibrila constituída pela celulose imensa em camadas de lignina e hemicelulose. A composição química e ângulo helicoidal da microfibrila observada em cada estrutura é o que determina as propriedades mecânicas da fibra [10]. O *script* em MATLAB também conseguiu determinar os pixels que representavam as áreas vazias das secções da fibra, e reportou que uma área significativa não é ocupada pela fibra.

O mesmo procedimento utilizado para representar em pixels a secção transversal da fibra de coco foi utilizado para a secção longitudinal, mostrado na Figura 6. É possível observar o lúmen ao longo do comprimento da fibra.

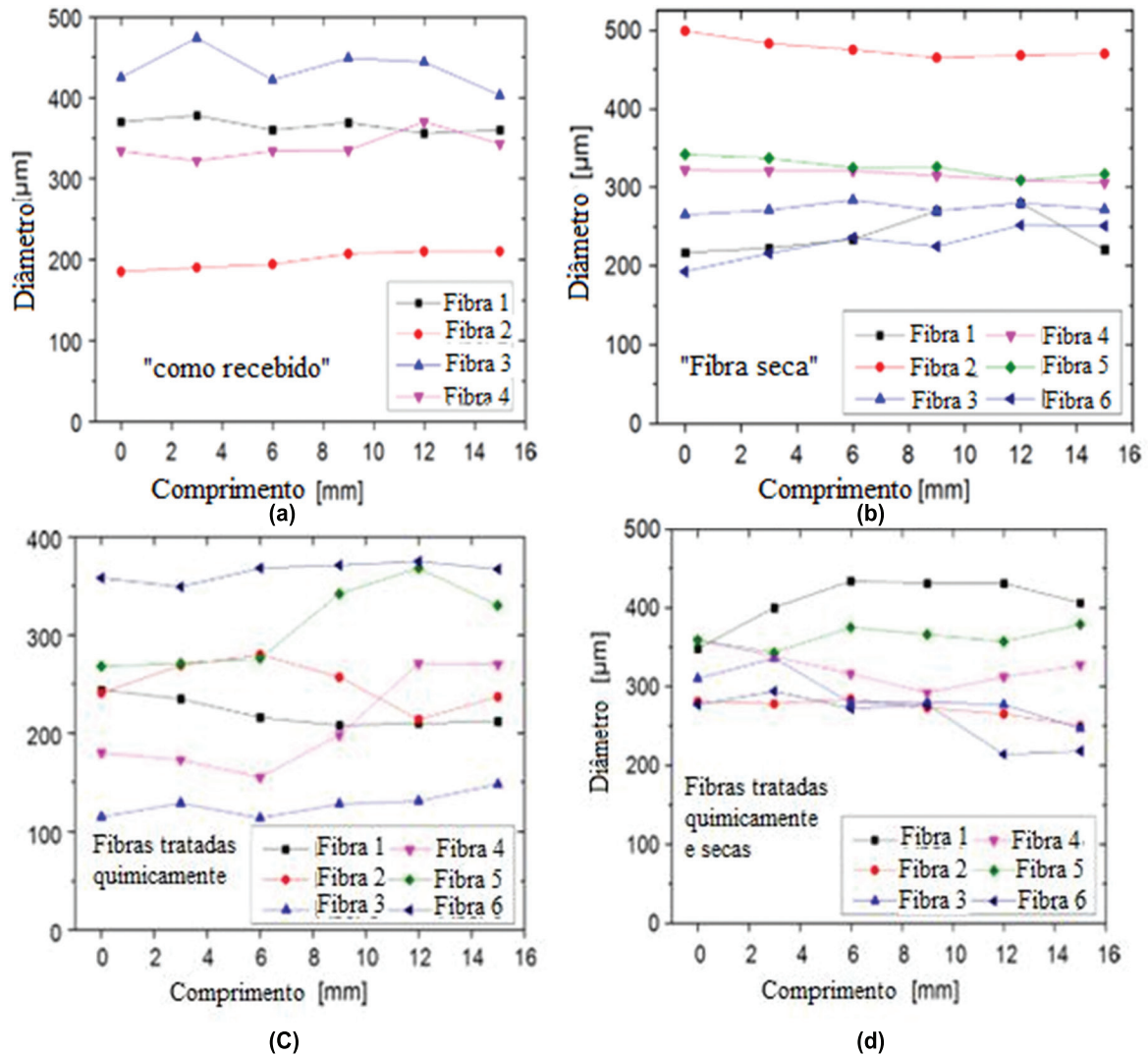


Figura 4: Medições de diâmetro ao longo do comprimento das fibras nas condições: não tratadas (a) não tratadas e secas (b), quimicamente tratadas (c) e quimicamente tratadas e secas (d).

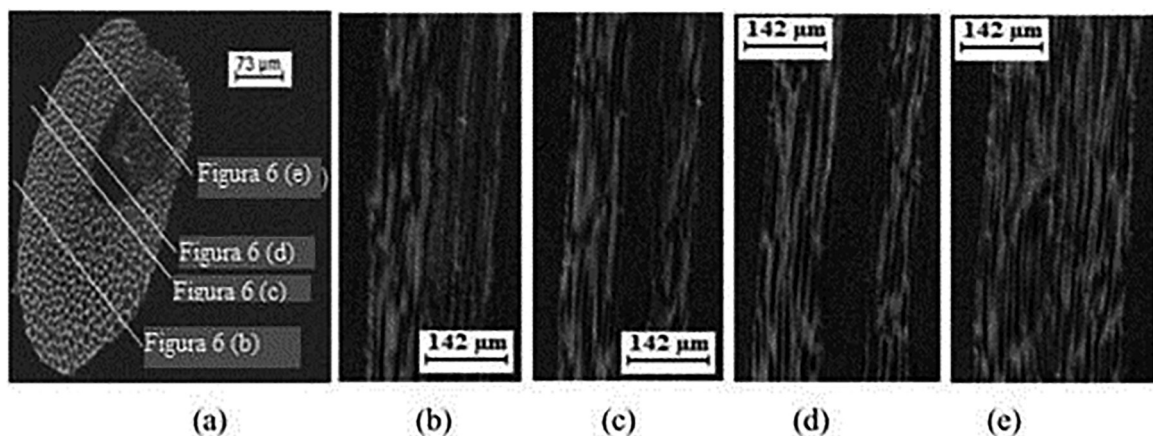


Figura 5: Tomografia de raio X da seção transversal e longitudinal da fibra de coco.

Utilizando o software ImageJ para processamento de imagem e ajustando para reconhecer os pixels como preto ou branco, e marcando o contorno da área em vermelho, foi possível estimar a área efetiva, ou seja, aquela que está ocupada por constituintes da fibra. Os valores encontrados foram entre 39,6% e 43,3%, após cinco medições. A variação se deve a ao contorno da fibra que foi feito manualmente. O software também

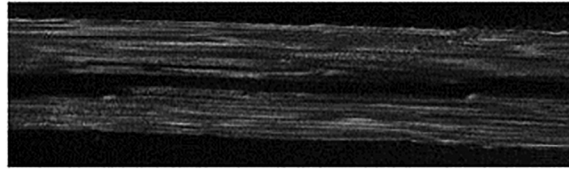


Figura 6: Tomografia de raio X da seção longitudinal da fibra de coco.

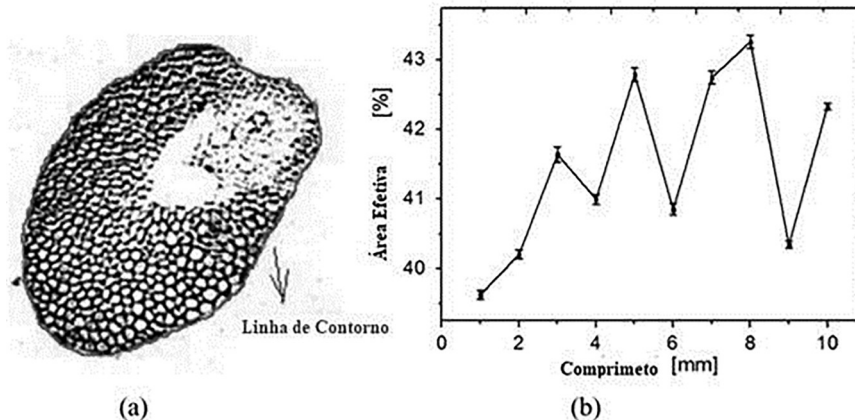


Figura 7: Determinação da área transversal efetiva através do software ImageJ mostrando o contorno aplicado na seção (a) e a variação da área efetiva ao longo do comprimento (b).

obteve uma área total de $0,037 \text{ mm}^2$, logo a fibra possui uma área efetiva entre $0,014$ e $0,016 \text{ mm}^2$. Fidelis, *et al.* (2013) [13] também realizou uma técnica similar e obteve para a fibra de coco uma área de $0,052 \text{ mm}^2$ com desvio padrão de $0,030 \text{ mm}^2$. No mesmo trabalho também foi obtido uma área efetiva de $56,8\%$, um valor maior devido à menor medida do lumen observada neste estudo. Como comparação, outras fibras estudadas neste trabalho como curauá, juta e sisal tiveram áreas efetivas bem maiores que o coco, com 95 , 75 e 75% respectivamente. A Figura 7 mostra o contorno da seção transversal para processamento da imagem e a variação da área efetiva ao longo do comprimento da fibra.

3.2. Análise mecânica

3.2.1. Ensaio de tração

A Figura 8 apresenta quatro diferentes curvas de tensão-deformação para quatro diferentes fibras de coco não tratadas, com variação diametral de 254 a $393 \mu\text{m}$. A Figura 8 (b) mostra o início da curva tensão-deformação e sua tangente em que pontos não lineares estão relacionados à incerteza do equipamento de medição usado no teste e podem estar associados à natureza das ligações químicas das fibras lignocelulósicas, e, portanto, o módulo de elasticidade será chamado de módulo inicial neste estudo. A incerteza nessa região está de acordo com outros estudos de fibras vegetais, e, consequentemente, seu módulo de elasticidade apresenta valores dispersos [10, 17].

Através das curvas de tensão-deformação, foi determinado o módulo de elasticidade inicial a partir da parte inicial das curvas. A resistência à tração foi determinada a partir da tensão máxima atingida pela fibra na ruptura, e a deformação associada foi chamada de deformação na ruptura. De acordo com os aspectos da curva apresentados, os diâmetros das fibras de coco influenciaram o comportamento mecânico, onde esta influência é mais bem demonstrada na Figura 9.

Pela Figura 9, o módulo inicial e a resistência a tração mostraram uma diminuição com o aumento do diâmetro da fibra em todas as quatro condições. Esse comportamento também foi obtido em estudos de Tomczak (2010) [10] e Fernandes *et al.* (2013)[18], além de estudos em fibras de banana [19] e linho [20].

Também é possível observar que para diâmetros maiores que $300 \mu\text{m}$ a resistência à tração converge para 20 a 60 MPa e o módulo de elasticidade para 1 a 3 GPa . No caso da deformação de falha, não foi observada relação com o diâmetro, por outro lado, a influência do diâmetro da fibra na propriedade mecânica ocorre devido à estrutura interna das fibras vegetais. O aumento do diâmetro, há variação no número de células constituintes,

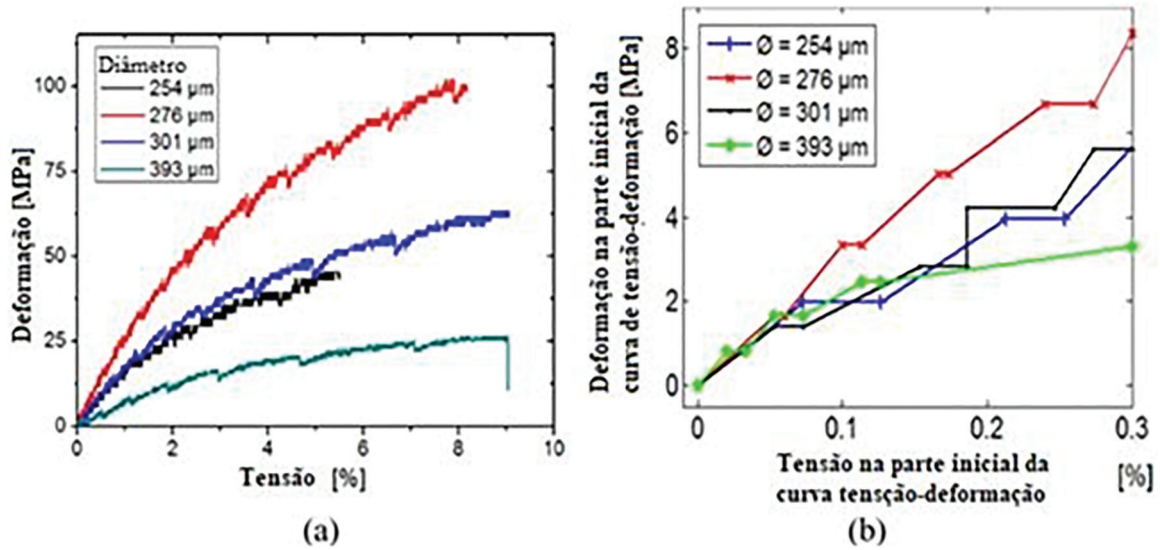


Figura 8: Curva de tensão-deformação para fibra de coco em diferentes diâmetros (a) e em detalhe o início da curva (b).

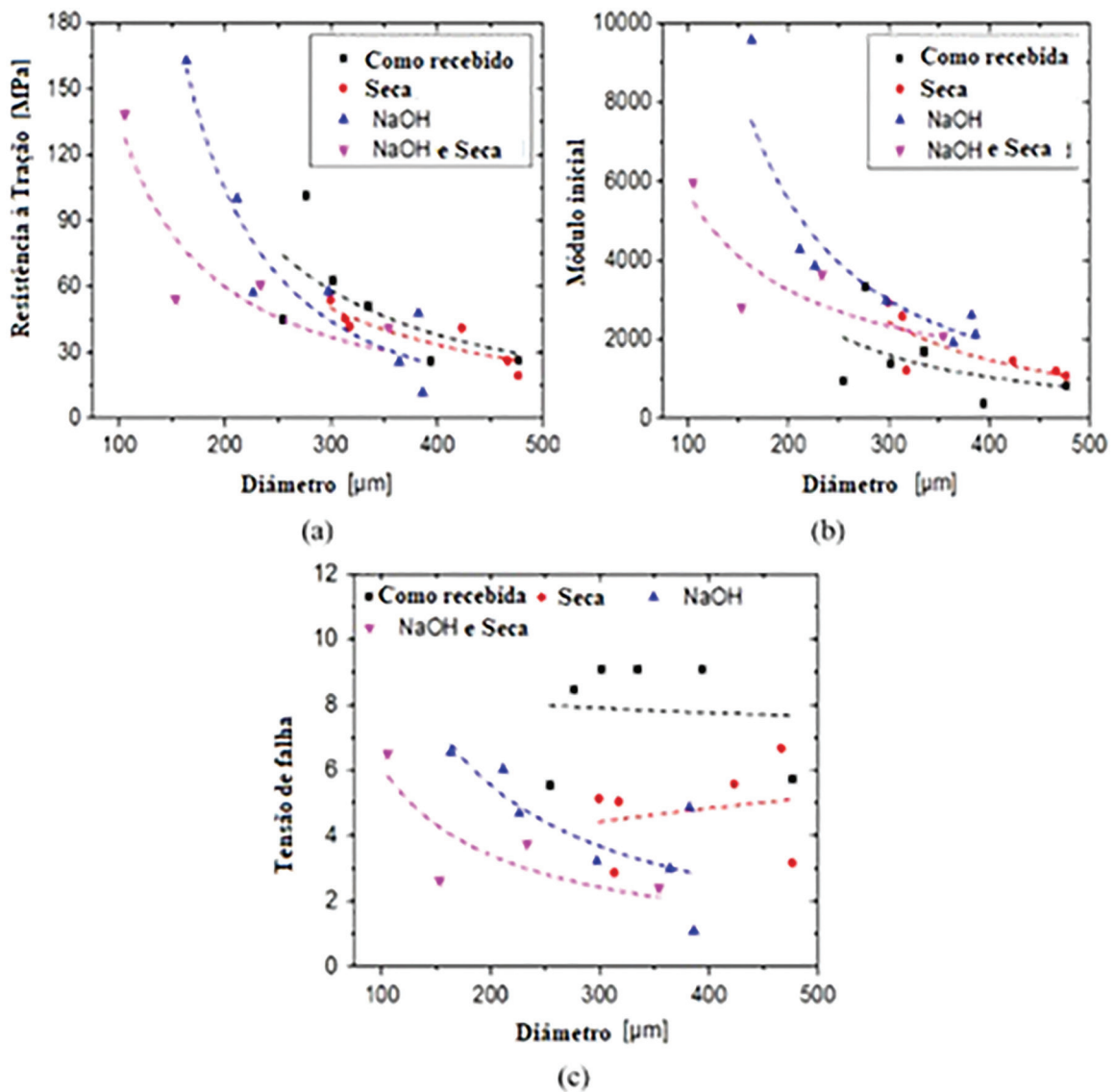


Figura 9: Influência do diâmetro nas propriedades mecânicas da fibra de coco: não tratada (a); não tratada e seca (b); tratada; tratada e seca (c).

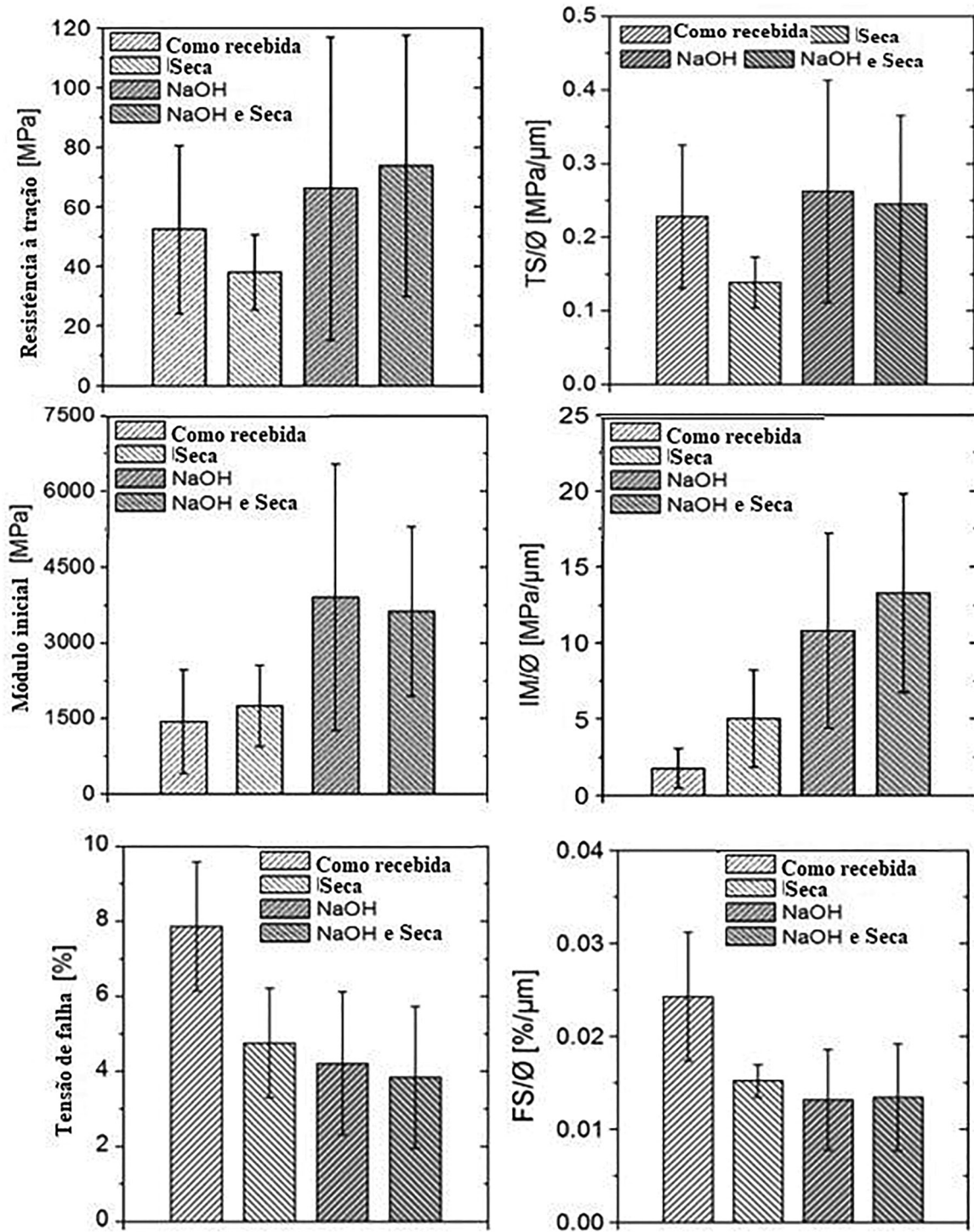


Figura 10: Influência da condição da fibra nas propriedades mecânicas: resistência a tração, módulo inicial, deformação na falha, e sua divisão pelos diâmetros.

alterando parâmetros estruturais, como o ângulo helicoidal, volume e o número de células que constituem defeitos. Todos esses fatores diminuem as propriedades mecânicas das fibras vegetais [10].

A Figura 10 mostra a resistência a tração, o módulo inicial, e a deformação na falha para as quatro condições de fibra, além de apresentar a relação entre cada propriedade e o diâmetro.

De acordo com a Figura 10 o tratamento superficial aumentou os valores médios da resistência à tração e o módulo inicial, embora tenha diminuído os valores médios da deformação na ruptura. Os dois grupos de fibras não tratadas apresentaram propriedades mecânicas semelhantes. O tratamento realizado neste estudo pôde oferecer maior capacidade de absorver forças e enrijecer as fibras de coco, favorecendo no uso em polímeros.

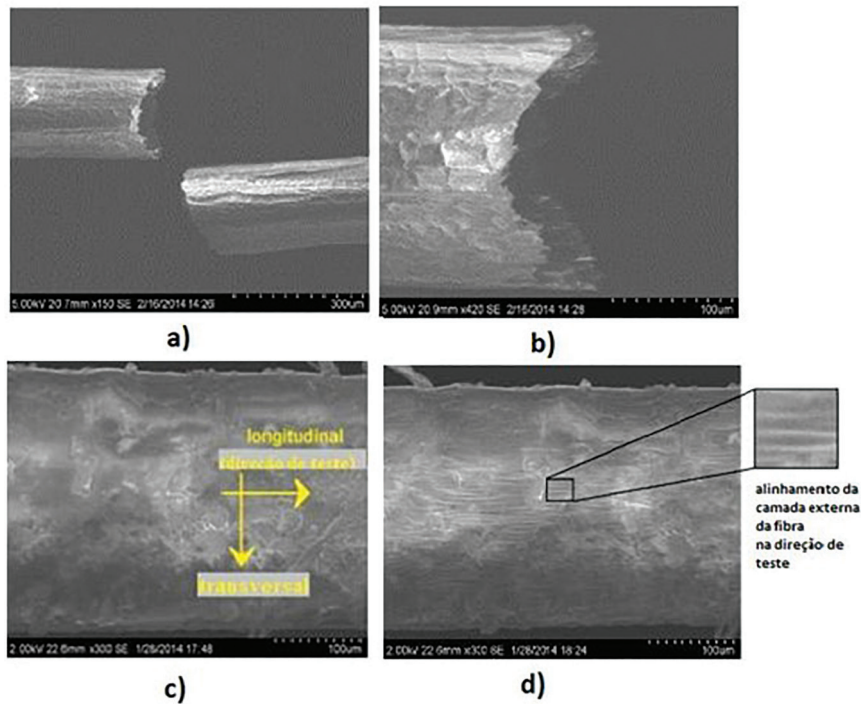


Figura 11: Micrografia de ruptura de fibra de coco: (a) 150x e (b) 420x. Camada externa da fibra de coco: (c) antes do teste e (d) última imagem capturada antes da ruptura.

Uma micrografia de ruptura de fibra de coco na condição como recebida é mostrada na Figura 11 (a-b), cujas regiões de fratura são apresentadas em formas dúcteis com arrancamento de microfibrilas. Esse comportamento é geralmente observado em fibras com deformação de ruptura acima de 4%. De acordo com a fractografia típica de fibra lignocelulósicas encontrada na literatura [12, 21] a região de ruptura ocorreu na direção ortogonal ao ensaio de tração e é formada por inúmeras fibrilas que foram rompidas individualmente até a separação final. A Figura 11 (c) apresenta a camada externa de fibra de coco antes do teste e sem deformações, enquanto que a Figura 11 (d) mostra a última imagem capturada antes da ruptura, na qual são observados vários traços de alinhamento na camada externa na direção de tração. Pela fractografia do MEV utilizada durante o ensaio de tração, o processo de danificação da fibra de coco até a quebra final, ocorria em todas as regiões de interesse e de forma não localizada; além disso, a formação dos traços de alinhamento pode estar associada à baixa resistência em áreas vazias encontradas por observações TXT, ou devido à variação nas ligações lignocelulósicas ou devido à redução da área da seção transversal que efetivamente transmite o carregamento mecânico durante o ensaio de tração.

A Figuras 12 e Tabela 1 mostram os campos de deformação obtidos por meio da técnica de correlação de imagens digitais (CID) em seis instantes: A, B, C, D, E, e F. Essa técnica apresenta os deslocamentos longitudinais (u_l) e transversais (u_t), em pixels, e as deformações (ϵ_l e ϵ_t), em pixel/pixel. Os deslocamentos das malhas também foram apresentados e podem representar a evolução da deformação em ambas as direções. As cores indicam as movimentações dos pixels (deformações) durante o carregamento mecânico, sendo a cor vermelha de maior intensidade. Durante o teste de tração existiram deformações positivas (na direção de ensaio) e negativas (ortogonais ao ensaio).

Através do instante F, pode ser observando que a linha do maior deslocamento de pixel é localizada na direção ortogonal à direção do ensaio de tração, demonstrando conformidade com a ruptura da micrografia anterior. Portanto, a técnica de DIC foi capaz de apresentar os seus mecanismos de ruptura e prever a ruptura final antes do seu início. As deformações longitudinais e transversais foram aleatórias nas imagens capturadas em todas as regiões analisadas.

De acordo com a Figura 13(a), a deformação longitudinal e transversal aumenta com o avanço do teste. A deformação longitudinal é maior em magnitude. A relação entre a deformação transversal e longitudinal na região elástica no mesmo instante de tempo e na mesma região é chamada de coeficiente de Poisson. A Figura 14b mostra os valores dessa relação ao longo do teste de tração na fibra, o que mostrou não ser muito bem

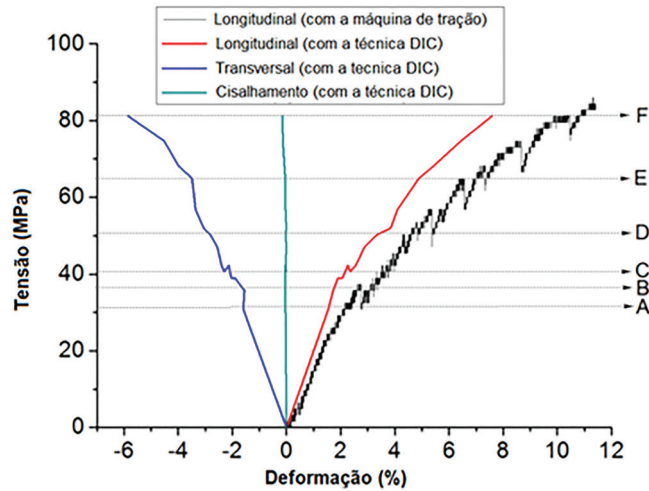


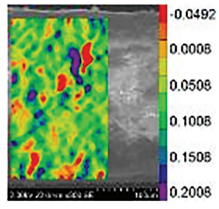
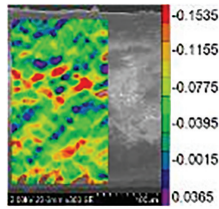
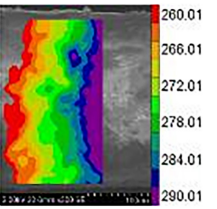
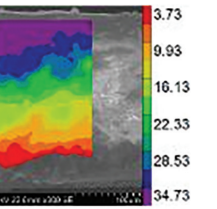
Figura 12: Ensaio de tração na fibra de coco (280 µm em diâmetro) usando a técnica DIC. Instante A (30.86 MPa), instante B (37.35 MPa), instante C (40.60 MPa), instante D (50.34 MPa), instante E (64.96 MPa) e instante F (81.20 MPa).

Tabela 1: Variação de tensão e deformação ao longo da região transversal e longitudinal em diferentes instantes.

INSTANTE	DEFORMAÇÃO [PIXEL/PIXEL]		DESLOCAMENTO [PIXEL]	
	ϵ_t	ϵ_l	u_t	u_l
A				
B				
C				
D				
E				

(continued)

Tabela 1: Continued.

INSTANTE	DEFORMAÇÃO [PIXEL/PIXEL]		DESLOCAMENTO [PIXEL]	
	ϵ_l	ϵ_t	u_l	u_t
F				

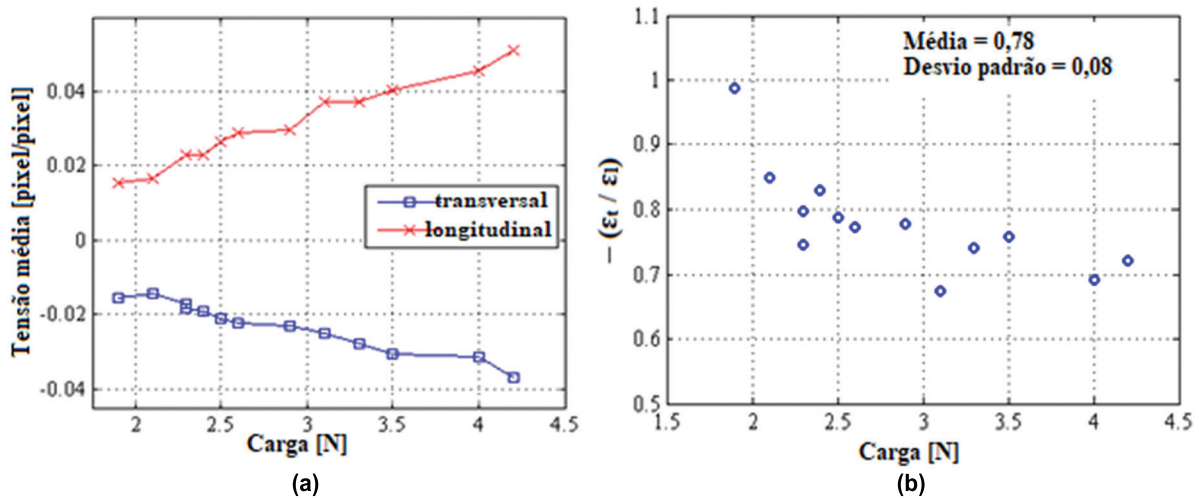


Figura 13: Tensão média na direção longitudinal e transversal durante o ensaio de tração na fibra de coco (a) e razão entre as tensões (b).

definido na região elástica e imprecisa e, portanto, não é confiável afirmar esse coeficiente seja o coeficiente de poisson. A média desse coeficiente foi 0,78 (desvio padrão). Os materiais isotrópicos têm o coeficiente de poisson entre -1 e 0,5 [22]. Porém, como observado na análise morfológica desse estudo, a fibra de coco tem muitos vazios na sua direção longitudinal e o valor dessa propriedade é próximo a outros materiais vegetais, como da madeira Guapuruvu, que tem coeficiente de poisson de 0,62 [23]. Os vazios presentes na fibra de coco fazem com que a sua seção transversal seja pouco rígida, resultando em maior contração nessa região e, conseqüentemente, um maior coeficiente entre essas deformações quando comprado com um material sólido.

4. CONCLUSÃO

As técnicas usadas para avaliar a fibra de coco permitiram compreender o comportamento mecânico e morfológico de modo a facilitar sua utilização como reforço em compósitos poliméricos. Através do MEV, foi observado que o tratamento químico através de NaOH removeu a lignina, hemicelulose e outras substâncias presentes na superfície da fibra, embora também tenha causado algumas microfissuras em uma amostra. O tratamento superficial também aumentou a resistência à tração e módulo inicial da fibra, enquanto diminuiu a deformação na ruptura. Já a secagem da fibra não apresentou influências nas suas propriedades mecânicas. Através da tomografia de raio x aliado ao processamento de imagem foi obtida uma área efetiva para a seção transversal da fibra, valores bem abaixo de outras fibras como sisal, juta e curauá. Os ensaios de tração mostraram que a resistência à tração e módulo inicial tendem a aumentar com o decréscimo do diâmetro das fibras, o que pode ser atribuído ao fato de as fibras menores terem menos vazios no seu interior, conforme apresentado na tomografia de raios X. Também se observou que os tratamentos químicos aumentaram a resistência a tração e o modulo inicial das fibras e diminuiu a deformação na ruptura. Esses fatores contribuem para a aplicação das fibras de coco tratadas quimicamente como reforço em matrizes poliméricas. A técnica de correlação de imagens digital (DIC) permitiu observar que a linha do maior deslocamento de pixel é localizada na direção ortogonal a direção do teste de tensão, resultado que está em consonância com a micrografia da ruptura observada no MEV.

5. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] GEORGE, J., SREEKALA, M.S., THOMAS, S., “A review on interface modification and characterization of natural fiber reinforced plastic composites”, *Polymer Engineering and Science*, v. 41, n. 9, pp. 1471–1485, 2001. <https://doi.org/10.1002/pen.10846>
- [2] SATYANARAYANA, K.G., SUKUMARAN, K., MUKHERJEE, P.S., *et al.*, “Natural fibre-polymer composites”, *Cement and Concrete Composites*, v. 12, n. 2, pp. 117–136, 1990. [https://doi.org/10.1016/0958-9465\(90\)90049-4](https://doi.org/10.1016/0958-9465(90)90049-4)
- [3] ZULKIFLI, N.I., SAMAT, N., ANUAR, H., *et al.*, “Mechanical properties and failure modes of recycled polypropylene/microcrystalline cellulose composites”, *Materials & Design*, v. 69, pp. 114–123, 2015.
- [4] KUMAR, A., SRIVASTAVA, A., “Preparation and Mechanical Properties of Jute Fiber Reinforced Epoxy Composites”, *Industrial Engineering & Management*, v. 6, n. 4, 1000234, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2014.12.053>
- [5] SURESH, R., SAI, B., LOKANADHAM, C.J., *et al.*, “Natural Fiber Reinforced Biodegradable Polymer Composites and Its Properties Testing”, *International Journal of Innovating in Scientific an Engineering Research*, v. 5, n. 8, pp. 78–85, 2018.
- [6] SONAR, T., PATIL, S., DESHMUKH, V., *et al.*, “Natural Fiber Reinforced Polymer Composite Material-A Review”, *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, Innovation in engineering science and technology (NCIEST-2015)*, v. 3, pp. 142–147, 2015. <https://www.iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/NCIEST/Volume%203/19.%20142-147.pdf>
- [7] MUKESH, GODARA, M.S.S., “Effect of chemical modification of fiber surface on natural fiber composites: A review”, *Materials Today: Proceedings*, v. 18, pt. 7, pp. 3428–3434, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.270>
- [8] KRISHNAN, K.A., JOSE, C., ROHITH, K.R., *et al.*, “Sisal nanofibril reinforced polypropylene/polystyrene blends: Morphology, mechanical, dynamic mechanical and water transmission studies”, *Industrial Crops and Products*, v. 71, pp. 173–184, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.03.076>
- [9] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM), *C1557-20: Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus for High-Modulus*, Albany: ASTM, 2020.
- [10] TOMCZAK, F., *Esudos sobre a estrutura e propriedades de fibras de coco e curauá do Brasil*. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.
- [11] CASSALES, A.R., PAULO, J., MORAIS, S., *et al.*, “Caracterização Morfológica por MEV de Fibras de Linter de Algodão”, In: *8º Congresso Brasileiro de Algodão & I Cotton Expo 2011*, pp. 1872–1876, São Paulo, 2011.
- [12] MONTEIRO, S.N., TERRONES, L.A.H., CARVALHO, E.A., *et al.*, “Effect of the fiber/matrix interface on the strength of polymeric composites reinforced with coir fibers”, *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 11, n. 4, pp. 395–402, 2006. <https://doi.org/10.1590/S1517-70762006000400005>
- [13] FIDELIS, M.E.A., PEREIRA, T.V.C., GOMES, O.F.M., *et al.*, “The effect of fiber morphology on the tensile strength of natural fibers”, *Journal of Materials Research and Technology*, v. 2, n. 2, pp. 149–157, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2013.02.003>
- [14] MOTTA, L.A.C., AGOPYAN, V., “Caracterização de Fibras Curtas Empregadas na Construção Civil Leila Aparecida de Castro Motta”, *Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP*. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2007. http://www.pcc.usp.br/files/text/publications/BT_00450.pdf
- [15] SILVA, R.V., AQUINO, E.M.F., “Curaua fiber: A new alternative to polymeric composites”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, v. 27, n. 1, pp. 103–112, 2008. <https://doi.org/10.1177/07316844080270010301>
- [16] PEREIRA, P.H.F., ROSA, M.F., CIOFFI, M.O.H., *et al.*, “Vegetal fibers in polymeric composites: A review”, *Polimeros*, v. 25, n. 1, pp. 9–22, 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/0104-1428.1722>
- [17] 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: Applied Science and Manufacturing*, v. 38, n. 7, pp. 1694–1709, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.02.006>

- [18] FERNANDES, E.M., CORRELO, V.M., MANO, J.F., *et al.*, “Novel cork-polymer composites reinforced with short natural coconut fibres: Effect of fibre loading and coupling agent addition”, *Composites Science and Technology*, v. 78, pp. 56–62, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2013.01.021>
- [19] KULKARNI, A.G., SATYANARAYANA, K.G., ROHATGI, P.K., *et al.*, “Mechanical properties of banana fibres (*Musa sepientum*)”, *Journal of Materials Science*, v. 18, n. 8, pp. 2290–2296, 1983. <https://doi.org/10.1007/BF00541832>
- [20] ANDERSONS, J., SPĀRNIŅŠ, E., JOFFE, R., *et al.*, “Strength distribution of elementary flax fibres”, *Composites Science and Technology*, v. 65, n. 3–4, pp. 693–702, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2004.10.001>
- [21] TOMCZAK, F., SYDENSTRICKER, T.H.D., SATYANARAYANA, K.G., “Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part II: Morphology and properties of Brazilian coconut fibers”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 38, n. 7, pp. 1710–1721, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.02.004>
- [22] FURLANI, J.E., “*Um estudo sobre a variação numérica do coeficiente de poisson na madeira, considerando a anisotropia do material*”, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1995. <https://doi.org/10.47749/T/UNICAMP.1995.88103>
- [23] MASCIA, N.T., NICOLAS, E.A., “Determination of Poisson’s ratios in relation to fiber angle of a tropical wood species”, *Construction and Building Materials*, v. 41, pp. 691–696, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.014>