

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS  
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA  
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**LUIS FELIPE SIQUEIRA FIGUEIREDO**

**APLICAÇÃO DA FIBRA AMAZÔNICA (*CROTON LANJOUWENSIS*) NA  
PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE BIOCMPÓSITOS DE PBAT**

**MANAUS-AM**

**2025**

**LUIS FELIPE SIQUEIRA FIGUEIREDO**

**APLICAÇÃO DA FIBRA AMAZÔNICA (*CROTON LANJOUWENSIS*) NA  
PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE BIOCMPÓSITOS DE PBAT**

Trabalho de Conclusão de Curso,  
apresentado ao Curso de  
bacharelado em Engenharia de  
Materiais, da Escola Superior de  
Tecnologia, da Universidade do  
Estado do Amazonas, como requisito  
parcial à obtenção do Título de  
Bacharel em Engenharia de  
Materiais.

Orientador: Prof. Dr. José Costa de Macêdo Neto

Coorientador: Prof. Dr. Roger Hoel Bello

**MANAUS-AM**

**2025**

## Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).  
**Sistema Integrado de Bibliotecas da Universidade do Estado do Amazonas.**

F475a

Figueiredo, Luis Felipe Siqueira

Aplicação da fibra amazônica (*Croton lanjouwensis*) na produção e caracterização de biocompósitos de PBAT / Luis Felipe Siqueira  
Figueiredo. Manaus : [s.n], 2025.

31 f.: il., color.; 21.0 cm.

TCC - Graduação em Engenharia de Materiais- Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2025.

Inclui Bibliografia.

Orientador: José Costa de Macêdo Neto.

Coorientador: Roger Hoel Bello.

1. PBAT. 2. *Croton lanjouwensis* (pau-caboclo). 3. fibras lignocelulósicas. 4. biocompósitos. I. José Costa de Macêdo Neto (Orient.) II . Roger Hoel Bello (Coorient.) III. Universidade do Estado do Amazonas. IV. Título

CDU(1997)66.03

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS**  
**ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA**  
**BACHARELADO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS**  
**TERMO DE APROVAÇÃO**

**LUIS FELIPE SIQUEIRA FIGUEIREDO**

**APLICAÇÃO DA FIBRA AMAZÔNICA (*CROTON LANJOUWENSIS*) NA  
PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE BIOCMPÓSITOS DE PBAT**

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado como requisito parcial para a  
obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Materiais, Escola Superior  
de Tecnologia, Universidade do Estado do Amazonas, pela seguinte banca  
examinadora.

**BANCA EXAMINADORA**

Documento assinado digitalmente



**JOSE COSTA DE MACEDO NETO**

Data: 09/12/2025 20:24:34-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. José Costa de Macedo Neto - Orientador

Documento assinado digitalmente



**ROGER HOEL BELLO**

Data: 09/12/2025 13:12:20-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Roger Hoel Bello - Coorientador

Documento assinado digitalmente



**JUCIKLECIA DA SILVA REINALDO**

Data: 09/12/2025 21:38:15-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

\_\_\_\_\_  
Prof.<sup>a</sup> Dra. Juciklécia da Silva Reinaldo - Membro da banca

Documento assinado digitalmente



**ANTONIO DE LIMA MESQUITA**

Data: 09/12/2025 12:50:54-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Antônio de Lima Mesquita - Membro da banca

Manaus, 24 de Novembro de 2025

## Resumo

Biocompósitos poliméricos reforçados com fibras lignocelulósicas têm recebido atenção crescente devido ao seu potencial como materiais sustentáveis. Entre esses reforços, as fibras amazônicas se destacam por sua ampla disponibilidade e pelas propriedades estruturais competitivas. Este estudo investigou o desempenho de biocompósitos de poli(butileno adipato-co-tereftalato) (PBAT) reforçados com fibras de pau-caboclo (*Croton lanjouwensis*), buscando relacionar as características da fibra às propriedades estruturais e mecânicas do material final. Os compósitos contendo 5, 10, 15 e 20% em massa foram processados por extrusão e moldagem por injeção e caracterizados por FTIR, DRX, MEV e ensaios mecânicos. A fibra apresentou estrutura semicristalina ( $l_c = 57,5\%$ ), diâmetro médio de 40,5  $\mu\text{m}$  e morfologia rugosa, favorecendo ancoragem mecânica, embora com adesão interfacial parcial. No teor de 20% de fibras, observou-se aumento de 105% no módulo elástico e de 12,3% na dureza Shore D, refletindo maior rigidez. A tensão à tração apresentou redução discreta de 5,5%, enquanto o alongamento na ruptura diminuiu substancialmente (82,3%). Os resultados demonstram que a incorporação de *Croton lanjouwensis* produz biocompósitos mais rígidos sem comprometer significativamente a resistência mecânica. Assim, o estudo confirma o potencial da espécie como reforço natural e contribui para o desenvolvimento de materiais biodegradáveis alinhados à bioeconomia amazônica.

**Palavras-chave:** PBAT; *Croton lanjouwensis* (pau-caboclo); fibras lignocelulósicas; biocompósitos.

## Abstract

Lignocellulosic fiber-reinforced polymer biocomposites have received increasing attention due to their potential as sustainable materials. Among these reinforcements, Amazonian fibers stand out for their broad availability and competitive structural properties. This study investigated the performance of poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) biocomposites reinforced with pau-caboclo (*Croton lanjouwensis*) fibers, aiming to relate the characteristics of the fiber to the structural and mechanical properties of the final material. Composites containing 5, 10, 15 and 20 wt% fiber were processed by extrusion and injection molding and characterized by FTIR, XRD, SEM and mechanical testing. The fiber exhibited a semicrystalline structure ( $l_c = 57.5\%$ ), an average diameter of 40.5  $\mu\text{m}$  and a rough morphology that favored mechanical anchoring, although interfacial adhesion remained partial. At the 20% fiber content, a 105% increase in elastic modulus and a 12.3% increase in Shore D hardness were observed, indicating higher stiffness. Tensile strength showed only a slight reduction of 5.5%, whereas elongation at break decreased substantially (82.3%). The results demonstrate that incorporating *Croton lanjouwensis* produces stiffer biocomposites without significantly compromising mechanical strength. Thus, the study confirms the potential of the species as a natural reinforcement and contributes to the development of biodegradable materials aligned with the Amazonian bioeconomy.

**Keywords:** PBAT; *Croton lanjouwensis* (pau-caboclo fiber); lignocellulosic fibers; biocomposites.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, cuja presença se manifesta em todas as etapas da minha vida, pela sabedoria, força e discernimento concedidos ao longo de toda a trajetória acadêmica.

Aos meus pais, Daniel Figueiredo e Maria do Socorro Siqueira, registro minha profunda gratidão pelo amor, apoio incondicional e incentivo que sempre me fortaleceram. Vocês são minha base e meu orgulho. Ao meu sobrinho Luís Takashi, por ser minha luz e alegria, o “titi” ama você. A toda a minha família, que me acolheu e deu suporte, em especial minha avó Antonina; minhas tias Cristiane e Luzia; meus tios Raimundo, Carlos e Antônio; e minhas primas Rayane e Adriana Siqueira.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Costa, e ao coorientador, Prof. Dr. Roger Hoel, agradeço o acompanhamento acadêmico, as orientações precisas e as oportunidades de aprendizado. À Prof.<sup>a</sup> Dra. Juciklécia Reinaldo, pelo conhecimento transmitido e pela liderança em projetos de extensão em prol do desenvolvimento do curso. Ao Prof. Dr. Antônio Mesquita, pela supervisão ao longo do trabalho de conclusão de curso.

Agradeço igualmente ao Departamento de Engenharia de Materiais e aos docentes do curso, que contribuíram decisivamente para minha formação. Aos meus amigos Gabriel Pádua, Gabriela Rocha e Nalanda Said. E aos colegas e grupos de pesquisa que compartilharam os desafios desta etapa.

Por fim, manifesto reconhecimento à Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas, em especial aos Laboratórios de Materiais (LABMAT) e de Pesquisa e Desenvolvimento (LABP&D), onde tive a oportunidade de desenvolver atividades científicas e consolidar minha formação em Engenharia de Materiais.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>8</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>11</b>
2.1 Objetivo geral.....	11
2.2 Objetivos específicos .....	11
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>12</b>
3.1 Poli(butileno adipato-co-tereftalato) (PBAT).....	12
3.2 Fibra <i>Croton lanjouwensis</i> .....	12
3.3 Preparação dos biocompósitos .....	12
3.3.1 Extrusão .....	12
3.3.2 Moldagem por injeção.....	13
3.4 Caracterizações .....	13
3.4.1 Caracterização química .....	13
3.4.2 Caracterização física .....	13
3.4.3 Caracterização morfológica .....	14
3.4.4 Caracterizações mecânicas .....	14
3.4.4.1 Ensaio de Tração.....	14
3.4.4.2 Dureza Shore D.....	14
3.4.4.3 Análise estatística .....	15
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>16</b>
4.1 Caracterização química .....	16
4.2 Caracterização física .....	18
4.3 Caracterização morfológica .....	19
4.4 Caracterizações mecânicas .....	22
4.4.1 Tração .....	22
4.4.2 Dureza Shore D .....	25
<b>5. CONCLUSÃO</b> .....	<b>27</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>28</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Mapa de distribuição geográfica de <i>Croton lanjouwensis</i> no Amazonas.....	10
<b>Figura 2.</b> Espectros de FTIR: a) PBAT puro e fibra <i>Croton lanjouwensis</i> ; b) biocompósitos de PBAT com diferentes teores de fibra (5 %, 10 %, 15 % e 20 %).....	17
<b>Figura 3.</b> Difração de raios-X da fibra <i>Croton lanjouwensis</i> com identificação dos planos cristalinos.....	19
<b>Figura 4.</b> Micrografias de MEV da morfologia de fratura do (a) PBAT e (b) fibra <i>Croton lanjouwensis</i> .....	20
<b>Figura 5.</b> Micrografias de MEV da morfologia de fratura dos biocompósitos PBAT/ <i>C. lanjouwensis</i> com diferentes teores de fibra: (a) 5 %, (b) 10 %, (c) 15 % e (d) 20 %.....	21
<b>Figura 6.</b> Propriedades mecânicas do PBAT e dos biocompósitos reforçados com fibra de <i>Croton lanjouwensis</i> : (a) curvas tensão–deformação; (b) módulo elástico e alongamento na ruptura; (c) diâmetro médio das fibras.....	24
<b>Figura 7.</b> Variação da dureza Shore D em função do teor de fibra de <i>Croton lanjouwensis</i> nos biocompósitos de PBAT.....	25

## 1. INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com os impactos ambientais associados ao uso de plásticos sintéticos convencionais tem impulsionado a busca por alternativas sustentáveis. Do ponto de vista ambiental, o material ideal deve ser totalmente reciclável ou biodegradável (CALLISTER; RETHWISCH, 2021). Nesse contexto, os biocompósitos lignocelulósicos despontam como alternativa promissora, por aliarem ampla disponibilidade de matérias-primas, baixo impacto ambiental e capacidade de degradação natural (ASYRAF *et al.*, 2022). A região Amazônica, em razão de seu clima úmido e posição geográfica favorável, abriga diversas fibras vegetais, como o açaí (*Euterpe oleracea*), o curauá (*Ananas erectifolius*), o guaruman (*Ischnosiphon arouma*) e a piaçava (*Leopoldinia piassaba*). Essas fibras apresentam elevado potencial para uso em materiais compósitos aplicados nos setores da construção civil, automotivo e de blindagem (LIMA *et al.*, 2022). Esses materiais fortalecem a bioeconomia e valorizam recursos regionais.

Entre os polímeros biodegradáveis de maior relevância industrial, como Polibutileno Succinado (PBS), Álcool Polivinílico (PVA), Policaprolactona (PCL) e Ácido Polilático (PLA) (ROSENBOOM; LANGER; TRAVERSO, 2022), o poli(butileno adipato-co-tereftalato) (PBAT) se destaca pela flexibilidade e boa processabilidade. Contudo, sua baixa resistência mecânica e estabilidade térmica limitam aplicações avançadas, motivando o desenvolvimento de blendas e biocompósitos (ITABANA *et al.*, 2024). Nesse contexto, Liu *et al.* (2024) verificaram que a incorporação de 5% de lignina fracionada elevou a resistência à tração das blendas PBAT/PLA para 38,79 MPa, representando um aumento de 35,39% em relação ao material puro. O limite de escoamento e o módulo de Young também cresceram 37,69% e 15,41%, respectivamente, confirmando o efeito reforçador da lignina na matriz polimérica. Lamsaf *et al.* (2023) observaram que a adição de 2% de fibras lignocelulósicas provenientes dos talos de cânhamo (*Cannabis sativa*), sem modificação química, aumentou a permeabilidade ao vapor d'água em 22% e duplicou a taxa de compostabilidade em relação ao PBAT puro. De modo semelhante, Wang *et al.* (2024) desenvolveram compósitos de PBAT com celulose silanizada, alcançando

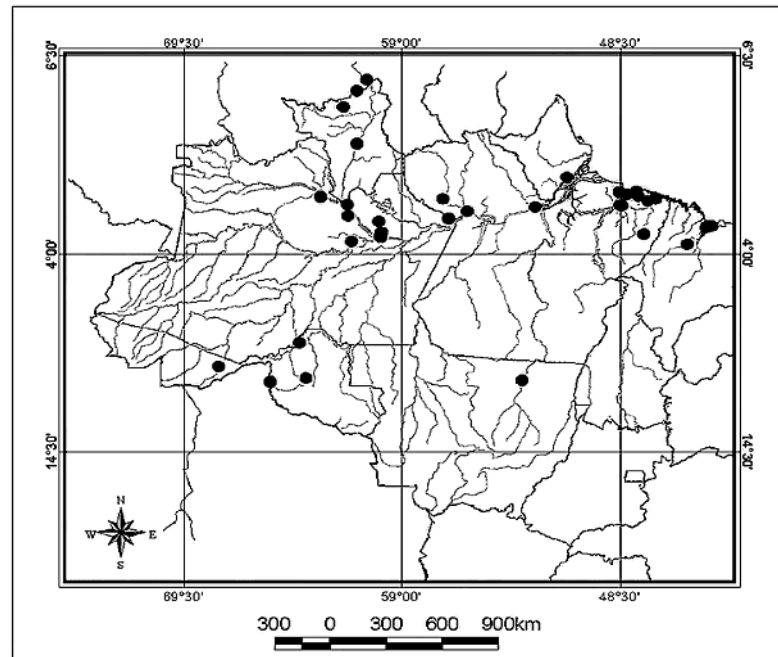
resistência à tração de 22 MPa na proporção 85/15, aproximadamente 30% superior à do PBAT puro, mantendo boa estabilidade térmica.

O conceito de bioeconomia, fundamentado na utilização de recursos biológicos renováveis, promove a integração entre inovação tecnológica, geração de valor e sustentabilidade. Associado à economia circular, reforça a importância do uso de fibras naturais na transição para uma economia de baixo carbono (ROSENBOOM; LANGER; TRAVERSO, 2022; BARBOSA *et al.*, 2025). Na floresta amazônica, há cerca de 16 mil espécies arbóreas distribuídas em seis milhões de quilômetros quadrados (STEEGE *et al.*, 2013), o que evidencia sua relevância como fonte de matérias-primas renováveis. Fibras amazônicas apresentam elevadas propriedades mecânicas. Silva *et al.* (2024) relataram resistências à tração de 515 MPa para o curauá, 213 MPa para o tururi, 74,4 MPa para a jacitara e 124 MPa para o tucumã, com módulos de elasticidade de 22,1; 10,5; 18,7 e 8,3 GPa, respectivamente. De forma complementar, estudos indicam que reforços lignocelulósicos regionais melhoram as propriedades do PBAT puro. Pinheiro, Morales e Mei (2014) produziram compósitos com fibra de munguba (*Pseudobombax munguba*), elevando o módulo elástico de 51,0 para 87,0 MPa com 10% de fibra e para 93,0 MPa com 20%, correspondendo a incrementos de 70,6% e 82,4%, respectivamente. Freitas (2024) verificou que resíduos do ouriço da castanha-do-Brasil, quando incorporados em 20% à matriz de PBAT, promoveram incremento de aproximadamente 141% no módulo elástico e 30% na dureza superficial. Além disso, Leite-Barbosa *et al.* (2025) avaliaram o reforço do PBAT com resíduos de sementes de açaí (RSA), registrando aumento de 20,1% no módulo de elasticidade, 39% na resistência à flexão, e 62% no módulo de flexão.

Entre as espécies amazônicas, o pau-caboclo (*Croton lanjouwensis*) destaca-se por sua ampla distribuição na região, com ocorrência registrada em todo o estado (Figura 1). A espécie apresenta tronco lenhoso, casca fibrosa e densidade básica entre 0,5 e 0,72 g/cm<sup>3</sup>, características que demonstram sua viabilidade como fonte de biomassa renovável (ROCA *et al.*, 2022). Embora suas propriedades fitoquímicas e farmacológicas já tenham sido descritas (MEDEIROS, 2022), seu uso em compósitos poliméricos ainda é limitado. Ferreira *et al.* (2019) relataram pela primeira vez a incorporação de fibras de

*Croton lanjouwensis* em PBAT, observando incremento de 48% no módulo de elasticidade em relação ao polímero puro. Esses resultados iniciais indicam a necessidade de novos estudos para ampliar o uso da espécie em biocompósitos.

**Figura 1.** Mapa de distribuição geográfica de *Croton lanjouwensis* no Amazonas.



**Fonte:** Guimarães (2006).

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Produzir e caracterizar biocompósitos à base de poli(butileno adipato-co-tereftalato) (PBAT) reforçados com fibras amazônicas de pau-caboclo (*Croton lanjouensis*), visando caracterizar seu desempenho como carga lignocelulósica em matriz polimérica.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Realizar a preparação das fibras de pau-caboclo (*Croton lanjouensis*).
- Desenvolver formulações de compósitos PBAT/fibra em diferentes proporções (5%, 10%, 15% e 20%), aplicando as técnicas de processamento de extrusão e moldagem por injeção.
- Obter a composição química dos biocompósitos e o índice de cristalinidade da fibra por meio de espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FT-IR) e difração de raios-X (DRX).
- Avaliar a morfologia da fibra, do PBAT e dos biocompósitos por microscopia eletrônica de varredura (MEV).
- Investigar o desempenho mecânico dos biocompósitos por meio de ensaios de tração (ASTM D638) e dureza Shore D (ASTM D2240).
- Analisar estatisticamente os resultados obtidos e comparar com os dados da literatura.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1 Poli(butileno adipato-co-tereftalato) (PBAT)**

A matriz utilizada foi o PBAT (formulação PU-968), um copoliéster alifático fornecido pela Ecobiopolímeros. Trata-se de material compostável no solo, de baixa fluidez, indicado para processamento por extrusão tubular. Os pellets foram secos em estufa a 80 °C por 6 h antes da extrusão.

#### **3.2 Fibra *Croton lanjouwensis***

A fibra utilizada foi obtida do caule da espécie *Croton lanjouwensis* (codificada nesse estudo como Fibra CL), conhecida popularmente como paucaboco. A coleta manual ocorreu na região do Rio Uaicurapá, município de Parintins (AM), em área de terra firme próxima à Comunidade de Santo Antônio (02°46'75" S, 56°43'32" W). O material foi identificado e registrado no herbário do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA nº 268731).

As fibras foram limpas por escovação e jato de ar, secas em estufa a 80 °C por 12 h e cominuídas em frações de aproximadamente 2 cm. Em seguida, foram moídas em moinho de facas (Wiley TE-680, Tecnal, Brasil) utilizando malha de 30 mesh, obtendo-se pó fibroso cuja granulometria foi posteriormente controlada por peneiramento em malha de 100 mesh. O diâmetro médio das fibras foi determinado em microscópio óptico (DSX1000, Olympus, EUA), com auxílio do software PreciV DSX, sendo medidas cinco fibras selecionadas aleatoriamente para o cálculo da média. Antes do processamento, as fibras foram novamente secas a 80 °C por 6 h para minimizar o teor de umidade.

#### **3.3 Preparação dos biocompósitos**

O processamento baseou-se em Itabana et al. (2024), cuja metodologia de extrusão a quente e moldagem por injeção favorece a dispersão homogênea das fibras na matriz polimérica.

##### **3.3.1 Extrusão**

As fibras de *Croton lanjouwensis* foram incorporadas ao PBAT em proporções de 5, 10, 15 e 20% em massa. O processamento foi realizado em uma extrusora monorosca (AX1626, AX Plásticos, Brasil), operando com perfil de temperatura de 120/125/130 °C nas zonas do canhão. O torque médio

aplicado foi de 30 N·m, com velocidade de rotação de 45 rpm e alimentação manual contínua. Os filamentos extrudados foram resfriados ao ar e posteriormente peletizados em um granulador (AX Plásticos, Brasil).

### 3.3.2 Moldagem por injeção

Os pellets obtidos foram secos a 80 °C por 6 h e posteriormente moldados em dispositivo de injeção (D.Inject.AX, AX-Plásticos, Brasil) para a confecção de corpos de prova. Foram produzidas 5 amostras por composição, no formato tipo IV, conforme norma ASTM D638. A injeção foi realizada com temperatura do canhão de 150 °C, pressão de injeção de 0,8 MPa e tempo de resfriamento de 20 s. Os corpos de prova foram condicionados por 48 h antes do ensaio de tração.

## 3.4 Caracterizações

O desempenho dos biocompósitos foi avaliado por meio de ensaios químicos, físicos, morfológicos e mecânicos.

### 3.4.1 Caracterização química

A espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FT-IR) foi realizada em um espectrômetro IRAffinity-1S (Shimadzu Corporation, Kyoto, Japão), operando no modo de transmissão. As amostras em pó de PBAT, fibra de *Croton lanjouwensis* e biocompósitos foram preparadas na forma de pastilhas de KBr. A análise espectral foi realizada com resolução de 4 cm<sup>-1</sup>, totalizando 32 varreduras na faixa de 4000 a 500 cm<sup>-1</sup>.

### 3.4.2 Caracterização física

Um estudo de difração de raios-X (DRX) foi realizado na fibra de *Croton lanjouwensis* utilizando um difratômetro de raios-X (X'Pert, Philips Analytical, Países Baixos). A análise foi conduzida com radiação Cu-K $\alpha$  ( $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$ ), operando a 40 kV de tensão e 40 mA de corrente. Os espectros de difração foram registrados em uma faixa de ângulos  $2\theta$  de 5° a 40°, com velocidade de varredura de 2° min<sup>-1</sup>. O índice de cristalinidade ( $I_c$ ) foi determinado conforme a metodologia proposta por Segal et al. (1959), conforme apresentado na Eq. 1.

$$I_c(\%) = \frac{I_{200} - I_{am}}{I_{200}} \times 100 \quad (1)$$

onde  $I_{200}$  é a intensidade relacionada ao pico cristalino e  $I_{am}$  é a intensidade da parte amorfa.

### **3.4.3 Caracterização morfológica**

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada utilizando um microscópio (modelo S5123, TESCAN VEGA4, República Tcheca) para obter imagens das superfícies fraturadas do PBAT, da fibra de *Croton lanjouwensis* e dos biocompósitos. As amostras foram fixadas em suportes metálicos com adesivo de carbono condutor de dupla face e revestidas com uma fina camada de ouro para garantir a condutividade elétrica. As observações foram realizadas sob tensão de aceleração de 5 kV, utilizando o software TESCAN Essence (versão 1.3.5.1, build 8450).

### **3.4.4 Caracterizações mecânicas**

#### **3.4.4.1 Ensaio de Tração**

Os ensaios de tração foram realizados de acordo com a ASTM D638, em corpos de prova Tipo IV, com seção útil de 6,0 mm × 3,2 mm × 33 mm (largura × espessura × comprimento). Os testes foram conduzidos em máquina universal de ensaios (modelo 5984, Instron, EUA), equipada com célula de carga de 150 kN. A velocidade de ensaio foi de 5 mm/min, condição prescrita pela norma para este tipo de corpo de prova, garantindo que a ruptura ocorresse dentro do intervalo de 0,5 a 5 min e possibilitando a determinação adequada do módulo de elasticidade.

#### **3.4.4.2 Dureza Shore D**

A resistência à penetração foi determinada conforme a norma ASTM D2240, utilizando durômetro digital Shore D (modelo DP-400, Instrutherm, Brasil), previamente calibrado. Foram realizadas dez indentações com tempo de aplicação de 5 s nos corpos de prova de PBAT e biocompósitos, sob temperatura controlada de  $23 \pm 2$  °C. Os valores de dureza foram expressos pela média aritmética das leituras obtidas.

#### **3.4.4.3 Análise estatística**

A significância dos efeitos da adição de fibras de *Croton lanjouensis* nas propriedades mecânicas do PBAT foi avaliada por meio de uma análise de variância (ANOVA), adotando-se um nível de significância de 5%. As médias e os desvios-padrão das amostras foram calculados previamente, e o procedimento estatístico foi realizado no Microsoft Excel para a obtenção do valor-p.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Caracterização química

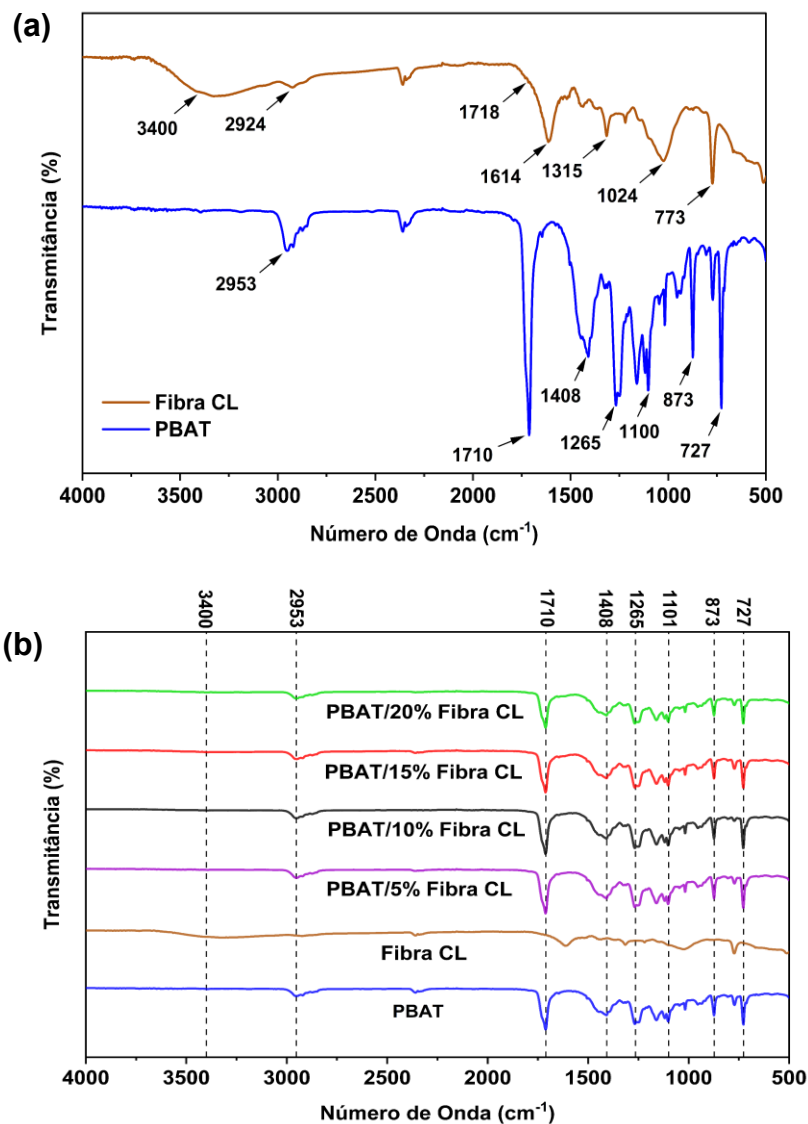
O FTIR identificou os grupos funcionais do PBAT, da fibra *Croton lanjouwensis* e dos biocompósitos com diferentes teores de carga (5 %, 10 %, 15 % e 20 %). Conforme apresentado na Figura 2 (a), o espectro do PBAT revelou picos característicos em 2953  $\text{cm}^{-1}$ , 1710  $\text{cm}^{-1}$ , 1408  $\text{cm}^{-1}$ , 1265–1101  $\text{cm}^{-1}$ , 873  $\text{cm}^{-1}$  e 727  $\text{cm}^{-1}$ . A banda em 2953  $\text{cm}^{-1}$  corresponde ao estiramento de  $-\text{CH}_2$ , enquanto o pico em 1710  $\text{cm}^{-1}$  está associado ao alongamento do grupo carbonila (C=O). As bandas em 1408  $\text{cm}^{-1}$  e 1265–1101  $\text{cm}^{-1}$  são atribuídas às vibrações de flexão de  $-\text{CH}_2$  e ao estiramento C–O–C do anel de glicose do polímero. Já os sinais em 873  $\text{cm}^{-1}$  e 727  $\text{cm}^{-1}$  indicam flexões fora do plano de C–H no anel benzênico, confirmando a estrutura aromática do PBAT. Esses resultados estão de acordo com Tsou et al. (2022), Zhou et al. (2023) e Nomadolo et al. (2024), que observaram bandas semelhantes, evidenciando a estabilidade química do polímero após o processamento.

O espectro da fibra *Croton lanjouwensis*, também apresentado na Figura 2 (a), exibiu picos em 3400  $\text{cm}^{-1}$ , 2924  $\text{cm}^{-1}$ , 1718  $\text{cm}^{-1}$ , 1614  $\text{cm}^{-1}$ , 1315  $\text{cm}^{-1}$ , 1024  $\text{cm}^{-1}$  e 773  $\text{cm}^{-1}$ . O pico largo em 3400  $\text{cm}^{-1}$  está relacionado ao estiramento O–H de grupos hidroxila, enquanto a banda em 2924  $\text{cm}^{-1}$  corresponde ao estiramento C–H de grupos metil e metileno. O sinal em 1718  $\text{cm}^{-1}$  foi atribuído ao estiramento C=O de grupos ésteres da hemicelulose, e as bandas em 1614  $\text{cm}^{-1}$  e 773  $\text{cm}^{-1}$  estão associadas, respectivamente, ao estiramento C=C e à flexão fora do plano C–H de anéis aromáticos da lignina. Já as absorções em 1315  $\text{cm}^{-1}$  e 1024  $\text{cm}^{-1}$  correspondem às vibrações C–O e C–O–C da celulose e hemicelulose. Kostryukov et al. (2023), Assanvo et al. (2024) e Logesh et al. (2025) relataram perfis espectrais semelhantes em resíduos madeireiros e agrícolas, fibras de *Lonchocarpus cyanescens* e de *Croton bonplandianus*, respectivamente. Assim, confirma-se que a fibra *Croton lanjouwensis* possui composição típica de materiais lignocelulósicos, com grupos hidroxila e carbonila.

A Figura 2 (b) apresenta os espectros dos biocompósitos PBAT/*Croton lanjouwensis* contendo diferentes teores de fibra. As bandas do PBAT foram

mantidas, mas as intensidades nas regiões de  $3400\text{ cm}^{-1}$  e  $1710\text{ cm}^{-1}$  aumentaram com o teor de reforço. Tendência semelhante foi relatada por Yu et al. (2025) e Zhou et al. (2023) em compósitos de PBAT reforçados com farinha de madeira e celulose nanofibrilada, associando esse aumento à presença de grupos hidroxila da fibra e à formação de ligações de hidrogênio entre as fases. Dessa forma, conclui-se que a incorporação da fibra *Croton lanjouwensis* não alterou a estrutura química do PBAT, mas elevou a densidade de grupos polares na interface, favorecendo interações físicas como pontes de hidrogênio e forças de van der Waals, o que explica as variações sutis nas intensidades das bandas.

**Figura 2.** Espectros de FTIR: a) PBAT puro e fibra *Croton lanjouwensis*; b) biocompósitos de PBAT com diferentes teores de fibra (5 %, 10 %, 15 % e 20 %).



Fonte: Autor.

## 4.2 Caracterização física

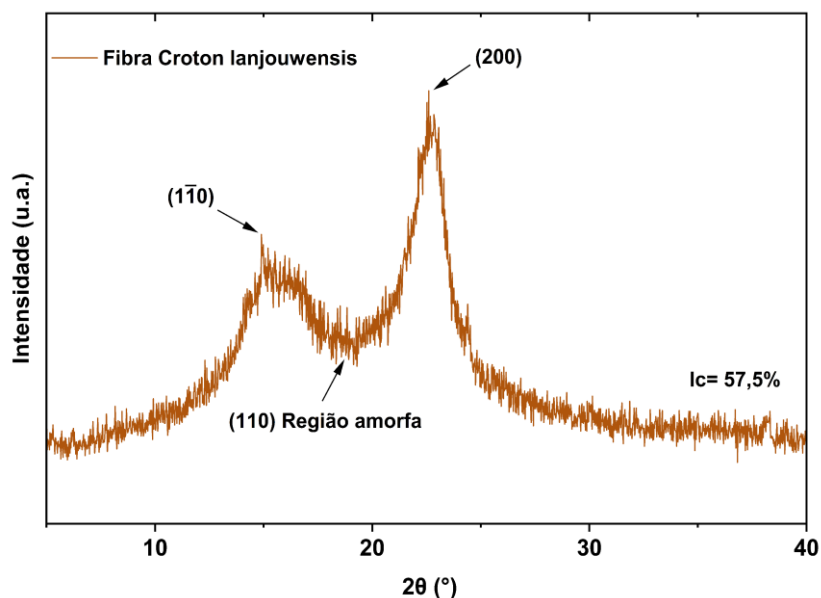
O perfil de difração de raios-X (DRX) da fibra *Croton lanjouwensis* é apresentado na Figura 3. O difratograma revela picos em  $2\theta$  próximos de  $14,9^\circ$ ,  $18,8^\circ$  (região amorfa) e  $22,6^\circ$ , correspondentes aos planos cristalinos (110), (110) e (200) da celulose I $\beta$ , respectivamente. Resultados semelhantes foram relatados por Assanvo et al. (2024) em fibras de *Lonchocarpus cyanescens* com estrutura monoclinica predominante. Souza et al. (2025) destacaram que a celulose I $\beta$  apresenta cadeias paralelas e elevada estabilidade, com regiões amorfas dispersas. Mamudu et al. (2025) complementaram que a celulose possui domínios cristalinos e amorfos, enquanto a hemicelulose e a lignina são essencialmente amorfas. Bhunia et al. (2023) associaram o pico de menor ângulo ( $\sim 16^\circ$ ) à presença de componentes amorfos, e o de maior intensidade ( $\sim 22^\circ$ ) à fração cristalina. Assim, o vale entre ambos ( $\sim 18^\circ$ ) foi considerado a região amorfa usada no cálculo do índice de cristalinidade.

O índice de cristalinidade (Ic) da fibra *C. lanjouwensis*, determinado pelo método de Segal et al. (1959), foi de 57,5 %, indicando estrutura semicristalina. Esse valor reflete a alta proporção de hemicelulose, lignina e celulose amorfa (ASSANVO *et al.*, 2024). Em comparação, fibras como algodão (65 %), cânhamo (88 %) e juta/sisal (71 %) apresentam maior cristalinidade, enquanto bambu (48 %), fibra de coco (37,3 %) e palmeira-datileira (38,5 %) exibem valores inferiores (ELEUTÉRIO *et al.*, 2025).

O índice de cristalinidade quantifica a fração de celulose cristalina nas fibras lignocelulósicas e está diretamente relacionado ao aumento do módulo elástico e da resistência à tração, tanto das fibras quanto dos compósitos. Eleutério et al. (2025) reportaram que fibras de linho com Ic entre 70-80% apresentam resistência à tração de 343–2000 MPa e módulo de 18,4-103 GPa. Em comparação, fibras de kenaf com Ic de 60% exibem resistência de 223–1191 MPa e módulo de 14,5-53 GPa. De forma conclusiva, Patsiaoura et al. (2024) verificaram que compósitos de PEAD contendo 20% de linho alcançam 27,8 MPa em tensão à tração e 1266 MPa em módulo de Young. Para PEAD/20% kenaf, os valores foram de 19,9 MPa e 789 MPa, respectivamente. Esses resultados foram atribuídos ao menor Ic do kenaf (63%) frente ao linho (77%), refletindo desempenho mecânico inferior.

Dessa forma, o valor de índice de cristalinidade obtido confirma o caráter lignocelulósico e não tratado da fibra *Croton lanjouwensis*. Segundo T et al. (2025), tratamentos químicos removem fases amorfas e alinham as cadeias, elevando o  $I_c$ . Por conseguinte, o resultado encontrado está de acordo com a estrutura natural da fibra amazônica (FERREIRA et al., 2019).

**Figura 3.** Difração de raios-X da fibra *Croton lanjouwensis* com identificação dos planos cristalinos.



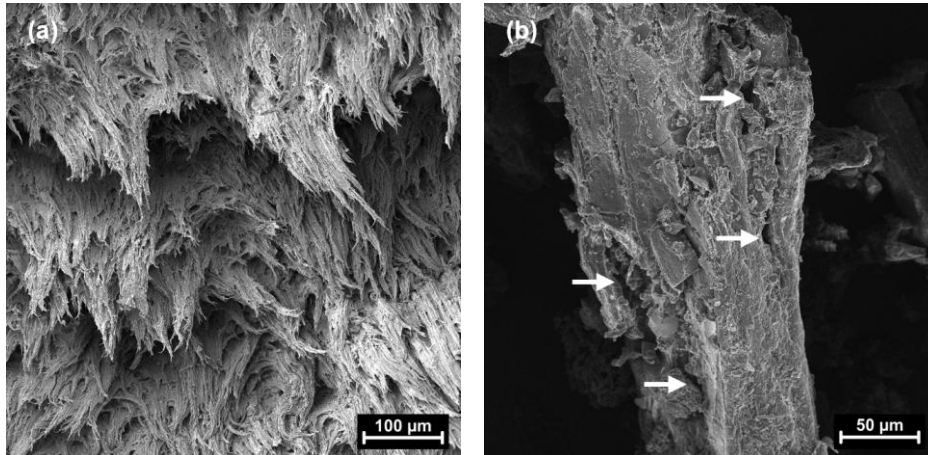
Fonte: Autor.

### 4.3 Caracterização morfológica

As morfologias do PBAT e da fibra *Croton lanjouwensis* são apresentadas nas Figuras 4 (a) e (b), respectivamente. A matriz exibe superfície alongada após a tração, típica de polímeros dúcteis, como o PBAT (LOPRESTI et al., 2024). A fibra, por sua vez, apresenta irregularidades, lacunas e protuberâncias. Essas imperfeições influenciam o comportamento mecânico do reforço. A rugosidade superficial favorece a ancoragem mecânica e eleva a resistência do biocompósito quando comparada à obtida em compósitos reforçados com fibras de superfície lisa (LOGESH et al., 2025). A melhoria das propriedades mecânicas está vinculada ao aumento da área superficial disponível quando a fibra apresenta topografia rugosa em padrão semelhante a uma grade. Essa morfologia expõe uma quantidade maior de grupos hidroxila da celulose, o que intensifica o potencial de interação com a matriz polimérica. Como

consequência, a formação de ligações de hidrogênio entre os constituintes é favorecida, ampliando a adesão interfacial (PATSIÃOURA *et al.*, 2024).

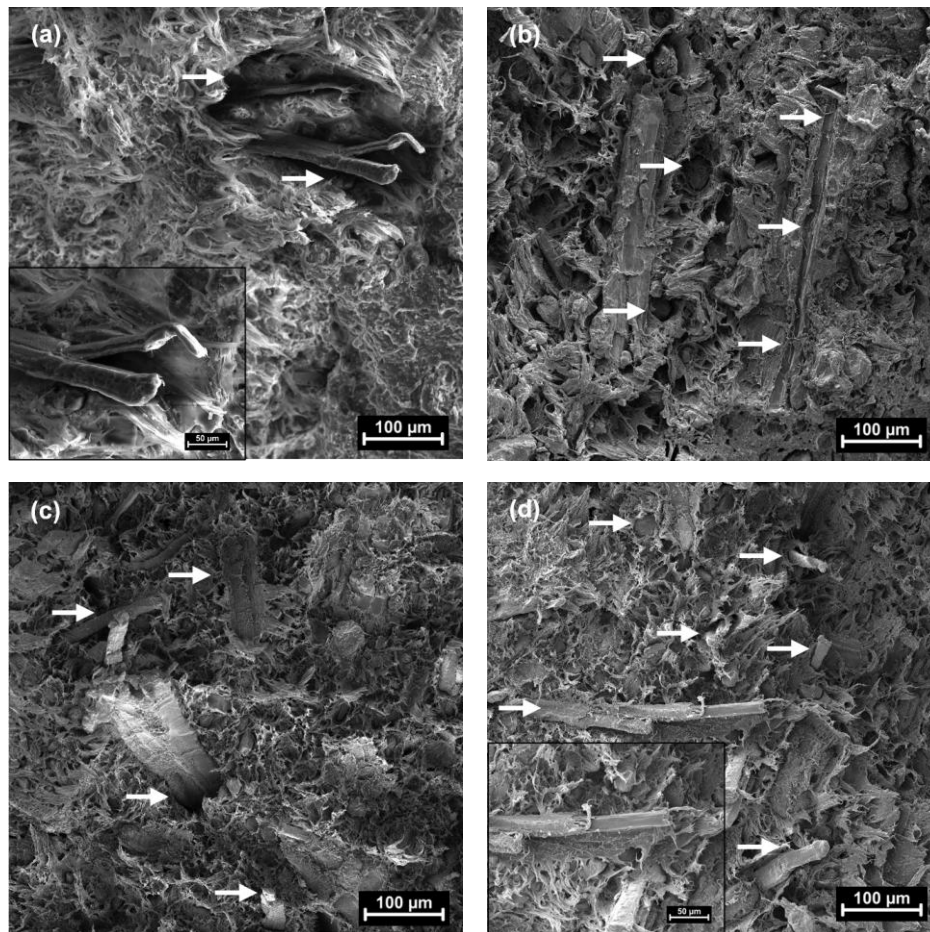
**Figura 4.** Micrografias de MEV da morfologia de fratura do (a) PBAT e (b) fibra *Croton lanjouwensis*.



**Fonte:** Autor.

A distribuição das fibras foi avaliada por micrografias da superfície de fratura dos biocompósitos PBAT/*Croton lanjouwensis* com diferentes teores de reforço (5, 10, 15 e 20 %), conforme Figuras 5 (a–d). Observa-se que as fibras preservam sua morfologia e se dispersam de forma aleatória na matriz. Na Figura 5(a), a presença de vazios ao redor das fibras indica fraca adesão interfacial entre o PBAT e a carga vegetal. Essa limitação favorece o arrancamento parcial das fibras durante a tração, como apresentado nas Figuras 5(b) e 5(c). Por outro lado, o aumento da fração de reforço promove maior densidade de fibras por unidade de área, conforme mostrado na Figura 5(d), o que demonstra dispersão aleatória obtida no processo de extrusão.

**Figura 5.** Micrografias de MEV da morfologia de fratura dos biocompósitos PBAT/*Croton lanjouensis* com diferentes teores de fibra: (a) 5 %, (b) 10 %, (c) 15 % e (d) 20 %.



**Fonte:** Autor.

A revisão de Itabana et al. (2024) evidenciou comportamento comparável em compósitos de PBAT reforçados com capim-elefante, amido e fibras de *Miscanthus* sem uso de compatibilizantes. Conforme observado neste estudo, a incompatibilidade entre a matriz e as fibras resultou em aglomeração e formação de vazios associados ao arrancamento das fibras. Essa condição foi atribuída à elevada densidade de grupos hidroxila presentes nas fibras, que aumenta sua hidrofiliabilidade e dificulta a interação com matrizes poliméricas hidrofóbicas. Conseqüentemente, a transferência de tensão e a dispersão das fibras tornam-se limitadas, reduzindo a eficiência do reforço. Estratégias de modificação superficial e uso de compatibilizantes podem atenuar esse efeito. Contudo, podem também elevar custos e favorecer a degradação das fibras (FERREIRA et al., 2019).

Nos biocompósitos avaliados, observa-se adesão parcial entre o PBAT e a fibra *Croton lanjouwensis*, atribuída à interação entre grupos hidroxila da fibra e grupos carbonila do polímero, conforme identificado por FTIR. Além disso, a rugosidade da superfície fibrosa favorece o ancoramento mecânico e contribui para o aumento da adesão polímero-carga.

#### **4.4 Caracterizações mecânicas**

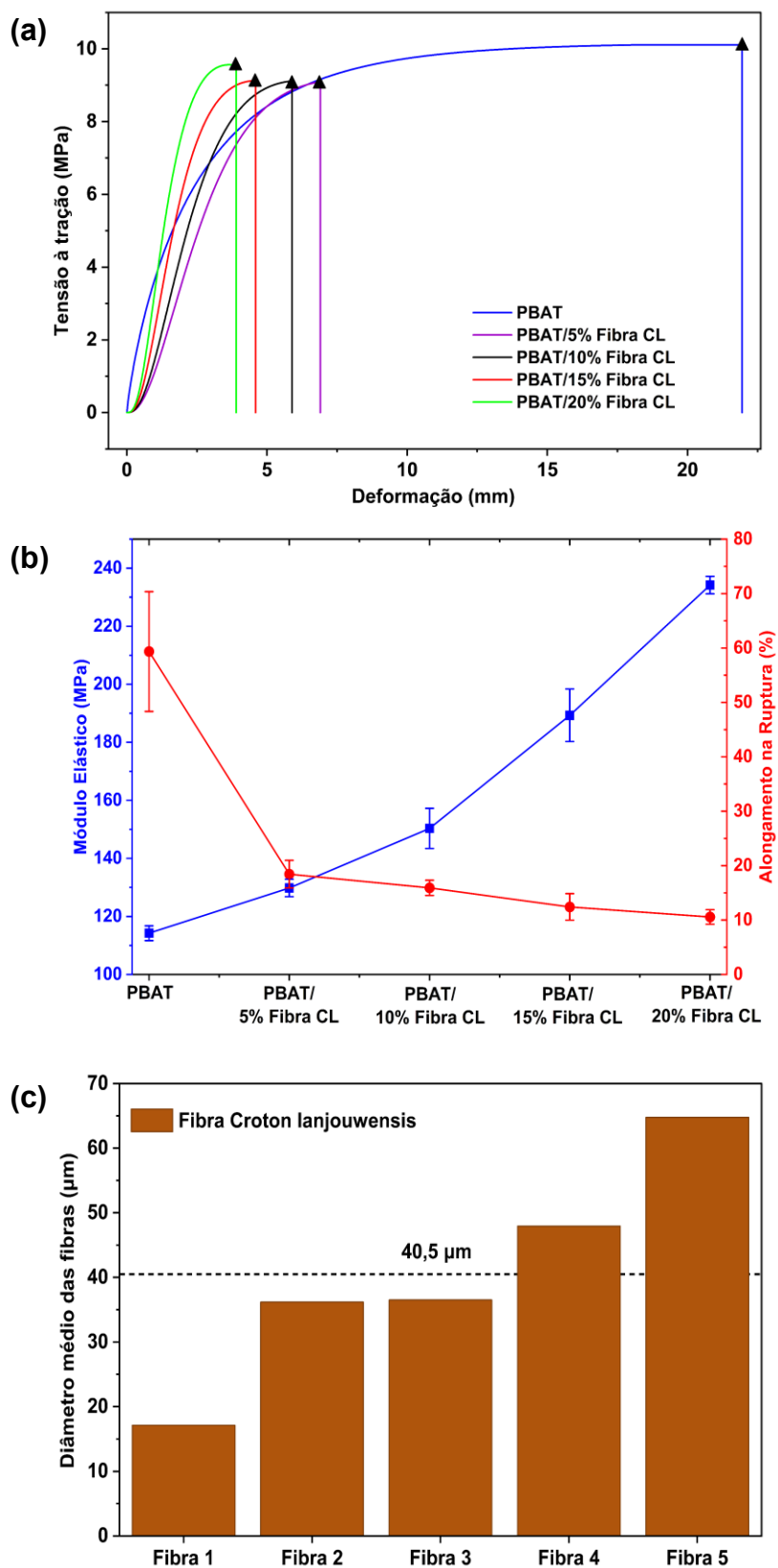
##### **4.4.1 Tração**

A adição da fibra de *Croton lanjouwensis* à matriz de PBAT resultou em redução moderada da tensão à tração. O PBAT puro apresentou valor médio de 10,2 MPa, enquanto os biocompósitos exibiram variações de 9,1 MPa (5% e 10%), 9,2 MPa (15%) e 9,6 MPa (20%). Assim, a redução foi de apenas 5,5% com a incorporação de 20 % em peso da fibra. Em contrapartida, outros estudos relataram reduções mais acentuadas nas propriedades mecânicas de matrizes de PBAT reforçadas com cargas lignocelulósicas. Ferreira et al. (2019) observaram queda de 46,4 % ao utilizar fibras amazônicas; Botta et al. (2021) reportaram reduções de até 64,0 % com microcelulose de amêndoa; e Freitas (2024) verificou diminuição de 28,4 % com partículas do ouriço da castanha-do-Brasil. Esses resultados, ilustrados na Figura 6 (a), evidenciam que a incorporação da fibra amazônica não comprometeu significativamente a resistência do polímero, mesmo na ausência de compatibilizantes. A redução sutil da tensão à tração nos biocompósitos está associada à incompatibilidade química entre o PBAT e a fibra *Croton lanjouwensis*, conforme evidenciado pelas micrografias de MEV. Observa-se que a baixa adesão na interface fibra-matriz e a dispersão limitada das fibras dificultam a transferência de carga durante o esforço mecânico. Como resultado, formam-se regiões com concentrações distintas de fibras, além de vazios e aglomerados, configurando uma mistura não homogênea (FONG et al., 2025). Nessa condição, o compósito apresenta menor capacidade de deformação e falha prematura quando comparado à matriz pura (PATSIÃOURA et al., 2024). Por outro lado, em misturas homogêneas, as fibras apresentam distribuição uniforme na matriz, sem aglomerações, e a ausência de vazios ao redor das fibras indica boa adesão e ligação eficaz entre os constituintes do compósito.

Conforme a Figura 6 (b), o módulo elástico passou de 114,2 MPa (PBAT) para 234,1 MPa (20%), representando ganho de 105%, enquanto o alongamento na ruptura reduziu de 59,3% para 10,5%. O aumento da rigidez dos biocompósitos está associado ao diâmetro médio de aproximadamente 40,5  $\mu\text{m}$  da fibra *Croton lanjouwensis*, conforme mostra a Figura 6 (c). Como observado por Patsiaoura et al. (2024), fibras mais finas apresentam maior área superficial efetiva do que fibras mais espessas, o que amplia a interface de contato com a matriz polimérica e melhora o desempenho mecânico. No estudo citado, fibras de kenaf com diâmetro de 44,9  $\mu\text{m}$  elevaram o módulo de Young em 16% em compósitos de PEAD com 20% em massa de reforço, enquanto fibras de linho, com diâmetro de 14,2  $\mu\text{m}$ , proporcionaram incremento de 87% sob as mesmas condições. Esse comportamento indica que menores diâmetros reduzem a densidade de defeitos distribuídos ao longo da fibra, favorecendo a transferência de carga tanto na superfície quanto no volume. Adicionalmente, a lignina contribui para a rigidez, como relatado por Eleutério et al. (2025). De acordo com Freitas (2024), sua estrutura aromática rígida e o alto módulo de Young intensificam interações intermoleculares, incluindo ligações de hidrogênio, interações  $\pi$  e complexos  $\pi$ - $\pi$  com o PBAT, o que reforça a matriz.

Os estudos avaliados mostram reduções acentuadas no alongamento na ruptura após a adição de cargas lignocelulósicas. Ferreira et al. (2019) reportaram queda de 96% no PBAT com 10% fibras amazônicas, enquanto Botta et al. (2021) observaram redução de 80,9% com 20% de celulose microcristalina. Freitas (2024) registrou diminuição de 24,23% para 5,89% com 20% de ouriço da castanha-do-brasil, e Patsiaoura et al. (2024) verificaram redução extrema no HDPE, de 716,7% para 1,7% com 20% de Kenaf. Em conjunto, esses resultados demonstram que a incorporação de fibras restringe a deformação plástica sob tração. Essa tendência decorre da formação de zonas de concentração de tensão ao redor das fibras, que se intensificam em maiores teores, conforme discutido por Kargarzadeh, Galeski e Pawlak (2020).

**Figura 6.** Propriedades mecânicas do PBAT e dos biocompósitos reforçados com fibra de *Croton lanjouwensis*: (a) curvas tensão–deformação; (b) módulo elástico e alongamento na ruptura; (c) diâmetro médio das fibras.

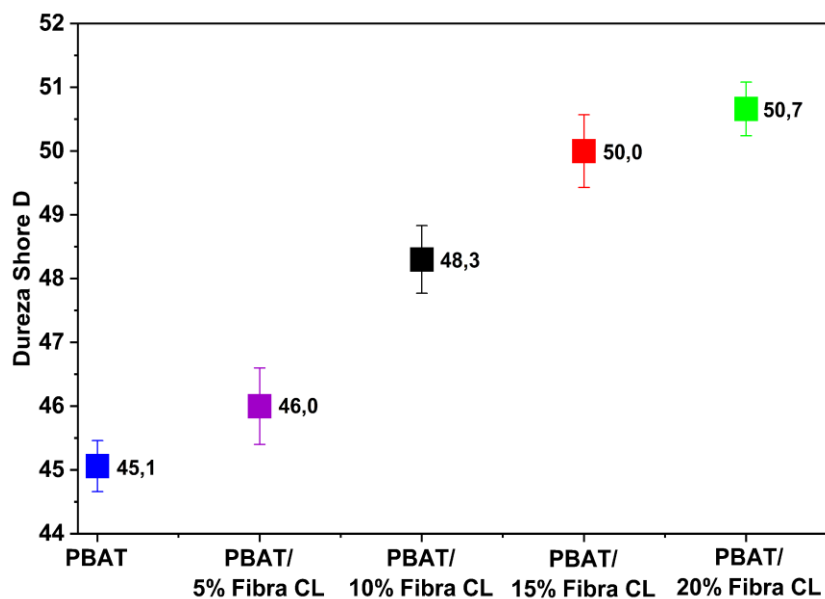


Fonte: Autor.

#### 4.4.2 Dureza Shore D

Conforme apresentado na Figura 7, a incorporação das fibras de *Croton lanjouwensis* aumentou gradualmente a dureza Shore D em relação ao PBAT puro. O polímero base apresentou valor médio de 45,1, enquanto os biocompósitos registraram 46,0; 48,3; 50,0 e 50,7 para os teores de 5, 10, 15 e 20%, respectivamente. Resultados semelhantes foram relatados por Rath, Krishnan e Kanny (2024), que observaram elevação de até seis unidades na dureza de formulações de PBAT com nanocargas de grafeno. De modo análogo, Li *et al.* (2021) reportaram aumento de 16,67% em compósitos PBAT/amido reforçados com lignina, e Yoksan e Boontanimitr (2023) verificaram incremento de 13,8% após a adição de  $\text{CaCO}_3$ . Além disso, Freitas (2024) constatou aumento superior a 30% na dureza de compósitos contendo 20% de partículas do ouriço da castanha-do-Brasil. Esses resultados convergem ao indicar que cargas lignocelulósicas e minerais reforçam a superfície do PBAT. Esse comportamento resulta da maior rigidez intrínseca da fibra e das interações físicas com as cadeias do biopolímero. Além disso, as partículas rígidas de lignina limitam o movimento molecular e aumentam a resistência à penetração.

**Figura 7.** Variação da dureza Shore D em função do teor de fibra de *Croton lanjouwensis* nos biocompósitos de PBAT.



Fonte: Autor.

A análise de variância (ANOVA) indicou diferenças estatisticamente significativas ( $p < 0,05$ ) entre as médias de tensão à tração, módulo elástico, alongamento na ruptura e dureza shore D, evidenciando que a adição da fibra de pau-caboclo (*Croton lanjouwensis*) influenciou significativamente as propriedades mecânicas do material.

## 5. CONCLUSÃO

Esta pesquisa teve como objetivo geral produzir e caracterizar biocompósitos de PBAT reforçados com fibras amazônicas de pau-caboclo (*Croton lanjouwensis*), visando compreender seu desempenho como carga lignocelulósica em matriz polimérica biodegradável. Com base nos resultados obtidos, constata-se que o objetivo proposto foi plenamente alcançado.

Em relação às propriedades estruturais, a espectroscopia FTIR evidenciou interações físicas entre o PBAT e a fibra *C. lanjouwensis*. A difração de raios-X revelou caráter semicristalino da fibra, com índice de cristalinidade de 57,5%. As micrografias obtidas por MEV confirmaram adesão parcial entre matriz e carga, e o diâmetro médio das fibras foi de 40,5 µm. Quanto às propriedades mecânicas, observou-se aumento de até 105% no módulo elástico e de 12,3% na resistência superficial à penetração. A tensão à tração apresentou redução sutil de 5,5% para a maior concentração de fibra, mantendo desempenho superior a muitas pesquisas sem agente compatibilizante, enquanto a ductilidade foi reduzida em 82,3%.

No campo teórico, este estudo amplia a compreensão sobre o comportamento estrutural e mecânico de biocompósitos à base de PBAT reforçados com fibras lignocelulósicas amazônicas. Até onde se tem conhecimento, trata-se do primeiro estudo a incorporar 20% em peso da fibra *Croton lanjouwensis* como carga. No campo prático, os achados fornecem subsídios para o desenvolvimento de novos materiais sustentáveis aplicáveis em embalagens e produtos descartáveis compostáveis, valorizando recursos regionais.

Quanto às limitações, destaca-se a necessidade de ampliar as caracterizações mecânicas em diferentes condições de carregamento e de realizar análises térmicas para avaliar a estabilidade do biocompósito. Também se verifica a ausência de métodos para melhorar a interação entre matriz e fibra. Assim, recomenda-se que trabalhos futuros incluam ensaios de flexão e impacto, análises TGA e DSC para definição do perfil térmico, além da aplicação de agentes compatibilizantes para aprimorar a adesão interfacial.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASYRAF, M.R.M. *et al.* Mechanical properties of oil palm fibre-reinforced polymer composites: a review. **Journal Of Materials Research And Technology**, [S.L.], v. 17, p. 33-65, mar. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.12.122>.

ASSANVO, Edja Florentin *et al.* Extraction and Detailed Physico-Chemical Characterization of Lignocellulosic Fibers Derived from *Lonchocarpus cyanescens*. **Journal Of Polymer Materials**, [S.L.], v. 41, n. 2, p. 55-68, 2024. Tech Science Press. <http://dx.doi.org/10.32604/jpm.2024.055397>.

ASTM INTERNATIONAL. *ASTM D638-22: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2022.

ASTM INTERNATIONAL. *ASTM D2240-15: Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2021.

BARBOSA, Carlos Eduardo da Silva Monteiro *et al.* Feasibility of Amazonian Natural Fibers as Sustainable Alternatives for Mortar Reinforcement. **Waste And Biomass Valorization**, [S.L.], v. 16, n. 11, p. 6075-6097, 15 abr. 2025. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12649-025-02992-Z>.

BHUNIA, Anup Kumar *et al.* Characterization of a new natural novel lignocellulose fiber resource from the stem of *Cyperus platystylis* R.Br. **Scientific Reports**, [S.L.], v. 13, n. 1, 15 jun. 2023. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-023-35888-w>.

BOTTA, Luigi *et al.* PBAT Based Composites Reinforced with Microcrystalline Cellulose Obtained from Softwood Almond Shells. **Polymers**, [S.L.], v. 13, n. 16, p. 2643, 9 ago. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/polym13162643>.

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 10. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2021. 864 p.

ELEUTÉRIO, Telmo *et al.* A Review of Natural Fibers: classification, composition, extraction, treatments, and applications. **Fibers**, [S.L.], v. 13, n. 9, p. 119, 4 set. 2025. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/fib13090119>.

FERREIRA, Filipe V. *et al.* Environmentally friendly polymer composites based on PBAT reinforced with natural fibers from the amazon forest. **Polymer Composites**, [S.L.], v. 40, n. 8, p. 3351-3360, 11 jan. 2019. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/pc.25196>.

FREITAS, Bruno Mello de. **Produção e caracterização de um biocompósito polimérico com partículas do ouriço da castanha do-Brasil**. 2024. 77 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência e Tecnologia dos Materiais, Faculdade de Ciências, Universidade Estadual Paulista (Unesp), Bauru – São Paulo, 2024.

FONG, Ailing *et al.* A review on the hybrid polymer composites comprising natural fibre and nanomaterial reinforcement. **Journal Of Composite Materials**, [S.L.], v. 59, n. 22, p. 2615-2646, 15 abr. 2025. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/00219983251334861>.

GUIMARÃES, Luiz Alberto Cavalcante. **O GÊNERO CROTON L. SEÇÃO CYCLOSTIGMA Griseb. E SEÇÃO LUNTIA (Raf.) G. L. Webster (EUPHORBIACEAE) OCORRENTES NA AMAZÔNIA BRASILEIRA.** 2006. 82 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Botânica Tropical, Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Rural da Amazônia (Ufra), Belém – Pará, 2006.

ITABANA, Blessing E. *et al.* Poly (Butylene Adipate-Co-Terephthalate) (PBAT) – Based Biocomposites: a comprehensive review. **Macromolecular Materials And Engineering**, [S.L.], v. 309, n. 12, 26 out. 2024. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/mame.202400179>.

KOSTRYUKOV, S. G. *et al.* Determination of Lignin, Cellulose, and Hemicellulose in Plant Materials by FTIR Spectroscopy. **Journal Of Analytical Chemistry**, [S.L.], v. 78, n. 6, p. 718-727, jun. 2023. Pleiades Publishing Ltd. <http://dx.doi.org/10.1134/s1061934823040093>.

KARGARZADEH, Hanieh; GALESKI, Andrzej; PAWLAK, Andrzej. PBAT green composites: effects of kraft lignin particles on the morphological, thermal, crystalline, macro and micromechanical properties. **Polymer**, [S.L.], v. 203, p. 122748, ago. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymer.2020.122748>.

LEITE-BARBOSA, Odilon *et al.* PBAT biocomposites reinforced with açai seed residues: exploring sustainable material development. **Journal Of Materials Research And Technology**, [S.L.], v. 37, p. 524-536, jul. 2025. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.06.008>.

LAMSAF, Hafsae *et al.* Multifunctional Properties of PBAT with Hemp (Cannabis sativa) Micronised Fibres for Food Packaging: cast films and coated paper. **Coatings**, [S.L.], v. 13, n. 7, p. 1195, 3 jul. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/coatings13071195>.

LIU, Qin *et al.* Fractionated lignin as a green compatibilizer to improve the compatibility of poly (butylene adipate-co-terephthalate) /polylactic acid composites. **International Journal Of Biological Macromolecules**, [S.L.], v. 265, p. 130834, abr. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130834>.

LIMA, Thuany de *et al.* Potential of Using Amazon Natural Fibers to Reinforce Cementitious Composites: a review. **Polymers**, [S.L.], v. 14, n. 3, p. 647, 8 fev. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/polym14030647>.

LOPRESTI, Francesco *et al.* Influence of Biochar on the Properties of Antibacterial PBAT/Carvacrol Films. **Journal Of Polymers And The Environment**, [S.L.], v. 32, n. 6, p. 2780-2796, 23 abr. 2024. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10924-024-03262-0>.

LI, Ming *et al.* Investigation into lignin modified PBAT/thermoplastic starch composites: thermal, mechanical, rheological and water absorption properties. **Industrial Crops And Products**, [S.L.], v. 171, p. 113916, nov. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113916>.

LOGESH, K. *et al.* Characterization and applications of Croton bonplandianus fiber for sustainable biomaterials. **Results In Engineering**, [S.L.], v. 26, p. 104765, jun. 2025. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104765>.

MAMUDU, Ukashat *et al.* Extraction, Preparation and Characterization of Nanocrystalline Cellulose from Lignocellulosic Simpor Leaf Residue. **Molecules**, [S.L.], v. 30, n. 7, p. 1622, 5 abr. 2025. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/molecules30071622>.

MEDEIROS, Yanne Celeste Silva de. **Estudo Fitoquímico e Farmacológico das Cascas de Croton lanjouwensis Jablonszky (Euphorbiaceae)**. 2022. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Produtos Naturais e Sintéticos Bioativos, Centro de Ciências da Saúde, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2022.

NOMADOLO, Nomvuyo *et al.* The Effect of Mechanical Recycling on the Thermal, Mechanical, and Chemical Properties of Poly (Butylene Adipate-Co-Terephthalate) (PBAT), Poly (Butylene Succinate) (PBS), Poly (Lactic Acid) (PLA), PBAT-PBS Blend and PBAT-TPS Biocomposite. **Journal Of Polymers And The Environment**, [S.L.], v. 32, n. 6, p. 2644-2659, 19 jan. 2024. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10924-023-03151-y>.

PATSIAOURA, Dimitra *et al.* Lignocellulosic-Based/High Density Polyethylene Composites: a comprehensive study on fiber characteristics and performance evaluation. **Applied Sciences**, [S.L.], v. 14, n. 9, p. 3582, 24 abr. 2024. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/app14093582>.

PINHEIRO, Ivanei Ferreira; MORALES, Ana Rita; MEI, Lucia H. Polymeric biocomposites of poly (butylene adipate-co-terephthalate) reinforced with natural Munguba fibers. **Cellulose**, [S.L.], v. 21, n. 6, p. 4381-4391, 24 ago. 2014. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10570-014-0387-z>.

RATH, Abjesh Prasad; KRISHNAN, P. Santhana Gopala; KANNY, Krishnan. A comparison of physical, morphological, and mechanical properties of bio-polyester hybrid nanocomposites. **Polymers For Advanced Technologies**, [S.L.], v. 35, n. 9, set. 2024. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/pat.6566>.

ROCA, Dean Kenji Vaca *et al.* CARACTERIZAÇÃO DENDROLÓGICA DE CROTON MATOURENSIS AUBL. EM UMA ÁREA FRAGMENTADA NO AMAZONAS. **Estudos Dendrológicos e Ecológicos na Amazônia: oportunidades e experiências - Volume 2**, [S.L.], p. 64-75, 2022. Editora Científica Digital. <http://dx.doi.org/10.37885/220508818>.

ROSENBOOM, Jan-Georg; LANGER, Robert; TRAVERSO, Giovanni. Bioplastics for a circular economy. **Nature Reviews Materials**, [S.L.], v. 7, n. 2, p. 117-137, 20 jan. 2022. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/s41578-021-00407-8>.

SEGAL, L. *et al.* An Empirical Method for Estimating the Degree of Crystallinity of Native Cellulose Using the X-Ray Diffractometer. **Textile Research Journal**, [S.L.], v. 29, n. 10, p. 786-794, out. 1959. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/004051755902901003>.

STEEGE, Hans Ter *et al.* Hyperdominance in the Amazonian Tree Flora. **Science**, [S.L.], v. 342, n. 6156, 18 out. 2013. American Association for the Advancement of Science (AAAS). <http://dx.doi.org/10.1126/science.1243092>.

SOUZA, Vitor da Silva de *et al.* Development of Epoxy Matrix Nanocomposites Reinforced with Coconut Shell Nanocellulose. **Materials Research**, [S.L.], v. 28, n. 1, 2025. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2025-0234>.

SILVA, Bianca Marinho da *et al.* FIBRAS COMERCIAIS DA AMAZÔNIA: oportunidades e entraves para expansão. **Aracê**, [S.L.], v. 6, n. 4, p. 16529-16549, 19 dez. 2024. Seven Events. <http://dx.doi.org/10.56238/arev6n4-321>.

TSOU, Chi-Hui *et al.* The preparation and performance of poly(butylene adipate) terephthalate/corn stalk composites. **Current Research In Green And Sustainable Chemistry**, [S.L.], v. 5, p. 100329, 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.crgsc.2022.100329>.

T, Dharanendra y *et al.* Influence of alkali treatment in enhancing crystallinity and breaking force of pineapple leaf fiber. **Scientific Reports**, [S.L.], v. 15, n. 1, 15 out. 2025. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-025-19991-8>.

WANG, Xiangyun *et al.* Preparation and Mechanical Properties of PBAT/Silanized Cellulose Composites. **Processes**, [S.L.], v. 12, n. 4, p. 722, 2 abr. 2024. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/pr12040722>.

YU, Wangwang *et al.* Effects of Modification on Properties of Wood Flour/PBAT Biocomposites. **Polymers**, [S.L.], v. 17, n. 5, p. 555, 20 fev. 2025. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/polym17050555>.

YOKSAN, Rangrong; BOONTANIMITR, Apinya. Effect of calcium carbonate on the performance of poly(butylene adipate-co-terephthalate) filled with duckweed biomass. **Industrial Crops And Products**, [S.L.], v. 205, p. 117442, dez. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117442>.

ZHOU, Xiangyang *et al.* Biodegradable Nanofibrillated Cellulose/Poly-(butylene adipate-co-terephthalate) Composite Film with Enhanced Barrier Properties for Food Packaging. **Molecules**, [S.L.], v. 28, n. 6, p. 2689, 16 mar. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/molecules28062689>.