

**MINISTÉRIO DA DEFESA  
EXÉRCITO BRASILEIRO  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE  
MATERIAIS**

**ODILON SOUZA LEITE BARBOSA**

**DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS DE PBAT  
REFORÇADOS COM RESÍDUOS DE SEMENTE DE AÇAÍ (*EUTERPE  
EDULIS*) PARA APLICAÇÕES SUSTENTÁVEIS**

**RIO DE JANEIRO  
2024**

ODILON SOUZA LEITE BARBOSA

DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS DE PBAT  
REFORÇADOS COM RESÍDUOS DE SEMENTE DE AÇAÍ (*EUTERPE  
EDULIS*) PARA APLICAÇÕES SUSTENTÁVEIS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador(es): Valdir Florêncio da Veiga Junior, D.Sc.  
Marcelo Ferreira Leão de Oliveira, D.Sc.

Rio de Janeiro

2024

©2024

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha

Rio de Janeiro – RJ CEP: 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmар ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es) e do(s) orientador(es).

Barbosa, Odilon Souza Leite.

Desenvolvimento de Compósitos Poliméricos de PBAT reforçados com Resíduos de Semente de Açaí (*Euterpe edulis*) para Aplicações Sustentáveis / Odilon Souza Leite Barbosa. – Rio de Janeiro, 2024.

128 f.

Orientador(es): Valdir Florêncio da Veiga Junior e Marcelo Ferreira Leão de Oliveira.

Dissertação (mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Ciência e Engenharia de Materiais, 2024.

1. compósitos poliméricos; resíduos de açaí; PBAT; sustentabilidade; materiais reforçados; *Euterpe edulis*. i. da Veiga Junior, Valdir Florêncio (orient.) ii. Ferreira Leão de Oliveira, Marcelo (orient.) iii. Título

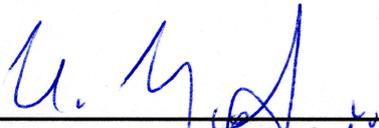
**ODILON SOUZA LEITE BARBOSA**

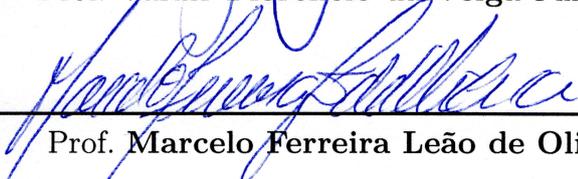
**Desenvolvimento de Compósitos Poliméricos de PBAT  
reforçados com Resíduos de Semente de Açaí (*Euterpe  
edulis*) para Aplicações Sustentáveis**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador(es): Valdir Florêncio da Veiga Junior e Marcelo Ferreira Leão de Oliveira.

Aprovada em 20 de Dezembro de 2024, pela seguinte banca examinadora:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Valdir Florêncio da Veiga Junior - D.Sc. do IME

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Marcelo Ferreira Leão de Oliveira - D.Sc. do INT

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Lucio Fabio Cassiano Nascimento - D.Sc. do IME - Presidente

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Sergio Neves Monteiro - Ph.D. do IME

  
\_\_\_\_\_  
Prof<sup>a</sup> Ana Maria Furtado de Sousa - D.Sc. da UERJ

Rio de Janeiro

2024

*À minha família, meu porto seguro e fonte eterna de amor e inspiração. Este trabalho é o fruto do suporte e carinho que vocês me proporcionaram.*

## AGRADECIMENTOS

Esta dissertação marca o fim de uma etapa desafiadora e significativa da minha vida acadêmica e pessoal. Ela é o resultado não apenas de esforços individuais, mas também do apoio e incentivo de muitas pessoas que estiveram ao meu lado durante esta jornada. É com profunda gratidão que registro aqui os meus sinceros agradecimentos.

À minha família, pelo amor incondicional e pelo suporte ao longo de toda a minha vida. Aos meus pais, que me ensinaram os valores do trabalho duro e da perseverança. Ao meu irmão, pelo companheirismo, e aos meus avós, cuja sabedoria e carinho foram fontes constantes de inspiração.

À minha esposa, Danna Souza, pelo amor, paciência e compreensão em todos os momentos. Seu apoio foi essencial para que eu pudesse superar os desafios deste percurso. Obrigado por acreditar em mim e por compartilhar cada conquista e dificuldade. Aos meus amigos de longa data, Márcio Pinto, Janielson Feitosa, Orivelton Medeiros, Igor Macedo, Marcel Amaral, Nayara Costa e todos os outros amigos que não consegui citar aqui, por sempre estarem presentes e por me motivarem com palavras de incentivo, mesmo à distância. A amizade de vocês é um pilar importante na minha vida.

Aos meus colegas do LAMAP/INT, Débora Santos, Mateus Silva, Vera Lapa, André Luiz, Fernanda Braga e Raphael Rodrigues, pela camaradagem, pelas discussões construtivas e pelo trabalho conjunto no laboratório, que contribuíram imensamente para o progresso desta pesquisa. Um agradecimento especial à Dra. Márcia Gomes de Oliveira, chefe do LAMAP, por seu apoio, liderança e confiança no desenvolvimento deste trabalho. Aos colegas e amigos do Instituto Militar de Engenharia (IME), Clicia Fonseca, Carlos Henrique, Marcela Velloso, Yasmin Cunha, e a todos os que tive a oportunidade de conhecer e compartilhar momentos enriquecedores.

Aos técnicos e alunos que me ajudaram em análises e processos, meu muito obrigado. À Fernanda Santos e Alan Menezes, do CENANO, pelas análises de MEV. Ao Erickson Pereira e à professora Ana Maria Furtado de Sousa (UERJ), pelo suporte e contribuições inestimáveis. À professora Mônica Padilha, do LBCD - LADETEC/IQ - UFRJ, pela orientação em momentos cruciais.

Ao meu orientador, Valdir Florêncio da Veiga Junior, pela paciência, dedicação e apoio em cada etapa deste trabalho. Ao meu coorientador, Marcelo Ferreira Leão de Oliveira, pela parceria, conselhos valiosos e por acreditar no potencial deste projeto. Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta dissertação. Este trabalho é também fruto da colaboração, do incentivo e do aprendizado compartilhado com cada um de vocês.

*“Não é nossa habilidade que mostra quem realmente somos,  
são nossas escolhas.”*  
*(Alvo Dumbledore, Harry Potter e a Câmara Secreta)*

## RESUMO

O desenvolvimento de materiais sustentáveis é essencial para o avanço de tecnologias ecologicamente corretas e práticas de economia circular. Este estudo investiga o reforço de poli(adipato de tereftalato de butileno) (PBAT) com resíduos de sementes de açaí (*Euterpe edulis*), um subproduto agroindustrial abundante no Brasil. Os resíduos foram caracterizados por densidade, FTIR, DRX, TGA e MEV, enquanto os compósitos foram analisados quanto às propriedades mecânicas, morfológicas e térmicas. Os compósitos foram preparados por mistura no estado fundido e moldagem por injeção com 20% e 40% de teor de carga. Os testes mecânicos revelaram que a dureza aumentou significativamente, de 24,0 no PBAT puro para 32,0 com 40% de carga, evidenciando a contribuição das partículas de caroço de açaí para o aumento da dureza do compósito. A resistência à tração apresentou um comportamento estável, com valores de 10,79 MPa para 20% de carga e 9,99 MPa para 40%, indicando que, mesmo com maior teor de partículas, os resultados foram semelhantes ao do material puro. A resistência à flexão aumentou de 7,5 MPa no PBAT puro para 10,4 MPa com 40% de carga, enquanto o módulo de flexão subiu de 191 MPa para 310 MPa. A análise térmica por DSC mostrou um efeito nucleante das partículas, elevando a temperatura de cristalização de 65,55°C para 79,90°C. Já a TGA indicou dois estágios de degradação, com estabilidade térmica suficiente para aplicações, e as massas residuais aumentaram de 6,84% no PBAT puro para 30,95% no compósito com 40% de carga. A absorção de água aumentou de 0,50% no PBAT puro para 3,75% no compósito com 40% de carga, devido à natureza hidrofílica da carga. Esses achados destacam o potencial dos resíduos de sementes de açaí no desenvolvimento de compósitos poliméricos biodegradáveis para aplicações sustentáveis.

**Palavras-chave:** compósitos poliméricos; resíduos de açaí; PBAT; sustentabilidade; materiais reforçados; *Euterpe edulis*.

## ABSTRACT

The development of sustainable materials is essential for advancing environmentally friendly technologies and circular economy practices. This study investigates the reinforcement of poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) with residues from açai seeds (*Euterpe edulis*), an abundant agro-industrial by-product in Brazil. The residues were characterized by density, FTIR, XRD, TGA, and SEM, while the composites were analyzed for their mechanical, morphological, and thermal properties. The composites were prepared by melt blending and injection molding with 20% and 40% filler content. Mechanical tests revealed that hardness increased significantly from 24.0 in pure PBAT to 32.0 with 40% filler content, demonstrating the contribution of açai seed particles to the composite's hardness. Tensile strength remained stable, with values of 10.79 MPa at 20% filler and 9.99 MPa at 40%, indicating that even with a high particle content, the results were comparable to the pure material. Flexural strength increased from 7.5 MPa in pure PBAT to 10.4 MPa with 40% filler content, while the flexural modulus rose from 191 MPa to 310 MPa. Thermal analysis by DSC showed a nucleating effect of the filler, raising the crystallization temperature from 65.55°C to 79.90°C. TGA indicated two stages of degradation, with sufficient thermal stability for applications, and residual mass increased from 6.84% in pure PBAT to 30.95% in the composite with 40% filler content. Water absorption increased from 0.50% in pure PBAT to 3.75% in the composite with 40% filler content due to the hydrophilic nature of the filler. These findings highlight the potential of açai seed residues for developing biodegradable polymer composites for sustainable applications.

**Keywords:** polymeric composites; açai residues; PBAT; sustainability; reinforced materials; *Euterpe edulis*.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Produção de açaí e seu valor econômico no brasil: 2016-2022 . . . . .	22
Figura 2 – Áreas de ocorrência das espécies <i>Euterpe oleracea</i> , <i>Euterpe precatória</i> e <i>Euterpe edulis</i> no Brasil . . . . .	24
Figura 3 – Árvore de Juçara <i>Euterpe edulis</i> . . . . .	26
Figura 4 – Açaí: resíduos e produtos gerados . . . . .	28
Figura 5 – Estrutura molecular repetida da celulose. . . . .	29
Figura 6 – Estrutura molecular de hemicelulose . . . . .	29
Figura 7 – Estrutura molecular de lignina . . . . .	30
Figura 8 – Classificação dos compósitos pelo tipo de reforço . . . . .	35
Figura 9 – Estrutura química do polietileno. . . . .	37
Figura 10 – Estrutura química do PBAT Poli(adipato-co-tereftalato de butileno) . .	37
Figura 11 – Imagem fotográfica dos resíduos de semente de açaí . . . . .	52
Figura 12 – Diagrama de Blocos Representando a Metodologia Experimental para Desenvolvimento e Caracterização de Compósitos Poliméricos . . . . .	54
Figura 13 – Imagens da vista externa e interna do Moinho Ultracentrífugo RETSCH ZM 200 . . . . .	55
Figura 14 – Agitador de peneiras Retsch AS 200 . . . . .	56
Figura 15 – Esquema do misturador interno Haake Rheomix 600 com rotores tipo Roller . . . . .	59
Figura 16 – Imagens fotográficas: (a) máquina de moldagem por injeção; (b) molde para confecção dos corpos de prova. . . . .	61
Figura 17 – Etapas de processamento da semente de açaí . . . . .	67
Figura 18 – Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) do resíduo das sementes de açaí <i>Euterpe edulis</i> . . . . .	71
Figura 19 – DRX do resíduo de açaí . . . . .	73
Figura 20 – Análise termogravimétrica (TGA) das sementes de <i>Euterpe edulis</i> . . .	75
Figura 21 – Micrografia obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e distribuição granulométrica das partículas do resíduo das sementes de açaí <i>E. edulis</i> . . . . .	77
Figura 22 – Imagens Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície dos resíduos. (a) ampliação de 1000x e (b) ampliação de 1000x . . . . .	78
Figura 23 – Micrografia e espectro EDS das partículas de resíduo de açaí . . . . .	79
Figura 24 – Curva de torque (a) e energia específica (b) em função do tempo do PBAT e seus compósitos . . . . .	80

Figura 25 – Imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das superfícies de fratura dos materiais analisados após fratura em nitrogênio líquido. (a) PBAT puro a 500x, (b) PBAT puro a 1000x, (c) PBAT/20% Semente de Açaí (SA) a 500x, (d) PBAT/20% SA a 1000x, (e) PBAT/40% SA a 500x, e (f) PBAT/40% SA a 1000x. As imagens mostram as características morfológicas, incluindo a homogeneidade da matriz polimérica no PBAT puro e a interação da matriz com as partículas de semente de açaí nos compósitos. . . . .	91
Figura 26 – Gráfico das curvas de DSC da 1° corrida de aquecimento do PBAT e compósitos com diferentes teores de semente de açaí . . . . .	94
Figura 27 – Gráfico das curvas de DSC da 2° corrida de aquecimento do PBAT e compósitos com diferentes teores de semente de açaí . . . . .	95
Figura 28 – Gráfico das curvas de DSC da 1° corrida de resfriamento do PBAT e compósitos com diferentes teores de semente de açaí . . . . .	96
Figura 29 – Análise TGA e DTG do PBAT puro e dos compósitos com 20% e 40% de semente de açaí. A parte superior (a) mostra as curvas TGA, e a parte inferior (b) exhibe as curvas DTG. . . . .	97
Figura 30 – Curvas de TG e DTG do PBAT puro. . . . .	124
Figura 31 – Curvas de TG e DTG do PBAT com 20% de resíduo de semente de açaí.124	
Figura 32 – Curvas de TG e DTG do PBAT com 40% de resíduo de semente de açaí.125	
Figura 33 – Curva DSC do PBAT puro. . . . .	126
Figura 34 – Curva DSC do compósito PBAT com 20% de resíduo de semente de açaí.127	
Figura 35 – Curva DSC do compósito PBAT com 40% de resíduo de semente de açaí.128	

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades de Poli(adipato-co-tereftalato de butileno) (PBAT) com informações adicionais adaptadas do produto ecoflex® F Blend C1200 da BASF. . . . .	37
Tabela 2 – Propriedades de Materiais de Resíduos Lignocelulósicos como Reforço em Compósitos . . . . .	39
Tabela 3 – Faixas de absorção FTIR características da lignina. As posições são dadas em números de onda ( $\text{cm}^{-1}$ ) e as origens das bandas são descritas de acordo com suas respectivas funções químicas . . . . .	51
Tabela 4 – Composições estudadas para a preparação dos compósitos. . . . .	59
Tabela 5 – Parâmetros de injeção do PBAT e resíduos de açaí. . . . .	60
Tabela 6 – Composição química das sementes in natura da <i>Euterpe edulis</i> . . . . .	69
Tabela 7 – Resultados dos valores de torque final e energia específica do PBAT e dos compósitos . . . . .	81
Tabela 8 – Índice de fluidez (IF) do PBAT e dos compósitos com diferentes teores de resíduo de açaí. . . . .	82
Tabela 9 – Resultados dos valores de dureza do PBAT e dos compósitos . . . . .	84
Tabela 10 – Resultados dos ensaios de resistência à tração do PBAT e seus compósitos	85
Tabela 11 – Resultados dos ensaios de resistência à flexão do PBAT e dos compósitos	88
Tabela 12 – Valores do módulo elástico obtidos pela técnica de excitação por impulso do PBAT e seus compósitos . . . . .	90
Tabela 13 – Propriedades Térmicas das Amostras de PBAT e Compósitos com Resíduo de Semente de Açaí . . . . .	94
Tabela 14 – Valores de $T_{\text{onset}}$ , $T_{\text{max}}$ , perda de massa e resíduos a $600^{\circ}\text{C}$ para as amostras de PBAT e compósitos. . . . .	98
Tabela 15 – Valores médios de absorção de água e densidade relativa para o PBAT puro e compósitos com diferentes teores de resíduo de semente de açaí.	99

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise de Variância
ASTM	American Society for Testing and Materials
CENANO	Centro de Caracterização em Nanotecnologia para Materiais e Catálise
DRX	Difração de Raios-X
DSC	Calorimetria Exploratória Diferencial
DTG	Derivada Termogravimétrica
EDS	Espectroscopia de Dispersão de Energia por Raios-X
FTIR	Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier
IME	Instituto Militar de Engenharia
INT	Instituto Nacional de Tecnologia
LACAT	Laboratório de Catálise
LABIC	Laboratório de Biocatálise, Bioprocessos e Bioprodutos
LATEP	Laboratório de Tecnologia de Pós
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MET	Microscopia Eletrônica de Transmissão
MFI	Índice de Fluidez
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
PBAT	Poli(adipato-co-tereftalato de butileno)
SRAA	Sólidos Resistentes ao Ataque Ácido
TGA	Análise Termogravimétrica

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\Delta H$	Entalpia
$\Delta H_m$	Entalpia de fusão
$\Delta H_m^\circ$	Entalpia de fusão do PBAT puro e 100% cristalino
$\epsilon$	Alongamento
$\epsilon_{\max}$	Alongamento máximo antes da ruptura
$\epsilon_{\text{rup}}$	Alongamento no momento da ruptura
$\sigma$	Tensão
$\sigma_{\max}$	Tensão máxima antes da ruptura
$\sigma_{\text{rup}}$	Tensão no momento da ruptura
$X_c$	Grau de cristalinidade
$T_m$	Temperatura de fusão
$T_c$	Temperatura de cristalização
$T_g$	Temperatura de transição vítrea
$T_{\text{onset}}$	Temperatura inicial de degradação
$T_{\max}$	Temperatura de decomposição máxima
$\lambda$	Comprimento de onda

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
1.1	JUSTIFICATIVA	18
1.2	OBJETIVOS	19
1.2.1	OBJETIVO GERAL	19
1.2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>20</b>
2.1	O AÇAÍ NO BRASIL	20
2.1.1	IMPORTÂNCIA ECONÔMICA	21
2.1.2	DIVERSIDADE DE ESPÉCIES NO BRASIL	23
2.1.3	<i>EUTERPE EDULIS</i>	24
2.1.3.1	DISTRIBUIÇÃO E CARACTERÍSTICAS	25
2.1.3.2	IMPORTÂNCIA ECOLÓGICA E UTILIZAÇÃO	25
2.2	RESÍDUOS DE LIGNOCELULÓSICOS	27
2.2.1	VISÃO GERAL SOBRE RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS	28
2.2.2	CARACTERIZAÇÃO E POTENCIAL	30
2.2.3	APLICAÇÕES INOVADORAS DE RESÍDUOS DE AÇAÍ EM COMPÓSITOS	31
2.3	COMPÓSITOS: FUNDAMENTOS E APLICAÇÕES	33
2.3.1	COMPÓSITOS POLIMÉRICOS	34
2.3.2	MATRIZES POLIMÉRICAS E REFORÇOS	36
2.3.3	VANTAGENS E DESAFIOS DOS COMPÓSITOS POLIMÉRICOS	40
2.4	TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO	41
2.4.1	ANÁLISE TÉRMICA	42
2.4.2	ANÁLISE MECÂNICA	43
2.4.3	ANÁLISE MORFOLÓGICA	46
2.4.4	ANÁLISE ESTRUTURAL E DE SUPERFÍCIE	48
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>52</b>
3.1	MATERIAIS	52
3.1.1	RESÍDUOS DE SEMENTE DE AÇAÍ	52
3.1.2	POLI(ADIPATO-CO-TEREFTALATO DE BUTILENO)(PBAT)	53
3.2	METODOLOGIA	53
3.2.1	CONDICIONAMENTO DO RESÍDUO DO AÇAÍ	53
3.2.2	CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DO AÇAÍ	54
3.2.2.1	CLASSIFICAÇÃO GRANULOMÉTRICA	54
3.2.2.2	DETERMINAÇÃO DO TAMANHO DE PARTÍCULA	55

3.2.2.3	DENSIDADE . . . . .	55
3.2.2.4	COMPOSIÇÃO QUÍMICA . . . . .	57
3.2.2.5	ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO (FTIR) . . . . .	57
3.2.2.6	DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX) . . . . .	58
3.2.3	PREPARAÇÃO DOS COMPÓSITOS . . . . .	58
3.2.3.1	PROCESSABILIDADE . . . . .	58
3.2.3.2	MOLDAGEM POR INJEÇÃO . . . . .	60
3.2.4	CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS . . . . .	60
3.2.4.1	DENSIDADE DOS COMPÓSITOS . . . . .	60
3.2.4.2	ABSORÇÃO DE ÁGUA . . . . .	61
3.2.4.3	PROPRIEDADES MECÂNICAS . . . . .	62
3.2.4.4	CALORIMETRIA EXPLORATÓRIA DIFERENCIAL (DSC) . . . . .	63
3.2.4.5	DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE FLUIDEZ (MFI) . . . . .	64
3.2.5	ANÁLISE MORFOLÓGICA POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARRE- DURA (MEV) . . . . .	64
3.2.6	ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA) . . . . .	65
3.2.7	ANÁLISE ESTATÍSTICA . . . . .	65
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO . . . . .</b>	<b>67</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DE AÇAÍ <i>EUTERPE EDULIS</i> . . . . .	67
4.1.1	INSPEÇÃO VISUAL . . . . .	67
4.1.2	DENSIDADE . . . . .	68
4.1.3	COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS SEMENTES . . . . .	68
4.1.4	ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO (FTIR) . . . . .	71
4.1.5	DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX) . . . . .	72
4.1.6	ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA) . . . . .	74
4.1.7	TAMANHO DE PARTÍCULA . . . . .	77
4.1.8	ANÁLISE MORFOLÓGICA DAS PARTÍCULAS MOÍDAS DE AÇAÍ . . . . .	78
4.2	PROCESSABILIDADE . . . . .	80
4.3	CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS . . . . .	83
4.3.1	PROPRIEDADES MECÂNICAS . . . . .	83
4.3.1.1	DUREZA . . . . .	83
4.3.1.2	ENSAIO DE TRAÇÃO . . . . .	85
4.3.1.3	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO . . . . .	87
4.3.1.4	ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO . . . . .	89
4.3.2	ANÁLISE MORFOLÓGICA DA ESTRUTURA INTERNA DO PBAT PURO E DOS COMPÓSITOS REFORÇADOS COM RESÍDUO DE AÇAÍ . . . . .	90
4.3.3	PROPRIEDADES TÉRMICAS . . . . .	93
4.3.3.1	CALORIMETRIA EXPLORATÓRIA DIFERENCIAL (DSC) . . . . .	93
4.3.3.2	ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA) . . . . .	96

4.3.4	ABSORÇÃO DE ÁGUA . . . . .	99
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>101</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>103</b>
	<b>APÊNDICE A – CURVAS DE TG E DTG . . . . .</b>	<b>124</b>
	<b>APÊNDICE B – CURVAS DE DSC . . . . .</b>	<b>126</b>

# 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de materiais sustentáveis tornou-se um campo de pesquisa significativo, impulsionado pela necessidade de reduzir os impactos ambientais associados aos produtos de consumo. Compósitos poliméricos que incorporam resíduos agrícolas, como a semente de açaí Juçara (*Euterpe edulis*), surgem como alternativas promissoras, combinando biodegradabilidade e aproveitamento de subprodutos de baixo valor econômico (WATAYA et al., 2016; WANG; GANEWATTA; TANG, 2020). Tais compósitos oferecem uma solução para a geração de resíduos, ao mesmo tempo em que potencializam as propriedades mecânicas dos polímeros usados, como o PBAT e outros (FERREIRA et al., 2019).

Além disso, o desenvolvimento de compósitos sustentáveis está alinhado com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, especialmente o ODS 11, que visa "Tornar as cidades e assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis". A integração de resíduos agrícolas, como a semente de açaí, em compósitos poliméricos não só promove a sustentabilidade urbana ao reduzir quantidade de resíduos descartados, mas também contribui para a criação de materiais mais eficientes e ecologicamente corretos para a construção e outras aplicações urbanas (FRAZAO; VALADAO; CALEGARIO, 2022; ONU, 2015).

A utilização de fibras provenientes de resíduos de açaí como reforço em matrizes poliméricas não apenas contribui para a economia circular mas também potencializa propriedades mecânicas específicas do compósito, como resistência e rigidez (ARAUJO et al., 2023). O açaí juçara, especialmente a variedade *Euterpe edulis*, que é presente na região de mata atlântica e seu aproveitamento em compósitos representa uma valiosa agregação de valor a um resíduo que, de outra forma, seria descartado (BARBOSA et al., 2022a; GUEDES et al., 2022).

A utilização da semente de açaí como reforço em matrizes poliméricas biodegradáveis, como o PBAT Poli(adipato-co-tereftalato de butileno), apresenta um potencial significativo para a produção de compósitos com propriedades mecânicas melhoradas, ao mesmo tempo que agrega valor a um resíduo até então subutilizado (MITTAL et al., 2015). O PBAT é um polímero biodegradável conhecido por sua flexibilidade e tenacidade, tornando-o uma escolha adequada para aplicações que requerem essas propriedades (JIAN; XIANGBIN; XIANBO, 2020).

Estudos revelam que a adição de fibras de açaí em matrizes poliméricas como PBAT e outros polímeros pode resultar em compósitos com propriedades mecânicas melhoradas, tornando-os adequados para uma variedade de aplicações, desde embalagens até peças

automotivas (ROSSETO et al., 2019; SHANKAR; RHIM, 2018). A escolha adequada das proporções dos materiais constituintes e das condições de processamento é crucial para otimizar as propriedades mecânicas e a biodegradabilidade dos compósitos (TOGLIATTI et al., 2021; SILVA et al., 2017).

O desenvolvimento de compósitos poliméricos sustentáveis reforçados com resíduos de semente de açaí apresenta-se como uma estratégia promissora para atender às crescentes demandas ambientais e econômicas. Alinhado com o princípio da economia circular, um modelo econômico que busca a reutilização, reciclagem e recuperação de materiais em vez da tradicional economia linear de 'extrair, produzir, descartar', este desenvolvimento é fundamental (SANTOS; SHIBAO; SILVA, 2020). Ao transformar resíduos agrícolas em materiais valiosos, este estudo exemplifica a aplicação prática dos princípios da economia circular, contribuindo para a redução do impacto ambiental e promovendo a sustentabilidade industrial. A circularidade dos materiais ajuda a fechar o ciclo de uso, minimizando o desperdício e promovendo uma gestão mais eficiente dos recursos naturais. Esta pesquisa visa contribuir para o avanço do campo de materiais biodegradáveis, explorando as sinergias entre polímeros biodegradáveis e fibras naturais, com foco em aplicações industriais e ambientalmente responsáveis.

## 1.1 Justificativa

Esta dissertação contribui para o avanço no desenvolvimento de materiais ecoeficientes através do estudo de compósitos de matriz polimérica reforçados com resíduos de semente de açaí. Um compósito desenvolvido com PBAT e resíduos lignocelulósicos pode apresentar propriedades mecânicas comparáveis ou até superiores às de materiais reforçados com fibras sintéticas. A utilização de resíduos de semente de açaí, em particular, oferece vantagens significativas devido às suas características físicas únicas. Estes resíduos possuem baixa densidade e uma natureza porosa, o que pode conferir ao compósito maior rigidez, aumento do módulo elástico e resistência à tração. Além disso, a integração de resíduos lignocelulósicos não só promove a sustentabilidade ao valorizar subprodutos agrícolas que seriam descartados, mas também contribui para a redução do impacto ambiental. Ao substituir fibras sintéticas por resíduos naturais, é possível desenvolver materiais que combinam desempenho mecânico robusto com uma pegada ecológica reduzida. Esse enfoque inovador não só amplia as aplicações potenciais dos compósitos poliméricos biodegradáveis, mas também fortalece o compromisso com práticas sustentáveis e ecoeficientes na engenharia de materiais.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver compósitos poliméricos utilizando PBAT reforçados com resíduos de semente de açaí (*Euterpe edulis*).

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar a composição química e física dos resíduos de semente de açaí para avaliar a viabilidade de sua utilização como reforço em compósitos poliméricos.
- Avaliar morfologicamente a interação física entre os resíduos e a matriz polimérica de PBAT, utilizando técnicas de espectroscopia e microscopia, variando-se a concentração da matéria prima de açaí em 20 e 40%.
- Avaliação da influência do teor dos resíduos na processabilidade, nas propriedades mecânicas e nas propriedades térmicas dos compósitos com o polímero de PBAT.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 O Açaí no Brasil

No Brasil, o açaí (*Euterpe oleracea* Mart.) desempenha um papel significativo tanto em termos econômicos quanto culturais, sendo um dos principais alimentos consumidos pelas comunidades ribeirinhas na Amazônia Brasileira. Além de ser uma fonte primária de renda para pequenos produtores, sua popularidade cresceu exponencialmente desde a década de 1990, devido ao reconhecimento de suas propriedades como alimento energético e funcional (JUNIOR et al., 2019). Essa fruta, inicialmente consumida principalmente na região Norte, atravessou fronteiras estaduais, ganhando espaço nos hábitos alimentares de todo o país. Sua popularidade disparou nas últimas décadas, impulsionada pela descoberta de suas ricas qualidades antioxidantes e energéticas, fazendo com que o açaí se tornasse um símbolo de bem-estar e saúde. A expansão de seu consumo transformou o açaí em uma importante commodity na economia brasileira, gerando empregos, estimulando a agroindústria e promovendo o Brasil no cenário global como líder na produção e exportação dessa fruta valorizada (SILVEIRA et al., 2023; MACIEL-SILVA et al., 2021).

A produção de açaí se concentra majoritariamente no estado do Pará, onde, em 2022, foram produzidas aproximadamente 1,6 milhão de toneladas do fruto, a produção gera uma renda significativa para o estado, sustentando comunidades locais e impulsionando a economia regional (IBGE, 2023). De acordo (JUNIOR et al., 2019), além da contribuição econômica, existe a importância cultural do açaí no Brasil que está enraizada profundamente nas tradições e na vida cotidiana das comunidades locais. Sua popularidade não apenas sustenta comunidades inteiras, mas também reflete um modo de vida que valoriza a harmonia com a natureza e o aproveitamento sustentável de seus recursos. O açaí é mais que um alimento; é um elemento de identidade cultural.

A diversidade de espécies de açaí no Brasil, como a *Euterpe oleracea*, *Euterpe precatória* e *Euterpe edulis*, demonstra a riqueza da biodiversidade amazônica e as diferentes características e usos que cada uma pode oferecer. Enquanto a *Euterpe oleracea* é amplamente conhecida e cultivada, principalmente por sua polpa nutritiva, a *Euterpe precatória* e a *Euterpe edulis* também desempenham papéis importantes, tanto em termos ecológicos quanto econômicos (SCHAUSS, 2010; SCHULZ et al., 2016; FRANCISCONI et al., 2022). Apesar do imenso potencial econômico, esse fruto enfrenta um problema comum na indústria, a geração de resíduos e como reaproveitá-los com o objetivo de promover a economia circular (COSTA et al., 2024). Diversos estudos têm sido conduzidos na área, exemplificados por (AZEVEDO et al., 2021), que examinaram o desempenho tecnológico

das fibras naturais de açaí em argamassas à base de cimento. Além disso, há pesquisas como a de (PESSÔA et al., 2019), que investigaram o uso de resíduos do processamento do açaí como biomassa para a geração de energia. Outros estudos abordam o pré-tratamento com água subcrítica e as tecnologias de digestão anaeróbica desses resíduos, visando à sua valorização, como os conduzidos por (MACIEL-SILVA et al., 2021).

### 2.1.1 Importância Econômica

Nos últimos anos, o açaí consolidou-se como um dos pilares da agroindústria brasileira, refletindo não apenas sua importância nutricional e medicinal, mas também seu valor econômico crescente. De acordo com dados do *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística* (IBGE), a produção de açaí no Brasil experimentou um aumento significativo, de 1.091.667 toneladas em 2016 para impressionantes 1.699.588 toneladas em 2022, acompanhada de um aumento substancial no valor de mercado, de aproximadamente 2 bilhões de reais para mais de 6 bilhões de reais no mesmo período. A Figura 1 resume o crescimento anual da produção e valor do açaí, destacando não apenas sua importância como commodity agrícola, mas também o potencial do Brasil como líder na exportação dessa fruta valorizada (IBGE, 2023). Esse aumento sustentado destaca não apenas a crescente demanda interna e externa pelo “ouro roxo” da Amazônia, mas também sublinha a importância econômica significativa do açaí para o Brasil. Tivemos o processo de globalização do açaí, o que transformou um recurso natural em uma significativa fonte de receita econômica. Este processo envolveu a expansão do mercado do açaí, inicialmente consumido principalmente na forma de polpa na Amazônia, para uma ampla variedade de produtos comercializados globalmente, incluindo bebidas, cosméticos e até mesmo produtos ligados à indústria da sexualidade, como preservativos e lubrificantes. Essas transformações não apenas elevaram o açaí ao status de “superfruta” no mercado global, mas também destacaram o papel crucial da mídia e das novas formas de consumo na disseminação da popularidade do açaí fora da Amazônia. O reconhecimento internacional do açaí como um alimento energético e saudável contribuiu para um novo ciclo de “moda alimentar”, impulsionando ainda mais a sua valorização econômica e cultural (CORTEZZI, 2020; VELOZ, 2020).

O açaí, além de ser uma força motriz para a economia, através de práticas de manejo sustentável e contribuições significativas para a economia agrícola, também desempenha um papel crucial no turismo gastronômico e na inovação empresarial. A riqueza e a autenticidade do açaí atraem turistas para a região Amazônica, ansiosos por experimentar este superalimento em seu habitat natural, impulsionando o turismo e promovendo uma apreciação mais profunda da cultura e da biodiversidade local (COSTA et al., 2024). Além disso, o açaí estimula a inovação em pequenas empresas, inspirando uma miríade de startups e estabelecimentos culinários a integrar o açaí em seus produtos e menus, transformando este fruto em um ingrediente chave para uma variedade de ofertas gastronômicas. Essa

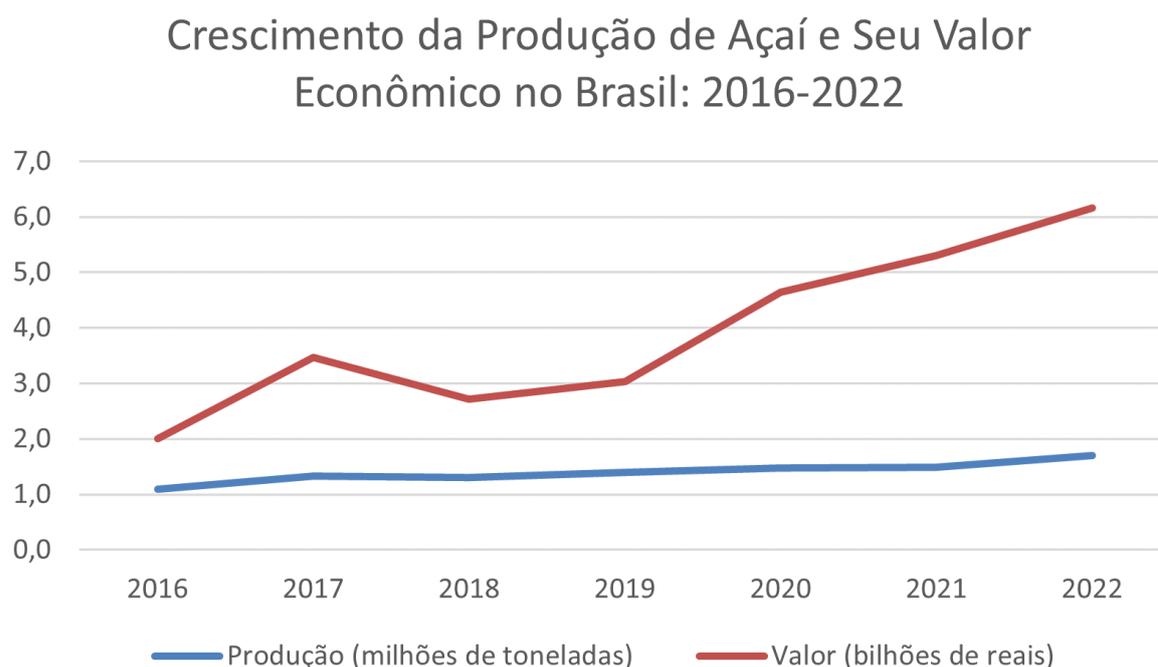


Figura 1 – Produção de açaí e seu valor econômico no Brasil: 2016-2022. Fonte: (IBGE, 2023)

tendência não apenas abre novos mercados e oportunidades de negócios, mas também realça o valor do açaí como um símbolo de sustentabilidade e inovação. O trabalho de Barbosa et al. (2022b) ilustra como o manejo sustentável nas áreas de açaí pode equilibrar efetivamente a produção com a conservação ambiental, enquanto estudos como os de Filho et al. (2021) e Lopes et al. (2019) destacam o crescente reconhecimento do açaí no mercado global e seu potencial para promover um desenvolvimento econômico que é simultaneamente sustentável e inovador. Essa intersecção entre turismo, inovação empresarial e manejo sustentável do açaí reflete uma abordagem holística para o desenvolvimento na Amazônia, alavancando o açaí não apenas como um recurso econômico, mas também como um catalisador para o turismo responsável e a inovação empreendedora. No entanto, para fechar o ciclo desta bioeconomia emergente, é crucial enfatizar a importância do reaproveitamento integral dos resíduos gerados na produção do açaí. A adoção de práticas de economia circular, onde os resíduos são vistos como recursos valiosos para novos processos produtivos, poderia não apenas minimizar o impacto ambiental, mas também criar oportunidades econômicas. A transformação de resíduos de açaí em produtos de valor agregado exemplifica como o fechamento do ciclo de bioeconomia pode contribuir para a sustentabilidade e a autossuficiência das regiões produtoras, maximizando os benefícios socioeconômicos do açaí enquanto se minimizam seus impactos ambientais (COSTA et al., 2024).

### 2.1.2 Diversidade de Espécies no Brasil

A diversidade do açaí no Brasil é um reflexo da sua adaptação a diferentes ecossistemas nas diversas regiões, promovendo não apenas a conservação da biodiversidade, mas também oferecendo alternativas sustentáveis para o desenvolvimento socioeconômico das comunidades locais. O mercado global crescente para o açaí não estimula apenas a produção e consumo locais, mas também impulsiona a pesquisa e o desenvolvimento de novas aplicações para este superfruto, ressaltando sua importância em uma economia baseada na valorização da biodiversidade e na sustentabilidade ambiental (PEPPER; ALVES, 2017).

As espécies se diferenciam principalmente pela região de cultivo (figura 2) e composição fitoquímica e têm contribuído significativamente para a economia e a nutrição no Brasil. A *Euterpe oleracea* é predominantemente cultivada nos estados do Pará e Amapá, com sua safra estendendo-se de meados de junho a dezembro. Já a *Euterpe precatoria*, com uma safra de fevereiro a junho, é mais encontrada nos estados de Rondônia, Acre e Mato Grosso. Por sua vez, a *Euterpe edulis*, comumente conhecida como juçara, é nativa da Mata Atlântica e apresenta uma distribuição geográfica que inclui o estado do Maranhão, a região costeira do estado da Bahia e o Espírito Santo. A safra de frutos de *E. edulis* começa em dezembro e vai até fevereiro, período em que esta espécie contribui significativamente para a diversidade alimentar e nutricional das comunidades locais (SCHAUSS, 2010).

A diversidade de espécies de açaí (*Euterpe*) no Brasil demonstra uma rica interação entre as práticas culturais, a economia e a conservação ambiental. O estudo de Lay et al. (2021) revela a importância do conhecimento tradicional na conservação da biodiversidade amazônica, destacando a relação simbiótica entre as populações tradicionais da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Piagaçu Purus, no Amazonas, e o uso sustentável do açaí (*Euterpe precatoria*). Este conhecimento não apenas sustenta a subsistência das comunidades locais, mas também sublinha a relevância cultural e econômica do açaí, fortalecendo práticas que promovem a conservação ambiental. Por outro lado, Matos et al. (2017) analisam a dinâmica de mercado das espécies *Euterpe precatoria* e *Euterpe oleracea*, ressaltando a importância econômica de investir em plantações de *Euterpe precatoria* nos estados do Pará e Amazonas. Este investimento é motivado pelo alto conteúdo de antocianinas e pela produção de frutos em períodos complementares à safra da *Euterpe oleracea*, o que pode ajustar a oferta anual e potencialmente estabilizar os preços no mercado.

Além disso, a crescente demanda pelo açaí amazônico tem estimulado a produção de polpa da palmeira juçara (*Euterpe edulis*) na Mata Atlântica, conforme discutido por Trevisan et al. (2015). Esta prática não apenas beneficia a conservação da espécie juçara, anteriormente ameaçada pela extração predatória de palmito, mas também oferece uma nova fonte de renda para as comunidades locais, exemplificando uma abordagem

sustentável que alia conservação ambiental ao desenvolvimento econômico. Esses estudos coletivamente ilustram como a valorização e a gestão sustentável das espécies de açaí podem contribuir significativamente tanto para a conservação da biodiversidade quanto para o desenvolvimento socioeconômico nas regiões amazônica e da Mata Atlântica, promovendo um modelo de uso dos recursos naturais que é ecologicamente responsável e economicamente viável.



Figura 2 – Áreas de ocorrência das espécies *Euterpe oleracea*, *Euterpe precatoria* e *Euterpe edulis* no Brasil. Fonte: (Flora do Brasil, 2024; OLIVEIRA et al., 2022; CARVALHO, 2010)

### 2.1.3 *Euterpe edulis*

A *Euterpe edulis*, conhecida popularmente como juçara, destaca-se não apenas pela sua relevância ecológica, mas também pelo seu potencial econômico significativo na Mata Atlântica. A diversidade genética entre os morfotipos de *E. edulis* revela uma estrutura genética complexa e distintiva, que ressalta a importância da conservação genética da espécie. Coelho et al. (2020) descobriram que a variação morfológica entre os morfotipos de juçara está fortemente associada a uma estrutura genética definida, mesmo entre populações geograficamente próximas, sugerindo a necessidade de estratégias de conservação que considerem essa diversidade genética intrínseca.

Além disso, a pesquisa de Trevisan et al. (2015) sobre a produção de polpa de juçara na Mata Atlântica demonstrou como a demanda pelo açaí amazônico (*Euterpe oleracea*) estimulou a exploração sustentável de juçara, proporcionando uma alternativa econômica para as comunidades locais e contribuindo para a conservação da espécie. A análise de Zamudio et al. (2021) sobre o sistema de polinização de *E. edulis* indica que a espécie possui um sistema de polinização ambófilo, com uma predominância de polinização pelo vento sobre a polinização por insetos em certos contextos ecológicos, destacando a complexidade dos mecanismos reprodutivos da juçara e a necessidade de considerar essas dinâmicas na sua gestão e conservação.

### 2.1.3.1 Distribuição e Características

A distribuição geográfica da juçara se estende por vastas regiões do Brasil, ocupando áreas no Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste e Sul. Enraizada nos biomas da Cerrado e Mata Atlântica, a juçara floresce em uma extensa gama de estados, desde o Rio Grande do Norte até o Rio Grande do Sul, abrangendo ainda o Distrito Federal. Sua presença vai além das fronteiras nacionais, alcançando o nordeste da Argentina e o sudeste do Paraguai (CONTE et al., 2000; REIS; REIS, 2000).

Com um único caule e ausência de novos crescimentos laterais, a juçara assume uma postura singular, diferenciando-se do açaí comum (*Euterpe oleracea Martius*), que se espalha em várias direções, a figura 3 exibem bem o caule sólitario da juçara. Sua natureza monoica, abrigando órgãos sexuais femininos e masculinos no mesmo indivíduo, promove uma polinização eficiente por meio de insetos, enquanto a dispersão de seus frutos é amplamente conduzida por aves e, ocasionalmente, por meio da queda direta. Ao contemplar a palmeira adulta de *E. edulis*, a majestosa planta revela um caule solitário, erguendo-se entre 5 m e 12 m, com folhas que variam de 0,8 m a 1,4 m em um vibrante tom de verde oliva a verde escuro. Essas características tornam a *Euterpe edulis* uma espécie única, não apenas em termos botânicos, mas também pela riqueza visual que adiciona à Mata Atlântica (QUEIROZ, 2000; HENDERSON, 2000).

### 2.1.3.2 Importância Ecológica e Utilização

O uso tradicional da espécie juçara revela uma profunda interconexão entre a palmeira e as comunidades que compartilham as paisagens da Mata Atlântica. Com uma versatilidade notável, a juçara desempenha papéis fundamentais em diversas esferas da vida cotidiana. Seu uso madeireiro é evidenciado na confecção de mourões de cerca, caibros e ripas, contribuindo para a construção de estruturas locais. Na alimentação humana, a juçara se destaca pelo palmito comestível, apreciado tanto em sua forma natural quanto em conservas. Os frutos, cuja polpa lembra o açaí da Amazônia, são transformados em sucos, sorvetes, e ainda são utilizados na elaboração de molhos, pastas e sopas (CARVALHO, 2003; EMBRAPA, 2023). Além disso, a juçara revela sua importância medicinal, com a polpa rica em antioxidantes. No campo do artesanato, suas folhas são hábeis na fabricação de cadeiras de palha, enquanto as sementes são empregadas na confecção de miçangas. Na apicultura, suas flores são fonte de néctar, contribuindo para a produção de mel. Não apenas funcional, a juçara mantém laços culturais fortes, sendo um ingrediente essencial na torta capixaba tradicionalmente consumida na Semana Santa, conforme descrito por produtores rurais na região, ressaltando sua presença marcante no arsenal cultural e gastronômico local (GUIMARÃES; SOUZA, 2017).

A produção e a economia do *Euterpe edulis*, conhecido como juçara, desempenham um papel significativo no cenário brasileiro. Anteriormente, a região sul e sudeste do



Figura 3 – Árvore de Juçara *Euterpe edulis*. Fonte: (GODOY et al., 2022).

Brasil era abastecida exclusivamente pelo açaí da Amazônia. No entanto, desde 2004, a implementação de unidades de processamento de juçara, como a de Garuva, Santa Catarina, diversificou o mercado local (SCHULZ et al., 2016). Agora a produção do açaí derivado da palmeira-juçara *Euterpe edulis* representa uma realidade consolidada em vários municípios de Santa Catarina e outras regiões do Sudeste e Sul do Brasil. Iniciativas, que datam de mais de uma década, envolvem centenas de famílias de agricultores familiares, que se dedicam ao cultivo, coleta e beneficiamento dos frutos de *E. edulis*. Essa atividade resulta no processamento anual de cerca de 150 a 200 mil kg de frutos de juçara em Santa Catarina. A produção também se estende ao Vale do Ribeira-SP, com estimativas entre 665 a 1.746 kg de polpa de juçara, e ao litoral do Rio Grande do Sul, com uma produção estimada de 28,5 mil kg de polpa (CONAB, 2020). O processo de comercialização da

juçara é semelhante ao do açaí, envolvendo etapas de seleção, lavagem e maceração dos frutos. A polpa resultante é amplamente consumida na forma de sucos, sorvetes e outros produtos alimentícios. Além disso, a polpa de juçara, por ser colhida no primeiro semestre, apresenta vantagens logísticas em relação ao açaí, cuja colheita ocorre no segundo semestre (SCHULZ et al., 2016). Apesar de ainda não existir legislação exclusiva para a produção de polpa de juçara, sua comercialização é expressiva, oferecendo oportunidades para o desenvolvimento sustentável e a geração de renda nas comunidades locais. Além da polpa, a juçara apresenta outra valiosa commodity: o palmito. Extraído do miolo do caule, o palmito de juçara é reconhecido por sua qualidade e métodos de produção sustentáveis. Apesar de normas ambientais regulamentarem sua extração, muitos produtores defendem a necessidade de uma abordagem mais flexível, permitindo o desbaste da área de produção para favorecer o desenvolvimento de árvores mais jovens e produtivas (GODOY et al., 2022).

## 2.2 Resíduos de Lignocelulósicos

A biomassa lignocelulósica (BL) constitui uma parte significativa dos resíduos gerados globalmente, provenientes principalmente da agricultura, silvicultura e processamento de alimentos. Esses resíduos incluem palha, cascas, bagaço, e outros subprodutos agrícolas e florestais. Devido à sua composição rica em carbono e sua abundância, há um crescente interesse na valorização desses materiais para a produção de bioenergia, bioprodutos e bioquímicos. A biomassa lignocelulósica, composta por celulose, hemicelulose e lignina, destaca-se como o recurso biológico mais abundante do planeta, com uma produção anual estimada em 181,5 bilhões de toneladas. A utilização atual de aproximadamente 8,2 bilhões de toneladas dessa biomassa sublinha o vasto potencial subaproveitado, especialmente no que tange à conversão em produtos químicos e energéticos por meio de biorrefinarias lignocelulósicas (DAHMEN et al., 2019; GALLEGO-GARCÍA et al., 2023). No entanto, de acordo com Tišma, Bucić-Kojić e Planinić (2021), apenas uma fração dessa biomassa é utilizada atualmente, destacando seu potencial subutilizado. As principais fontes de BL incluem resíduos de colheita, como palhas e cascas, subprodutos da indústria de processamento de alimentos, como bagaço de cana e resíduos de cereais, além de culturas dedicadas como miscanto e switchgrass. O resíduo de açaí, especificamente, é um exemplo de BL proveniente da indústria de processamento de alimentos. Após a extração da polpa do açaí, restam caroços e fibras que constituem uma forma dessa biomassa como mostrado na figura 4. A valorização da BL, incluindo resíduos de açaí, em produtos de alto valor agregado requer a implementação de conceitos de biorrefinaria modular, como discutido por Dahmen et al. (2019). Métodos de pré-tratamento, especialmente os biológicos, são fundamentais na utilização desses resíduos lignocelulósicos, com foco no isolamento de lignina e seu potencial utilização dentro de biorrefinarias lignocelulósicas.



Figura 4 – Açaí: resíduos e produtos gerados. fonte: (LEMOS et al., 2021)

Todos os resíduos gerados pelo processamento do fruto de todas as espécies de açaí representam um desafio ambiental e para todos os resíduos já se estudam alternativas sustentáveis, como a Sato et al. (2019), que recentemente estudou o biochar, um subproduto obtido através da pirólise dos resíduos de açaí, como alternativa sustentável para a disposição desses resíduos, tendo potencial uso como condicionador de solo na região amazônica devido às suas propriedades físico-químicas favoráveis. Adicionalmente, a diversidade genética do açaí, com diferentes genótipos desenvolvidos por programas de melhoramento, destaca o potencial de inovação e valorização do fruto em diversas frentes, incluindo a nutrição, saúde e uso industrial, refletindo o rico patrimônio biocultural da Amazônia (TORMA et al., 2020).

### 2.2.1 Visão Geral sobre Resíduos Lignocelulósicos

A biomassa lignocelulósica (BL) é um recurso orgânico abundante e promissor, composto essencialmente por três principais componentes: celulose, hemicelulose e lignina. A celulose, um polissacarídeo composto por unidades de glicose ligadas por ligações  $\beta$ -1,4-glicosídicas igual na figura 5, é o componente orgânico mais abundante na terra, formando a estrutura esquelética primária das paredes celulares das plantas. Como elemento fundamental da biomassa lignocelulósica, a celulose desempenha um papel crucial na indústria de bioenergia e bioprodutos, servindo como substrato para a produção de bioetanol e outros biocombustíveis. A robustez da celulose decorre de sua organização cristalina e da formação de microfibrilas, que conferem resistência e estabilidade à estrutura das plantas. No entanto, essa mesma cristalinidade e a densa rede de hidrogênio tornam a celulose resistente à hidrólise, desafiando sua conversão em açúcares fermentáveis. Tecnologias de pré-tratamento visam modificar essa estrutura cristalina, aumentando a acessibilidade enzimática e a eficiência da conversão. A valorização eficiente da celulose, portanto, não apenas apoia o desenvolvimento sustentável ao substituir combustíveis fósseis, mas também

impulsiona a economia circular ao transformar resíduos agrícolas e florestais em recursos valiosos (WOICIECHOWSKI et al., 2020; KRASZNAI et al., 2018).

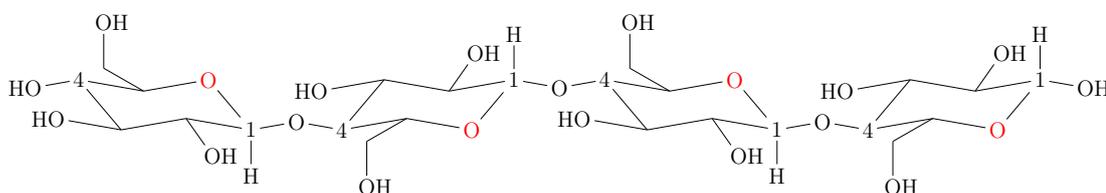


Figura 5 – Estrutura molecular repetida da celulose.

A hemicelulose, uma componente importante da biomassa lignocelulósica, destaca-se por sua composição heterogênea e complexa, constituída por uma matriz de polissacarídeos, incluindo xilanos, mananos e galactanos. Diferentemente da celulose, a hemicelulose possui uma estrutura ramificada e não é tão cristalina (figura 6), o que facilita sua hidrólise. Este polímero desempenha um papel fundamental na matriz celular das plantas, atuando como uma ponte entre a celulose e a lignina, e contribuindo para a integridade estrutural e flexibilidade da parede celular. A hemicelulose é de particular interesse na produção de biocombustíveis e produtos químicos renováveis, devido à sua capacidade de ser convertida em açúcares fermentáveis e outros compostos de valor agregado, como o furfural. As técnicas de pré-tratamento hidrotérmico têm se mostrado promissoras na desagregação seletiva da hemicelulose da biomassa lignocelulósica, permitindo a recuperação eficiente deste polímero para sua posterior valorização. A exploração eficaz da hemicelulose representa um passo significativo para o avanço das biorefinarias lignocelulósicas, destacando o potencial deste componente na transição para uma economia mais verde e sustentável (LUO et al., 2019; BENEDETTI et al., 2019).

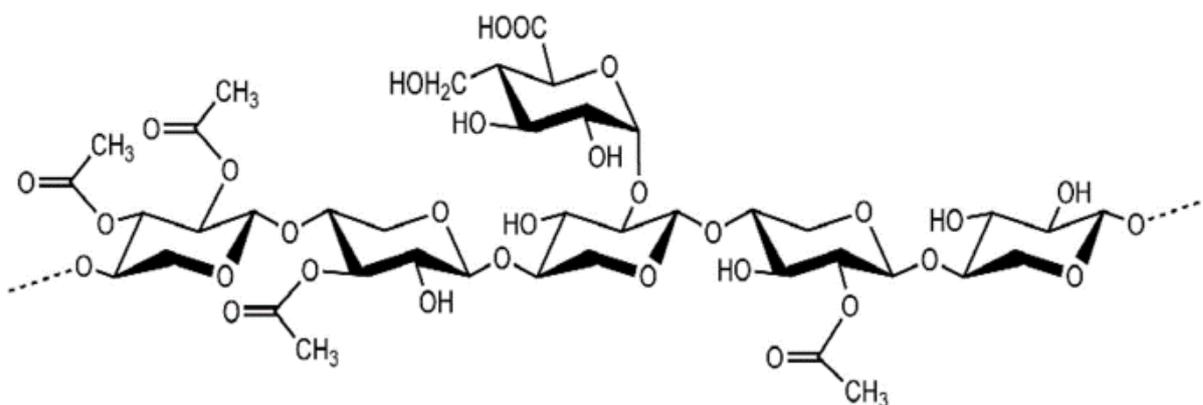


Figura 6 – Estrutura molecular de hemicelulose

Lignina, um componente integral da biomassa lignocelulósica, é um polímero complexo e tridimensional composto por unidades de fenilpropano como mostrado na figura 7, conferindo rigidez e resistência estrutural às plantas. Caracterizada por sua heterogeneidade e recalcitrância, a lignina desempenha um papel importante na proteção da celulose e da hemicelulose contra a degradação enzimática. Esse atributo, embora essencial para a

integridade das plantas, representa um desafio significativo para a conversão eficiente de biomassa em biocombustíveis e produtos químicos. Recentemente, avanços nas estratégias de pré-tratamento têm se concentrado na modificação ou remoção seletiva da lignina, visando reduzir sua recalcitrância e melhorar a acessibilidade dos carboidratos. Métodos como o uso de líquidos iônicos, solventes de eutéticos profundos e tratamentos hidrotérmicos surgem como técnicas promissoras para a valorização da lignina, transformando-a de um subproduto em um recurso valioso para a produção de materiais renováveis, produtos químicos e combustíveis. Essas abordagens não apenas facilitam a degradação da lignocelulose mas também abrem novos caminhos para a utilização sustentável da lignina, destacando seu potencial em uma bioeconomia circular (YOO et al., 2020; HASANOV et al., 2020).

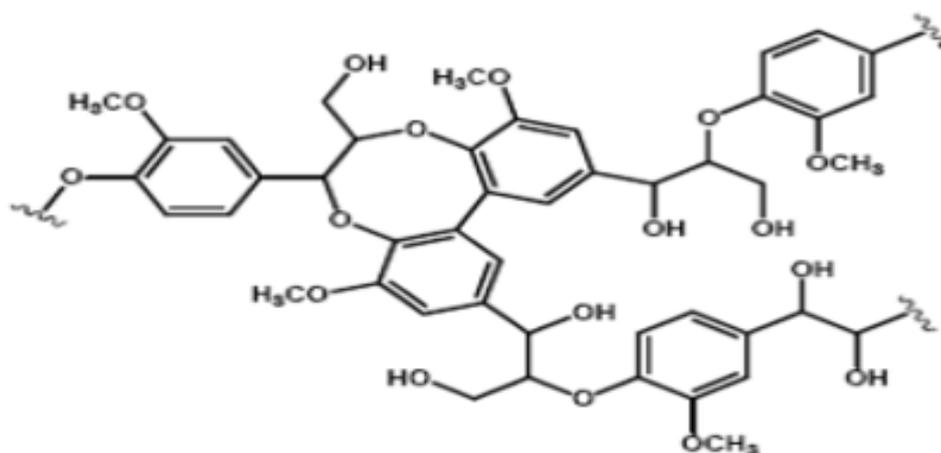


Figura 7 – Estrutura molecular de lignina

O entendimento detalhado da composição e estrutura desses componentes é fundamental para o desenvolvimento de tecnologias de pré-tratamento eficientes, capazes de desbloquear o potencial energético dos resíduos lignocelulósicos e possibilitar sua transformação em uma ampla gama de produtos valorizados. Os avanços recentes em métodos de pré-tratamento ácido e alcalino, assim como as inovações tecnológicas, têm mostrado potencial para superar a recalcitrância da BL e maximizar a valorização de seus componentes, movendo-se em direção a uma bioeconomia sustentável (WOICIECHOWSKI et al., 2020; KRASZNAI et al., 2018).

## 2.2.2 Caracterização e Potencial

A caracterização das sementes despulpadas de açaí revela um potencial interessante para a valorização desses resíduos, principalmente devido à sua composição química e propriedades físicas (COSTA et al., 2024). No trabalho de Tavares et al. (2020), os resíduos de açaí, particularmente as fibras extraídas das sementes, exibem uma composição aproximada de 40% de celulose, 12% de hemicelulose e 40% de lignina, além de um

teor de umidade de 9% e 2% de cinzas. O estudo de Queiroz et al. (2020) demonstra que as sementes de açaí podem ser transformadas em carvão ativado de alta superfície, oferecendo uma solução inovadora para a remoção de íons metálicos da água, aproveitando efetivamente os resíduos gerados durante o processamento do açaí. A pesquisa de Monteiro et al. (2019) revela que as sementes contêm um alto teor de manano, um componente da hemicelulose presente em várias formas de biomassa lignocelulósica, o que representa cerca de 50% do seu peso seco, mostrando a viabilidade de converter esse polissacarídeo em manose, um açúcar com valor comercial, por meio de hidrólise enzimática.

Além disso, Melo et al. (2021) exploram a semente de açaí como fonte de lipídios, fibras e compostos fenólicos com atividade antioxidante, ressaltando o alto conteúdo de fibras dietéticas (86%) e um perfil interessante de ácidos graxos insaturados e saturados, indicando aplicações potenciais nas indústrias cosmética e alimentícia. O estudo de Souto et al. (2021) destaca a importância dos resíduos de açaí como biomassa para bioenergia, evidenciando sua condutividade térmica efetiva e como esta afeta a eficiência do processo de bioenergia. Os resíduos de açaí, resultantes do processamento industrial, possuem características físicas e químicas que os tornam candidatos promissores para a produção de energia térmica e a geração de compostos valorizados por meio de processos de conversão termoquímica. Adicionalmente, o trabalho de Buratto, Cocero e Martin (2021) na extração assistida por micro-ondas destes resíduos indica a presença de compostos fenólicos e capacidades antioxidantes significativas, sugerindo possíveis aplicações em indústrias cosméticas ou alimentícias, além do potencial energético.

### 2.2.3 Aplicações Inovadoras de Resíduos de Açaí em Compósitos

O aproveitamento dos resíduos de açaí, especialmente sementes e fibras, em compósitos poliméricos, representa um campo emergente na pesquisa por materiais sustentáveis e inovadores. A busca por alternativas ecológicas para reforçar matrizes poliméricas tem levado à exploração desses resíduos, não só para aprimorar propriedades mecânicas e térmicas dos compósitos, mas também para promover uma gestão ambiental eficiente. A integração de resíduos de açaí em diversas matrizes poliméricas sugere uma melhoria significativa nas propriedades dos compósitos, indicando um caminho promissor para aplicações inovadoras em setores variados, desde automotivo até a construção civil.

Por exemplo, a pesquisa de Barbosa et al. (2022b) destaca a introdução de resíduos de sementes de açaí como reforço em compósitos de polímeros aumentou a resistência mecânica e a estabilidade térmica do material final, oferecendo uma alternativa sustentável e de baixo custo para reforços tradicionais em compósitos poliméricos. O uso de fibras de açaí em compósitos de borracha natural também demonstrou resultados promissores. Um estudo avaliou as propriedades térmicas e mecânicas de compósitos de borracha natural reforçados com fibras de açaí, observando uma melhoria na resistência ao impacto e na estabilidade

térmica. Essas descobertas abrem caminho para aplicações inovadoras de resíduos de açaí em setores como automotivo e construção civil, onde a demanda por materiais sustentáveis e de alta performance é crescente (MARTINS et al., 2008). A pesquisa em compósitos cimentícios também se beneficia das fibras de açaí. Como observado por Silva et al. (2023), o tratamento alcalino dessas fibras melhora significativamente sua adesão à matriz de cimento, resultando em compósitos com propriedades mecânicas superiores. Esse avanço sugere uma nova aplicação valiosa para as folhas de açaí, geralmente descartadas como resíduos, contribuindo para o desenvolvimento de materiais de construção mais sustentáveis e eficientes.

O estudo de Tavares et al. (2020) desbrava novos caminhos na utilização de fibras de açaí (*Euterpe oleracea*) para reforçar compósitos poliméricos, evidenciando um método inovador através do tratamento térmico dessas fibras em autoclave. Esse processo tem como objetivo principal modificar as propriedades físicas, químicas e morfológicas das fibras, otimizando sua interação com matrizes de polipropileno (PP). Para tal, o polipropileno enxertado com anidrido maleico (PPgMA) é empregado como agente de acoplamento, evidenciando a eficácia desse tratamento na melhoria da adesão fibra-matriz. Esse avanço não só sublinha o potencial das fibras de açaí, um subproduto frequentemente descartado da produção da fruta, como um reforço valioso para compósitos poliméricos, mas também propõe uma alternativa sustentável e eficiente para o aproveitamento desses resíduos. A aplicação de tratamentos térmicos às fibras vegetais se apresenta como um passo significativo em direção à produção de compósitos mais resistentes e ambientalmente amigáveis, alinhando-se com os princípios de economia circular e inovação em materiais. Em paralelo, o estudo conduzido por Silva et al. (2023) reforça essa visão inovadora ao explorar as fibras de açaí como reforço em ecocompósitos de Poliestireno de Alto Impacto (HIPS). A investigação foca especialmente no efeito do tratamento alcalino com NaOH nas propriedades estruturais, térmicas e mecânicas dos compósitos. Este enfoque detalhado sobre o tratamento alcalino como um método de preparação das fibras de açaí para integração em ecocompósitos revela novas possibilidades para o uso dessas fibras naturais em aplicações avançadas de engenharia de materiais, sublinhando o compromisso contínuo com a inovação sustentável no campo dos compósitos poliméricos.

Em um esforço contínuo para fomentar inovações sustentáveis, o estudo conduzido por Costa et al. (2022) marca um avanço significativo na aplicação de fibras naturais em tecnologias avançadas, especificamente no desenvolvimento de sensores de pressão. Este trabalho inovador utiliza fibras de *Euterpe oleracea*, revestidas com polianilina (PANI), e as incorpora em uma matriz de polidimetilsiloxano (PDMS). A abordagem tem como objetivo superar os desafios relacionados ao desempenho mecânico e elétrico de compósitos reforçados com fibras naturais, especialmente sob condições de pressão variáveis. A combinação de fibras de açaí com PANI e PDMS não apenas viabiliza uma nova utilidade para os resíduos de açaí, como também representa um passo importante no campo dos materiais compósitos

e sensores, evidenciando a viabilidade desses ecocompósitos em aplicações de sensoriamento de pressão. A iniciativa de Costa et al. (2022) enfatiza a importância de adotar estratégias de design que sejam tanto sustentáveis quanto inovadoras, alinhadas com os princípios de desenvolvimento sustentável e avanço tecnológico.

Seguindo a tendência de explorar aplicações sustentáveis para resíduos agrícolas, o estudo de Nogueira et al. (2022) destaca a produção de filmes biodegradáveis ativos a partir de farinha de feijão vermelho e extrato de semente de açaí. Esses filmes foram desenvolvidos com a intenção de serem utilizados em embalagens de azeite de oliva extravirgem, demonstrando uma melhoria notável nas propriedades mecânicas e antioxidantes. A incorporação de 0,5% a 10% de extrato de semente de açaí resultou em um aumento de até 100% na resistência à tração dos filmes, além de reduzir a solubilidade e a transparência e aumentar tanto a cristalinidade relativa quanto a atividade antioxidante. Essas melhorias dependem da concentração do extrato adicionado, apresentando uma abordagem inovadora para prolongar a vida útil e preservar a qualidade de produtos alimentícios sensíveis. Adicionalmente, a aplicação de fibras naturais não se limita à produção de sensores ou embalagens. Como discutido por Lima et al. (2022), há um crescente interesse na utilização dessas fibras, incluindo as de açaí, na construção civil para reforçar compósitos cimentícios. Este estudo oferece uma visão abrangente sobre o potencial das fibras naturais da Amazônia, enfatizando os avanços e desafios associados à sua integração em materiais de construção. A diversidade e a abundância de fibras na região amazônica, dada sua biodiversidade única, abrem portas para o desenvolvimento de soluções construtivas mais sustentáveis e ecológicas.

Estes estudos ilustram o vasto potencial dos resíduos de açaí em promover inovações em compósitos, alinhando-se com os objetivos de sustentabilidade e economia circular. A incorporação desses resíduos não apenas valoriza um subproduto da indústria do açaí, mas também contribui para o desenvolvimento de materiais com melhor desempenho e menor impacto ambiental.

## 2.3 COMPÓSITOS: FUNDAMENTOS E APLICAÇÕES

Os materiais compósitos representam uma classe distinta de materiais engenheirados que são formados pela combinação estratégica de dois ou mais materiais com propriedades físicas e químicas notavelmente diferentes (RAJAK et al., 2019). Essa combinação é projetada para produzir um novo material cujas propriedades são superiores às dos componentes individuais quando operam isoladamente. A principal motivação por trás do desenvolvimento desses materiais reside na busca por características otimizadas como resistência, rigidez, densidade, resistência térmica e elétrica, que são essenciais para atender às exigências de aplicações específicas (BIERMANN, 2018).

Os compósitos são tipicamente classificados com base no tipo de matriz - que pode ser polimérica, metálica, cerâmica ou de carbono - e no tipo de reforço utilizado, que varia de fibras (sintéticas ou naturais) a partículas ou escamas. A matriz atua como o meio contínuo, mantendo unido o material de reforço, que é incorporado para aprimorar as propriedades mecânicas e físicas do compósito (GEORGE, 2015). Esta sinergia entre os componentes resulta em propriedades aprimoradas, que são cuidadosamente ajustadas para cumprir com as necessidades específicas de uma ampla gama de aplicações. A fabricação de compósitos exige um entendimento profundo das propriedades dos materiais constituintes, bem como dos processos de fabricação. Esses processos incluem técnicas como moldagem por compressão, extrusão, moldagem por injeção, e laminação, cada uma adaptada para maximizar as propriedades desejadas do compósito final, levando em consideração fatores como orientação do reforço, distribuição homogênea dos materiais, e a minimização de defeitos estruturais (CALLISTER; RETHWISCH, 2018; HSISSOU et al., 2021).

Os compósitos oferecem uma versatilidade e capacidade de personalização das propriedades que os tornam materiais atraentes para setores como o aeroespacial, automotivo, construção civil, desporto, eletrônica e biomédica. Esta diversidade de aplicações sublinha a importância contínua da pesquisa e desenvolvimento na área de materiais compósitos, com o objetivo de melhorar suas propriedades e explorar novos potenciais de aplicação (CALLISTER; RETHWISCH, 2018; RAJAK et al., 2019; BIERMANN, 2018). No universo dos materiais compósitos, uma vasta gama de materiais é empregada em sua fabricação, o que naturalmente conduziu à necessidade de uma classificação sistemática desses materiais com base em suas características distintas. Uma das principais distinções se dá quanto à origem do material de reforço, que pode ser de origem natural ou sintética. No campo da engenharia, os materiais compósitos são predominantemente sintéticos, refletindo o foco principal das pesquisas nessa área (CALLISTER; RETHWISCH, 2018; RAJAK et al., 2019).

Quanto à sua classificação, esta é tipicamente baseada no tipo e nas particularidades do reforço que compõe a matriz. Essa classificação pode ser visualizada de forma esquemática, como ilustrado na figura 8, definida a partir do tipo de reforço. Os materiais compósitos são, portanto, classificados em função das características geométricas da fase dispersa, onde fatores como a forma, o tamanho, a distribuição e a orientação do reforço desempenham um papel importante na determinação dos tipos de compósitos existentes.

### 2.3.1 Compósitos Poliméricos

Os compósitos poliméricos são materiais que combinam polímeros com reforços (como fibras ou partículas) para melhorar suas propriedades mecânicas, térmicas, elétricas, entre outras. Estes materiais são constituídos por duas fases principais: a matriz e a fase dispersa (reforço). A matriz, geralmente um polímero, serve como meio contínuo

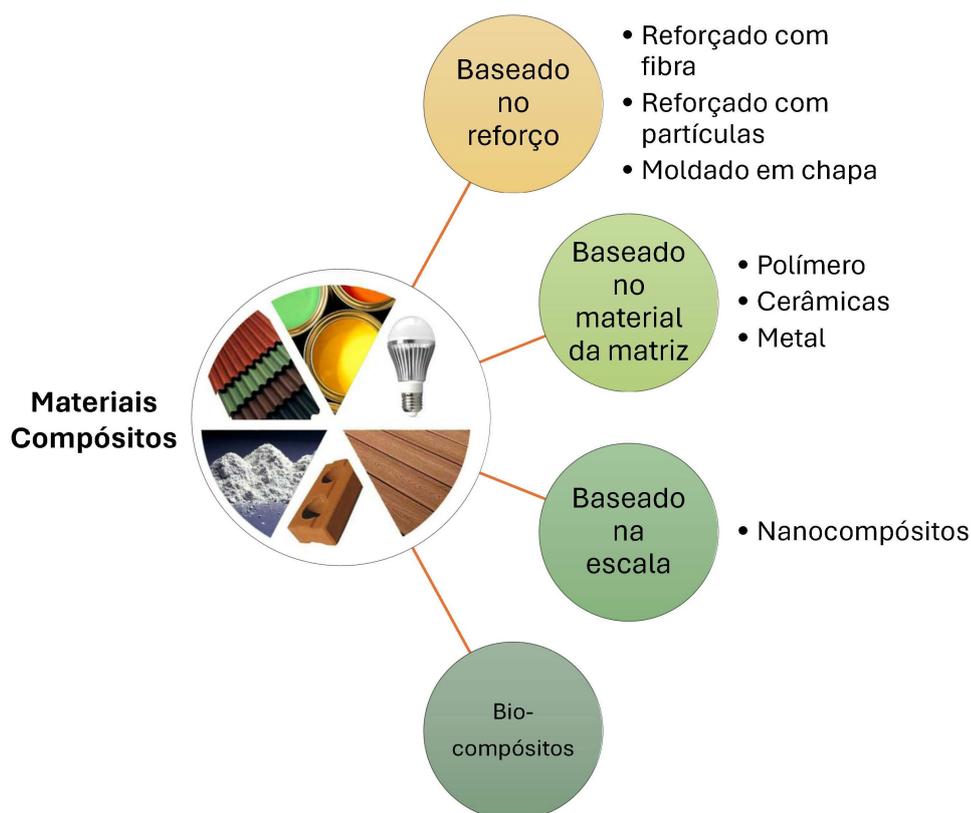


Figura 8 – Classificação dos compósitos pelo tipo de reforço (adaptado de Rajak et al. (2019))

que mantém os reforços unidos, enquanto a fase dispersa é incorporada para melhorar certas propriedades do material compósito. A fase matriz em compósitos poliméricos é fundamental para a transmissão de tensões aos reforços e para a proteção destes contra danos ambientais e mecânicos. Polímeros termoplásticos, termorrígidos e elastômeros são comumente utilizados como matrizes devido à sua versatilidade e capacidade de serem moldados em diversas formas (GIBSON, 2016).

A fase dispersa, ou reforço, pode ser composta por fibras, partículas, ou até mesmo nanomateriais, e é responsável por conferir ao compósito propriedades melhoradas, como maior resistência mecânica, módulo de elasticidade, e resistência ao impacto. Fibras de vidro, carbono e aramida, bem como partículas de sílica e nanotubos de carbono, são exemplos comuns de materiais usados como reforços em compósitos poliméricos (GIBSON, 2016; FRIEDRICH, 2018).

A interface entre a matriz e a fase dispersa é uma região crítica que influencia significativamente as propriedades do compósito. A adesão nessa interface determina a eficiência na transferência de carga da matriz para o reforço e impacta diretamente na resistência mecânica, condutividade térmica e elétrica do material compósito. Técnicas de tratamento superficial dos reforços e a adição de agentes de acoplamento são estratégias utilizadas para melhorar a interação matriz-reforço (KASHFIPOUR; MEHRA; ZHU, 2018; GIBSON, 2016; LEITE-BARBOSA et al., 2024a).

Os compósitos poliméricos oferecem uma combinação única de propriedades que não podem ser alcançadas pelos materiais constituintes isoladamente. Suas propriedades dependem da natureza dos componentes, da quantidade e do arranjo da fase dispersa, bem como da qualidade da interface entre a matriz e o reforço. Por exemplo, a adição de fibras de carbono a uma matriz polimérica pode resultar em um material compósito com alta resistência mecânica e baixa densidade, ideal para aplicações aeroespaciais e automotivas (HSISSOU et al., 2021; GIBSON, 2016). Dada a versatilidade em suas propriedades, os compósitos poliméricos têm encontrado aplicações em uma vasta gama de campos, incluindo aeroespacial, automotivo, construção civil, dispositivos eletrônicos e médicos. A escolha dos materiais para a matriz e o reforço, assim como o processo de fabricação, são cuidadosamente selecionados com base nas exigências específicas de cada aplicação.

### 2.3.2 Matrizes Poliméricas e Reforços

No desenvolvimento de compósitos poliméricos, as matrizes poliméricas desempenham um papel fundamental, atuando como a fase contínua que envolve e suporta o material de reforço. Essas matrizes podem ser derivadas de uma vasta gama de polímeros, incluindo termoplásticos, termorrígidos e elastômeros, selecionados com base nas propriedades desejadas do material compósito final. Os reforços, por outro lado, são incorporados à matriz para melhorar as propriedades mecânicas, térmicas ou elétricas do compósito, dependendo do aplicativo alvo. As matrizes poliméricas representam o “coração” dos compósitos poliméricos, fornecendo a fase contínua na qual os reforços são incorporados. Entre as principais matrizes poliméricas, destacam-se polímeros tanto tradicionais, como o polietileno (PE) e o polipropileno (PP), quanto biodegradáveis, como o ácido polilático (PLA), Poli(adipato-co-tereftalato de butileno) (PBAT), e o polibutileno succinato (PBS). Estes últimos têm ganhado destaque devido à crescente preocupação ambiental e à demanda por materiais sustentáveis (ELVERS et al., 2016; COSTA et al., 2020).

O PBAT e o PBS são poliésteres biodegradáveis amplamente utilizados em aplicações de embalagem, devido à sua excelente processabilidade e propriedades mecânicas. Estes polímeros oferecem uma combinação interessante de flexibilidade e resistência, tornando-os adequados para uma variedade de aplicações onde a degradabilidade ambiental é desejada. Por outro lado, polímeros tradicionais como o PE e o PP são conhecidos pela sua resistência química e durabilidade, mas enfrentam críticas devido à sua persistência ambiental (LIU et al., 2022; COSTA et al., 2020; URBANEK et al., 2019; QIN et al., 2021).

O polietileno (PE) é um dos polímeros mais produzidos e utilizados globalmente, conhecido por suas excelentes propriedades de resistência química, durabilidade e versatilidade de aplicações, que vão desde embalagens a componentes automotivos. Por ser um polímero sintético derivado do petróleo, o PE não é biodegradável, o que representa um desafio ambiental significativo devido à sua persistência nos ecossistemas e contribuição

para a poluição por plásticos (WEI et al., 2021).

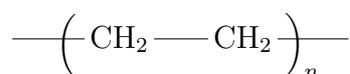


Figura 9 – Estrutura química do polietileno.

Em contraste, o Poli(adipato-co-tereftalato de butileno) (PBAT) é um polímero biodegradável que tem atraído atenção devido à sua combinação de flexibilidade, resistência ao impacto e biodegradabilidade. O PBAT é frequentemente utilizado em aplicações de embalagens, onde sua degradação no ambiente pode minimizar o impacto ambiental associado ao descarte inadequado de plásticos (ELVERS et al., 2016).

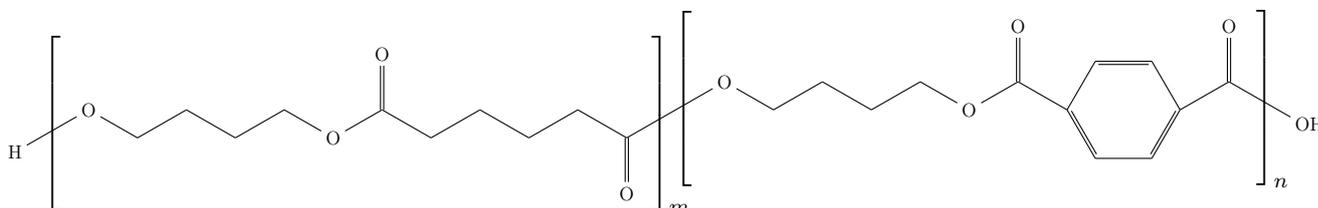


Figura 10 – Estrutura química do PBAT Poli(adipato-co-tereftalato de butileno)

Um estudo recente de Costa et al. (2020) sobre filmes biodegradáveis baseados em misturas de PBS e PBAT destacou a possibilidade de ajustar as propriedades de barreira e mecânicas desses materiais para aplicações específicas de embalagem, demonstrando a versatilidade e o potencial do PBAT como substituto biodegradável em determinadas aplicações tradicionalmente dominadas pelo PE. A tabela 1 mostra várias características importantes desse polímero.

Tabela 1 – Propriedades de Poli(adipato-co-tereftalato de butileno) (PBAT) com informações adicionais adaptadas do produto ecoflex® F Blend C1200 da BASF.

Propriedade	Valor	Unidade
Resistência à Tração	23	MPa
Alongamento na Ruptura	720	%
Temperatura de Fusão (TM)	115-120	°C
Temperatura de Transição Vítreia (TG)	-35	°C
Índice de Fluidez	2.7 - 4.9	g/10 min (2.16 kg, 190°C)
Densidade	1.25 - 1.27	g/cm <sup>3</sup>
Dureza Shore D	32	—

Fontes: (VENKATESAN; RAJESWARI; TAMILSELVI, 2018; SHI; ITO; KIKUTANI, 2006; MUTHURAJ; MISRA; MOHANTY, 2015; ARSLAN et al., 2016); e especificações do ecoflex® F Blend C1200 (BASF, 2021).

A análise de tendências tecnológicas de Elvers et al. (2016) sugere que o PBAT, junto com outros polímeros biodegradáveis como o PLA e o PBS, está direcionando o

crescimento do mercado e a inovação devido à crescente demanda por produtos mais sustentáveis. Contudo, apesar dos avanços significativos na produção e aplicação do PBAT, desafios relacionados ao custo de produção e à performance em comparação com polímeros convencionais como o PE ainda precisam ser superados. O desafio da biodegradação de plásticos no ambiente aquático foi investigado por (WEI et al., 2021), que comparou a formação de microplásticos a partir do PBAT e do LDPE (um tipo de PE). Seus resultados mostraram uma maior formação de microplásticos a partir do PBAT sob condições ambientais simuladas, destacando a importância de considerar o ciclo de vida completo e o comportamento ambiental dos polímeros biodegradáveis.

A incorporação de reforços lignocelulósicos em matrizes poliméricas, tanto biodegradáveis quanto sintéticas, representa uma abordagem inovadora para melhorar as propriedades mecânicas dos compósitos enquanto se contribui para a sustentabilidade. Resíduos agrícolas, como cascas de arroz e bagaço de cana-de-açúcar, fornecem fontes ricas de material lignocelulósico que, quando tratados adequadamente, podem ser utilizados como reforços eficazes em compósitos poliméricos (LEITE-BARBOSA et al., 2024b; YAP et al., 2020; BUMBUDSANPHAROKE et al., 2022).

Ao longo das últimas décadas, a pesquisa em materiais compósitos tem visto um crescente interesse na utilização de materiais lignocelulósicos como reforço. Muitos desses materiais já foram estudados extensivamente, enquanto outros estão começando a emergir como candidatos promissores devido às suas características únicas e benefícios ambientais, a tabela 2 mostra alguns materiais estudados. Materiais como a casca de arroz, bagaço de cana-de-açúcar, e fibras de juta têm sido tradicionalmente valorizados por suas propriedades de reforço, incluindo alta resistência e rigidez, bem como a sua contribuição para a redução da pegada de carbono dos compósitos (NECHITA; IONESCU, 2018; CHONG; LAW; CHAN, 2021).

Além disso, resíduos agrícolas e industriais, tais como cascas de nozes, fibras de bananeira, e até mesmo resíduos de processos bioenergéticos, estão sendo investigados por suas potenciais aplicações em materiais compósitos (LEITE-BARBOSA et al., 2024b; STANCIU; SAVIN; NASTAC, 2018; DAHY, 2019). Esses estudos têm demonstrado que, com tratamentos superficiais adequados e a escolha correta da matriz polimérica, esses materiais podem oferecer melhorias significativas nas propriedades mecânicas, térmicas e até mesmo estéticas dos compósitos. A sustentabilidade e a valorização de resíduos têm sido as principais motivações por trás dessas pesquisas, visando não apenas melhorar as propriedades dos materiais, mas também contribuir para uma economia mais circular e reduzir o impacto ambiental associado ao descarte desses resíduos (LEITE-BARBOSA et al., 2024b).

Tabela 2 – Propriedades de Materiais de Resíduos Lignocelulósicos como Reforço em Compósitos

<b>Material de Resíduo Lignocelulósico</b>	<b>Propriedades Primárias</b>	<b>Impacto nas Propriedades dos Compósitos</b>
Fibras de resíduos de milho	Alto teor de celulose, lignina variável	Melhoria das propriedades mecânicas, necessidade de tratamento superficial para melhor compatibilidade fibra-matriz
Casca de arroz	Alto teor de sílica, baixa densidade	Aumento das propriedades de isolamento térmico, redução das propriedades mecânicas sem tratamento adequado
Bagaço de cana-de-açúcar	Alto conteúdo de celulose, hemicelulose	Reforço da resistência mecânica e rigidez, potencial para absorção de água se não tratado corretamente
Farinha de madeira	Conteúdo variável de lignina e celulose	Bom reforço mecânicos, dependente do tamanho da partícula e tratamento para resistência à água
Farinha de caroço de azeitona	Alto conteúdo de lignina, estrutura robusta	Proporciona rigidez e estabilidade térmica, a modificação superficial pode ser necessária para melhorar as propriedades do compósito
Fibras de juta	Alta resistência à tração, boa flexibilidade	Melhoria significativa na resistência à tração e flexural, boa compatibilidade com diversas matrizes
Fibras de malva	Baixa densidade, propriedades mecânicas moderadas	Pode aumentar o módulo da matriz, necessita tratamento para melhoria da hidrofobicidade

*Fonte: Adaptado de Chong, Law e Chan (2021), Nechita e Ionescu (2018), Stanciu, Savin e Nastac (2018)*

### 2.3.3 Vantagens e Desafios dos Compósitos Poliméricos

Os compósitos poliméricos apresentam uma série de vantagens em comparação com materiais convencionais como metal, madeira e couro, devido à sua boa resistência à tração, resistência à flexão, resistência à compressão, resistência ao impacto, módulo de Young e rigidez, juntamente com alta estabilidade dimensional. A necessidade de explorar mais aplicações para compósitos avançados surge principalmente de preocupações ambientais relacionadas ao uso de recursos naturais, especialmente madeira, e a busca contínua por substitutos que possam atender ou superar o desempenho de materiais tradicionais em aplicações de engenharia (GHOSH; DWIVEDI, 2020). Além disso, os compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais têm sido explorados por suas vantagens sustentáveis, como biodegradabilidade, biocompatibilidade, flexibilidade de design e sustentabilidade. Esses materiais oferecem propriedades mecânicas satisfatórias, o que os torna atraentes em comparação com outros materiais compósitos. Sua facilidade de disponibilidade e renovabilidade posicionam as fibras naturais como uma alternativa viável às fibras sintéticas como agentes de reforço (KEYA et al., 2019).

No entanto, a inclusão de fibras naturais em polímeros introduz vários desafios, como absorção excessiva de água e propriedades térmicas inferiores, que precisam ser superadas para produzir materiais com propriedades comparáveis aos materiais compostos convencionais. Embora métodos químicos e físicos de modificação sejam utilizados para eliminar esses desafios, uma nova tendência de utilizar resíduos, resíduos e subprodutos de processos em compósitos de fibras naturais-polímeros como aditivos ou reforços pode trazer melhorias consideráveis nas propriedades dos compósitos de maneira sustentável e resiliente (VäISÄNEN; DAS; TOMPPO, 2017; LEITE-BARBOSA et al., 2024b). A compatibilidade entre a matriz polimérica e o reforço lignocelulósico também é um desafio crítico, devido à natureza hidrofílica das fibras lignocelulósicas e ao caráter tipicamente hidrofóbico das matrizes poliméricas. Para superar essa barreira, métodos de tratamento superficial das fibras, como a aplicação de radiação ionizante (GüVEN et al., 2016) e o uso de líquidos iônicos (TISSERAT et al., 2015), têm sido explorados. Esses tratamentos visam modificar a superfície das fibras lignocelulósicas para melhorar sua adesão à matriz polimérica, resultando em compósitos com propriedades mecânicas aprimoradas.

Estudos demonstram que o tratamento hidrotermal e a modificação química das fibras lignocelulósicas com agentes silanizantes podem melhorar significativamente a compatibilidade com a matriz polimérica, resultando em compósitos com melhor desempenho mecânico e térmico. Tais tratamentos modificam a superfície das fibras, aumentando sua hidrofobicidade e promovendo uma melhor adesão com as matrizes poliméricas (MI-EDZIANOWSKA et al., 2020; DAHY, 2019). Outro desafio importante é a reciclagem e o fim de vida dos compósitos poliméricos. A presença de múltiplos materiais em um único compósito pode dificultar a reciclagem, exigindo processos específicos de separação e

recuperação dos materiais. Soluções inovadoras para o projeto de compósitos recicláveis ou biodegradáveis estão sendo exploradas para abordar essa questão de sustentabilidade (BHADRA; AL-THANI; ABDULKAREEM, 2017).

## 2.4 Técnicas de Caracterização

A caracterização de materiais compósitos é uma etapa importante no desenvolvimento e na aplicação desses materiais e também a carga, que pode ser partículas, fibras ou outras formas de reforço, desempenha um papel importante na definição das propriedades mecânicas, térmicas e até elétricas do compósito. Portanto, a caracterização tanto do material de matriz quanto das cargas incorporadas é fundamental para garantir que o material compósito final atenda às especificações de desempenho necessárias para suas aplicações em engenharia. Os materiais compósitos, devido à sua natureza heterogênea e ao arranjo complexo de seus componentes, requerem uma abordagem multifacetada para sua caracterização. As técnicas empregadas são divididas em categorias com base no tipo de propriedade que elas estão configuradas para medir: análises térmicas, mecânicas e morfológicas. Estas técnicas têm evoluído de ferramentas rudimentares para instrumentos extremamente sofisticados, permitindo uma análise detalhada das propriedades dos compósitos em diversas escalas e sob diferentes condições (CROSS et al., 2015).

As siglas utilizadas nas técnicas de análise térmica, como a Análise Termogravimétrica (TGA, do inglês Thermogravimetric Analysis) e a Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC, do inglês Differential Scanning Calorimetry), são amplamente padronizadas e geralmente mantidas em inglês devido ao uso internacional dessas nomenclaturas na literatura científica. Essas técnicas são indispensáveis para investigar as propriedades térmicas de compósitos poliméricos e cargas, fornecendo informações detalhadas sobre a estabilidade térmica, decomposição e transições de fase dos materiais (BRUNO, 2017; ZHU; KNOPP; ZHOU, 2017).

A caracterização mecânica através de ensaios de resistência à tração, flexão, impacto e dureza fornece dados valiosos sobre a resistência, rigidez e durabilidade dos compósitos sob diferentes condições de carga. Estas análises ajudam a prever o comportamento dos compósitos em aplicações estruturais e são essenciais para o design e otimização de materiais (YUKHYMETS et al., 2018; GEORGANTZINOS, 2023).

A morfologia dos compósitos e das partículas, fibras ou outras formas de reforço é examinada utilizando técnicas como Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), que permite a visualização da distribuição de reforços na matriz, a detecção de defeitos, vazios, a qualidade da interface fibra-matriz e superfície do reforço. Essas informações são cruciais para compreender a relação entre a estrutura do compósito e suas propriedades finais (BRUNO, 2017; PARK; BAE, 2015).

Além dessas técnicas, métodos como o Índice de Fluididez (MFI) e o Ângulo de Contato são utilizados para avaliar as interações superficiais, respectivamente. Essas análises complementam a caracterização mecânica e térmica, oferecendo uma compreensão abrangente das propriedades dos compósitos (CARVALHO; AZEVEDO; BARBOSA, 2020; HEBBAR; ISLOOR; ISMAIL, 2017).

A escolha das técnicas de caracterização depende das propriedades de interesse e da composição do material. A combinação dessas técnicas fornece uma compreensão abrangente da matriz do compósito, no material de reforço, ou em ambos, destacando a importância da sinergia entre a matriz e os materiais de reforço. A caracterização adequada não apenas ajuda a otimizar as propriedades dos materiais compósitos para aplicações específicas, mas também contribui para o avanço do conhecimento na ciência dos materiais (HUANG et al., 2021; RAMACHANDRAN et al., 2022).

### 2.4.1 Análise Térmica

A análise termogravimétrica (TGA) é uma técnica de análise térmica que mede a mudança na massa de uma amostra ao longo do tempo, enquanto esta é aquecida ou resfriada em uma atmosfera controlada. Este método fornece informações cruciais sobre a composição do material, as transformações físicas e as reações químicas que ocorrem durante o aquecimento (BLASIO, 2019). A TGA é amplamente utilizada para caracterizar materiais compósitos e reforços, permitindo a identificação de componentes voláteis, a estabilidade térmica e a decomposição de polímeros, fibras, e outros materiais compósitos. Durante uma análise TGA, a amostra é colocada em uma balança de precisão dentro de um forno. À medida que a temperatura aumenta, a massa da amostra pode diminuir devido à evaporação de umidade, decomposição térmica ou reações químicas, como oxidação. O perfil de perda de massa é registrado como função da temperatura ou do tempo, fornecendo um termograma que pode ser usado para identificar os eventos térmicos associados a mudanças de massa específicas (LOGANATHAN et al., 2017).

A metodologia típica envolve aquecer a amostra a uma taxa de aquecimento constante, sob atmosfera inerte (como nitrogênio) ou oxidante (como ar), até uma temperatura final predeterminada. A seleção da atmosfera depende das propriedades do material sendo testado e do objetivo da análise. Diferentes configurações de TGA, como análise isotérmica ou não isotérmica, podem ser escolhidas com base nos requisitos específicos do estudo (JAIN; MEHRA; RANADE, 2016). A análise dos dados de TGA pode revelar informações sobre a composição do material, como o conteúdo de umidade, cargas inorgânicas, e a quantidade de material orgânico presente. A análise diferencial da curva de TGA (DTG), que é a derivada da curva de TGA em relação ao tempo, destaca as taxas de perda de massa e pode identificar com precisão os pontos de inflexão correspondentes aos eventos de decomposição (YAO et al., 2022).

Uma outra técnica analítica poderosa é a Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) que é usada para estudar as propriedades termodinâmicas de materiais, incluindo transições de fase, como fusão, cristalização, e transições vítreas. A DSC mede as diferenças no fluxo de calor entre uma amostra e uma referência enquanto ambas são aquecidas ou resfriadas a uma taxa de temperatura controlada. Essa capacidade de capturar eventos térmicos específicos torna a DSC uma ferramenta indispensável na caracterização de materiais, especialmente compósitos e polímeros (KNOPP et al., 2016; PANWAR; SINGH; SEHGAL, 2020). No coração da técnica DSC está a medição precisa do fluxo de calor necessário para manter a amostra e a referência à mesma temperatura ao longo do tempo. Isso é conseguido usando um calorímetro diferencial que monitora as diferenças de energia associadas a transições térmicas na amostra. Essas transições podem ser endotérmicas (absorção de calor) ou exotérmicas (liberação de calor), refletindo processos físicos ou químicos, como mudanças de fase ou reações químicas dentro do material (ZHENG et al., 2019).

Uma análise DSC típica envolve o posicionamento de uma pequena quantidade da amostra e um material de referência inerte em copos de alumínio dentro da câmara de análise do calorímetro. À medida que o sistema é uniformemente aquecido ou resfriado, o instrumento mede a diferença de energia entre a amostra e a referência. A taxa de aquecimento ou resfriamento, a atmosfera do gás (inerte ou reativa) e o intervalo de temperatura são parâmetros ajustáveis que podem ser otimizados com base nas propriedades do material em estudo e nos objetivos da análise (YU et al., 2017). A principal saída de uma análise DSC é uma curva que representa a diferença no fluxo de calor em função da temperatura ou do tempo. A área sob os picos da curva corresponde à entalpia ( $\Delta H$ ) associada a transições térmicas específicas, enquanto a temperatura em que esses picos ocorrem pode indicar pontos de fusão, cristalização, ou transições vítreas. A análise das curvas DSC permite a identificação de composições de fase, pureza, miscibilidade entre componentes, e estabilidade térmica dos materiais (PARNIAKOV et al., 2016).

### 2.4.2 Análise Mecânica

O ensaio de resistência à tração é uma técnica fundamental na caracterização das propriedades mecânicas dos materiais, essencial para a determinação da capacidade de um material resistir a forças de tração antes de falhar. Existem várias normas para conduzir esses ensaios, dependendo do tipo de material sendo testado. Entre essas, a ASTM D638 (Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics) é uma das principais normas utilizadas para medir as propriedades de tração de materiais plásticos. Esta norma fornece um procedimento padronizado que permite comparar a resistência e a ductilidade de diferentes tipos de plásticos sob condições uniformes de teste (AKPAKPAVI; SACKKEY; ASANTE-AFRIFA, 2023). O ensaio de resistência à tração avalia o comportamento de

materiais quando submetidos a forças uniaxiais, medindo propriedades como a resistência máxima à tração, o módulo de elasticidade (módulo de Young) e o alongamento na ruptura. O princípio por trás do teste é simples: uma amostra do material, preparada conforme especificações da norma, é esticada a uma taxa constante até que se rompa. O equipamento de teste registra a força aplicada e a extensão do material até o ponto de falha, fornecendo dados cruciais sobre o desempenho do material sob tensão (LAURETO; PEARCE, 2018).

Conforme a norma ASTM D638, a metodologia para realizar o ensaio de resistência à tração envolve várias etapas cruciais. Inicialmente, os corpos de prova são fabricados em formas e dimensões padronizadas, especificadas pela norma, para garantir consistência e reprodutibilidade dos resultados. A realização do teste exige o uso de uma máquina de ensaios universais, que aplica uma força de tração progressiva no corpo de prova até sua ruptura. A taxa de alongamento e a forma como a força é aplicada são controladas rigorosamente conforme a norma, garantindo que as condições de teste sejam as mesmas para todas as amostras. A seleção da geometria do corpo de prova (Tipo I a V, segundo a norma) é determinada pela natureza do material e pelo objetivo específico do teste, com o Tipo IV sendo comumente utilizado para plásticos (KAZEMI; RAHIMI, 2015). Os resultados obtidos a partir do ensaio de resistência à tração são plotados em um gráfico de tensão-deformação, que apresenta a relação entre a força aplicada (tensão) e a extensão relativa (deformação) do material. A partir desse gráfico, é possível identificar o ponto de ruptura (a máxima tensão que o material pode suportar antes de falhar), bem como calcular o módulo de elasticidade, que é a inclinação da curva na fase elástica linear. A área sob a curva até o ponto de ruptura fornece uma medida de trabalho total realizado na amostra, que está relacionado à tenacidade do material. A interpretação desses dados permite não apenas avaliar a resistência do material, mas também entender seu comportamento sob diferentes condições de carga, sendo fundamental para a seleção de materiais em aplicações de engenharia (LAURETO; PEARCE, 2018).

O ensaio de resistência à flexão é uma avaliação crucial para compósitos poliméricos, desempenhando um papel fundamental na determinação de sua adequação para aplicações específicas, onde a resistência sob carga flexural é exigida. Este ensaio é particularmente importante para compósitos reforçados com fibras, pois oferece uma visão sobre o comportamento desses materiais sob condições de estresse que simulam o uso real (MEHNDIRATTA et al., 2017). O ensaio baseia-se na aplicação de uma carga em um ponto específico ou distribuída ao longo de um vão entre dois apoios, induzindo uma tensão de flexão no material. A norma ASTM D790 é comumente adotada para testar as propriedades de flexão de compósitos poliméricos, definindo as dimensões do corpo de prova e o procedimento de teste. Este método permite avaliar tanto a resistência à flexão quanto o módulo de flexão, refletindo a rigidez do material sob carga flexural (ALP; MURAT; YILMAZ, 2019).

Para realizar o ensaio de resistência à flexão conforme a ASTM D790, corpos de prova padronizados são carregados em uma máquina de ensaio universal até a falha. A taxa de aplicação da carga e a configuração do vão entre os apoios são especificadas pela norma, garantindo a consistência e a reprodutibilidade dos resultados. Durante o ensaio, são registrados a carga máxima aplicada, a deflexão na carga máxima, e a deflexão no início do escoamento, permitindo calcular a resistência à flexão e o módulo de flexão do material (YU et al., 2019). A resistência à flexão é determinada pela carga máxima suportada pelo corpo de prova antes da falha, dividida pela área da seção transversal. Já o módulo de flexão é calculado a partir da inclinação da curva carga versus deflexão na região elástica do ensaio. Esses parâmetros fornecem insights valiosos sobre o desempenho do compósito sob cargas flexurais, incluindo a capacidade de suportar esforços sem deformação significativa e a rigidez do material. A análise dos dados obtidos fornece uma base sólida para a compreensão do comportamento mecânico dos compósitos poliméricos, facilitando o desenvolvimento de materiais com propriedades mecânicas otimizadas para diversas aplicações (REDDY et al., 2021).

Os ensaios de impacto são fundamentais para compreender a resistência e a tolerância de compósitos poliméricos a cargas dinâmicas repentinas, simulando condições reais de aplicação, como quedas ou colisões. A análise da resposta desses materiais a impactos é crucial para sua aplicação em indústrias que exigem alta performance sob condições extremas, incluindo aeroespacial, automotiva, e equipamentos esportivos (KALU et al., 2023). O ensaio de impacto visa quantificar a energia absorvida por um material ao falhar sob uma carga de impacto rápida. Dois métodos comuns são o Charpy e o Izod, ambos envolvendo a ruptura de uma amostra notched ou unnotched por um pêndulo liberado de uma altura pré-determinada. A diferença na energia potencial do pêndulo antes e após o impacto fornece a medida da energia absorvida pelo material durante a falha. Estes ensaios são cruciais para avaliar a tenacidade e a capacidade de absorção de energia dos compósitos poliméricos sob cargas de impacto (BLITTERSWYK; FLETCHER; PIERRON, 2018).

Para realizar o ensaio de impacto, uma amostra é firmemente fixada em uma posição vertical (para Izod) ou horizontal (para Charpy) dentro do equipamento de teste. Um pêndulo é então liberado de uma altura específica, atingindo a amostra com uma velocidade definida e aplicando uma carga de impacto concentrada. O equipamento registra automaticamente a energia absorvida pela amostra no momento da falha. As condições de teste, incluindo a temperatura da amostra, a velocidade do pêndulo e o tipo de entalhe na amostra, são rigorosamente controladas para assegurar a reprodutibilidade e a comparabilidade dos resultados (OPRAN et al., 2017). A interpretação dos dados de um ensaio de impacto fornece insights sobre a resistência ao impacto e a tenacidade do material testado. A energia absorvida, medida em joules, indica a quantidade de energia que o material pode absorver antes de falhar. Materiais com alta absorção de energia são considerados tenazes e capazes de suportar condições de impacto severas sem fraturar

catastroficamente. A análise detalhada desses dados permite aos engenheiros selecionarem materiais apropriados para aplicações específicas onde a resistência ao impacto é crítica (RAMACHANDRAN et al., 2022).

O ensaio de dureza é uma técnica essencial na caracterização de compósitos poliméricos, proporcionando uma avaliação rápida e eficaz da resistência superficial dos materiais à penetração ou deformação permanente. Geralmente, a dureza em compósitos poliméricos é medida utilizando a escala Shore, com os testes Shore A e Shore D sendo os mais comuns para avaliar materiais de média e alta dureza, respectivamente (DULEBOVÁ; GARBACZ, 2017). A dureza Shore baseia-se na resistência de um material à penetração de um indentador sob uma carga definida. A escala Shore A é utilizada para materiais mais macios, como borrachas e polímeros flexíveis, enquanto a escala Shore D é aplicada a materiais mais rígidos, incluindo alguns tipos de compósitos poliméricos. O valor da dureza Shore é determinado pela profundidade de penetração do indentador na superfície do material sob uma força específica (GANDHI et al., 2019).

Durante o teste, um indentador, tipicamente de forma cônica ou esférica, é pressionado contra a superfície do material com uma força pré-determinada. A dureza Shore é então lida diretamente no durômetro, que registra a profundidade de penetração do indentador. É essencial que o material seja preparado adequadamente e que a superfície de teste esteja plana e livre de irregularidades para garantir resultados precisos. A norma ASTM D2240 fornece as diretrizes para a realização desses testes, incluindo os requisitos para o indentador e a força aplicada (VIAN; DENTON, 2018). Os valores obtidos nos testes de dureza Shore oferecem insights sobre a resistência mecânica e a rigidez do material. Materiais com valores de dureza Shore mais altos são geralmente mais resistentes a desgaste e penetração. No entanto, é importante notar que a dureza Shore não é uma medida direta da resistência mecânica total do material, mas sim da resistência superficial a deformações. A interpretação desses valores deve, portanto, considerar o contexto da aplicação do material e as propriedades desejadas para o uso final (LIAO et al., 2020).

### 2.4.3 Análise Morfológica

A análise morfológica desempenha um papel importante na compreensão das propriedades físicas e mecânicas de compósitos poliméricos e no material que será utilizado como fase dispersa. Esta técnica investiga a estrutura, a forma, o tamanho e a distribuição dos componentes dentro de um compósito, incluindo a matriz polimérica e os reforços, como fibras ou nanopartículas. As características morfológicas têm um impacto direto nas propriedades finais do material, como resistência mecânica, condutividade térmica e elétrica, e resistência à degradação (RAIMO, 2021). A importância da análise morfológica reside na sua capacidade de correlacionar a estrutura interna dos compósitos poliméricos com seu desempenho em aplicações práticas e a superfícies de partículas, fibras ou outras

formas de reforço pode mostrar como a adesão inter-facial entre fibra e matriz pode ocorrer. Alterações na morfologia podem significativamente influenciar a eficácia com que um compósito polimérico pode ser utilizado em aplicações específicas, como componentes aeroespaciais, biomateriais e na indústria automotiva. Entender a morfologia permite otimizar o processo de fabricação para alcançar as propriedades desejadas, melhorando a compatibilidade entre a matriz e o reforço, e promovendo a distribuição uniforme dos reforços na matriz (MAGHAMI et al., 2020).

No campo da caracterização de compósitos poliméricos, diversas técnicas de análise morfológica são empregadas para examinar a estrutura e a distribuição dos constituintes destes materiais. Dentre as principais técnicas utilizadas, destacam-se a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), uma técnica amplamente reconhecida por sua capacidade de fornecer imagens detalhadas da superfície dos compósitos (RAJABALINIA et al., 2019). A Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET), com sua capacidade de oferecer uma resolução significativamente mais alta em comparação à MEV, a MET é utilizada para obter imagens da estrutura interna dos compósitos em escala nanométrica (MAGHAMI et al., 2020). Existe também a microscopia de força atômica (AFM) que fornece informações detalhadas sobre a topografia da superfície dos compósitos poliméricos, além de medir as propriedades mecânicas em escala nanométrica (TALWAR; WANG; YAN, 2016). Cada uma dessas técnicas desempenha um papel fundamental na compreensão e no desenvolvimento de compósitos poliméricos com propriedades específicas, permitindo a otimização dos processos de fabricação e a melhoria do desempenho dos materiais em diversas aplicações.

Os avanços recentes na análise morfológica de compósitos poliméricos e reforços incluem o desenvolvimento de técnicas de imagem de alta resolução e a aplicação de algoritmos avançados para a análise de dados. Técnicas como a microscopia eletrônica de varredura ambiental (MEVA) permitem a observação de amostras em condições próximas ao ambiente natural, sem a necessidade de preparações complexas. Além disso, a integração da inteligência artificial e aprendizado de máquina nas técnicas de análise morfológica possibilita a automação da classificação de imagens e a quantificação precisa das características estruturais dos compósitos (TALWAR; WANG; YAN, 2016).

Uma técnica indispensável para a análise morfológica de compósitos poliméricos é Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Através da MEV, é possível visualizar a superfície dos compósitos com detalhes em alta resolução, proporcionando insights valiosos sobre a distribuição dos reforços na matriz polimérica e a presença de eventuais defeitos ou irregularidades (HAIR, 2021). A MEV opera pelo princípio de varredura da superfície da amostra com um feixe de elétrons concentrado. Quando o feixe interage com a amostra, gera diversos sinais, incluindo elétrons secundários e retroespalhados, que são coletados para formar imagens detalhadas da superfície. Este método permite obter imagens com profundidade de campo elevada e resolução na ordem de nanômetros, possibilitando a

observação de microestruturas e características superficiais específicas dos compósitos (MUDALIGE et al., 2023). A preparação da amostra para a MEV envolve etapas cruciais que garantem a qualidade das imagens obtidas. Primeiramente, as amostras precisam ser secas e, se necessário, sputter-coated com um metal condutor (como ouro ou platina) para evitar o acúmulo de carga elétrica na superfície durante a análise. Após a preparação, a amostra é inserida na câmara de vácuo do microscópio, e as condições de operação, como a aceleração do feixe de elétrons e o tipo de detetor utilizado, são ajustadas de acordo com o objetivo específico da análise (HOLMGREN et al., 2023). A interpretação dos dados obtidos via MEV fornece informações fundamentais sobre a interação entre a matriz polimérica e os materiais de reforço, bem como sobre a eficiência da dispersão desses reforços na matriz. Por meio das imagens de MEV, é possível identificar a presença de falhas, tais como vazios, trincas ou desaglomeração de partículas de reforço, que podem afetar as propriedades mecânicas e a durabilidade dos compósitos. Adicionalmente, a análise detalhada das imagens pode revelar a morfologia dos reforços e sua orientação em relação à matriz, fornecendo insights sobre o processo de fabricação e sobre possíveis melhorias na composição dos compósitos (ZHANG et al., 2015).

#### 2.4.4 Análise estrutural e de superfície

A análise das propriedades superficiais e da processabilidade de compósitos poliméricos é crucial para otimizar seu desempenho em aplicações específicas. Essas propriedades determinam a interação do material com seu ambiente, incluindo adesão, wettability, resistência ao desgaste e estabilidade química. Da mesma forma, a processabilidade afeta diretamente a eficiência da produção e a qualidade final do compósito (GHOSH; DWIVEDI, 2020).

O controle adequado das propriedades superficiais, como a molhabilidade, e a otimização da processabilidade são essenciais para garantir a qualidade final dos compósitos poliméricos, melhorar sua compatibilidade com diferentes substratos e otimizar os parâmetros de processamento para reduzir defeitos e aumentar a eficiência de produção (OGAH, 2017). Dentre as principais técnicas existem a análise da molhabilidade e ângulo de contato, que avalia a capacidade de um líquido para molhar a superfície dos compósitos, sendo crucial para aplicações que requerem adesão ou resistência à umidade (KOAY et al., 2018). Outra análise importante é o índice de fluidez (MFI) que avalia a viscosidade do polímero fundido e a sua capacidade de ser processado por extrusão ou moldagem por injeção, sendo crucial para a produção de compósitos (ANDRADE et al., 2021).

Uma análise muito feita atualmente é a análise de torque x energia específica em que é utilizado a reometria de torque para avaliar as características reológicas dos compósitos durante o processamento, esta análise fornece insights sobre a processabilidade, incluindo a influência de aditivos e o comportamento do material sob diferentes condições

de processamento (CHUN et al., 2017). Técnicas avançadas de caracterização e novas metodologias de processamento têm permitido o desenvolvimento de compósitos poliméricos com propriedades superficiais e de processabilidade otimizadas. A utilização de aditivos específicos e a adaptação dos parâmetros de processamento baseados em análises detalhadas, como a reometria de torque, contribuem para melhorar a eficiência da produção e a performance dos materiais em aplicações finais (MAZZANTI; MOLLICA, 2020; XIE et al., 2019).

Estudos recentes, como o de Črešnar et al. (2021), exploram a influência de cargas como fibras de madeira nas propriedades superficiais de compósitos poliméricos, destacando a relevância da carga na modificação da hidrofobicidade e das propriedades mecânicas da superfície. Ziąbka e Dziadek (2018) investigaram a incorporação de nanopartículas de prata em compósitos poliméricos, observando mudanças mínimas na rugosidade e na molhabilidade, mas um impacto significativo na microestrutura e na compatibilidade celular. Esses estudos sublinham o papel das técnicas de análise de propriedades superficiais e processabilidade na engenharia de compósitos poliméricos com funcionalidades específicas para aplicações industriais e biomédicas.

O Índice de Fluidez (MFI) é uma métrica importante na avaliação das propriedades de processamento de compósitos poliméricos. Ele indica a facilidade com que o polímero flui sob condições específicas de calor e pressão, sendo amplamente utilizado para caracterizar materiais termoplásticos (SHAHARUDIN et al., 2023). O MFI é medido pela quantidade de polímero que flui através de um orifício de uma dimensão específica quando aplicado um determinado peso durante um tempo fixo, a uma temperatura específica. Valores mais altos de MFI indicam um polímero com menor viscosidade e, portanto, maior fluidez (CARVALHO; AZEVEDO; BARBOSA, 2020).

A análise do MFI é realizada usando um plastômetro, onde o material é aquecido até seu estado fundido e pressionado através de um capilar sob uma carga pré-determinada. A quantidade de material que flui em um período de 10 minutos é medida em gramas. O teste é padrão e segue as diretrizes da ASTM D1238 para termoplásticos (SHAHARUDIN et al., 2023). O MFI fornece informações vitais sobre a viscosidade do polímero em estado fundido, que é um fator crítico no processo de moldagem por injeção, extrusão e outras técnicas de processamento de plásticos. Um MFI mais alto indica que o material pode ser processado a velocidades mais rápidas ou a temperaturas mais baixas, enquanto um MFI mais baixo sugere uma viscosidade mais alta, exigindo maiores pressões de processamento (CARVALHO; AZEVEDO; BARBOSA, 2020).

A Difração de Raios X (DRX) é frequentemente empregada para caracterizar a estrutura cristalina de fibras lignocelulósicas utilizadas como reforços em materiais compósitos. Esta técnica permite uma análise detalhada da ordenação molecular e da cristalinidade das fibras, o que é essencial para entender e otimizar suas propriedades

mecânicas e de interação com a matriz polimérica. A análise por DRX pode revelar mudanças na estrutura cristalina das fibras tratadas quimicamente, como demonstrado no estudo de Belouadah et al. (2021), onde fibras de *Atriplex halimus* foram analisadas após tratamentos com NaOH e NaHCO<sub>3</sub>. Os resultados mostraram um aumento na cristalinidade das fibras tratadas, sugerindo uma maior remoção de componentes amorfos e uma potencial melhoria nas propriedades mecânicas dos compósitos resultantes.

Estudos como o de Hamdan (2020) também aplicaram DRX para avaliar o efeito de tratamentos enzimáticos na cristalinidade de fibras de bambu. Observou-se que o tratamento enzimático aumentou significativamente a cristalinidade das fibras, o que pode contribuir para uma melhor performance quando utilizadas como reforço em compósitos.

A análise química de fibras e partículas lignocelulósicas para determinar a composição de celulose, hemicelulose e lignina é fundamental para otimizar seu uso em aplicações industriais. Essas metodologias envolvem diversos procedimentos que podem variar dependendo do tipo de biomassa e do objetivo específico da análise. Os métodos mais comuns incluem a utilização de procedimentos químicos e espectroscópicos para quantificar cada componente. Por exemplo, o método Van Soest é frequentemente usado para separar e quantificar fibras neutras detergentes, fibras ácidas detergentes e lignina ácida detergente em materiais vegetais, como demonstrado por Hindrichsen et al. (2006).

Outra abordagem envolve o uso de líquidos iônicos para a dissolução e subsequente fracionamento de lignocelulose em seus componentes primários, seguido por técnicas como espectroscopia FTIR e Ressonância Magnética Nuclear (RMN) para caracterização detalhada, conforme descrito por Mohtar et al. (2017). Tratamentos alcalinos, como o uso de hidróxido de sódio, também são aplicados para reduzir o conteúdo de lignina e hemicelulose, melhorando a acessibilidade e reatividade da celulose. Estudos como o de Bartos et al. (2020) exploraram como variações na concentração de NaOH afetam a composição e as propriedades das fibras extraídas do bagaço de cana.

Geralmente, ao trabalhar com materiais lignocelulósicos como reforço, utiliza-se a técnica de Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR, do inglês Fourier Transform Infrared Spectroscopy), uma abordagem amplamente reconhecida e mantida em inglês na literatura científica. Essa análise não identifica diretamente grupos funcionais específicos que podem estar presentes na celulose, hemicelulose, lignina ou outros componentes, mas sim bandas de absorção características que podem ser atribuídas a diferentes componentes ou interações moleculares. A FTIR é uma técnica analítica valiosa para investigar as propriedades vibracionais das moléculas, permitindo a conversão de interferogramas em espectros. Isso facilita a análise rápida de compostos, sendo particularmente vantajosa para estudos de espécies transitórias ou para a melhoria da relação sinal-ruído por meio de procedimentos de "tempo médio" (BECKER; FARRAR, 1972). A técnica explora como diferentes ligações químicas dentro de uma molécula

absorvem radiação infravermelha em várias frequências, o que é essencial para identificar compostos orgânicos e inorgânicos. A espectroscopia de transformada de Fourier introduziu um método popular para análises quantitativas de misturas complexas e investigação de fenômenos de superfície e interfaciais, destacando-se pela rapidez e pela capacidade de automatização (DUTTA, 2017). Além disso, a FTIR tem aplicação prática na caracterização de proteínas, destacando alterações conformacionais e estabilidade estrutural, oferecendo um método conveniente e não destrutivo para esses estudos (KONG; YU, 2007). A comparação dos espectros com dados de referência da literatura facilitará a interpretação dos resultados, possibilitando uma compreensão mais profunda das propriedades químicas dos resíduos de açaí (tabela 3).

Tabela 3 – Faixas de absorção FTIR características da lignina. As posições são dadas em números de onda ( $\text{cm}^{-1}$ ) e as origens das bandas são descritas de acordo com suas respectivas funções químicas

Posição Inicial ( $\text{cm}^{-1}$ )	Posição Final ( $\text{cm}^{-1}$ )	Origem da Banda
3450	3400	Ligações O – H.
3050	2840	Ligações C – H (alifático + aromático).
1740	1710	Ligações de C = O (cetona não conjugada, éster ou grupos carboxílicos).
1675	1660	Ligações C = O em conjugação ao anel aromático.
1605	1600	Vibrações de anéis aromáticos.
1515	1505	Vibrações de anéis aromáticos.
1470	1460	Deformações C – H.
1430	1425	Vibrações de anéis aromáticos.
1370	1365	Deformações C – H.
1330	1325	Aspirando a anéis de siringil.
1275	1270	Aspirando a anéis de Guaiacyl.
1230	1220	Ligações C – C, C – O.
1172	1172	Ligações C – O de grupos éster conjugados em ligninas de gramíneas.
1085	1030	Deformações C – H, C – O.
835	835	C – H fora do plano em unidades de p-hidroxifenil.

Fonte: Adaptado de Monteiro et al. (2014)

## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 Materiais

#### 3.1.1 Resíduos de Semente de Açaí

Os resíduos de semente de açaí (Figura 11) foram obtidas de produtor local, 10 dias após o processo de despulpagem dos frutos, na Estrada Mury Lumiar, em Nova Friburgo - RJ. O material é constituído por fibras curtas presentes no caroço propriamente dito. Após a coleta, os resíduos passaram por etapas de lavagem, secagem, moagem e armazenamento, preparando-os para o processamento e caracterização dos compósitos.



Figura 11 – Imagem fotográfica dos resíduos de semente de açaí. Fonte: Próprio autor.

### 3.1.2 Poli(adipato-co-tereftalato de butileno)(PBAT)

O PBAT utilizado foi adquirido pela empresa BASF, comercialmente conhecido como *Ecoflex* (F blend C 1200), um copoliéster alifático-aromático biodegradável, polimerizado a partir dos monômeros 1,4-butanodiol, ácido adípico e ácido tereftálico. A matriz polimérica encontra-se na forma de *pellets* branco. É classificada como material compostável e biodegradável de origem fóssil e sua decomposição em condições aeróbicas produz dióxido de carbono, água e biomassa e em condições anaeróbicas gera dióxido de carbono, metano, água e biomassa.

## 3.2 Metodologia

A Figura 12 apresenta o diagrama de bloco dos ensaios aplicados no estudo, destacando duas vias principais de análise: (i) o condicionamento e caracterização do resíduo de açaí e, (ii) o processamento e caracterização dos compósitos desenvolvidos. Ambas as trajetórias são marcadas por um conjunto de ensaios criteriosos que fundamentam a pesquisa, garantindo uma compreensão detalhada das propriedades e potencialidades dos materiais estudados.

### 3.2.1 Condicionamento do resíduo do açaí

Inicialmente, as sementes de açaí passaram por uma etapa de lavagem, onde foram submetidas com água corrente em excesso para remoção de impurezas superficiais como terras, cinzas e resíduos solúveis. Em seguida, os materiais foram secos em uma estufa com circulação forçada de ar (*Marca FENEM, modelo 320E*) a uma temperatura controlada de 70 °C por um período de 24 horas. Esta etapa visa reduzir o teor de umidade das sementes e otimizar a etapa de moagem.

Posteriormente, o material seco foi conduzido por um processo de cominuição em duas etapas, com o intuito de alcançar a granulometria desejada para os ensaios subsequentes. Na primeira etapa, utilizou-se um moinho granulador de duas facas (SEIBT, modelo MGHS 1,5/85, de rotação 1150 rpm) no Laboratório de Tecnologia de Materiais Poliméricos (LAMAP) do Instituto Nacional de Tecnologia, para a redução inicial do tamanho das partículas. Em sequência, o material pré-moído foi processado em um Moinho Ultracentrífugo da marca RETSCH ZM 200 (Figura 13), localizado no Laboratório Núcleo de Excelência em Reciclagem e Desenvolvimento Sustentável (NERDES), do Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano (IMA/UFRJ), resultando em partículas na escala do micrômetro.

Após a moagem, os resíduos foram cuidadosamente armazenados em sacos do tipo ziplock, os quais foram mantidos em dessecadores para assegurar a qualidade do material,

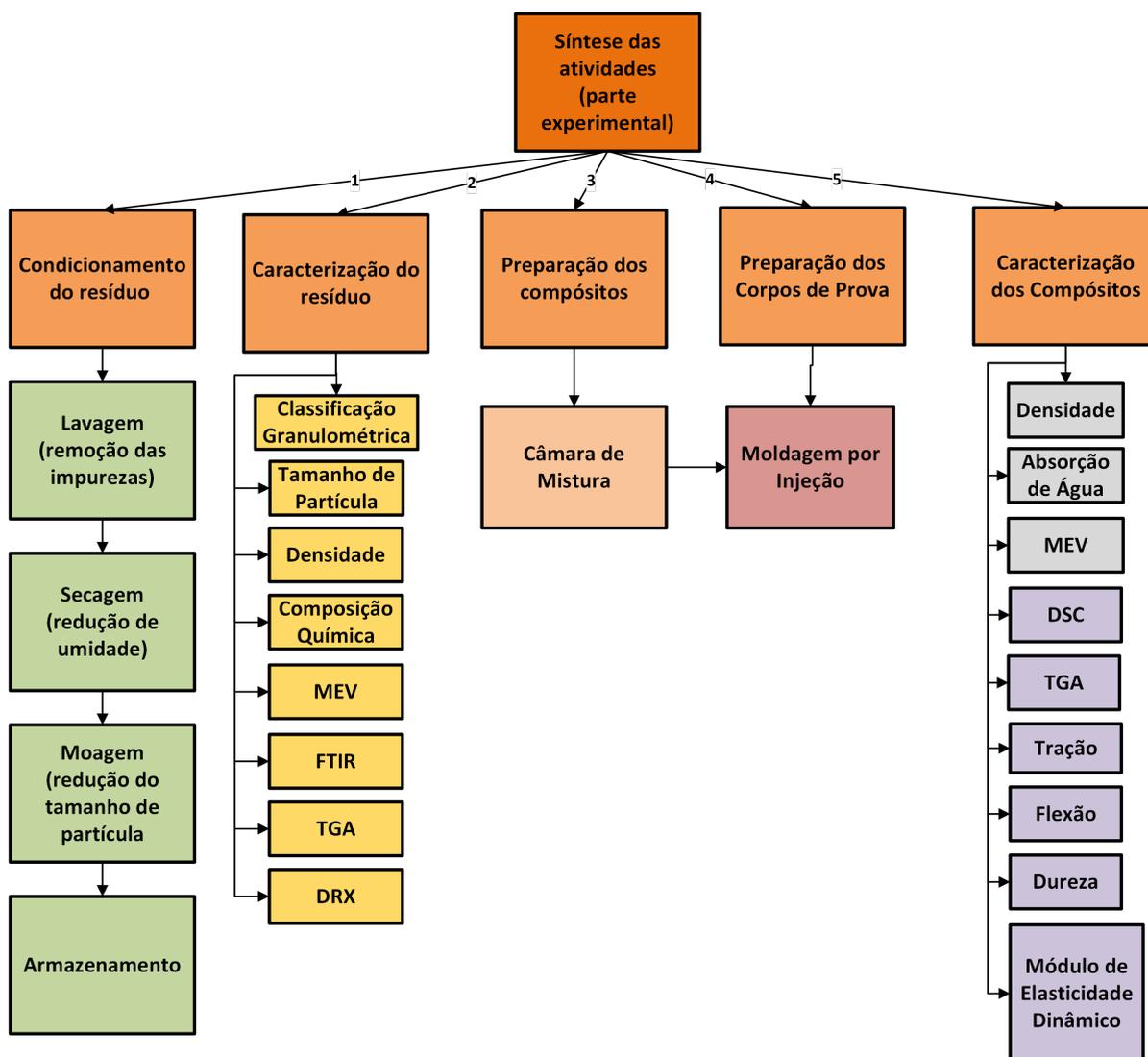


Figura 12 – Diagrama de Blocos Representando a Metodologia Experimental para Desenvolvimento e Caracterização de Compósitos Poliméricos. Fonte: Próprio autor.

a consistência e a reprodutibilidade no processamento e caracterização dos compósitos.

### 3.2.2 Caracterização do resíduo do aço

#### 3.2.2.1 Classificação Granulométrica

Após a etapa da moagem, os resíduos pré-tratados foram submetidos ao processo de peneiramento, utilizando-se um agitador de peneiras com vibração eletromagnética Restch, modelo AS basic no Laboratório de Tecnologia de Materiais Poliméricos (LAMAP/INT). A classificação granulométrica do resíduo foi feita por um conjunto de quatro peneiras respectivas com abertura de 180, 90, 75 e 45  $\mu\text{m}$ , colocadas em agitação por 15 minutos por duas vezes, em amplitude de vibração de 1,3 mm a 23°C. Os materiais retidos na peneira de 75  $\mu\text{m}$  foram escolhidos por apresentarem maior quantidade dentre os demais. A Figura 14 ilustra a imagem do agitador de peneiras.



Figura 13 – Imagens da vista externa e interna do Moinho Ultracentrífugo RETSCH ZM 200

### 3.2.2.2 Determinação do Tamanho de Partícula

A técnica utilizada para medir o tamanho das partículas ou a distribuição dos diferentes tamanhos de partículas de uma amostra envolve a difração a laser ou espalhamento de luz do material em uma unidade de dispersão aquosa, utilizando um meio ótico, segundo os princípios das medidas de Mie e Fraunhofer.

A distribuição do tamanho de partícula do resíduo de açaí foi realizada em um analisador de tamanho de partículas a laser, CILAS, modelo 1064, no Laboratório de Tecnologia de Pós (LATEP/INT), configurado na faixa de 0,04 a 500  $\mu\text{m}$  por 100 classes em meio líquido, utilizando o álcool isopropílico, um solvente que atuou como agente dispersante. A amostra de resíduo de açaí permaneceu por 60 segundos no solvente para evitar a aglomeração de partículas, ampliando a precisão durante a leitura. Os resultados obtidos apresentam os diâmetros em 10, 50 e 90% de volumes cumulativos,  $d_{10}$ ,  $d_{50}$  e  $d_{90}$ , respectivamente. A seleção das condições de operação, como a intensidade do laser e o tempo de medição, foi cuidadosamente ajustada para maximizar a precisão e a repetibilidade das medições. A informação sobre a distribuição do tamanho de partículas também auxilia na previsão de comportamentos como a viscosidade do compósito em estado fundido, a estabilidade durante o processamento e a qualidade final do produto.

### 3.2.2.3 Densidade

A determinação da densidade dos resíduos de açaí foi realizada para avaliar a massa volumétrica deste material. A densidade dos resíduos foi medida utilizando o método de picnometria a gás, reconhecido por sua precisão e adequação para materiais porosos



Figura 14 – Agitador de peneiras Retsch AS 200

e particulados. O procedimento envolveu o enchimento de um picnômetro, que é um recipiente calibrado, contendo a amostra seca e moída. Em seguida, o picnômetro foi conectado a um equipamento que evacuou o ar e o preencheu com gás, capaz de penetrar completamente nos espaços porosos do material. A densidade foi calculada com base no deslocamento do gás.

O equipamento utilizado para este ensaio foi um Ultrapycnômetro Quantachrome, modelo Ultrapycnometer 1000, com o material arrastado por gás hélio a uma temperatura de  $23 \pm 3$  °C. O ensaio foi realizado no Laboratório de Tecnologia de Pós (LATEP/INT). Em geral, cada amostra foi submetida a cinco leituras corridas, e posteriormente foi calculada a média e o desvio padrão para determinar a densidade do material.

#### 3.2.2.4 Composição Química

A análise da composição química dos resíduos de açaí foi realizada no Instituto Nacional de Tecnologia (INT), no Laboratório de Biocatálise, Bioprocessos e Bioprodutos (LABIC). O procedimento seguiu as normas do Laboratório Nacional de Energia Renovável dos EUA (National Renewable Energy Laboratory, NREL), que é uma referência estabelecida para a caracterização de biomassas (SLUITER et al., 2012; MARTINS et al., 2023; SILVA, 2024). Esse método consiste em uma hidrólise ácida em duas etapas e emprega cromatografia líquida de alta performance para a determinação dos açúcares resultantes da hidrólise dos polissacarídeos. Foram aplicadas as normas Preparation of Samples for Compositional Analysis (NREL/TP-510-42620) para a preparação das amostras, Determination of Extractives in Biomass (NREL/TP-510-42619) para quantificação dos extrativos, e Determination of Structural Carbohydrates and Lignin in Biomass (NREL/TP-510-42618) para a determinação de carboidratos estruturais e lignina.

Foram analisados os seguintes componentes: extrativos totais, extrativos polares, extrativos apolares, cinzas totais, cinzas insolúveis, cinzas sem extrativos, SRAA\* (Sólidos Resistentes ao Ataque Ácido, representando a matéria orgânica residual após a hidrólise ácida), glucana, xilana, galactana, manana, arabinana e uma fração não recuperada. Dentro dessas frações, os açúcares glucana, xilana, galactana, manana e arabinana podem estar associados a celulose e hemicelulose, enquanto o SRAA foi relacionado principalmente à lignina (MARTINS et al., 2023; SILVA, 2024).

#### 3.2.2.5 Espectroscopia no Infravermelho (FTIR)

A análise por Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) dos resíduos de açaí foi realizada para identificar a composição química e detectar quaisquer mudanças estruturais significativas no material. Este ensaio foi conduzido no Laboratório de Análises Orgânicas e Inorgânicas (LAQOI) do Instituto Nacional de Tecnologia, utilizando um espectrômetro da Thermo Electron Corporation, modelo Nicolet Nexus 470 FTIR. Para a análise FTIR, foi adotado o método do pó, preparado de forma similar ao tratamento de fibras em outros estudos. Aproximadamente 1 mg do pó foi misturado com 99 mg de brometo de potássio (KBr), um agente que não interfere na análise por ser transparente ao infravermelho (*IR transparente* significa que o KBr não absorve significativamente a radiação infravermelha nas faixas típicas de análise, permitindo que a amostra seja analisada sem interferências). A mistura foi então prensada para formar uma pastilha transparente, ideal para análises por transmitância.

O espectrofotômetro foi configurado para realizar varredura no modo de transmitância, abrangendo uma faixa de número de onda de 4000 a 400  $\text{cm}^{-1}$ , com intervalos de 1  $\text{cm}^{-1}$  de varredura. Este intervalo é amplamente utilizado para caracterizar materiais orgânicos, pois inclui a maioria das bandas de vibração características dos grupos funci-

onais, tais como os presentes em compostos lignocelulósicos. Foram realizados 64 scans com resolução de 4, para ampliar a definição das bandas espectrais e uma análise com alta precisão. Os espectros obtidos foram analisados utilizando o software OriginPro, que permitiu uma avaliação detalhada dos picos de absorção. Esta análise ajudou a identificar os grupos funcionais característicos, como celulose, hemicelulose, lignina e outros componentes orgânicos ou inorgânicos existentes.

### 3.2.2.6 Difração de Raios-X (DRX)

A técnica de difração de raios-X (DRX) possibilitou analisar a estrutura cristalina dos resíduos lignocelulósicos de açaí. Os difratogramas foram coletados no Instituto Militar de Engenharia (IME), empregando um difratômetro de Raios X, modelo X'PERT PRO MRD da PANalytical. As amostras foram manuseadas cuidadosamente em porta-amostras, compactando o pó e garantindo elevada homogeneização do material, assegurando a uniformidade das partículas.

O ensaio foi conduzido em temperatura ambiente, utilizando radiação de Cobalto ( $\text{CoK}\alpha$ ,  $\lambda = 1.789 \text{ \AA}$ ) com um filtro de ferro para minimizar a radiação secundária. A varredura foi realizada na faixa de ângulo  $2\theta$  entre  $10^\circ$  a  $70^\circ$ , com incrementos de  $0,02^\circ$  e passo por 1 s. Estes parâmetros foram escolhidos para otimizar a detecção das características cristalinas do material.

Adicionalmente, o perfil de difração foi tratado usando o software Origin Pro para interpretação detalhada do perfil do difratograma do resíduo, possibilitando uma análise quantitativa da distribuição e da natureza das fases cristalinas e amorfas presentes nos resíduos.

## 3.2.3 Preparação dos compósitos

### 3.2.3.1 Processabilidade

A preparação dos compósitos à base de PBAT foi realizada em uma câmara de mistura interna acoplada a um reômetro de torque *Haake Rheomix 600*, no Laboratório de Processamento de Polímeros II do Instituto de Química da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), equipados com rotores do tipo *ROLLER*, operando em velocidades contrarrotantes numa razão de 2:3, ajustadas em 80 rpm na temperatura de  $140^\circ\text{C}$  e tempo total de residência da mistura em 10 minutos.

O torque final foi medido em Newton-metro (Nm), enquanto a energia específica foi expressa em Joules por grama (J/g), refletindo a eficiência energética do processo de mistura. O cálculo das proporções de PBAT foi baseado no volume livre da câmara de mistura de  $69 \text{ cm}^3$ , considerando um fator de preenchimento de 70%. As concentrações

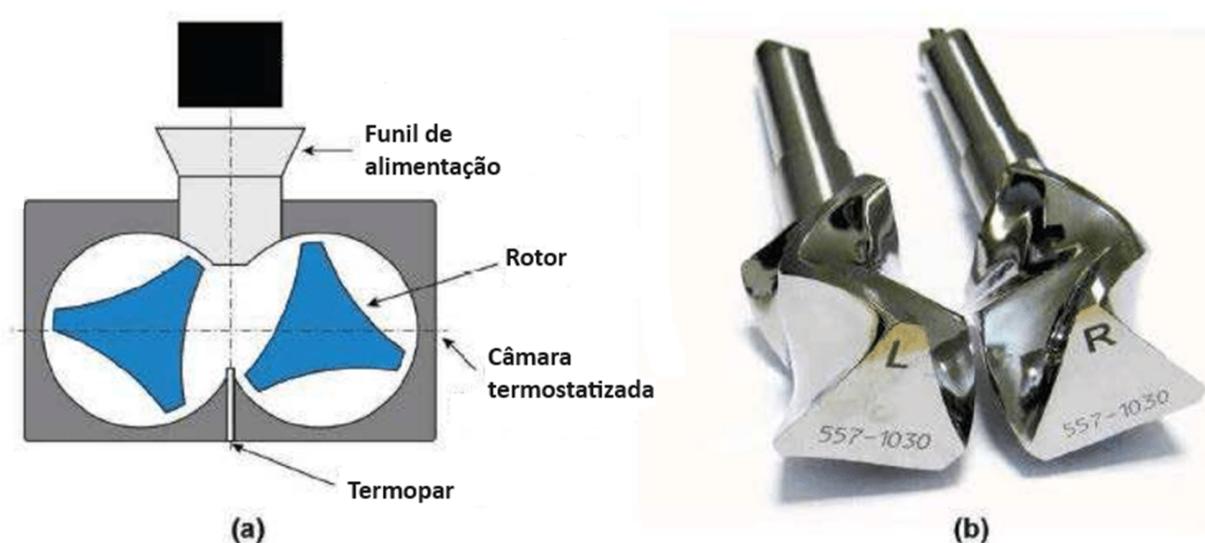


Figura 15 – Esquema do misturador interno Haake Rheomix 600 com rotores tipo Roller. A figura apresenta a câmara de mistura em vista frontal (a) e os rotores Roller utilizados para a mistura (b) Fonte: Adaptado de Besson, F. (2013).

dos materiais na mistura foram expressas em termos percentuais. A Tabela 4 ilustra as composições estudadas.

Os teores de 20% e 40% de partículas de semente de açaí (SA) foram escolhidos com base na literatura, que explora concentrações de resíduos lignocelulósicos entre 10% e 50% em PBAT, permitindo avaliar os limites de incorporação de resíduos em compósitos poliméricos (CHINA et al., 2018; YAP et al., 2020). O objetivo principal é reduzir o uso de polímeros, aumentando a quantidade de resíduo na formulação e promovendo maior sustentabilidade. A concentração de 20% busca uma composição equilibrada, preservando propriedades mecânicas e processabilidade, enquanto a concentração de 40% visa maximizar o uso do resíduo, reduzindo ainda mais a dependência de polímeros e analisando o impacto nas propriedades dos compósitos.

Reômetros de torque são equipamentos que utilizam geometrias complexas, contendo um par de rotores contrarrotantes e semi-interpenetrantes, visando reproduzir as geometrias existentes nos equipamentos convencionais, como as extrusoras de dupla rosca (D'AVILA; BRETAS, 2005).

Tabela 4 – Composições estudadas para a preparação dos compósitos.

Amostras	PBAT (%)	SA (%)
PBAT	100	0
PBAT/SA20	80	20
PBAT/SA40	60	40

(SA = semente de açaí)

Este procedimento rigoroso conduz a homogeneidade dos materiais e reprodutibilidade dos resultados. Inicialmente, o resíduo e a matriz polimérica foram secos em estufa com circulação forçada de ar (*Marca FENEM, modelo 320E*) a 80°C por 24 horas. Posteriormente, os materiais secos foram acondicionados em dessecador por mais 24 horas antes do processamento das misturas. Os compósitos obtidos foram moídos no LAMAP/INT, em um moinho de facas SEIBT, modelo MGHS 1,5/85, a uma velocidade de rotação de 1150 rpm. Após a moagem, as amostras produzidas foram armazenadas em dessecador por 48 horas antes da moldagem por injeção.

### 3.2.3.2 Moldagem por injeção

As amostras moídas foram injetadas em uma máquina de injeção semi-industrial Battenfeld™, modelo Plus 35-75 35 ton, com parafuso de diâmetro de 25 mm e razão L/D igual a 15, no Laboratório de Tecnologia de Materiais Poliméricos (LAMAP/INT) para a obtenção de corpos de prova, segundo a norma ASTM D 2240, ASTM D 638, tipo V e ASTM D 790, para a realização de ensaios de dureza, resistência à tração e resistência à flexão, respectivamente (Figura 16). As condições das amostras injetadas são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros de injeção do PBAT e resíduos de açaí.

Parâmetros de Injeção	Valores
Temperatura das Zonas (°C)	140 (bico) / 140/140 (alimentação)
Pressão de Injeção (bar)	80/70
Pressão de Recalque (bar)	40/40/40
Pressão de Fechamento do Molde (bar)	110
Velocidade de Injeção (%)	60-90
Tempo de Resfriamento do Molde (s)	30
Rotação do Parafuso (rpm)	300

Fonte: Próprio Autor.

## 3.2.4 Caracterização dos compósitos

### 3.2.4.1 Densidade dos Compósitos

A densidade dos compósitos à base de resíduos de açaí e PBAT foi determinada utilizando o método de Arquimedes, conforme especificado pela norma ASTM D792 (ASTM International, 2020). Este método consiste em medir a massa do corpo de prova no ar e a massa do corpo de prova submerso em um líquido de densidade conhecida a 23 °C. Em geral, a água destilada e o etanol são utilizados como solvente.

Inicialmente, os corpos de prova foram secos em estufa a 50 °C por 24 horas para garantir a remoção de umidade residual. Em seguida, cada corpo de prova foi pesado no

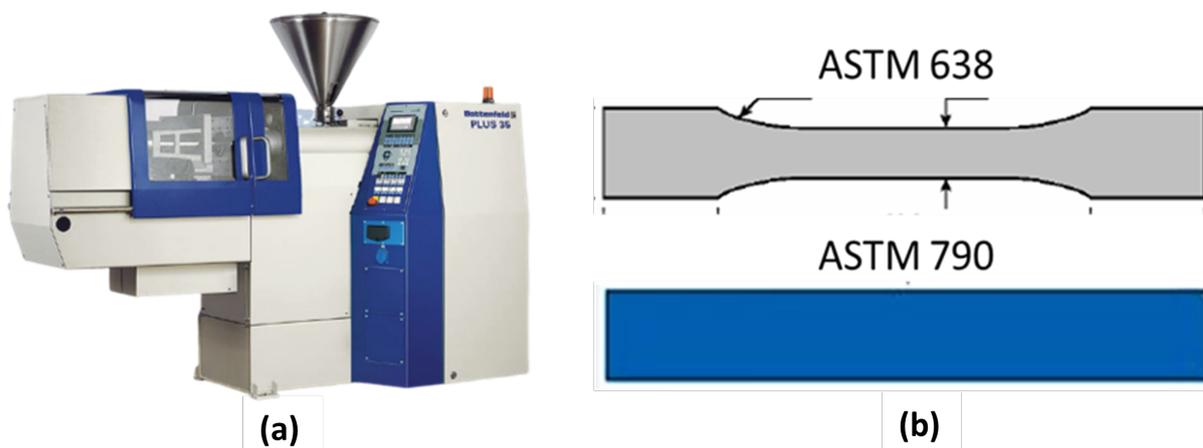


Figura 16 – Imagens fotográficas: (a) máquina de moldagem por injeção; (b) molde para confecção dos corpos de prova.

ar utilizando uma balança analítica de alta precisão (com precisão de 0,001 g). A balança utilizada foi a Balança Analítica BEL - M214AI, equipada com um kit de densidade para medições submersas. Após essa medição, o corpo de prova foi imerso em água destilada, e a massa submersa foi registrada.

A densidade ( $\rho$ ) do compósito foi calculada utilizando a equação de Arquimedes:

$$\rho = \frac{m_{\text{ar}}}{m_{\text{ar}} - m_{\text{água}}} \times \rho_{\text{água}}$$

onde  $m_{\text{ar}}$  é a massa do corpo de prova no ar,  $m_{\text{água}}$  é a massa do corpo de prova submerso, e  $\rho_{\text{água}}$  é a densidade da água destilada a 23°C (aproximadamente 0,9975 g/cm<sup>3</sup>).

O valor médio da densidade foi obtido a partir de três medições para cada compósito, garantindo a reprodutibilidade e a precisão dos resultados. Este método é amplamente utilizado devido à sua simplicidade e confiabilidade para materiais sólidos e é particularmente adequado para compósitos que podem apresentar porosidade ou variações na estrutura interna.

#### 3.2.4.2 Absorção de Água

A absorção de água do PBAT e dos compósitos à base de resíduos lignocelulósicos de açaí e PBAT foi determinada conforme a norma ASTM D570-22 (ASTM International, 2022c). Este ensaio avalia a quantidade de água absorvida pelos compósitos após imersão em água por um período determinado de 24 h.

Inicialmente, os corpos de prova foram secos em estufa a 50 °C por 24 horas e, em seguida, resfriados em um dessecador até atingirem temperatura ambiente e massa constante. Após o resfriamento, os corpos de prova foram pesados com uma balança analítica de alta precisão (com precisão de 0,001 g), registrando-se a massa inicial seca

( $m_{\text{seco}}$ ). A balança analítica utilizada foi a Sartorius Cubis MSU324S, localizada no LAMAP/INT.

Em seguida, os corpos de prova foram imersos em água destilada a 23°C por um período de 24 horas. Após o tempo de imersão, as amostras foram removidas da água, a superfície foi cuidadosamente seca com um pano limpo e seco, e as amostras foram imediatamente pesadas para determinar a massa molhada ( $m_{\text{molhado}}$ ).

A absorção de água ( $A$ ) foi calculada pela seguinte fórmula:

$$A(\%) = \frac{m_{\text{molhado}} - m_{\text{seco}}}{m_{\text{seco}}} \times 100$$

onde  $m_{\text{molhado}}$  é a massa do corpo de prova após a imersão e  $m_{\text{seco}}$  é a massa do corpo de prova seco (GOMES et al., 2017).

O ensaio foi repetido para três corpos de prova, e o valor médio foi calculado para garantir a precisão e reprodutibilidade dos resultados. Este método é essencial para avaliar a resistência dos compósitos à absorção de umidade, o que pode influenciar diretamente suas propriedades mecânicas e a durabilidade em ambientes úmidos.

### 3.2.4.3 Propriedades Mecânicas

A caracterização físico-mecânica do PBAT e seus compósitos com teores de 20% e 40% em masa de resíduos da semente de açaí foi realizado no LAMAP/INT, pelos ensaios de dureza, resistência à tração, resistência à flexão e pela técnica de excitação por impulso, conduzidos de acordo com as normas ASTM estabelecidas para garantir a precisão e confiabilidade dos resultados.

A dureza foi determinada utilizando um durômetro Shore D, adequado para medir a dureza de materiais poliméricos rígidos, seguindo a norma ASTM D2240 (ASTM International, 2021). Durante o ensaio, o durômetro foi pressionado contra a superfície dos corpos de prova por uma força padronizada, e a resistência do material à penetração pelo indentador foi medida. Os valores da dureza foram coletados diretamente no visor do instrumento. Cada medição foi repetida cinco vezes em diferentes pontos da superfície dos corpos de prova de flexão, buscando a uniformidade dos resultados.

Os ensaios de resistência à tração foram realizados utilizando uma máquina universal de ensaios, EMIC, modelo DL 3000, equipada com célula de carga de 1 kN. A velocidade de separação entre as garras foi configurada para 50 mm/min. Os corpos de prova do tipo S2 foram testados sob condições controladas de temperatura ( $23 \pm 0,3^\circ\text{C}$ ) e umidade relativa ( $55 \pm 0,5\%$ ), conforme especificado pela norma ASTM D638 (ASTM International, 2022b). A determinação do módulo elástico (MPa), a tensão de ruptura (MPa) e o alongamento na ruptura (%) foram realizadas a partir da média de sete corpos de prova para garantir a

precisão dos resultados, obtidos pelas curvas de tensão em função da deformação .

Os ensaios de resistência à flexão dos corpos de prova de dimensões de 65,3 x 12,7 e 3,2 mm foram conduzidos pelo dispositivo acoplado na mesma máquina universal de ensaios, utilizando o método de flexão em três pontos, de acordo com a norma ASTM D790 (ASTM International, 2017). A taxa de carregamento foi ajustada conforme a especificação da norma, variando entre 1,3 mm/min. Cada corpo de prova foi posicionado sobre dois apoios, e a carga foi aplicada no centro do corpo de prova, perpendicularmente ao eixo longitudinal, para avaliar a resistência à deformação sob flexão. A determinação da tensão da flexão (MPa) e do módulo elástico de flexão (MPa), foram obtidos a partir de cinco corpos de prova de cada composição, com intuito em garantir a consistência e confiabilidade dos resultados.

O módulo de elasticidade dinâmico das amostras foi determinado por meio de ensaio não destrutivo de vibração, conforme a norma ASTM E1876-22 (ASTM International, 2022a), utilizando o equipamento Sonelastic modelo SA-BC. Esse equipamento permite a obtenção do módulo elástico através da análise das frequências naturais de vibração das amostras, proporcionando uma avaliação precisa das propriedades elásticas em condições dinâmicas.

#### 3.2.4.4 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

O DSC foi utilizado para caracterizar os compósitos de resíduos lignocelulósicos de açaí, visando entender o comportamento térmico e determinar parâmetros cruciais como a temperatura de fusão ( $T_m$ ), temperatura de cristalização ( $T_c$ ), entalpia de fusão ( $\Delta H_m$ ), e o grau de cristalinidade ( $X_c$ ). Este ensaio foi realizado no Instituto Nacional de Tecnologia (INT), utilizando um Calorímetro Diferencial de Varredura modelo Q-100 da TA Instruments.

Aproximadamente 6 mg de amostras moídas dos compósitos foram pesadas com precisão de  $\pm 0.5$  mg em uma balança analítica. As amostras foram encapsuladas em cadinhos de alumínio padrão DSC para análise. As amostras foram submetidas a um ciclo de aquecimento de 40°C a 200°C sob fluxo de nitrogênio de 20 mL/min, com uma taxa de aquecimento de 20°C/min, para eliminar a história térmica dos materiais. Uma isoterma foi realizada a 200°C durante 5 minutos para garantir condições de equilíbrio térmico, seguida de um resfriamento até 40°C sob o mesmo fluxo de nitrogênio e taxa de resfriamento. Em seguida, foi realizado um segundo ciclo de aquecimento até 200°C nas mesmas condições para obter os termogramas de fusão.

O grau de cristalinidade ( $X_c$ ) foi calculado usando a fórmula:

$$X_c = \left( \frac{\Delta H_m}{w \Delta H_m^\circ} \right) \times 100$$

onde  $\Delta H_m$  é a entalpia de fusão obtida da área sob o pico endotérmico,  $\Delta H_m^\circ$  é a entalpia de fusão para o PBAT puro e 100% cristalino (114 J/g, conforme literatura) (CHEN; CHEN; YANG, 2011), e  $w$  é a fração em massa do PBAT no compósito. As temperaturas de fusão e cristalização foram determinadas a partir dos picos nos termogramas obtidos durante o segundo ciclo de aquecimento e o primeiro ciclo de resfriamento, respectivamente.

#### 3.2.4.5 Determinação do Índice de Fluidez (MFI)

O índice de fluidez (MFI) dos compósitos foi determinado utilizando um plastômetro de extrusão de plástico, conforme especificado pela norma ASTM D 1238 (ASTM International, 2010). O ensaio foi realizado em um equipamento modelo XNR (Testing Machines Incorporated Group), sob uma carga de 2,16 kg e a uma temperatura de 170°C.

#### 3.2.5 Análise Morfológica por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi realizada para caracterizar a morfologia tanto dos resíduos lignocelulósicos de açaí quanto dos compósitos obtidos a partir destes resíduos. Todas as amostras foram preparadas seguindo o mesmo protocolo, que incluiu a fixação com fitas dupla face de carbono na superfície de *stubs* metálicos para suporte durante a análise. Devido à natureza não condutora das amostras, foi aplicado um revestimento condutor, utilizando uma camada fina de platina (4 minutos) ou ouro (1 minuto, conforme o caso), no metalizador da marca EMITECH K500X, com Câmara de Revestimento a Vácuo, marca Leica. Esse procedimento foi essencial para evitar o acúmulo de carga elétrica, garantindo imagens de alta qualidade. Para os resíduos de açaí, a análise foi conduzida no Laboratório de Nanotecnologia para Materiais e Catálise (CENANO/INT) com o Microscópio Eletrônico de Varredura FEI Helios Nanolab G3 CX. As micrografias foram capturadas com aumentos de 100, 200, 500 e 1000x, proporcionando detalhes sobre a forma, textura e porosidade das partículas, que são fatores cruciais para compreender a interação do pó com a matriz polimérica. Além disso, detectores de raios X (EDS) foram utilizados para mapear a composição química das partículas. A morfologia dos compósitos foi analisada no Departamento de Ciência dos Materiais do Instituto Militar de Engenharia (IME), utilizando o Microscópio Eletrônico de Varredura FEI Quanta 250 FEG SEM. As amostras dos compósitos foram submetidas à fratura em nitrogênio líquido para obter superfícies de fratura representativas. Detectores de elétrons secundários (SEI) e retroespalhados (BEI) foram usados a uma voltagem de 20 kV, permitindo uma análise detalhada da topografia e composição elementar das superfícies de fratura e das seções internas dos compósitos. Todas as imagens foram tratadas pelo software Image J (versão 1.54g).

### 3.2.6 Análise Termogravimétrica (TGA)

A Análise Termogravimétrica (TGA) foi realizada para avaliar a estabilidade térmica tanto dos resíduos lignocelulósicos de açaí quanto dos compósitos à base de PBAT reforçados com esses resíduos. Os ensaios para os resíduos de açaí foram conduzidos no Laboratório de Catálise do Instituto Nacional de Tecnologia (LACAT/INT), enquanto os ensaios dos compósitos foram realizados no Instituto Militar de Engenharia (IME), na Seção de Química, no Laboratório de Ensaios Térmicos, utilizando um analisador termogravimétrico SHIMADZU TGA-50. Para as análises, foram utilizados entre 4 e 10 mg de cada amostra, incluindo resíduos de açaí secos e moídos e compósitos finamente processados, foram pesados. Os resíduos de açaí foram acondicionados em cadinhos de platina, enquanto os compósitos foram colocados em porta-amostras de alumínio. Esses materiais foram escolhidos devido à sua inércia química e estabilidade térmica sob as condições do ensaio, garantindo que não houvesse interação com as amostras durante o aquecimento. Os ensaios foram realizados em uma atmosfera de nitrogênio, com fluxo controlado de 100 mL/min para os resíduos de açaí e 60 mL/min para os compósitos, prevenindo a oxidação durante o aquecimento. A taxa de aquecimento foi de 10 °C/min, partindo de uma temperatura inicial de 25 °C (30 °C para os compósitos) até 600 °C. Esses parâmetros foram selecionados para permitir uma análise detalhada das transições térmicas e dos eventos de degradação. Durante o ensaio, a perda de massa foi monitorada continuamente em função da temperatura. As temperaturas iniciais ( $T_{\text{onset}}$ ) e máximas ( $T_{\text{máx}}$ ) de degradação, onde ocorre a maior taxa de perda de massa, foram identificadas a partir das curvas de perda de massa versus temperatura. Adicionalmente, uma análise derivada (DTG) foi empregada para determinar com maior precisão as faixas de temperatura associadas aos processos de degradação, como a decomposição de hemicelulose e lignina nos resíduos, e a estabilidade térmica geral nos compósitos. Os dados obtidos foram essenciais para entender o comportamento térmico das amostras, identificar as temperaturas críticas que podem influenciar seu processamento e aplicação, e comparar o impacto da adição de resíduos lignocelulósicos na estabilidade térmica dos compósitos.

### 3.2.7 Análise Estatística

Para assegurar a validade e robustez da análise estatística, inicialmente foi aplicado o teste Q para verificar a normalidade e homogeneidade dos dados obtidos nos ensaios de físico-mecânicos. Esse teste preliminar foi essencial para confirmar que os dados atendiam aos requisitos para a aplicação da análise de variância (ANOVA), garantindo uma interpretação estatística confiável (MAEDA; HARWELL, 2016; ZHANG, 1999).

Posteriormente, aplicou-se a ANOVA aos resultados dos ensaios de tração, flexão e dureza para identificar diferenças estatisticamente significativas entre os grupos analisados. O nível de confiança adotado foi de 95% ( $\alpha = 0,05$ ), garantindo que as conclusões baseadas

na análise estatística tivessem alta confiabilidade. Nos ensaios de tração, foram considerados a tensão máxima ( $\sigma_{\max}$ ), representando a resistência máxima do material antes da ruptura; o alongamento máximo ( $\varepsilon_{\max}$ ), que indica a deformação máxima atingida até o ponto de ruptura; a tensão de ruptura ( $\sigma_{\text{rup}}$ ), refletindo a resistência do compósito no ponto de falha; e o alongamento na ruptura ( $\varepsilon_{\text{rup}}$ ), relacionado à deformação total no momento da ruptura (NIEDOBA; PIĘTA, 2016; MCHUGH, 2011).

Para o ensaio de resistência à flexão, os parâmetros investigados foram o módulo de flexão, que representa a rigidez do material sob cargas flexionais, e a tensão de flexão, que indica a resistência do compósito ao momento fletor. No caso da dureza, a ANOVA permitiu avaliar as diferenças na resistência à indentação entre os diferentes grupos experimentais.

Após a ANOVA, foi aplicado o teste de comparações múltiplas de Tukey para identificar quais grupos apresentaram diferenças significativas entre si em cada ensaio. O teste de Tukey também foi realizado com um nível de confiança de 95%, adotando-se  $p$ -values de 0,05 como limite para determinar significância estatística. Esse procedimento permitiu uma análise detalhada do impacto das variáveis experimentais nas propriedades de resistência, deformação e dureza dos compósitos, assegurando a precisão e confiabilidade dos resultados obtidos e uma interpretação criteriosa das características mecânicas dos materiais desenvolvidos (TUKEY, 1953; MCHUGH, 2011).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Caracterização dos Resíduos de Açáí *Euterpe edulis*

#### 4.1.1 Inspeção Visual

A Figura 17 ilustra as imagens fotográficas das etapas de processamento da semente de açáí (SA), demonstrando as mudanças visuais que ocorrem desde o estado natural até a sua completa moagem.



Figura 17 – Etapas de processamento da semente de açáí: (a) sementes in natura, (b) semente completamente moída.

Inicialmente, observou-se que as sementes em seu estado natural (Figura 17a), apresentam uma forma esférica e com a presença de fibras curtas fixas em sua superfície, de coloração marrom escura e uma textura rugosa e rígida, de dimensões com e sem fibras na ordem de 1,6 a 0,9 cm, respectivamente. Essas características sugerem uma alta concentração de teores lignocelulósicos destes materiais.

Notou-se que as sementes após a remoção parcial das fibras revelam a predominância do caroço, destacando-se por uma superfície lisa, consistência mais dura e menos flexível. O caroço possui coloração marrom com tom mais escuro que as fibras do açáí, apresentando uma tonalidade que contrasta com a observada nas sementes não processadas. Por outro lado, as fibras separadas contrastam em textura e coloração com o caroço. Elas possuem uma coloração marrom mais clara e uma textura mais macia e flexível.

Por fim, a Figura 17b ilustra a semente completamente moída. Observou-se um pó de coloração marrom clara, oriundo da moagem em moinho ultra-centrífugo, com tamanho de partícula menor que 75  $\mu\text{m}$ .

### 4.1.2 Densidade

Os resultados da determinação das densidades das sementes de açaí de *Euterpe edulis* foram de 1,61 g/cm<sup>3</sup>. Quando comparadas a outras fibras lignocelulósicas e resíduos lignocelulósicos, essas densidades se situam dentro de uma faixa similar. (QUIRINO, 2010) encontrou valores de densidade das fibras de açaí da espécie *Euterpe precatória* em 1,41 g/cm<sup>3</sup> para o desenvolvimento de materiais compósitos. (BARBOSA, 2016) encontraram valores aproximadamente entre 1,49 e 1,51 g/cm<sup>3</sup> para os resíduos moídos das sementes de açaí *Euterpe oleracea*. A densidade das fibras de bagaço de cana-de-açúcar varia entre 1,25 g/cm<sup>3</sup> e 1,40 g/cm<sup>3</sup>, e a densidade das fibras de casca de coco é de aproximadamente 1,15 g/cm<sup>3</sup> (FERRAZ et al., 2020; FIORELLI; GOMIDE; LAHR, 2014).

A densidade de materiais lignocelulósicos é um parâmetro crítico na formulação de compósitos, pois influencia diretamente a eficiência de processamento, a dispersão das fibras/partículas na matriz polimérica e as propriedades finais do compósito, como resistência mecânica e estabilidade dimensional. Uma densidade comparável com outros materiais lignocelulósicos torna as sementes de açaí uma opção viável para substituição ou complementação de fibras convencionais em compósitos poliméricos, contribuindo para a redução de custos e o aumento da sustentabilidade ambiental (ROWELL, 1992).

### 4.1.3 Composição Química das Sementes

A análise química das sementes de açaí (*Euterpe edulis*) revelou uma composição rica em polissacarídeos, conforme apresentado na Tabela 6. Foram identificadas frações compostas por açúcares, como glucana, xilana, galactana, manana e arabinana, além de sólidos resistentes ao ataque ácido (SRAA). Essas frações são frequentemente associadas a componentes lignocelulósicos, como celulose, hemicelulose e lignina, sem, contudo, identificá-los diretamente (MARTINS et al., 2023; SILVA, 2024).

A análise química dos resíduos de semente de açaí (SA) revelou uma fração significativa de glucanas, correspondendo a  $7,0 \pm 0,5\%$  da massa seca. As glucanas são polímeros de glicose que podem incluir celulose, um tipo específico de glucana conhecido por sua estrutura altamente cristalina e ligações Beta-1,4, responsáveis pela rigidez e resistência mecânica de muitos compósitos lignocelulósicos (MALTBY et al., 1979). No entanto, como essa análise não diferencia entre tipos específicos de glucanas, é possível que essa fração contenha tanto celulose quanto outras glucanas menos cristalinas e mais flexíveis, como as encontradas nas hemiceluloses. Esse conteúdo de glucanas nos resíduos de açaí pode oferecer uma base interessante para a criação de compósitos com o PBAT, onde a potencial presença de celulose contribuiria para aumentar a rigidez do material. Ao mesmo tempo, outras glucanas mais flexíveis poderiam favorecer a maleabilidade e processabilidade do compósito (HU et al., 2018; KIEMLE et al., 2014).

Tabela 6 – Composição química das sementes in natura da *Euterpe edulis*

Componentes	Semente de <i>Euterpe edulis</i>
Massa seca (g/100g de biomassa)	
Extrativos totais	9,0 ± 1,4%
Extrativos polares	7,95 ± 0,92%
Extrativos apolares	1,34 ± 0,61%
Cinzas totais	2,0 ± 0,1%
Cinzas insolúveis	0,19 ± 0,07%
Cinzas sem extrativos	0,50 ± 0,12%
SRAA*	17,0 ± 1,9%
Glucana	7,0 ± 0,5%
Xilana	3,7 ± 0,4%
Galactana	2,2 ± 0,6%
Manana	56,2 ± 1,7%
Não recuperado	2,8%
Recuperado	97,2%

\*Sólidos resistentes ao ataque ácido representando a matéria orgânica residual após a hidrólise ácida.

As frações de polissacarídeos identificadas nos resíduos de semente de açaí incluem 3,7 ± 0,4% de xilana, 2,2 ± 0,6% de galactana e, predominantemente, 56,2 ± 1,7% de manana. Esses polissacarídeos podem estar associados a estruturas presentes em hemiceluloses devido às suas características estruturais, mas a análise não permite identificá-los diretamente como hemicelulose (MARTINS et al., 2023; SILVA, 2024). Devido à sua menor rigidez e estrutura amorfa, esses polissacarídeos podem favorecer a flexibilidade do compósito, contribuindo para um maior alongamento na ruptura e facilitando o processamento (REN et al., 2006).

De acordo com Monteiro et al. (2019), a fração predominante identificada na semente de açaí é composta por manana linear, com ligações beta-1,4, representando cerca de 50% da massa seca. Essa estrutura confere à semente uma resistência significativa à compressão e ao impacto. A manana, devido à sua densidade e menor solubilidade em relação a outros polissacarídeos, pode aproximar-se da rigidez observada em materiais como a celulose, contribuindo para a formação de compósitos robustos e duráveis. Além disso, a presença de xilana e galactana, também identificadas como frações de polissacarídeos, auxilia na composição estrutural da biomassa, favorecendo uma combinação de resistência e flexibilidade (MARTINS et al., 2023; SILVA, 2024). Contudo, esses polissacarídeos apresentam maior suscetibilidade à degradação térmica em comparação a polímeros mais rígidos, como a celulose. Estudos mostram que a xilana, por exemplo, sofre degradação significativa em temperaturas superiores a 265°C, representando uma limitação importante para o processamento de compósitos que requerem maior resistência térmica (SHEN et al.,

2015).

Os SRAA, que representam  $17,0 \pm 1,9\%$  da massa seca, são frequentemente associados à lignina, uma vez que essa fração inclui compostos resistentes ao ataque químico. A lignina, embora não identificada diretamente, é conhecida por conferir estabilidade térmica e resistência à água em materiais lignocelulósicos. Esse material, caracterizado por uma estrutura polimérica complexa, contribui para a rigidez e a resistência à biodegradação da biomassa. Em compósitos, os SRAA desempenham um papel importante na **estabilidade térmica** e na **resistência à água**, devido à sua composição rica em estruturas aromáticas. Estudos mostram que a incorporação de lignina, ou frações semelhantes, em compósitos com PBAT pode aumentar a estabilidade térmica, deslocando a temperatura inicial de degradação térmica de  $250^{\circ}\text{C}$  para até  $316^{\circ}\text{C}$  com a adição de 15% (ZHANG et al., 2020). Além disso, tais materiais podem reduzir a absorção de água nos compósitos; por exemplo, a adição de 10% de lignina ao PBAT diminuiu significativamente a permeabilidade à água (LI et al., 2021a). No entanto, concentrações elevadas dessas frações (acima de 10%) podem dificultar a dispersão homogênea no compósito. Para melhorar a compatibilidade com a matriz de PBAT, modificações químicas, como a metilação ou o uso de compatibilizantes como o anidrido maleico, têm demonstrado ser eficazes (XIONG et al., 2020). Esses resultados indicam que essas frações, associadas à lignina, são valiosas para aplicações em compósitos que exigem **durabilidade, resistência à água e estabilidade térmica**, mas suas concentrações devem ser cuidadosamente ajustadas para preservar a integridade mecânica do material.

Além disso, a baixa quantidade de extrativos apolares ( $1,34 \pm 0,61\%$ ) nos resíduos de açaí sugere que o material possui um perfil de polaridade que pode favorecer a interação com a matriz polimérica PBAT, promovendo uma melhor dispersão e estabilidade do compósito. Estudos mostram que lignocelulósicos com menos componentes apolares possuem uma maior afinidade com polímeros biodegradáveis polarizados, melhorando a aderência interfacial. Isso foi evidenciado em compósitos onde lignoceluloses modificadas aumentaram a estabilidade térmica e melhoraram a homogeneidade da matriz de PBAT (ANGELINI et al., 2016; SIYAMAK et al., 2012).

Para melhorar a compatibilidade entre lignoceluloses e PBAT, tratamentos com agentes de acoplamento como o anidrido succínico foram utilizados com sucesso, promovendo interações moleculares mais fortes e maior estabilidade estrutural do compósito (GINDL-ALTMUTTER et al., 2015). Esses tratamentos reduzem as propriedades hidrofóbicas dos resíduos lignocelulósicos, o que é benéfico para a criação de compósitos homogêneos e duráveis.

#### 4.1.4 Espectroscopia no Infravermelho (FTIR)

Na Figura 18, é mostrado o espectro vibracional obtido da amostra cominuída da semente de açaí. O espectro FTIR revelou a presença de diversos grupos funcionais importantes. As bandas em  $871\text{ cm}^{-1}$  e  $807\text{ cm}^{-1}$  estão associadas às vibrações de estiramento das ligações C-O-C, características de ligações glicosídicas  $\beta$  presentes em polissacarídeos. Essas bandas são indicativas da presença de açúcares estruturais, como os encontrados em glucanas ou mananas, que desempenham um papel crítico na estruturação do material (CARVALHO, 2016; MVONDO et al., 2017).

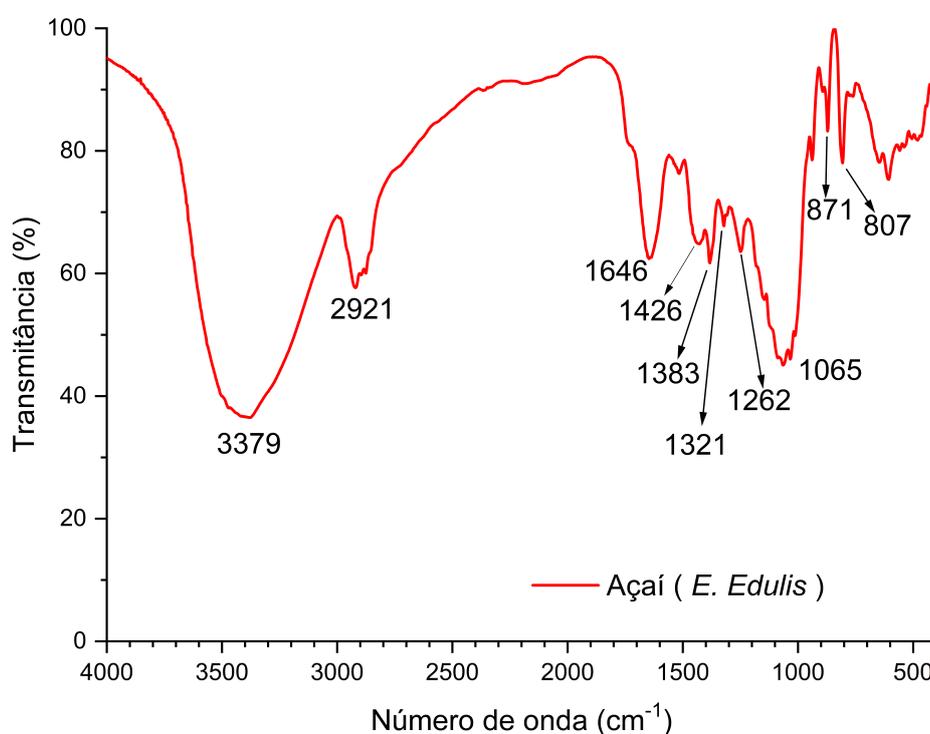


Figura 18 – Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) do resíduo das sementes de açaí *Euterpe edulis*

A banda em  $1262\text{ cm}^{-1}$  pode ser atribuída ao estiramento do grupo C-O, frequentemente associado a ligações acetiladas e ésteres presentes em hemiceluloses e outras estruturas poliméricas (RABYK et al., 2018). Essa banda é indicativa de modificações estruturais nos polissacarídeos e reforça a presença de ligações funcionais complexas. A banda em  $1065\text{ cm}^{-1}$  é característica do estiramento assimétrico das ligações C-O-C, predominante em polissacarídeos, como celulose e hemicelulose, sugerindo uma estrutura organizada com potencial de formar ligações glicosídicas (OLIVEIRA et al., 2016).

As bandas em  $1426\text{ cm}^{-1}$  e  $1378\text{ cm}^{-1}$  podem ser relacionadas, respectivamente, às vibrações de flexão dos grupos metila ( $\text{CH}_3$ ) e à deformação axial de ligações C-H, que

estão presentes em estruturas aromáticas e polissacarídicas (OLIVEIRA et al., 2016). Essas bandas sugerem a presença de componentes estruturais complexos, como polissacarídeos e fragmentos aromáticos associados a materiais lignocelulósicos, embora não indiquem diretamente sua identidade específica (MURILLO-FRANCO; GALVIS-NIETO; ORREGO, 2023; MONTEIRO et al., 2014; ROMANZINI et al., 2012).

A banda em  $1646\text{ cm}^{-1}$  é comumente atribuída às vibrações de deformação axial de grupos hidroxila (O-H) relacionados à água adsorvida, indicando a presença de umidade residual no material, uma característica típica de biomateriais com alto teor de polissacarídeos e ligação com água por hidrogênio (OLIVEIRA et al., 2016; MURILLO-FRANCO; GALVIS-NIETO; ORREGO, 2023; MONTEIRO et al., 2014).

A banda de absorção observada em  $3379\text{ cm}^{-1}$  pode ser atribuída às vibrações de estiramento O-H, que são características da celulose e da hemicelulose. A banda de absorção em  $2920\text{ cm}^{-1}$ , indica a presença de vibrações de estiramento C-H, é típica de estruturas alifáticas encontradas em lipídios e ceras, e é uma característica de celulose e hemicelulose. Isso sugere que esses componentes macromoleculares estão presentes na amostra, como esperado (MURILLO-FRANCO; GALVIS-NIETO; ORREGO, 2023; AVANTHI; BANERJEE, 2016; NEVES et al., 2020).

Esses resultados indicam que o material analisado possui uma composição rica em polissacarídeos e componentes aromáticos, característicos de materiais lignocelulósicos. Embora as bandas não confirmem diretamente a presença de celulose, hemicelulose ou lignina, elas fornecem evidências de frações associadas a esses constituintes, como açúcares estruturais e grupos funcionais relacionados.

#### 4.1.5 Difração de Raios-X (DRX)

As análises de difração de raios-X realizadas nas amostras de semente de açaí *Euterpe edulis* (Figura 19) forneceram dados sobre a estrutura cristalina. Os picos de difração  $2\theta$  identificados nas análises de DRX em  $16,02^\circ$ ,  $18,29^\circ$ ,  $20,05^\circ$ ,  $23,76^\circ$  e  $25,21^\circ$  correspondem a diferentes componentes estruturais.

Os picos em  $16,02^\circ$  e  $18,29^\circ$  podem estar associados aos planos de difração 110 e 200 da celulose, respectivamente, que indicam uma presença significativa de celulose I, caracterizada por sua alta cristalinidade. O pico em  $20,05^\circ$  indicativo de estruturas hexagonais empacotadas, pode estar relacionado com a presença de outros polissacarídeos ou arranjos moleculares específicos. Os picos em  $23,76^\circ$  e  $25,21^\circ$ , que denotam a presença de manano tipo I, destacam-se o conteúdo significativo deste polissacarídeo nas sementes. Resultados da literatura realçam a manana como um componente majoritário na sementes de Açaí (MONTEIRO et al., 2019; MURILLO-FRANCO; GALVIS-NIETO; ORREGO, 2023; SILVA, 2024). Este polissacarídeo, com sua estrutura linear e propriedades, pode

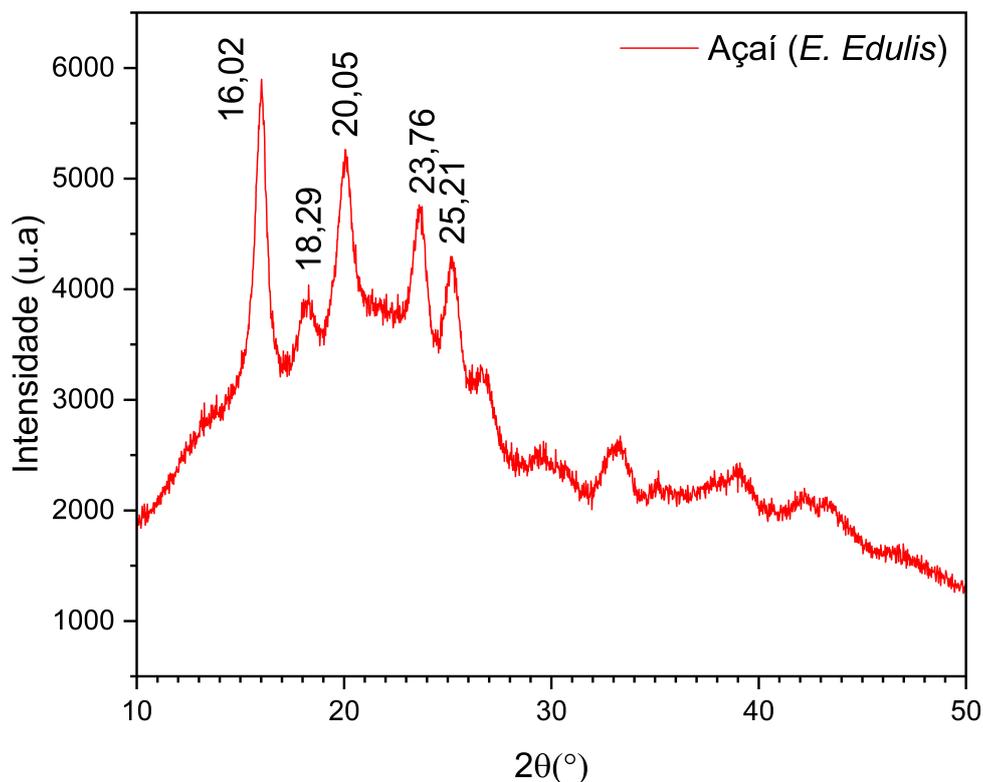


Figura 19 – DRX do resíduo de açaí

oferecer vantagens específicas quando incorporado em compósitos poliméricos, como a melhoria das propriedades de processamento e possivelmente afetando a degradabilidade do compósito (RABYK et al., 2018).

A análise comparativa com difratogramas de espécies relacionadas, como *Euterpe oleracea* e *Euterpe precatoria* revelam perfis semelhantes. Para *Euterpe oleracea*, Oliveira et al. (2016) identificaram picos de difração em  $2\theta$  de aproximadamente  $16^\circ$  e  $18^\circ$ , correspondentes aos planos cristalográficos 002 e 101, respectivamente, característicos da celulose I. Já Murillo-Franco, Galvis-Nieto e Orrego (2023) observaram picos em  $2\theta$  de  $16,8^\circ$  (plano 110) e  $21,4^\circ$  (plano 200), confirmando a presença de celulose I. Além disso, picos adicionais em  $25^\circ$  e  $26,8^\circ$  foram atribuídos ao manano tipo I, reforçando que as hemiceluloses são mais abundantes que a celulose nesta espécie. Para *Euterpe precatoria*, Barros et al. (2021) descreveram um difratograma com picos em  $2\theta$  nas posições  $15,62^\circ$ ,  $18,24^\circ$ ,  $20,11^\circ$ ,  $23,56^\circ$  e  $25,03^\circ$ , atribuídos a planos cristalográficos como (112), (212) e (107), caracterizando uma estrutura semicristalina predominantemente monocíclica. A análise da celulose extraída mostrou picos intensos em  $15,67^\circ$ ,  $22,17^\circ$  e  $34,37^\circ$  (planos 110, 200 e 004) (BARROS et al., 2021).

A análise de difração de raios-X em biomassa lignocelulósica frequentemente enfrenta

desafios para atribuir com precisão picos de difração a componentes específicos, como celulose ou hemicelulose. Embora a celulose seja amplamente reconhecida como o principal contribuinte cristalino em biomassa, estudos como o de Xu, Shi e Wang (2013) destacam que hemicelulose e lignina são predominantemente amorfas e, teoricamente, não deveriam apresentar padrões cristalinos evidentes em DRX. No entanto, interações complexas entre essas frações podem gerar sinais difusos que complicam a interpretação dos dados. Além disso, a segregação precisa entre as contribuições cristalinas e amorfas é dificultada pela sobreposição de sinais e pela natureza intrinsecamente desordenada da biomassa. Assim, é essencial abordar os resultados de DRX com cautela, levantando hipóteses sobre a composição com base em estudos complementares e na contextualização estrutural da biomassa, sem assumir categoricamente a identificação de componentes específicos (PARK et al., 2010; SONG et al., 2015; XU; SHI; WANG, 2013).

#### 4.1.6 Análise Termogravimétrica (TGA)

A análise termogravimétrica (TGA) foi empregada para investigar a estabilidade térmica das sementes de *Euterpe edulis*, conforme ilustrado na Figura 20. As curvas de decomposição térmica evidenciaram a perda de massa em função da temperatura, apresentando perfis característicos associados aos principais constituintes do material lignocelulósico, incluindo polissacarídeos estruturais e compostos mais resistentes, como lignina.

A análise termogravimétrica (TGA) foi empregada para investigar a estabilidade térmica das sementes de *Euterpe edulis*, conforme ilustrado na Figura 20. As curvas de decomposição térmica evidenciaram a perda de massa em função da temperatura, apresentando perfis característicos associados aos principais constituintes do material lignocelulósico, incluindo polissacarídeos estruturais e compostos mais resistentes, como lignina.

A análise TG revelou dois eventos principais de decomposição térmica (*Tonset*). O primeiro evento foi observado a aproximadamente 52°C (*Tonset1*), representando a evaporação de água e compostos voláteis. Este comportamento é consistente com a literatura, que aponta esta faixa de temperatura para a perda de umidade em materiais lignocelulósicos (RAMIAH, 1970). Esse evento inicial está frequentemente associado à evaporação de água livre e substâncias voláteis superficiais (CARRIER et al., 2011).

O segundo evento significativo ocorreu na faixa de aproximadamente 256°C a 357°C (*Tonset2*), relacionado à decomposição térmica de componentes estruturais, como hemiceluloses, celulose e, em menor grau, lignina. Durante essa etapa, as hemiceluloses, que possuem uma estrutura amorfa, degradam-se em temperaturas mais baixas, enquanto a celulose cristalina se decompõe em temperaturas ligeiramente superiores (SHEN et al., 2015). A lignina, devido à sua complexidade estrutural, apresenta uma degradação mais

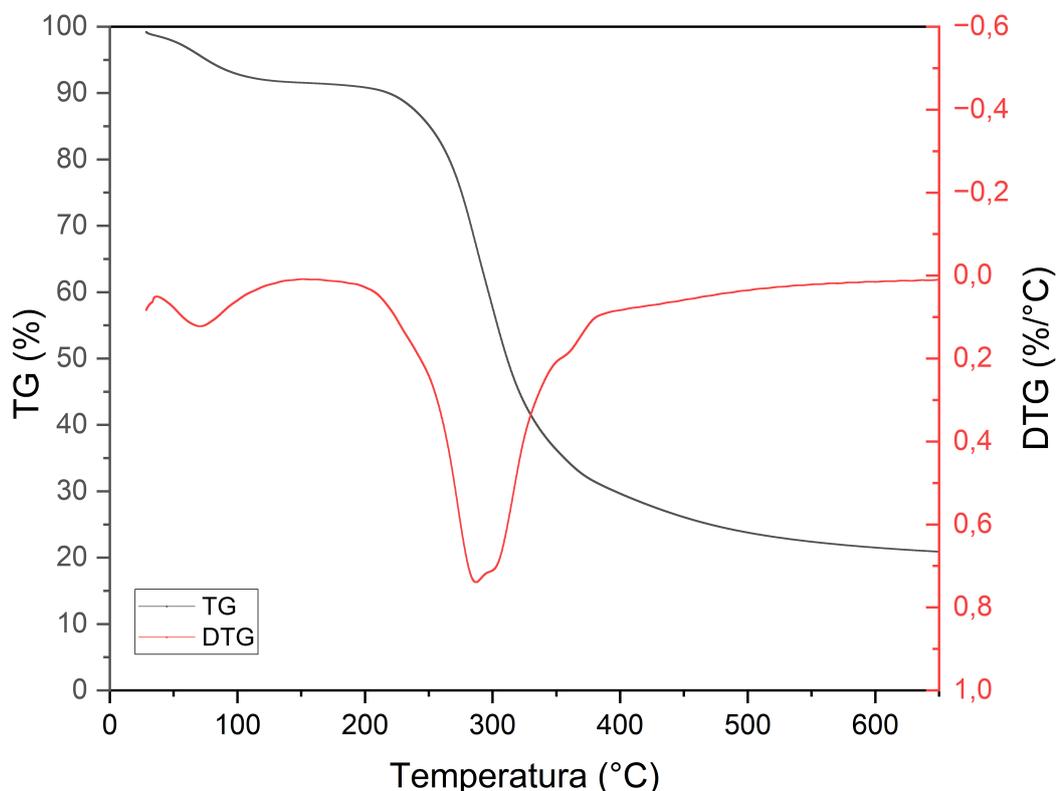


Figura 20 – Análise termogravimétrica (TGA) das sementes de *Euterpe edulis*

ampla e gradual, contribuindo para o resíduo final. Ao final da análise, foi registrada uma massa residual de aproximadamente 20%, indicando a presença de componentes mais estáveis, como lignina e materiais inorgânicos. Esses resultados estão alinhados com estudos que demonstram que resíduos lignocelulósicos apresentam remanescentes significativos devido à natureza resistente da lignina à decomposição térmica (CARRIER et al., 2011).

A análise DTG (Derivada Termogravimétrica), que representa a taxa de perda de massa em função da temperatura, destacou dois picos principais de decomposição máxima ( $T_{max}$ ). O primeiro pico foi observado a aproximadamente 71°C ( $T_{max1}$ ), indicando a evaporação de água e a liberação de compostos voláteis superficiais, como observado em materiais lignocelulósicos (CHENG; WINTER; STIPANOVIC, 2012). Este evento inicial está relacionado à perda de umidade e à volatilização de substâncias leves presentes no resíduo. O segundo pico, registrado em 286°C ( $T_{max2}$ ), corresponde à decomposição térmica máxima de polissacarídeos estruturais, como hemiceluloses e celulose. As hemiceluloses, devido à sua natureza amorfa, degradam-se primeiro, seguidas pela celulose, que apresenta uma estrutura cristalina mais resistente ao calor (SHEN et al., 2015). A lignina, embora contribua em menor intensidade no intervalo térmico, degrada-se de forma gradual, garantindo maior estabilidade térmica ao resíduo (CARRIER et al., 2011).

A perda de massa total durante o processo foi de aproximadamente 71%, com a maior parte da decomposição ocorrendo no intervalo entre os dois eventos principais. Esses resultados corroboram os achados de Rambo, Schmidt e Ferreira (2015), que identificaram padrões semelhantes de decomposição térmica em estudos de TGA de componentes lignocelulósicos individuais e misturas de biomassa, inclusive para sementes de açaí. A presença de lignina foi associada a uma maior estabilidade térmica e a uma maior produção de resíduos sólidos (cinzas) após a decomposição (CHENG; WINTER; STIPANOVIC, 2012).

De acordo com Ramiah (1970), a decomposição térmica de celulose, hemicelulose e lignina ocorre em diferentes intervalos de temperatura devido às suas distintas estruturas químicas. A hemicelulose se decompõe entre 220°C e 315°C, a celulose entre 315°C e 400°C, enquanto a lignina se decompõe em uma faixa mais ampla, de 160°C a 900°C.

Stefanidis et al. (2014) observaram que a análise TG de componentes individuais de biomassa lignocelulósica, como celulose, hemicelulose e lignina, mostrou que a celulose apresenta uma perda de massa rápida e significativa entre 260°C e 410°C, enquanto a lignina se decompõe gradualmente em uma faixa mais ampla, de 200°C a 600°C. A hemicelulose mostrou comportamento intermediário, decompondo-se entre 210°C e 370°C. Yeo et al. (2019) também relataram que a celulose tende a se decompor rapidamente em temperaturas mais altas, enquanto a lignina, devido à sua estrutura complexa e reticulada, decompõe-se em um intervalo de temperatura mais amplo e gera uma quantidade significativa de resíduos sólidos. Isso é consistente com os resultados da análise de TGA das sementes de *E. edulis*, que mostram um comportamento semelhante na decomposição de componentes que podem estar associados às características lignocelulósicas (BARBOSA et al., 2024).

Portanto, os resultados da TGA sugerem a presença de componentes que exibem comportamento térmico compatível com lignina, celulose e hemicelulose nas sementes de *E. edulis*, embora sua identificação específica não tenha sido confirmada. O perfil de decomposição térmica observado é típico de materiais lignocelulósicos. A lignina, sendo mais resistente ao calor, provavelmente contribuiu significativamente para a estabilidade térmica dos resíduos, enquanto os polissacarídeos, que incluem frações associadas à celulose e hemicelulose, são responsáveis pelas fases iniciais de decomposição. Esses resultados são importantes para entender a estabilidade térmica dos resíduos lignocelulósicos e seu potencial uso em aplicações voltadas para compósitos poliméricos (RAMBO; SCHMIDT; FERREIRA, 2015; CARRIER et al., 2011; STEFANIDIS et al., 2014). Os perfis das curvas de TG e DTG evidenciados nesta análise estão em concordância com os espectros de FTIR e DRX apresentados nos itens 4.1.4 e 4.1.5, indicando a complexidade e a heterogeneidade do material analisado.

### 4.1.7 Tamanho de Partícula

A imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e a distribuição granulométrica por difração a laser da amostra estudada estão representadas na Figura 21. Notou-se que a morfologia das amostras apresentou tamanhos de partículas distintos, formas não esféricas, superfícies rugosas e formação de aglomerados.

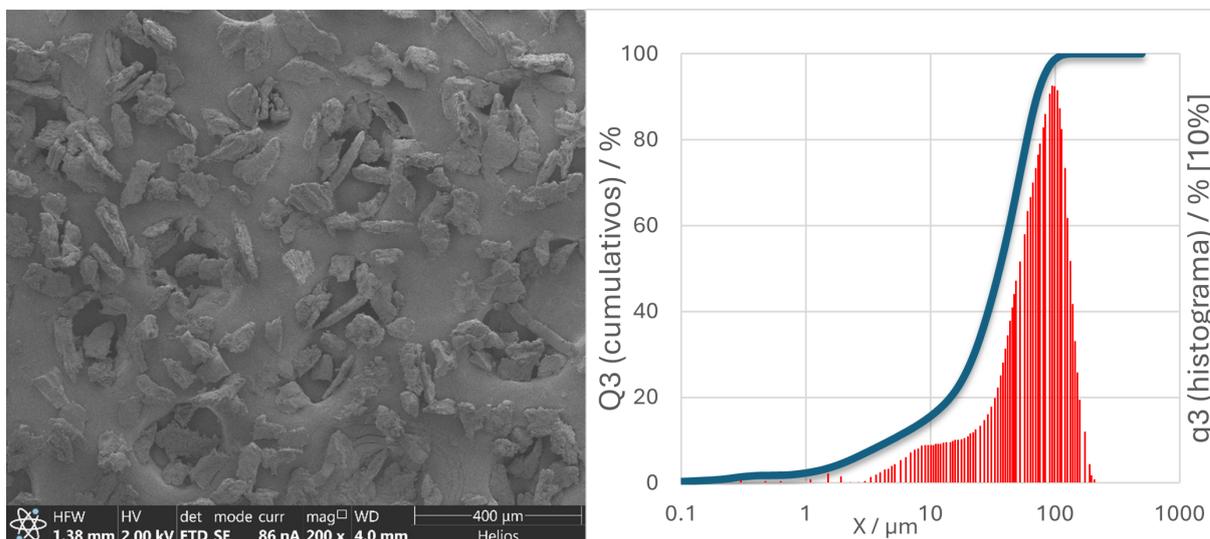


Figura 21 – Micrografia obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e distribuição granulométrica das partículas do resíduo das sementes de açaí *E. edulis*.

De modo geral, verificou-se uma distribuição estreita, com características mais homogêneas e assimétricas, deslocadas para a direita. O diâmetro médio das partículas de *E. edulis* foi de 38 μm e isso está relacionado ao processo de moagem. A morfologia irregular são características que podem influenciar positivamente a adesão entre a matriz polimérica e o reforço, resultando em propriedades mecânicas melhoradas dos compósitos.

A amostra de *E. edulis* apresentou uma distribuição granulométrica relativamente uniforme, com a maioria das partículas situadas na faixa de 10 a 100 μm. Essa faixa foi obtida devido ao processo de moagem em moinho ultracentrífugo e posteriormente peneiramento. A imagem de MEV mostra partículas com tamanhos e formas variados, indicando uma moagem eficaz dos resíduos de açaí. A distribuição granulométrica (Figura 21) demonstra que a maioria das partículas se encontra na faixa desejada para compósitos, o que é consistente com a literatura, onde partículas menores tendem a apresentar uma melhor dispersão na matriz polimérica e uma melhor interface de adesão (HABIBI et al., 2008).

Como observado em outros estudos que destacam a importância do tamanho e da forma das partículas para a eficiência da dispersão e adesão em compósitos (GÜVEN et al., 2016). A influência do tamanho das partículas na adesão e nas propriedades mecânicas dos compósitos poliméricos é bem documentada. Por exemplo, partículas menores podem

levar a uma dispersão mais homogênea e melhorar a resistência mecânica devido à maior área superficial para interação com a matriz (TAKAYAMA et al., 2013). A combinação de partículas de diferentes tamanhos também pode otimizar o empacotamento e reduzir os volumes de porosidade, resultando em materiais mais densos e robustos (NANA et al., 2021).

#### 4.1.8 Análise Morfológica das Partículas Moídas de Açai

As micrografias de MEV das sementes de açai moídas mostradas na Figura 22 revelam detalhes significativos sobre as propriedades superficiais e morfológicas das partículas. Observou-se uma superfície irregular, formas não esféricas e tamanhos distintos, características que são fundamentais para a aplicação dessas partículas como reforço em compósitos poliméricos. A irregularidade superficial pode influenciar diretamente a adesão das partículas à matriz polimérica, afetando as propriedades mecânicas do compósito final.

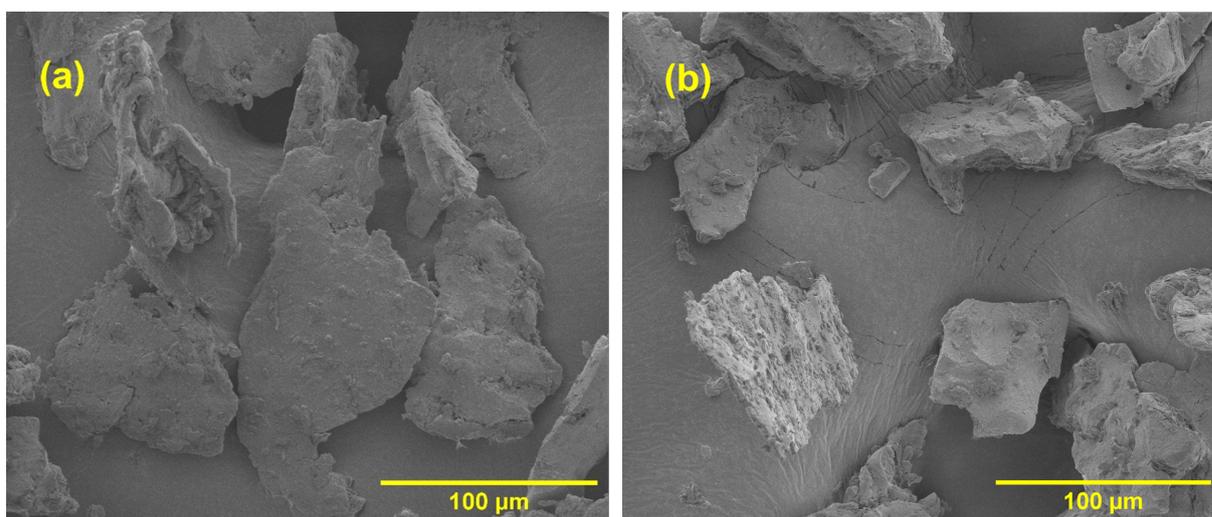


Figura 22 – Imagens Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície dos resíduos. (a) ampliação de 1000x e (b) ampliação de 1000x

Singha e Rana (2012) destacam que partículas naturais podem melhorar as propriedades mecânicas de compósitos poliméricos quando bem aderidas à matriz, graças ao aumento do entrelaçamento mecânico que essas irregularidades superficiais proporcionam. Além disso, a manipulação do tamanho e forma das partículas, como indicado por Perumal (2018), pode otimizar a distribuição e a compatibilidade com a matriz polimérica, melhorando assim as propriedades de impacto e a resistência à fadiga do compósito.

A granulometria das partículas, sendo inferior a 75  $\mu\text{m}$ , sugere uma alta área superficial em relação ao volume, o que potencialmente aumenta a interação física e química com a matriz polimérica. Essa interação é importante para a eficácia do reforço, como descrito por Kulkarni e Kishore (2002), onde tratamentos superficiais em partículas de cinza volante demonstraram melhorar a adesão dessas partículas com matrizes de

epóxi, resultando em melhores propriedades compressivas dos compósitos. Finalmente, as aplicações potenciais destes compósitos, considerando as características observadas das partículas de semente de açaí, incluem não apenas reforços mecânicos, mas também a melhoria da biodegradabilidade e sustentabilidade dos materiais compósitos, alinhando-se com as tendências atuais de desenvolvimento de materiais ecologicamente corretos e economicamente viáveis.

A Figura 23 ilustra a imagem obtida por MEV e os espectros dos possíveis elementos químicos obtidos por espectroscopia de energia dispersa (EDS) da amostra do resíduo de açaí em três pontos distintos.

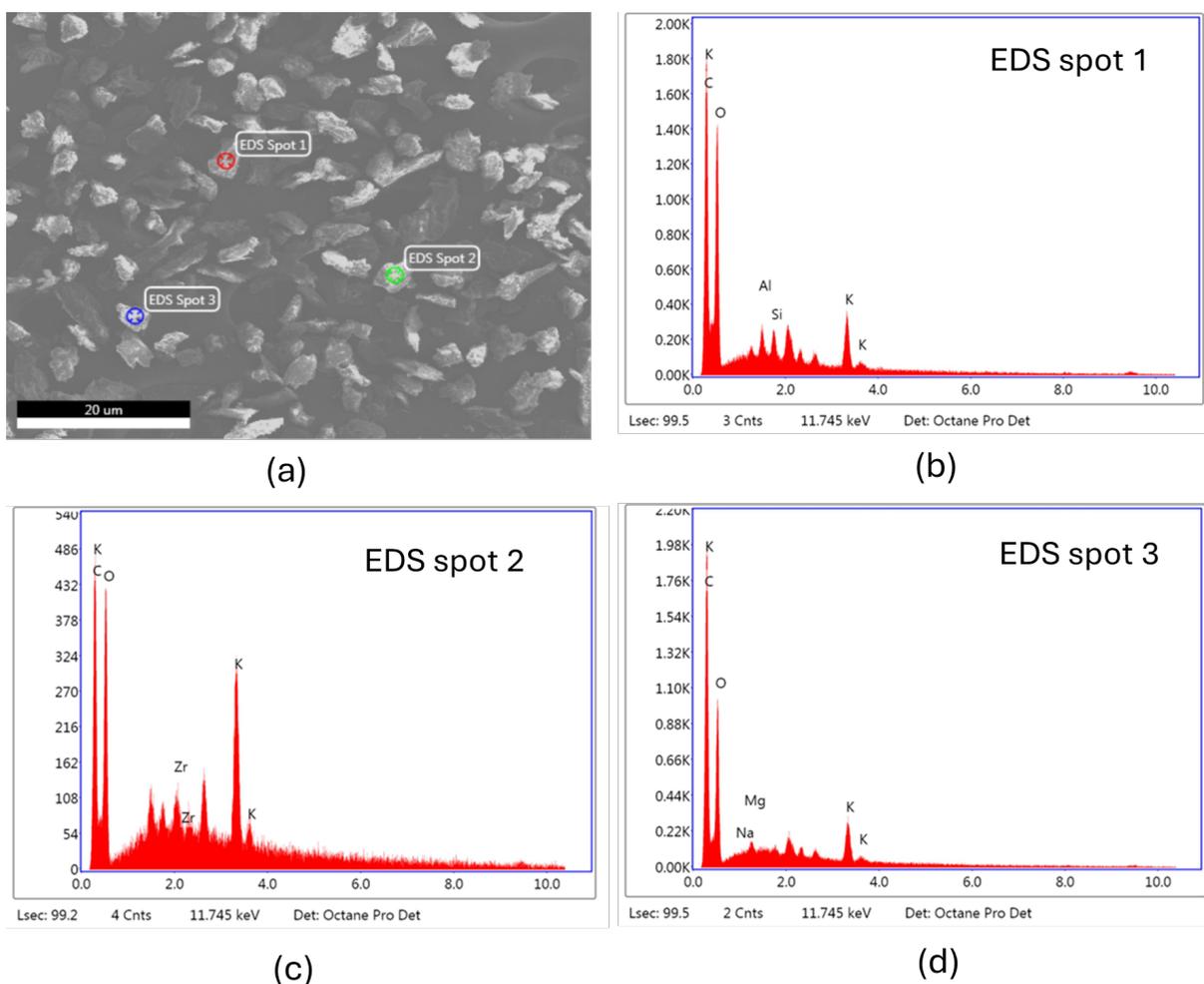


Figura 23 – Micrografia e espectro EDS das partículas de resíduo de açaí

A micrografia obtida por MEV (a) e dos espectros de EDS (b), (c) e (d) do resíduo do açaí apresentaram valores da análise qualitativa e semi-quantitativa dos elementos químicos presentes. Verificou-se que o elemento químico majoritário detectado na superfície das partículas foi o potássio, que apresenta percentual em massa de 2,34%; 7,83% e 2,23% das regiões do EDS spot 1, EDS spot 2 e EDS spot 3, respectivamente. Notou-se também os elementos químicos, como o Na (sódio), Mg (magnésio) e Al (alumínio) com valores

percentuais em massa de 2,40%; 1,70% e 1,66%, nas regiões EDS spot 1 e EDS spot 3, respectivamente.

Os teores percentuais de carbono e oxigênio presentes que aparecem nos espectros são referentes a composição química da matéria-prima constituinte, constituída por hemicelulose, celulose e lignina (COELHO et al., 2018). Cabe ressaltar que este resultado percentual de carbono presente também está relacionado a fita de carbono utilizada para fixação no suporte stub para análise no microscópio.

## 4.2 Processabilidade

No estágio inicial do processamento dos compósitos de PBAT com diferentes teores de resíduo de açaí, observou-se uma elevação do torque com o carregamento do material no interior da câmara de mistura. Esse comportamento está associado à resistência inicial dos materiais em sua forma particulada (*pellets*), o que também se reflete no aumento da energia específica durante o processamento, conforme ilustrado nas curvas de torque e energia específica em função do tempo da Figura 24 (a) e (b).

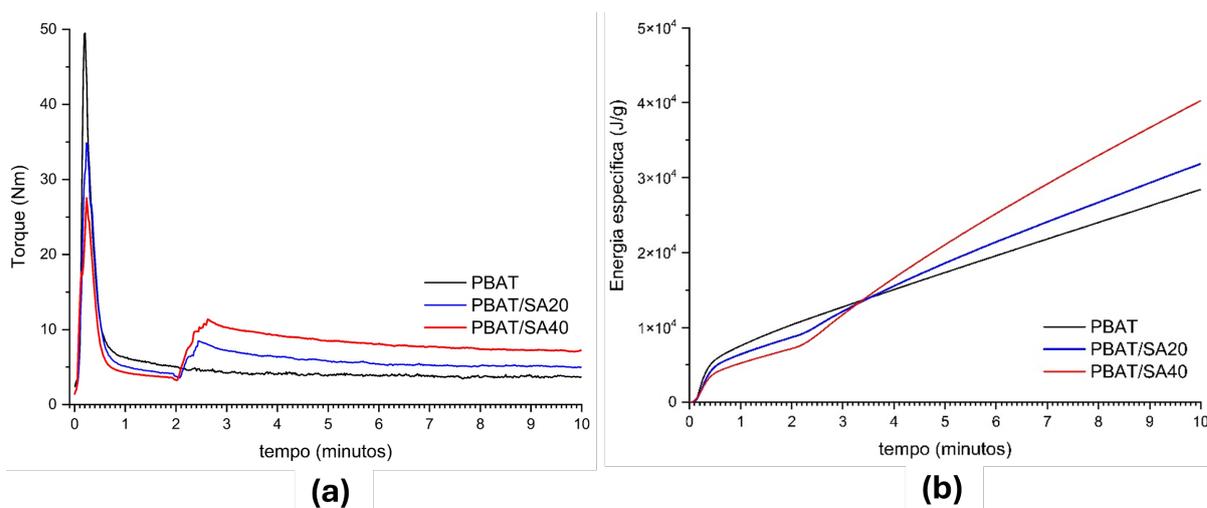


Figura 24 – Curva de torque (a) e energia específica (b) em função do tempo do PBAT e seus compósitos

O comportamento da curva de torque do PBAT diminuiu, após o primeiro minuto, devido à compressão do material, acarretando redução da viscosidade associada ao efeito da temperatura e da pressão exercida pelos rotores, o que reduz o torque da mistura e, conseqüentemente, a viscosidade, atingindo o ponto de fusão. Durante o segundo minuto de processamento, com a incorporação de teores crescentes de resíduos de açaí na câmara, a mistura apresentou um discreto aumento nos valores de torque e energia, conforme mostrado pelo perfil das curvas da Figura 24. Esse aumento está diretamente associado ao aumento da viscosidade.

A partir do 3° e 5° minuto de processamento do PBAT e os compósitos, observou-se o início da estabilização do torque em função do tempo, verificando que as misturas encontram-se no estado fundido, respectivamente. Notou-se também um discreto aumento da temperatura até o tempo total de mistura, acompanhado de uma discreta diminuição do torque. O percentual de aumento na temperatura durante o processamento de mistura foi de aproximadamente 11%, de 140°C para 155°C, sem apresentar degradação, ou seja, queda abrupta nos valores de torque.

A Tabela 7 apresenta os resultados do torque final e da energia específica do PBAT e dos seus compósitos produzidos com diferentes teores de resíduo de açaí. Tais resultados representam a média de quatro corridas realizadas, acompanhados dos respectivos desvios-padrão.

Tabela 7 – Resultados dos valores de torque final e energia específica do PBAT e dos compósitos

<b>Amostras</b>	<b>Torque (Nm)</b>	<b>Energia Específica (J/g)</b>
PBAT	3,7 ± 0,1	28.394 ± 1.712
PBAT/SA20	5,0 ± 0,1	31.813 ± 0.855
PBAT/SA40	7,3 ± 0,6	40.252 ± 2.989

Para os compósitos com 20% de resíduo de açaí, observou-se um aumento no torque final em comparação com o PBAT. Esse comportamento sugere que o resíduo de açaí, em concentrações moderadas, contribuiu para uma maior resistência ao cisalhamento durante o processamento, possivelmente devido à interação inicial entre as partículas e a matriz polimérica. Ao adicionar 40% de resíduo, o torque final aumentou, indicando que concentrações mais elevadas intensificam as interações entre os componentes, possivelmente devido ao aumento da densidade de partículas em suspensão e à formação de uma estrutura mais compacta no compósito.

Esse relato é consistente com o estudo de Masłowski, Miedzianowska e Strzelec (2019), que observaram que resíduos agrícolas, como palha de cereais, aumentaram o torque em compósitos de borracha natural devido ao elevado grau de entrelaçamento das partículas lignocelulósicas com a matriz polimérica. Resultados similares foram reportados por Montanes et al. (2019), que observaram que teores elevados de cargas lignocelulósicas podem alterar o comportamento reológico, tornando o processamento menos eficiente em alguns casos devido ao aumento da densidade de partículas suspensas. Além disso, o estudo de China et al. (2018) também demonstrou que a incorporação de borra de café em matrizes de PBAT resultou em um aumento discreto no torque das misturas devido à restrição da mobilidade das cadeias poliméricas, indicando boa processabilidade até concentrações de 50%. Este comportamento sugere que resíduos lignocelulósicos, como sementes de açaí e borra de café, possuem potencial significativo como reforços

em compósitos biodegradáveis, promovendo uma interação fibra-matriz que melhora o desempenho mecânico sem comprometer a processabilidade.

Em termos de energia específica, os valores aumentaram com a adição de 20% de resíduo de açaí em comparação com o PBAT, indicando um aumento nas interações mecânicas internas durante o processamento, demandam maior esforço energético, possivelmente devido à maior densidade de partículas na matriz, o que intensifica tanto o atrito interno quanto a dispersão do *carga* lignocelulósico. Esse aumento da energia específica com a presença de carga também foi observado por Nagarajan, Mohanty e Misra (2013) em compósitos de PHBV/PBAT com resíduos agrícolas, onde a presença da carga aumentou a rigidez e resistência, mas elevou o consumo de energia durante o processamento.

A taxa de dissipação de energia mecânica que é transformada em energia interna, durante o processamento no misturador envolvendo o preparo de compósitos, acarreta na alteração do torque e energia do sistema. O mecanismo de interação dos componentes durante o aquecimento pode ser atribuído pelo atrito partícula-partícula, atrito partícula-parede, deformação plástica pelo aumento da interação física (PBAT e carga de reforço) de forma irreversível, ocasionadas pelas tensões compressivas e de cisalhamento. A temperatura de fusão imposta ao PBAT resulta na abrupta queda do torque e os mecanismos de dissipação de energia mecânica nos sólidos particulados são substituídos pela dissipação viscosa no fundido (CANEDO; ALVES, 2017).

Quanto ao índice de fluidez (IF), os resultados mostraram que a adição do resíduo de açaí influenciou a viscosidade das misturas. Conforme apresentado na Tabela 8, os valores do IF dos compósitos diminuíram em relação ao PBAT puro, indicando um aumento na viscosidade com a presença das partículas de açaí.

Tabela 8 – Índice de fluidez (IF) do PBAT e dos compósitos com diferentes teores de resíduo de açaí.

Amostras	IF (g/10 min)
PBAT	9,72 ± 1,32
PBAT/SA20	6,87 ± 0,49
PBAT/SA40	5,02 ± 0,47

Esta redução nos valores do IF foi ocasionada pela interação entre os componentes envolvidos, principalmente em decorrência da distribuição e dispersão da carga na matriz de PBAT obtida durante a processabilidade. Deste modo, a carga restringiu a mobilidade das cadeias de polímero do PBAT, causando resistência ao escoamento. Os resultados do índice de fluidez estão em concordância com os valores de torque final e a energia dissipada ilustrada na Tabela 7. Cabe ressaltar que não foi possível determinar o índice de fluidez do PBAT antes e após o processamento na temperatura de 190°C, de acordo com as condições fornecidas na ficha técnica do material da BASF, devido o elevado índice de fluidez. Isto

pode ser um indicativo de que o material nesta temperatura apresente degradação.

Os resultados observados neste estudo, que indicam um aumento da viscosidade dos compósitos com a adição de resíduos de açaí, são consistentes com outros trabalhos que investigaram efeitos semelhantes em sistemas de polímeros com cargas naturais. Salmah, Lim e Teh (2013) observaram que o índice de fluidez (IF) de compósitos de polietileno de baixa densidade com casca de palmiste diminuiu com o aumento do carregamento do enchimento, atribuindo este comportamento ao aumento da viscosidade devido à presença do material particulado no polímero. De maneira semelhante, Dixit et al. (2006) relataram que agentes modificadores de interface aumentam a viscosidade de compósitos ao melhorar a adesão interfacial entre fibras naturais e a matriz polimérica. Além disso, Sewda e Maiti (2012) verificaram um aumento na viscosidade do polietileno de alta densidade quando preenchido com farinha de casca de árvore, destacando que as partículas do enchimento obstruem o fluxo do polímero. Esses achados corroboram a ideia de que a adição de partículas naturais, como o resíduo de açaí, pode aumentar a resistência ao escoamento do polímero, refletida na redução do índice de fluidez (IF). Isso ocorre porque as partículas naturais introduzem barreiras físicas ao movimento molecular da matriz polimérica, gerando um aumento na viscosidade do material. Além disso, a interação entre a superfície das partículas e o polímero pode aumentar a adesão interfacial, dificultando ainda mais o escoamento e exigindo maior esforço para a deformação do compósito durante o processamento. Este fenômeno é amplamente descrito em sistemas de compósitos com cargas naturais, onde o comportamento de cisalhamento e a viscosidade são impactados pelo conteúdo e pela dispersão das partículas no material base (SALMAH; LIM; TEH, 2013; DIXIT et al., 2006; SEWDA; MAITI, 2012).

## 4.3 Caracterização dos Compósitos

### 4.3.1 Propriedades Mecânicas

#### 4.3.1.1 Dureza

A análise dos dados de dureza para o PBAT puro e para os compósitos com diferentes concentrações de resíduo de açaí (20% e 40%) revelou variações relevantes que indicam a influência das partículas da semente de açaí sobre as propriedades mecânicas dos compósitos, conforme apresentado na Tabela 9. A mediana de dureza do PBAT puro foi de 24. É importante destacar que a mediana foi utilizada como medida central para os resultados, uma vez que é o padrão recomendado para a análise de dureza, sendo mais robusta em relação a valores atípicos e proporcionando uma representação mais fiel da distribuição dos dados experimentais.

A aplicação da análise de variância (ANOVA) e do teste de Tukey nos dados de

Tabela 9 – Resultados dos valores de dureza do PBAT e dos compósitos

Amostra	Dureza (mediana)
PBAT	24 <sup>b</sup>
PBAT com 20% de SA	27 <sup>b</sup>
PBAT com 40% de SA	32 <sup>a</sup>

<sup>a,b</sup> Letras iguais indicam que as medianas são estatisticamente iguais entre si (p-valor  $\geq 0,05$ ). Letras distintas indicam diferenças estatisticamente significativas (p-valor  $< 0,05$ ).

dureza evidenciou que as diferenças entre o PBAT puro e o compósito com 20% de resíduo de açaí não foram estatisticamente significativas (p-valor  $\geq 0,05$ ). Por outro lado, a adição de 40% de resíduo de açaí resultou em um incremento significativo na dureza, com a mediana alcançando 32 e coeficiente de variação de 4,80%. Esses resultados indicam que, em maiores concentrações, a presença da carga lignocelulósico contribui para uma maior rigidez do compósito, possivelmente devido à interação entre as partículas da carga e a matriz polimérica, resultando em uma estrutura mais coesa.

Esse comportamento é consistente com o estudo de Rybiński et al. (2018), que observou um aumento significativo na dureza de compósitos de borracha natural reforçados com lignocelulose, com incremento de aproximadamente 40% ao incorporar cargas lignocelulósicas. De forma semelhante, Li et al. (2021a) documentaram um incremento de dureza em compósitos de PBAT ao incorporar lignina modificada, onde a dureza do PBAT puro (42 Shore-D) aumentou para até 49 Shore-D, representando um incremento de aproximadamente 17%.

Entretanto, ao comparar o compósito com 20% de resíduo de açaí ao de 40%, foi observado um efeito significativo (p-valor  $< 0,05$ ), com maior dureza na formulação com 40%. Esses achados reforçam a utilidade dos resíduos lignocelulósicos como reforço em compósitos, particularmente em concentrações mais elevadas. Esse resultado também está alinhado com os achados de Masłowski, Miedzianowska e Strzelec (2019), que relataram que, em formulações contendo altos teores de resíduos lignocelulósicos, o aumento na rigidez pode ser atribuído à melhor distribuição e interação da carga na matriz.

Portanto, os resultados indicam que a adição de resíduo de açaí em concentrações elevadas (40%) aumentou a dureza do compósito, promovendo uma estrutura mais rígida. Em concentrações moderadas (20%), o impacto na dureza é menos evidente, mas a adição ainda contribui para uma matriz mais estável. Esses achados são coerentes com a literatura recente sobre compósitos lignocelulósicos (HEJNA et al., 2020).

## 4.3.1.2 Ensaio de Tração

Os resultados dos ensaios de tração para os compósitos de PBAT reforçados com resíduos de semente de açaí (Tabela 10) revelaram variações significativas nas propriedades mecânicas, evidenciando o impacto do tipo de tratamento aplicado ao material. A análise de variância (ANOVA) seguida pelo teste de Tukey indicou que a adição de diferentes concentrações de resíduo de açaí impacta de maneira moderada a tensão de escoamento, a deformação de escoamento, a tensão na ruptura, a deformação na ruptura e o módulo elástico.

Tabela 10 – Resultados dos ensaios de resistência à tração do PBAT e seus compósitos

Parâmetro	PBAT	PBAT 20%SA	PBAT 40%SA
Tensão de Esc (MPa)	10,20 ± 0,42 <sup>a</sup>	10,79 ± 0,19 <sup>b</sup>	9,99 ± 0,38 <sup>a</sup>
Deformação de Esc. (%)	8,65 ± 1,5 <sup>a</sup>	5,73 ± 1,3 <sup>b</sup>	2,82 ± 0,9 <sup>c</sup>
Tensão na Ruptura (MPa)	19,71 ± 1,41 <sup>a</sup>	12,37 ± 0,40 <sup>b</sup>	9,19 ± 0,55 <sup>c</sup>
Deformação na Ruptura (%)	239,39 ± 23 <sup>a</sup>	150,77 ± 23 <sup>b</sup>	121,12 ± 18 <sup>b</sup>
Módulo de Elasticidade (1%)	752,27 ± 89,7 <sup>b</sup>	818,24 ± 133,9 <sup>a,b</sup>	903,61 ± 79,8 <sup>a</sup>

<sup>a, b, c</sup>Letras iguais indicam que as médias são estatisticamente iguais entre si (p-valor ≥ 0,05). Letras distintas indicam diferenças estatisticamente significativas (p-valor < 0,05).

A tensão de escoamento (ponto de escoamento) das amostras mostrou uma leve variação entre os tratamentos. O PBAT apresentou um valor de tensão de escoamento de 10,20 MPa, enquanto o compósito PBAT 20%SA obteve um valor ligeiramente superior de 10,79 MPa. De acordo com o teste de Tukey, os valores de tensão de escoamento de 10,20 MPa (PBAT Puro) e 9,99 MPa (PBAT 40%SA) são estatisticamente iguais ( $p \geq 0,05$ ), enquanto o valor de 10,79 MPa (PBAT 20%SA) é estatisticamente distinto dos demais ( $p < 0,05$ ). Esses dados sugerem que a adição de 20% de resíduo de açaí melhora discretamente a resistência à tração do compósito, enquanto o aumento da carga para 40% não promove um ganho adicional significativo.

Em relação à deformação de escoamento, observou-se uma diminuição expressiva conforme o teor de resíduo de açaí foi elevado. O PBAT Puro apresentou uma deformação de escoamento de 8,65%, enquanto o compósito PBAT 20%SA registrou uma redução significativa para 5,73% ( $p < 0,05$ ). A inclusão de 40% de resíduo de açaí (PBAT 40%SA) resultou em uma deformação de escoamento de apenas 2,82%, também estatisticamente distinta das demais ( $p < 0,05$ ). Esses dados indicam que o aumento do teor de resíduo de açaí aumenta a rigidez do compósito, limitando sua capacidade de deformação.

A análise da tensão na ruptura reforça essas observações. O PBAT Puro apresentou uma tensão na ruptura de 19,71 MPa, enquanto os compósitos PBAT 20%SA e PBAT 40%SA exibiram valores menores, de 12,37 MPa e 9,18 MPa, respectivamente. O teste de Tukey indicou que ambas as amostras contendo resíduo de açaí diferem estatisticamente

do PBAT ( $p < 0,05$ ), sugerindo uma diminuição progressiva da resistência à ruptura com o aumento do teor de resíduo, possivelmente devido à menor coesão entre os componentes.

Para a deformação na ruptura, os resultados seguem a mesma tendência da deformação de escoamento. O PBAT apresentou uma deformação na ruptura de 239%, enquanto os compósitos PBAT 20%SA e PBAT 40%SA exibiram valores de 150% e 121%, respectivamente. De acordo com o teste de Tukey, os valores de 150% e 121% são estatisticamente iguais ( $p \geq 0,05$ ), enquanto a matriz de PBAT é significativamente diferente ( $p < 0,05$ ), indicando que maiores teores de resíduo resultam em uma perda significativa de ductilidade.

Para o módulo de elasticidade ( $E$ ) a 1% os resultados mostraram um aumento consistente com os teores crescentes de resíduo. O compósito de PBAT 40%SA apresentou valor de 903,61 MPa, superior ao PBAT, que registrou 752,27 MPa ( $p < 0,05$ ). O PBAT 20%SA, com valor intermediário de 818,24 MPa, não diferiu estatisticamente do PBAT Puro ( $p \geq 0,05$ ). Esses resultados indicam que a adição de resíduo de açaí em concentrações elevadas aumenta a rigidez do compósito, em concordância com a redução nas propriedades de deformação observada.

Em síntese, os resultados dos ensaios de tração (Tabela 10) demonstram que a inclusão de resíduos de semente de açaí afeta de forma significativa as propriedades mecânicas do PBAT. Enquanto a adição de 20% em massa de resíduo promove um leve ganho ou mantém o desempenho mecânico com a substituição de parte do polímero por carga de reforço, sugerindo um teor ótimo na composição, o aumento para 40% compromete tanto a resistência quanto a deformação do compósito. A concentração de resíduo de açaí deve ser cuidadosamente controlada para equilibrar rigidez e flexibilidade, dependendo da aplicação específica do compósito em desenvolvimento.

Em comparação com os resultados da literatura, o estudo de Itabana et al. (2023) sobre compósitos de PBAT com adição de talco também demonstra a influência significativa dos materiais de reforço nas propriedades mecânicas. Itabana e colaboradores observaram um aumento expressivo no módulo de elasticidade dos filmes de PBAT com a adição de 15% e 25% de talco, seguido por estiramento uniaxial, resultando em um ganho de aproximadamente 1939% e 2486%, respectivamente, em comparação ao PBAT puro. Esse aumento substancial no módulo é associado ao aumento na cristalinidade do material, que foi impulsionada pela dispersão e pela orientação uniaxial das partículas de talco. No presente estudo, embora não tenha sido realizado estiramento uniaxial, a adição de resíduos de açaí também resultou em um incremento no módulo de elasticidade. Além disso, Itabana et al. (2023) relataram uma redução significativa na elongação na ruptura dos compósitos após o estiramento uniaxial, similar ao comportamento observado nos compósitos de PBAT com resíduos de açaí no presente estudo, provavelmente devido à maior rigidez conferida pelo reforço mineral e à orientação das cadeias poliméricas.

Outros resultados como os de Pinheiro, Morales e Mei (2014) sobre biocompósitos de PBAT reforçados com fibras de Munguba (*Pseudobombax munguba*) apresentaram algumas semelhanças. Nesse estudo, a adição de 10% e 20% de fibras de Munguba na matriz de PBAT resultou em um aumento significativo do módulo elástico, alcançando um incremento de aproximadamente 70% com a adição de 20% de fibras tratadas. Esse comportamento é coerente e indica que a incorporação de fibras naturais e resíduos lignocelulósicos pode contribuir para o aumento da rigidez dos compósitos de PBAT, embora a magnitude desse aumento dependa das características específicas do reforço e do tratamento aplicado. Além disso, o estudo verificou uma redução na tensão e na elongação na ruptura com o aumento da carga de reforço. No caso das fibras de Munguba, a tensão na ruptura caiu de 21,0 MPa no PBAT puro para valores entre 6,0 e 10,0 MPa nos compósitos, dependendo da concentração e do tratamento da fibra, enquanto a elongação na ruptura diminuiu de 806% para até 103%. Esses comportamentos refletem a tendência geral em compósitos reforçados com fibras naturais, onde o aumento da rigidez com a adição de fibras é acompanhado por uma diminuição na capacidade de alongamento e na resistência à tração, frequentemente devido à menor interação interfacial e à rigidez das partículas de reforço, que atuam como pontos de falha.

Portanto, o comportamento dos compósitos estudados nesse trabalho reflete a tendência amplamente observada em compósitos poliméricos reforçados com resíduos lignocelulósicos, onde o aumento da rigidez ocorre às custas da ductilidade e da resistência à tração. Isso ocorre principalmente devido à rigidez intrínseca das partículas de reforço e à menor capacidade de deformação da matriz ao redor delas, exacerbada por interfaces menos compatíveis quimicamente (NEVES et al., 2020; AZEVEDO et al., 2021; ITABANA et al., 2023).

#### 4.3.1.3 Ensaio de Resistência à Flexão

A análise dos resultados do ensaio de resistência à flexão indicou diferenças nas propriedades mecânicas dos compósitos de PBAT reforçados com diferentes teores de resíduos de semente de açaí. A análise de variância (ANOVA) revelou que os valores de tensão de flexão ( $\sigma_f$ ) e módulo de flexão ( $E_f$ ) apresentam variações estatisticamente significativas entre as amostras avaliadas.

Especificamente, a tensão de flexão das amostras PBAT Puro e PBAT 20%SA apresentou médias estatisticamente iguais, com valores de  $\sigma_f$  de 7,5 MPa para ambas as amostras, conforme observado na Tabela 11. A ausência de diferença significativa entre esses valores foi confirmada pelo teste de Tukey, indicando que a adição de 20% de resíduo de açaí não resultou em alteração substancial na tensão de flexão do material. Em contraste, o compósito PBAT 40%SA apresentou um aumento significativo na tensão de flexão, atingindo 10,4 MPa, o que representa uma melhoria significativa em relação às

outras formulações. Essa diferença foi confirmada pela comparação dos valores pelo teste de Tukey, que indicou distinção estatística entre PBAT 40%SA e os demais grupos ( $p < 0,05$ ).

Tabela 11 – Resultados dos ensaios de resistência à flexão do PBAT e dos compósitos

Parâmetro	PBAT Puro	PBAT 20%SA	PBAT 40%SA
Tensão de Flexão, $\sigma_f$ (MPa)	$7,5 \pm 0,7^b$	$7,5 \pm 0,9^b$	$10,4 \pm 1,4^a$
Módulo de Flexão, $E_f$ (MPa)	$191 \pm 17^b$	$192 \pm 23^b$	$310 \pm 56^a$

<sup>a,b</sup>Letras iguais indicam que as médias são estatisticamente iguais entre si ( $p$ -valor  $\geq 0,05$ ). Letras distintas indicam diferenças estatisticamente significativas ( $p$ -valor  $< 0,05$ ).

No que se refere ao módulo de flexão ( $E_f$ ), o comportamento dos compósitos seguiu uma tendência semelhante. Tanto PBAT puro quanto PBAT 20%SA demonstraram valores de  $E_f$  estatisticamente equivalentes, com médias de 191 MPa e 192 MPa, respectivamente, reforçando a constatação de que a adição de até 20% de resíduo de açaí não impacta significativamente na rigidez do compósito em ensaios de flexão. No entanto, a amostra PBAT 40%SA obteve um módulo de flexão superior, com um valor de 310 MPa. A análise de Tukey corroborou que, este valor é estatisticamente diferente dos demais ( $p < 0,05$ ), evidenciando que a incorporação de 40% de resíduo de açaí contribui de forma relevante para o aumento da rigidez do material.

Esses resultados sugerem que a adição de 40% de resíduo de semente de açaí ao PBAT não promoveu melhoria nas propriedades mecânicas, mas ainda assim resultou em compósitos com desempenho mecânico aceitável, particularmente em termos de resistência e rigidez à flexão. Apesar de não haver avanços significativos, a inclusão de uma quantidade elevada de resíduo contribui para a redução do uso de polímero, favorecendo a sustentabilidade do material. Além disso, o acabamento superficial liso indica uma boa processabilidade, mesmo com o alto teor de carga, demonstrando o potencial de aplicação do compósito em casos onde propriedades de flexão mais moderadas sejam adequadas.

O desempenho similar entre o PBAT puro e o PBAT com 20% de resíduo de semente de açaí indica que concentrações menores de resíduo podem não ser suficientes para modificar as propriedades mecânicas, possivelmente devido a uma dispersão menos eficaz ou à quantidade insuficiente de material reforçador. No entanto, a manutenção da tensão e do módulo de flexão com a incorporação de 20% de resíduo, em comparação ao PBAT puro, representa um avanço significativo do ponto de vista do escoamento do material e da processabilidade. Além disso, a substituição parcial do polímero por resíduo de açaí contribui para a sustentabilidade do compósito, destacando seu potencial para aplicações ambientalmente responsáveis (WANG; GANEWATTA; TANG, 2020; NAGARAJAN; MOHANTY; MISRA, 2013).

Deste modo, pode-se concluir que o nível de carga de resíduo lignocelulósico é

um fator crítico na determinação das propriedades mecânicas de compósitos de PBAT. Embora concentrações mais elevadas, como 40%, possam oferecer benefícios em termos de rigidez e resistência em alguns contextos, os resultados do presente estudo indicam que essa quantidade deve ser cuidadosamente avaliada para evitar comprometimento da processabilidade e da uniformidade do compósito. Esses achados estão alinhados com estudos prévios que enfatizam a importância de ajustar a quantidade de reforço para garantir uma boa interação entre as fases e um desempenho mecânico equilibrado em compósitos poliméricos (LEITE-BARBOSA et al., 2024b).

A literatura reporta que o PBAT puro apresenta uma resistência à flexão média de aproximadamente 7,5 MPa e um módulo de flexão em torno de 126 MPa Jiao, Zeng e Huang (2020). Esses valores refletem a flexibilidade e a baixa rigidez desse material, que o tornam adequado para aplicações onde são necessárias propriedades de flexão moderadas, como embalagens flexíveis e filmes plásticos Itabana et al. (2024). No entanto, para aplicações onde maior rigidez ou resistência à flexão são necessárias, o PBAT puro pode ser insuficiente, o que justifica o desenvolvimento de biocompósitos que melhoram essas propriedades mecânicas.

Como já visto, os resultados dos ensaios de flexão dos compósitos de PBAT com adição de 20% e 40% de resíduos de semente de açaí mostraram que a resistência à flexão e o módulo de flexão aumentaram em comparação ao PBAT sem carga. Especificamente, o compósito com 40% de resíduos de açaí apresentou uma resistência à flexão de 10,4 MPa e um módulo de flexão de 310 MPa, valores que superam os de PBAT puro reportados por Jiao, Zeng e Huang (2020) e Itabana et al. (2024). Esse aumento é atribuído ao efeito reforçador dos resíduos de açaí, que contribuem para a rigidez da matriz polimérica, além de possibilitar uma melhor interface matriz-partícula, conforme observado nas análises morfológicas.

#### 4.3.1.4 Ensaio de Módulo de Elasticidade Dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico ( $E$ ) foi determinado utilizando o equipamento Sonelastic, que realiza medições baseadas nas frequências de vibração natural das amostras, diferindo dos ensaios de tração e flexão, que são métodos estáticos. Este ensaio apresenta vantagens por permitir uma avaliação rápida e não destrutiva das propriedades elásticas dos materiais, além de fornecer um módulo de elasticidade que pode refletir a resposta do material a oscilações de pequena amplitude, o que pode ser relevante para aplicações onde o material está sujeito a vibrações ou impactos.

Os valores obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico foram diferentes entre as amostras, conforme confirmado pela análise de variância (ANOVA) e pelo teste de Tukey. A ANOVA indicou uma diferença estatisticamente significativa entre as médias dos módulos elásticos para as amostras de PBAT, PBAT com 20% de resíduos de semente

de açaí (SA) e PBAT com 40% de SA, com um nível de significância de 5%, conforme os valores reunidos na Tabela 12. O teste de Tukey foi então aplicado para comparar as médias individualmente, revelando que o módulo de elasticidade dinâmico aumentou com a incorporação dos resíduos de SA.

Tabela 12 – Valores do módulo elástico obtidos pela técnica de excitação por impulso do PBAT e seus compósitos

Amostra	PBAT	PBAT 20%SA	PBAT 40%SA
Módulo Elástico, $E$ (MPa)	$165,71 \pm 17,18^c$	$234,29 \pm 23,70^b$	$368,57 \pm 73,00^a$

<sup>a,b,c</sup>Letras iguais indicam que as médias são estatisticamente iguais entre si (p-valor  $\geq 0,05$ ). Letras distintas indicam diferenças estatisticamente significativas (p-valor  $< 0,05$ ).

Especificamente, o valor de  $E$  para o PBAT puro foi de  $165,71 \pm 17,18$  MPa, enquanto o PBAT com 20% de SA apresentou um aumento para  $234,29 \pm 23,70$  MPa, representando um incremento de aproximadamente 41,4%. Já o PBAT com 40% de SA atingiu um módulo de  $368,57 \pm 73,00$  MPa, um aumento ainda mais expressivo de 122,4% em relação ao PBAT puro. Esse comportamento sugere que a presença dos resíduos de SA, atuando como fase reforçadora, contribui para a rigidez dinâmica do compósito.

Comparando esses resultados com os módulos de elasticidade obtidos nos ensaios de tração e flexão, observou-se que o módulo dinâmico tende a apresentar valores mais elevados. Essa diferença é comum em materiais poliméricos e compósitos, pois o módulo dinâmico reflete a rigidez do material em condições de vibração, onde as deformações são tipicamente menores e as propriedades elásticas podem ser influenciadas pela estrutura interna do material e pela presença de reforços particulados, como os resíduos de SA. Os resultados obtidos neste estudo corroboram com os dados apresentados por China et al. (2018), que relataram um aumento significativo no módulo de elasticidade de compósitos de PBAT reforçados com teores crescentes de borra de café. O módulo elástico, obtido pela técnica de excitação por impulso, variou de 126 MPa para o PBAT puro para 318 MPa com a adição de 50% de borra de café, representando um aumento de aproximadamente 152%.

#### 4.3.2 Análise Morfológica da Estrutura Interna do PBAT puro e dos Compósitos Reforçados com Resíduo de Açaí

Nas imagens de MEV do PBAT puro (Figuras 25 (a) e (b)), foi observada uma superfície de fratura relativamente homogênea e lisa, reflexo do processo de criofratura realizado. É importante destacar que o material não se encontrava em um estado dúctil durante a análise, uma vez que a fratura ocorreu sob condições de criogenia. Essa técnica impede a ocorrência de deformações plásticas, resultando em uma superfície de fratura que não reflete necessariamente o comportamento natural do material em temperaturas

ambientes. A ausência de partículas de reforço na matriz de PBAT puro também evitou a formação de pontos de concentração de tensão, contribuindo para a homogeneidade observada nas superfícies de fratura.

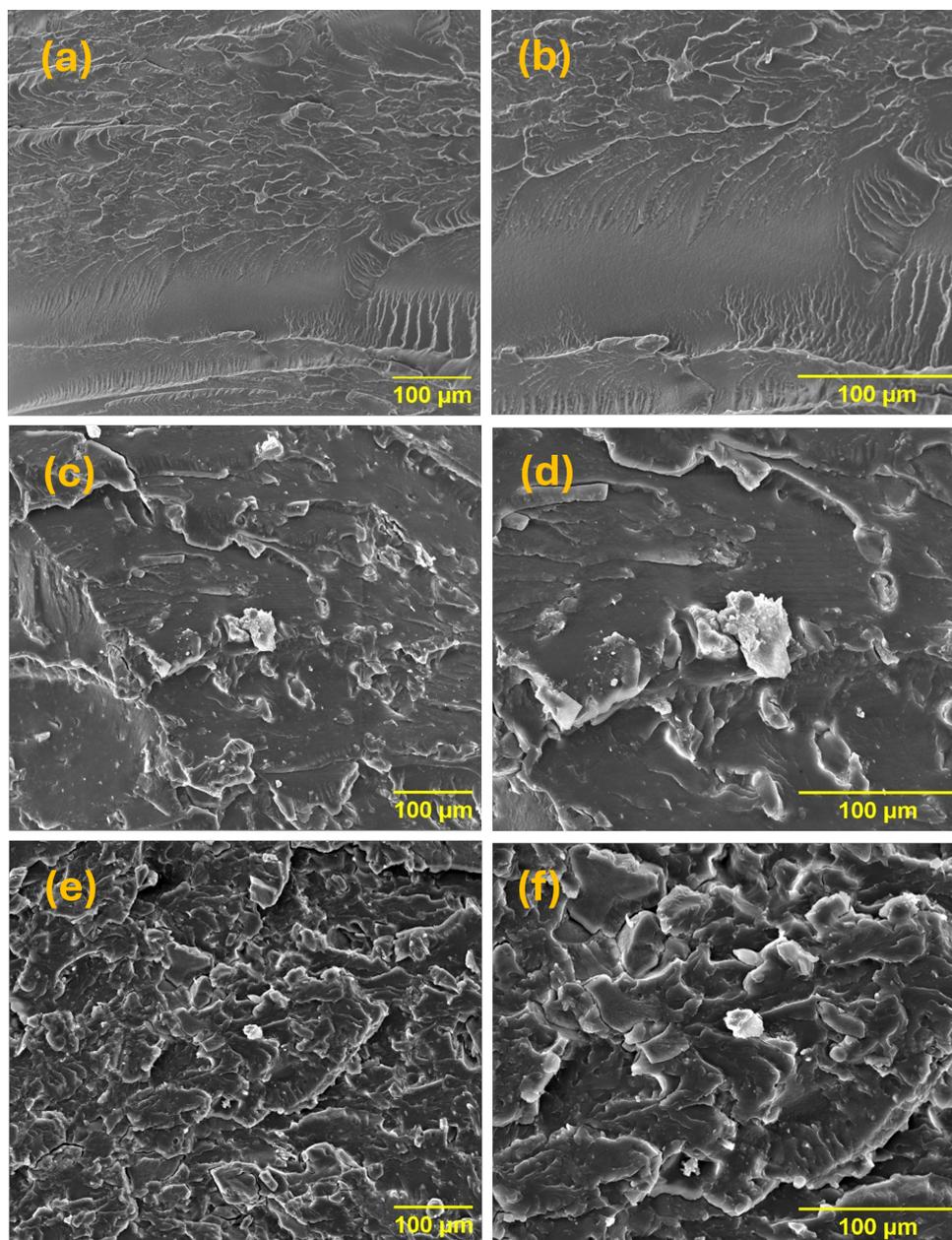


Figura 25 – Imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das superfícies de fratura dos materiais analisados após fratura em nitrogênio líquido. (a) PBAT puro a 500x, (b) PBAT puro a 1000x, (c) PBAT/20% Semente de Açaí (SA) a 500x, (d) PBAT/20% SA a 1000x, (e) PBAT/40% SA a 500x, e (f) PBAT/40% SA a 1000x. As imagens mostram as características morfológicas, incluindo a homogeneidade da matriz polimérica no PBAT puro e a interação da matriz com as partículas de semente de açaí nos compósitos.

Ao incorporar 20% de carga de semente de açaí na matriz de PBAT, foi observada uma mudança significativa na morfologia da superfície de fratura, conforme ilustrado nas Figuras 25 (c) e (d). A adição de partículas de carga resultou em uma superfície mais rugosa

e heterogênea, com regiões de descontinuidade e maior rugosidade em comparação ao PBAT puro. Essas partículas atuaram como pontos de concentração de tensão, promovendo uma fratura menos uniforme e indicando que o material se tornou mais rígido, porém menos resistente ao impacto. As imagens de MEV mostraram uma boa dispersão das partículas de carga na matriz polimérica, com algumas áreas de aglomeração moderada. Esse padrão foi semelhante ao observado por Botta et al. (2021), onde a distribuição uniforme de partículas de celulose na matriz de PBAT contribuiu para uma melhoria da rigidez do material, embora com uma redução na elongação à ruptura. A presença de trincas ao redor das partículas sugeriu que a adesão interfacial entre o PBAT e a carga foi moderada, e que as partículas reforçadoras afetaram o comportamento de fratura ao criar pontos fracos na interface.

Com o aumento da carga para 40%, as imagens de MEV revelaram uma superfície de fratura ainda mais rugosa e com maior heterogeneidade (Figuras 25 (e) e (f)). A maior concentração de partículas de carga no compósito gerou uma morfologia de fratura mais complexa, com presença de cavidades e áreas de separação interfacial pronunciadas. Esse comportamento sugeriu uma adesão interfacial insuficiente entre a matriz de PBAT e as partículas de carga, o que pode ter sido atribuído à quantidade elevada de carga que ultrapassou a capacidade da matriz de distribuir uniformemente as partículas.

Hejna et al. (2020) observaram fenômenos semelhantes em biocompósitos de PCL com diferentes resíduos agrícolas, onde o aumento da carga levou a uma diminuição da compatibilidade interfacial e a uma fratura mais frágil e porosa. No caso do PBAT com 40% de carga, a morfologia da fratura indicou que o material se tornou mais suscetível à falha sob menor tensão, provavelmente devido à formação de aglomerados de partículas que criaram pontos de concentração de tensão.

Comparando os três compósitos, observou-se que a adição de carga à matriz de PBAT influenciou o comportamento de fratura e as propriedades mecânicas, embora os resultados não tenham apresentado diferenças extremas, o que é positivo para a redução do uso de polímeros e o aumento de resíduos na formulação. O PBAT puro apresentou uma fratura mais homogênea e dúctil, evidenciando a alta coesão da matriz polimérica. A incorporação de 20% de carga aumentou a rigidez do compósito, tornando-o mais resistente à deformação, mas com menor elasticidade, resultando em superfícies de fratura mais rugosas. A adição de 40% de carga, por sua vez, gerou uma fratura mais heterogênea, com maior suscetibilidade à falha prematura devido à menor adesão interfacial e à formação de aglomerados de partículas. Ramos et al. (2019) reportaram resultados semelhantes em compósitos de PP com resíduos de sabugo de milho, onde o aumento da carga causou uma distribuição irregular das partículas e uma adesão interfacial inconsistente, levando a uma fratura menos controlada. Assim, foi possível concluir que o teor ideal de carga para o PBAT está provavelmente abaixo de 40%, de modo a garantir um bom equilíbrio entre

rigidez e resistência ao impacto, sem comprometer a integridade da matriz. Essa análise das superfícies de fratura forneceu uma compreensão mais detalhada sobre o impacto da carga na microestrutura e nas propriedades mecânicas dos compósitos de PBAT. Ela reforçou a importância de se encontrar um balanço adequado entre a quantidade de carga e a matriz polimérica para otimizar as propriedades mecânicas e o desempenho do material para aplicações específicas.

### 4.3.3 Propriedades Térmicas

#### 4.3.3.1 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

A análise térmica das amostras de PBAT e compósitos reforçados com resíduos de semente de açaí (SA) foi avaliada por meio de calorimetria exploratória diferencial (DSC). Foram determinadas as temperaturas de fusão ( $T_m$ ), cristalização ( $T_c$ ), e transição vítrea ( $T_g$ ), além da entalpia de fusão ( $\Delta H_m$ ) e grau de cristalinidade ( $X_c$ ), conforme apresentados pelos valores na tabela 13 e nas Figuras 26, 28 e 27.

A primeira corrida de aquecimento, apresentada na Figura 26, fornece informações importantes sobre o histórico térmico das amostras e os efeitos do processamento inicial. O pico endotérmico observado corresponde à fusão da parte cristalina do PBAT, representado pelo  $T_m$ . A presença de resíduos de semente de açaí (SA) não causou mudanças significativas no  $T_m$ , indicando que a fase cristalina do polímero foi preservada. No entanto, a intensidade e a largura do pico variam devido à redução do conteúdo polimérico nas misturas com maior teor de SA, uma vez que a quantidade de PBAT disponível para formar regiões cristalinas diminui proporcionalmente ao aumento do resíduo.

Observou-se que não houve mudanças significativas nas temperaturas de transição vítrea ( $T_g$ ), de fusão ( $T_m$ ) e de cristalização ( $T_c$ ) entre as amostras, obtidas na primeira curva de resfriamento, sugerindo a preservação do comportamento térmico do PBAT mesmo após a adição de resíduos de semente de açaí. O  $T_m$  manteve-se praticamente inalterado, com variações mínimas entre 122,23°C e 122,51°C (Figura 28), indicando que a incorporação do resíduo não afeta a estrutura cristalina do PBAT. Já o  $T_g$  permaneceu próximo a -35°C em todas as composições, sugerindo que a mobilidade segmentar das cadeias poliméricas na fase amorfa não foi impactada pela presença do reforço.

De acordo com o gráfico das curvas da segunda corrida de aquecimento do PBAT e dos compósitos, observou-se uma inflexão e um pico largo endotérmico de baixa intensidade, que estão associados à  $T_g$  e à  $T_m$ , conforme ilustrado na Figura 27 e os valores reunidos na Tabela 13, respectivamente. Verificou-se que os valores de  $T_g$  e  $T_m$  dos compósitos de PBAT não apresentaram praticamente alterações significativas quando comparados aos valores da matriz de PBAT, sugerindo que a presença de resíduos de semente de açaí não altera a temperatura na qual ocorre a fusão dos cristalitos do polímero.

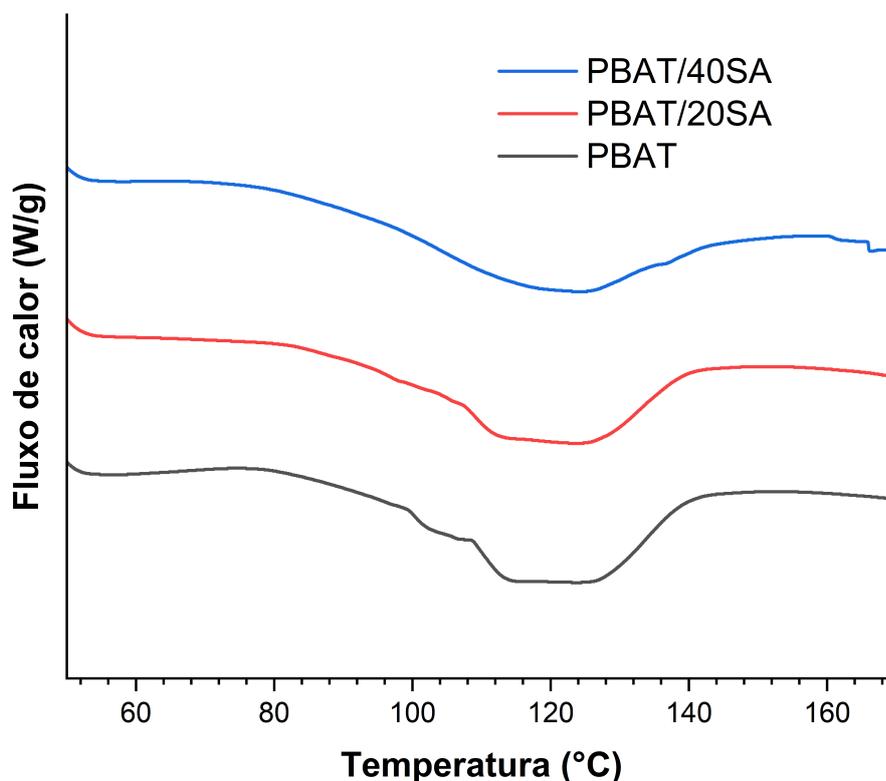


Figura 26 – Gráfico das curvas de DSC da 1ª corrida de aquecimento do PBAT e compósitos com diferentes teores de semente de açaí

A temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) das amostras permaneceu inalterada para as composições. Esse resultado sugeriu que a flexibilidade e a mobilidade segmentar das cadeias poliméricas na fase amorfa do PBAT não foram significativamente impactadas pela presença do resíduo da semente de açaí, mantendo características semelhantes às do PBAT puro (MUNIYASAMY et al., 2013).

Tabela 13 – Propriedades Térmicas das Amostras de PBAT e Compósitos com Resíduo de Semente de Açaí

Amostras	$T_m$ (°C)	$T_c$ (°C)	$T_g$ (°C)	$\Delta H_m$ (J/g)	$\Delta H^o$ (J/g)	$X_c$ (%)
PBAT	122,24	65,55	-35,56	14,27	114,00	12,52
PBAT20%SA	122,23	76,44	-35,28	10,20	114,00	11,19
PBAT40%SA	122,51	79,90	-35,35	8,35	114,00	12,20

A literatura reporta que o PBAT apresenta duas temperaturas de fusão cristalina, associadas à fusão da estrutura alifática em uma temperatura próxima de 60°C, e a segunda temperatura de fusão cristalina, referente à fusão da parte aromática do PBAT, com valor próximo a 125°C. No entanto, não foi possível detectar nesta análise o pico endotérmico referente à parte da estrutura alifática devido ao perfil do termograma obtido (GAN et al.,

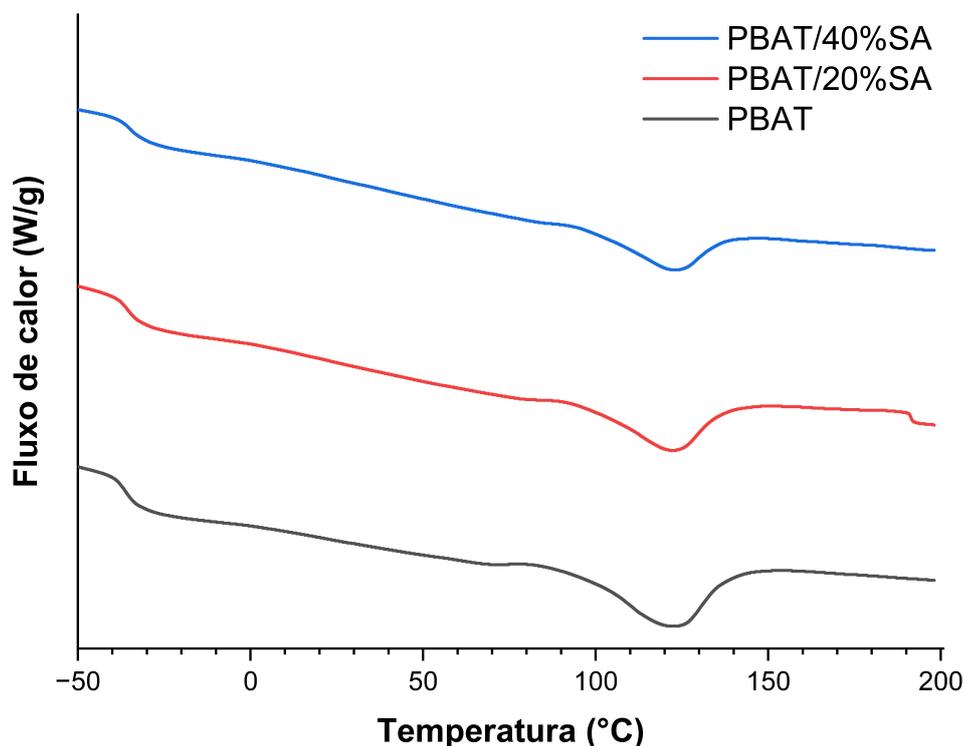


Figura 27 – Gráfico das curvas de DSC da 2ª corrida de aquecimento do PBAT e compósitos com diferentes teores de semente de açaí

2004; CHINA et al., 2018).

A temperatura de cristalização ( $T_c$ ), no entanto, apresentou aumento com a quantidade de semente de açaí (SA), como mostrado na Figura 27. O PBAT puro apresentou um  $T_c$  de 65,55°C, enquanto as amostras PBAT20SA e PBAT40SA apresentaram  $T_c$  de 76,44°C e 79,90°C, respectivamente. Esse incremento nos valores de  $T_c$  pode estar relacionado ao efeito nucleante proporcionado pelas partículas de SA, que facilitam o início da cristalização ao servir como pontos de nucleação para o rearranjo das cadeias do PBAT durante o resfriamento. Essa nucleação acelerada pelo reforço contribui para uma cristalização mais rápida e a temperaturas mais altas, beneficiando a estabilidade térmica dos compósitos (FENG et al., 2014; CHIVRAC; POLLET; AVÉROUS, 2007; LIU et al., 2023).

A entalpia de fusão ( $\Delta H_m$ ) e o grau de cristalinidade ( $X_c$ ) apresentaram uma tendência de diminuição com o aumento do teor de resíduo de semente de açaí (RSA). O PBAT puro possui  $\Delta H_m$  de 14,27 J/g e  $X_c$  de 12,52%, enquanto o PBATRSA20 apresentou  $\Delta H_m$  de 10,20 J/g e  $X_c$  de 11,19%, e o PBATRSA40 exibiu  $\Delta H_m$  de 8,35 J/g e  $X_c$  de 12,20%. Essa redução na cristalinidade pode ser atribuída à interferência física das partículas de semente de açaí no crescimento cristalino do PBAT, restringindo a mobilidade das cadeias e dificultando o desenvolvimento completo de regiões cristalinas. A

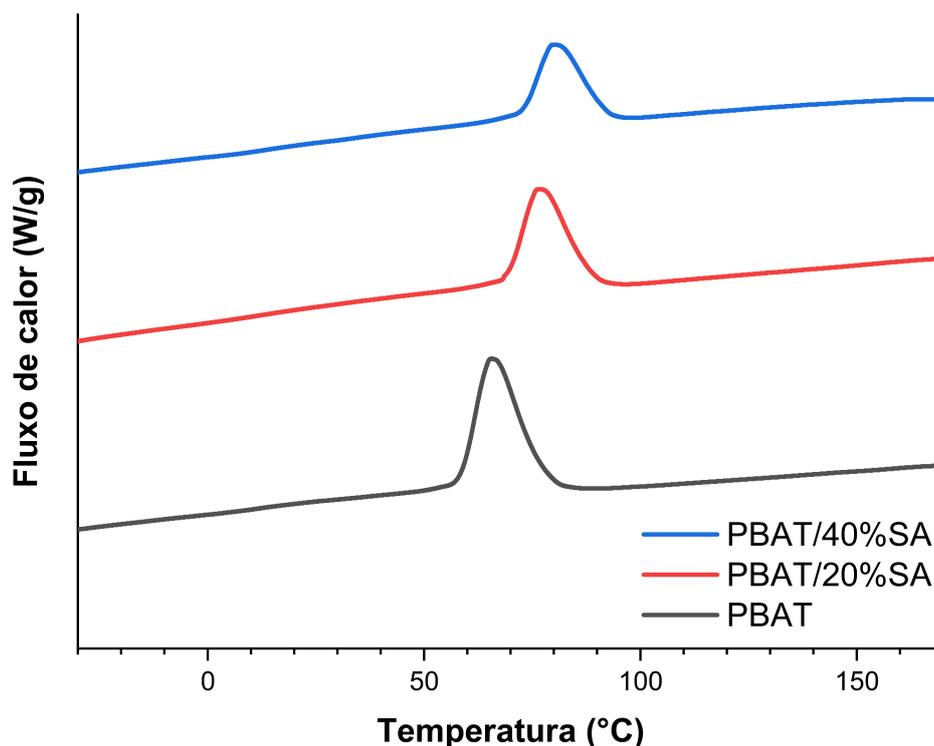


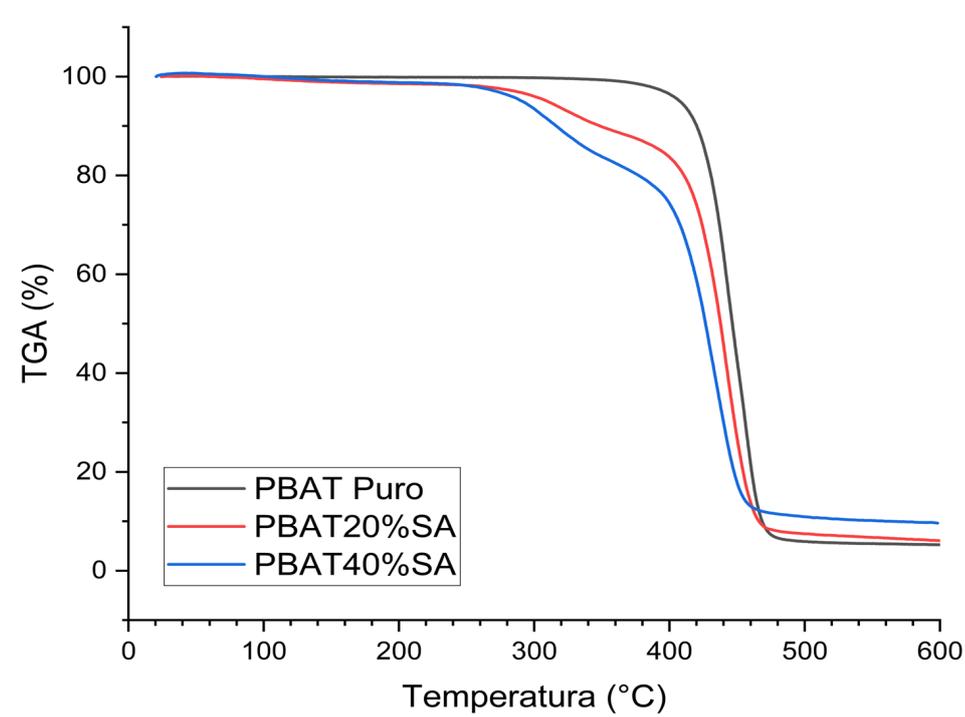
Figura 28 – Gráfico das curvas de DSC da 1ª corrida de resfriamento do PBAT e compósitos com diferentes teores de semente de açaí

presença do reforço parece promover uma estrutura menos cristalina, o que pode impactar a rigidez e outras propriedades mecânicas dos compósitos (NUNES; SOUZA; ROSA, 2020; LIU et al., 2023).

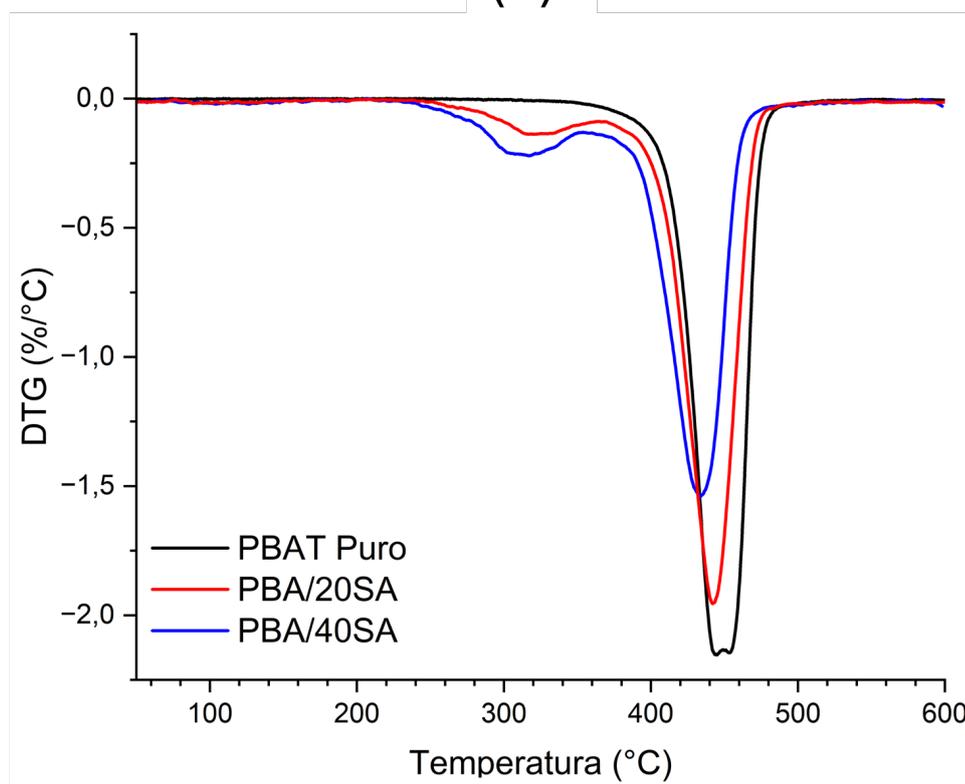
Em resumo, os resultados de DSC indicam que a adição de resíduos de semente de açaí ao PBAT promove um aumento na temperatura de cristalização e uma redução no grau de cristalinidade. Esse comportamento sugere que o reforço de SA atua como agente nucleante, ao mesmo tempo que limita a organização estrutural completa das cadeias poliméricas, afetando diretamente a cristalinidade e, possivelmente, as propriedades finais do material.

#### 4.3.3.2 Análise Termogravimétrica (TGA)

A análise das curvas de TG e DTG do PBAT e dos compósitos com diferentes concentrações de partículas do resíduo revela importantes aspectos sobre os estágios de degradação térmica do material. As curvas de perda de massa (TG) e da primeira derivada (DTG) em função da temperatura estão apresentadas nas Figuras 29 (a) e (b). Os valores das temperaturas iniciais de decomposição térmica ( $T_{\text{onset}}$ ) e das temperaturas máximas de decomposição ( $T_{\text{max}}$ ) foram extraídos dessas curvas e estão resumidos na Tabela 14.



(a)



(b)

Figura 29 – Análise TGA e DTG do PBAT puro e dos compósitos com 20% e 40% de semente de açaí. A parte superior (a) mostra as curvas TGA, e a parte inferior (b) exibe as curvas DTG.

No PBAT, a curva de TG exhibe um único estágio de perda de massa, como mostrado na Figura 29 (a), com uma perda de massa de aproximadamente 93,16%. Esse estágio corresponde à degradação térmica da matriz polimérica do PBAT, sugerindo que o material é relativamente estável até cerca de 300°C, quando começa a perder massa rapidamente devido à decomposição. O valor de  $T_{\text{onset}}$  registrado é de 421,7°C, com picos de decomposição (Figura 29 (b)) em torno de 443,7°C e 457,46°C ( $T_{\text{max}}$ ), reforçando a estabilidade térmica do PBAT puro em altas temperaturas.

Nos compósitos, foram observados dois estágios de perda de massa em função da temperatura. No compósito com 20% de carga, a primeira região de degradação iniciou-se a 264,9°C ( $T_{\text{onset}}$ ) e apresentou sua máxima velocidade de perda de massa a 315,78°C ( $T_{\text{max}}$ ), atribuída à decomposição de hemicelulose e celulose. A segunda região, iniciada a 415,64°C ( $T_{\text{onset}}$ ), apresentou sua máxima velocidade de perda de massa em 436,24°C ( $T_{\text{max}}$ ), relacionada à decomposição da matriz polimérica do PBAT e à lignina, com uma perda de massa total de 78,88%, indicando que a maior parte da degradação ocorre nessa etapa. No compósito com 40% de partículas, a primeira região de perda de massa ocorreu com  $T_{\text{onset}}$  registrado a 262,48°C e máxima velocidade de perda registrada em 333°C ( $T_{\text{max}}$ ), associada principalmente à hemicelulose e celulose. A segunda região de degradação iniciou-se a 375,73°C ( $T_{\text{onset}}$ ), com máxima velocidade de perda em 433,15°C ( $T_{\text{max}}$ ), refletindo a decomposição da matriz polimérica e da lignina, e resultando em uma perda total de 69,05%. Esses resultados destacam a influência da maior proporção de partículas lignocelulósicas nos estágios de degradação térmica. Como evidenciado na análise térmica das partículas da semente de açaí apresentada na seção 4.1.6, a temperatura inicial de degradação ( $T_{\text{onset}}$ ) foi registrada em 247,19°C. Apesar desse valor ser inferior ao observado para o PBAT puro, os compósitos contendo essas partículas demonstraram estabilidade térmica suficiente para aplicações práticas, refletindo uma resistência térmica consistente mesmo com a inclusão de materiais lignocelulósicos. Estudos apontam que a hemicelulose degrada-se em temperaturas mais baixas, geralmente entre 200°C e 330°C, seguida pela celulose, que começa a degradar entre 250°C e 400°C, enquanto a lignina apresenta uma faixa mais ampla de degradação, entre 200°C e 600°C (XIAO; SUN; SUN, 2001; RAMIAH, 1970). A lignina, em particular, possui uma estrutura complexa e termicamente estável, o que contribui para a estabilidade térmica dos compósitos em faixas de temperatura mais elevadas. (CHEN et al., 2019; ORNAGHI et al., 2023).

Tabela 14 – Valores de  $T_{\text{onset}}$ ,  $T_{\text{max}}$ , perda de massa e resíduos a 600°C para as amostras de PBAT e compósitos.

<b>Amostras</b>	$T_{\text{onset}}$ (°C)	$T_{\text{max}}$ (°C)	<b>Perda de Massa (%)</b>	<b>Resíduos (%)</b>
PBAT puro	421,7	457,46	93,16	6,84
PBAT/20%SA	415,64	436,24	78,88	21,12
PBAT/40%SA	411,85	433,15	69,05	30,95

A presença de partículas lignocelulósicas nas sementes de açaí e a natureza hidrofílica do material influenciam a degradação térmica dos compósitos. Conforme descrito por van (1992), Bianchi et al. (2010), a degradação térmica da celulose pode ser acelerada na presença de água, oxigênio e ácidos, devido à formação de radicais livres que levam ao aparecimento de grupos carbonila, carboxila e hidroperóxido. No caso das partículas de sementes de açaí, a presença de hemicelulose e celulose, que possuem alta afinidade por água, além de compostos como ácidos graxos e extrativos polares naturais, pode contribuir para a aceleração da degradação térmica em temperaturas mais baixas. Esses componentes favorecem reações de oxidação e hidrólise, aumentando a suscetibilidade do material às condições térmicas, especialmente em atmosferas contendo oxigênio.

Essas observações são essenciais para o entendimento das propriedades térmicas dos compósitos de PBAT, especialmente na escolha do teor ideal de partículas para aplicações industriais específicas. Materiais com menor teor de partículas lignocelulósicas tendem a ser mais resistentes à degradação inicial, adequados para aplicações que exigem maior estabilidade térmica em faixas moderadas de temperatura. Em contrapartida, maiores teores de partículas proporcionam maior flexibilidade e propriedades mecânicas aprimoradas, embora com menor resistência térmica inicial, o que deve ser considerado em aplicações que demandam resistência a temperaturas elevadas e flexibilidade aprimorada.

#### 4.3.4 Absorção de Água

A análise de absorção de água dos compósitos de PBAT com diferentes concentrações de resíduo de semente de açaí revelou variações significativas entre as amostras, indicando a influência desse resíduo sobre essas propriedades. A Tabela 15 apresenta os valores médios de absorção de água e densidade relativa para o PBAT puro e para os compósitos com 20% e 40% de resíduo de semente de açaí.

Tabela 15 – Valores médios de absorção de água e densidade relativa para o PBAT puro e compósitos com diferentes teores de resíduo de semente de açaí.

<b>Amostras</b>	<b>Absorção de água (%)</b>
PBAT	0,50 ± 0,06
PBAT20%SA	2,62 ± 0,05
PBAT40%SA	3,75 ± 0,18

O comportamento da absorção de água dos compósitos de PBAT/40SA e PBAT/20SA, apresentaram valores para essa propriedade maiores em relação à matriz de PBAT. Isto pode ser atribuído aos grupos hidrofílicos -OH presentes na carga incorporada, que aumentam a capacidade de absorção de água do compósito. O PBAT puro apresentou um valor médio de 0,50%, o que reflete a baixa hidroflicidade do material puro por ser co-poliéster.

Esse comportamento é consistente com estudos que mostram que o aumento de teor de materiais lignocelulósicos em compósitos poliméricos eleva a absorção de água devido à

presença de grupos hidroxila, que interagem com moléculas de água (LAI; ANI; HASSAN, 2008; NAJAFI; TAJVIDI; CHAHARMAHLI, 2006). O estudo de Guo, Finkenstadt e Nimmagadda (2019), que investigaram compósitos de polietileno de alta densidade (HDPE) reforçados com fibras de madeira e fibra de carbono mostrou que a absorção de água em compósitos com 20% de fibra de madeira chegou a 0,66%, significativamente maior que o HDPE puro, que absorveu apenas 0,01%. Esse aumento foi atribuído à estrutura porosa e hidrofílica da fibra de madeira, que permite maior interação com moléculas de água. No presente estudo, o resíduo de semente de açaí exerce efeito semelhante, possuindo grupos hidrofílicos que aumentam a capacidade de absorção de água do compósito. Além disso, Li et al. (2021b) observaram um efeito oposto ao adicionar lignina modificada em compósitos de PBAT/Amido. À medida que o teor de lignina aumentou para 40%, a absorção de água diminuiu de 28,8% para 6,5%. Essa diminuição foi atribuída ao aumento da hidrofobicidade conferida pela estrutura aromática da lignina, que reduz a migração de água para dentro do compósito. Em contraste, o resíduo de semente de açaí, por sua natureza hidrofílica, aumenta a absorção de água dos compósitos de PBAT em nosso estudo, destacando que a escolha do tipo de carga influencia diretamente as propriedades de absorção de água.

## 5 CONCLUSÃO

1. Caracterização da composição química e física dos resíduos de semente de açaí.

- A análise de FTIR e DRX identificou frações de polissacarídeos, como glucanas e mananas, além de componentes lignocelulósicos que impactam diretamente no comportamento térmico e mecânico dos compósitos.

- A caracterização térmica (TGA) revelou estágios de decomposição associados aos componentes lignocelulósicos, destacando a estabilidade térmica dos resíduos.

- As propriedades físicas, como densidade e absorção de água, demonstraram que os resíduos possuem características adequadas para reforço em compósitos poliméricos, embora o caráter hidrofílico tenha aumentado a absorção de água nos compósitos.

2. Avaliação morfológica da interação física entre os resíduos e a matriz polimérica de PBAT.

- As análises morfológicas (MEV) evidenciaram boa dispersão das partículas de açaí na matriz de PBAT, especialmente para a concentração de 20%, que apresentou menor formação de microporos e melhor adesão interfacial.

- A concentração de 40% de resíduo mostrou maior ocorrência de aglomerados e pontos de concentração de tensão, sugerindo limitações na compatibilidade interfacial.

- Os resultados indicam que a interação entre matriz e reforço pode ser aprimorada com o uso de agentes compatibilizantes.

3. Avaliação da influência do teor dos resíduos na processabilidade, nas propriedades mecânicas e térmicas dos compósitos

- O processamento em câmara de mistura interna foi eficiente, garantindo boa homogeneidade na dispersão dos resíduos na matriz de PBAT, mesmo com aumento da viscosidade relatado pelos valores de torque final.

- Os ensaios mecânicos mostraram que a adição de até 40% de resíduo manteve propriedades próximas às do PBAT puro, especialmente na tensão de escoamento. Isso é positivo, pois reduziu o uso de polímero sem comprometer o desempenho mecânico ou o acabamento superficial, que permaneceu liso, evidenciando a viabilidade do material para aplicações práticas e sustentáveis.

- A estabilidade térmica dos compósitos foi mantida mesmo com o aumento do teor de resíduo, demonstrando que a incorporação de até 40% de partículas não comprometeu a resistência térmica.

- A estabilidade térmica foi mantida com a adição dos resíduos, enquanto as

propriedades de deformação e tensão na ruptura foram comprometidas em concentrações mais altas (40%), devido à menor interação entre matriz e reforço.

- A absorção de água aumentou com o teor de resíduo, refletindo a presença de grupos hidrofílicos nos resíduos lignocelulósicos, enquanto a densidade não apresentou variações significativas.

Portanto, os compósitos de PBAT reforçados com resíduos de semente de açaí apresentam potencial significativo para aplicação em materiais sustentáveis. A concentração de 20% foi identificada como a mais promissora, combinando propriedades mecânicas e térmicas equilibradas com boa processabilidade. Apesar das limitações observadas na concentração de 40%, o uso de resíduos lignocelulósicos em compósitos biodegradáveis demonstra viabilidade técnica e econômica, alinhando-se aos princípios da economia circular. Estudos futuros focados em tratamentos de compatibilização poderão expandir ainda mais a aplicabilidade desses materiais, contribuindo para o desenvolvimento de produtos sustentáveis e inovadores.

## REFERÊNCIAS

- AKPAKPAVI, M. K.; SACKKEY, S. M.; ASANTE-AFRIFA, M. K. Optimisation of process parameters on tensile strength of 3d printed polylactic acid (pla) parts: Astm d638 type – iv. *AFRICAN JOURNAL OF APPLIED RESEARCH*, v. 9, n. 2, p. 104–123, 2023.
- ALP, G.; MURAT, S.; YILMAZ, B. Comparison of flexural strength of different cad/cam pmma-based polymers. *Journal of Prosthodontics*, v. 28, p. e491–e495, 2019.
- ANDRADE, P. et al. Melt flow index analysis of composites for improved processing techniques. *Journal of Composite Materials*, v. 55, n. 29, p. 3899–3910, 2021.
- ANGELINI, S.; CERRUTI, P.; IMMIRZI, B.; SCARINZI, G.; MALINCONICO, M. Acid-insoluble lignin and holocellulose from a lignocellulosic biowaste: Bio-fillers in poly(3-hydroxybutyrate). *European Polymer Journal*, v. 76, p. 63–76, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/J.EURPOLYMJ.2016.01.024>>.
- ARAUJO, S. S.; SANTOS, G. T. A.; TOLOSA, G. R.; HIRANOBE, C. T.; BUDEMBERG, E. R.; CABRERA, F. C.; SILVA, M. J. d.; PAIM, L. L.; JOB, A. E.; SANTOS, R. J. d. Acai residue as an ecologic filler to reinforcement of natural rubber biocomposites. *Materials Research*, ABM, ABC, ABPol, v. 26, p. e20220505, 2023. ISSN 1516-1439. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2022-0505>>.
- ARSLAN, A.; ÇAKMAK, S.; CENGİZ, A.; GÜMÜŞDERELİOĞLU, M. Poly(butylene adipate-co-terephthalate) scaffolds: processing, structural characteristics and cellular responses. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, Taylor & Francis, v. 27, p. 1841–1859, 2016.
- ASTM International. *Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2010. Last Updated: Aug. 26, 2013. DOI: 10.1520/D1238-10. Disponível em: <<https://www.astm.org/>>.
- ASTM International. *Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017. Approved July 1, 2017. DOI: 10.1520/D0790-17. Disponível em: <<https://www.astm.org/>>.
- ASTM International. *Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020. Approved July 1, 2020. DOI: 10.1520/D0792-20.
- ASTM International. *Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2021. Approved June 15, 2021. DOI: 10.1520/D2240-15R21.
- ASTM International. *Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2022. Approved April 1, 2022. DOI: 10.1520/E1876-22. Disponível em: <<https://compass.astm.org/>>.

ASTM International. *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2022. Approved July 1, 2022. DOI: 10.1520/D0638-22.

ASTM International. *Standard Test Method for Water Absorption of Plastics*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2022. Approved Sept. 1, 2022. DOI: 10.1520/D0570-22. Disponível em: <<https://www.astm.org/>>.

AVANTHI, A.; BANERJEE, R. A strategic laccase mediated lignin degradation of lignocellulosic feedstocks for ethanol production. *Industrial Crops and Products*, v. 92, p. 174–185, 2016. ISSN 0926-6690.

AZEVEDO, A.; MARVILA, M.; TAYEH, B. A.; CECCHIN, D.; PEREIRA, A.; MONTEIRO, S. Technological performance of açai natural fibre reinforced cement-based mortars. *Journal of Building Engineering*, v. 33, p. 101675, 2021.

BARBOSA, A. de M. *Compósitos poliméricos com resíduo de açai para mitigação de efeitos térmicos como estratégias eco-alternativas em habitações na Amazônia*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal do Amazonas, Manaus, Brasil, 2016.

BARBOSA, A. de M.; SANTOS, G. M. dos; MELO, G. M. M. de; LITAIFF, H. A.; MARTORANO, L. G.; GIACON, V. M. Evaluation of the use of açai seed residue as reinforcement in polymeric composite. *Polymers and Polymer Composites*, v. 30, p. 09673911221108307, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/09673911221108307>>.

BARBOSA, E. D.; LIMA, H.; ELIAS, L. M.; CARLA, J.; SANTOS, A. V. F. Management of açai areas in the sustainability-oriented supply chain in the municipality of abaetetubará. *Journal of Agricultural Science*, v. 14, p. 164, 02 2022.

BARBOSA, O. S. L.; OLIVEIRA, M. F. L. d.; SANTOS, D. C. d. S.; OLIVEIRA, M. G. d.; JUNIOR, V. F. d. V. Caracterização físico-química das sementes de açai de três espécies para potencial uso como reforço em compósitos poliméricos. In: *77º Congresso Anual da ABM - Internacional*. São Paulo, Brasil: [s.n.], 2024. p. 2656–2667. ISSN 2594-5327.

BARROS, S. d. S.; OLIVEIRA, E. d. S.; JR, W. A. G. P.; ROSAS, A. L. G.; FREITAS, A. E. M. d.; LIRA, M. S. d. F.; CALDERARO, F. L.; SARON, C.; FREITAS, F. A. d. Waste açai (*Euterpe precatoria Mart.*) seeds as a new alternative source of cellulose: Extraction and characterization. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 7, p. e31110716661, 2021.

BARTOS, A.; ANGGONO, J.; FARKAS Ágnes E.; KUN, D.; SOETAREDJO, F. E.; MÓCZÓ, J.; ANTONI; PURWANINGSIH, H.; PUKÁNSZKY, B. Alkali treatment of lignocellulosic fibers extracted from sugarcane bagasse: Composition, structure, properties. *Polymer Testing*, v. 88, p. 106549, 2020. ISSN 0142-9418. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142941820302282>>.

BASF. *Product Information ecoflex® F Blend C1200*. 2021. URL: <<https://www.ecoflex.basf.com>>. Accessed: 2023-05-05.

BECKER, E. D.; FARRAR, T. C. Fourier transform spectroscopy. *Science*, v. 178, p. 361 – 368, 1972. Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:29183957>>.

- BELOUADAH, Z.; TOUBAL, L.; BELHANECHÉ-BENSEMRA, N.; ATI, A. Characterization of ligno-cellulosic fiber extracted from atriplex halimus l. plant. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 168, p. 806–815, 2021. ISSN 0141-8130. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141813020350674>>.
- BENEDETTI, M. et al. Design of a highly thermostable hemicellulose-degrading blend from *thermotoga neapolitana* for the treatment of lignocellulosic biomass. *Journal of Biotechnology*, v. 296, p. 42–52, 2019.
- BHADRA, J.; AL-THANI, N.; ABDULKAREEM, A. Recycling of polymer-polymer composites. *Micro and Nano Fibrillar Composites (MFCs and NFCs) from Polymer Blends*, Woodhead Publishing, p. 263–277, 2017.
- BIANCHI, O.; CASTEL, C. D.; OLIVEIRA, R. V. B. d.; BERTUOLI, P. T.; HILLIG, E. Avaliação da degradação não-isotérmica de madeira através de termogravimetria-tga. *Polímeros*, v. 20, n. 5, p. 395–400, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0104-14282010005000060>>.
- BIERMANN, D. Composite materials. *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*, Springer, 2018.
- BLASIO, C. D. *Thermogravimetric Analysis (TGA)*. Cham: Springer, 2019. (Green Energy and Technology).
- BLITTERSWYK, J. V.; FLETCHER, L.; PIERRON, F. Image-based inertial impact test for composite interlaminar tensile properties. *Journal of Dynamic Behavior of Materials*, v. 4, p. 543–572, 2018.
- BOTTA, L.; TITONE, V.; MISTRETTA, M.; MANTIA, F. L.; MODICA, A.; BRUNO, M.; SOTTILE, F.; LOPRESTI, F. Pbat based composites reinforced with microcrystalline cellulose obtained from softwood almond shells. *Polymers*, v. 13, p. 2643, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/polym13162643>>.
- BRUNO, L. Mechanical characterization of composite materials by optical techniques: A review. *Optics and Lasers in Engineering*, v. 104, p. 192–203, 2017.
- BUMBUDSANPHAROKE, N.; WONGPHAN, P.; PROMHUAD, K.; LEELAPHIWAT, P.; HARNKARNSUJARIT, N. Morphology and permeability of bio-based poly(butylene adipate-co-terephthalate) (pbat), poly(butylene succinate) (pbs) and linear low-density polyethylene (lldpe) blend films control shelf-life of packaged bread. *Food Control*, v. 132, p. 108541, 2022.
- BURATTO, R. T.; COCERO, M. J.; MARTIN, A. Characterization of industrial açai pulp residues and valorization by microwave-assisted extraction. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, v. 160, p. 108269, 2021.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 9. ed. [S.l.]: Wiley, 2018.
- CANEDO, E. L.; ALVES, T. *Processamento no Misturador Interno de Laboratório*. [S.l.]: Campina Grande, 2017. DOI: 10.13140/RG.2.2.23644.64647.

- CARRIER, M.; LOPPINET-SERANI, A.; DENUX, D.; LASNIER, J.-M.; HAMPICHAVANT, F.; CANSSELL, F.; AYMONIER, C. Thermogravimetric analysis as a new method to determine the lignocellulosic composition of biomass. *Biomass and Bioenergy*, v. 35, n. 1, p. 298–307, 2011. ISSN 0961-9534. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953410003314>>.
- CARVALHO. Avaliação do efeito de tratamento químico às fibras da palha de carnaúba. In: *22º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*. [S.l.: s.n.], 2016.
- CARVALHO, M.; AZEVEDO, J.; BARBOSA, J. Effect of the melt flow index of an hdpe matrix on the properties of composites with wood particles. *Polymer Testing*, v. 90, p. 106678, 2020.
- CARVALHO, P. E. R. *Palmito (Euterpe edulis)*. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Embrapa Florestas, 2003. ISBN 85-7383-167.
- CARVALHO, P. E. R. Palmito euterpe edulis. In: CARVALHO, P. E. R. (Ed.). *Espécies arbóreas brasileiras*. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Embrapa Florestas, 2010, (Coleção espécies arbóreas brasileiras, v. 1). p. 699–708.
- CHEN, J.; CHEN, C.; YANG, M. Characterization of nanocomposites of poly(butylene adipate-co-terephthalate) blending with organoclay. *Journal of Polymer Research*, v. 18, p. 2151–2159, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10965-011-9625-3>>.
- CHEN, W.-H.; WANG, C.-W.; ONG, H. C.; SHOW, P. L.; HSIEH, T.-H. Torrefaction, pyrolysis and two-stage thermodegradation of hemicellulose, cellulose and lignin. *Fuel*, v. 258, p. 116168, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236119315224>>.
- CHENG, K.; WINTER, W. T.; STIPANOVIC, A. J. A modulated-tga approach to the kinetics of lignocellulosic biomass pyrolysis/combustion. *Polymer Degradation and Stability*, v. 97, n. 9, p. 1606–1615, 2012. ISSN 0141-3910. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141391012002522>>.
- CHINA, A. L.; CARMO, D. M.; COSTA, D.; BRAGA, F. C. F.; OLIVEIRA, M. F. L.; OLIVEIRA, M. G. Uso da borra de café como carga de reforço em matriz de polímero biodegradável. In: *Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Química (COBEQ)*. São Paulo: Blucher, 2018. p. 4439–4442. ISSN 2359-1757.
- CHIVRAC, F.; POLLET, E.; AVÉROUS, L. Nonisothermal crystallization behavior of poly(butylene adipate-co-terephthalate)/clay nano-biocomposites. *J. Polym. Sci. B Polym. Phys.*, v. 45, p. 1503–1510, 2007.
- CHONG, T.; LAW, M.; CHAN, Y. The potentials of corn waste lignocellulosic fibre as an improved reinforced bioplastic composites. *J Polym Environ*, v. 29, p. 363–381, 2021.
- CHUN, H. et al. Torque rheometry studies in polymer composite processing. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, v. 55, n. 18, p. 1378–1389, 2017.
- COELHO, D.; MONTEIRO, S.; CANDIDO, V.; SILVA, A. Caracterização microestrutural do caroço do açaí para aplicação com material compósito de matriz polimérica. In: *73º Congresso Anual da ABM – Internacional, parte integrante da ABM Week*. São Paulo, SP, Brasil: [s.n.], 2018. p. 2375–2382.

- COELHO, G. M.; SANTOS, A. S.; MENEZES, I. P. P. et al. Genetic structure among morphotypes of the endangered brazilian palm *Euterpe edulis* Mart (Arecaceae). *Ecology and Evolution*, v. 10, p. 6039–6048, 2020.
- CONAB. *Boletim da Sociobiodiversidade: Juçara*. 2020. 9-15 p. 2º trimestre.
- CONTE, R.; REIS, M. S.; MANTOVANI, A.; MARIOT, A.; FANTINI, A. C.; NODARI, R. O. *Euterpe edulis Martius (Palmito): biologia, conservação e manejo*. Itajaí, SC: Herbário Barbosa Rodrigues, 2000.
- CORTEZZI, F. Açá in the globalization model of amazon plants: An ancient product, new forms of spatial production and reproduction. *Geosaberes*, v. 11, p. 493, 2020.
- COSTA, A. de M.; CROCITTI, A.; CARVALHO, L. Hecker de; CARROCCIO, S.; CER- RUTI, P.; SANTAGATA, G. Properties of biodegradable films based on poly(butylene succinate) (PBS) and poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) blends. *Polymers*, v. 12, p. 2317, 2020.
- COSTA, C. C.; MAPA, L. M.; KELMER, A. C.; FERREIRA, S. O.; BIANCHI, R. F. Advanced applications of natural fibers in pressure sensor technologies. *Advanced Materials Technologies*, v. 2022, p. 8869, 2022.
- COSTA, O. L. B. da; MONTEIRO, S. N.; OLIVEIRA, M. F. L. de; JUNIOR, V. F. da V. Research on materials science and characterization for engineering applications. *Journal of Engineering Research*, Editora Atena, Ponta Grossa - PR, v. 4, n. 17, 2024. Disponível em: <<http://lattes.cnpq.br/3247596322977712>>.
- CROSS, J.; OPILA, R.; BOYD, I. et al. Materials characterization and the evolution of materials. *MRS Bulletin*, v. 40, p. 1019–1034, 2015.
- DAHMEN, N. et al. Integrated lignocellulosic value chains in a growing bioeconomy: Status quo and perspectives. *GCB Bioenergy*, v. 11, p. 107–117, 2019.
- DAHY, H. Natural fibre-reinforced polymer composites (nfrp) fabricated from lignocellulo- sic fibres for future sustainable architectural applications, case studies: Segmented-shell construction, acoustic panels, and furniture. *Sensors*, v. 19, p. 738, 2019.
- D'AVILA, M.; BRETAS, R. *Reologia de Polímeros Fundidos*. 2. ed. São Carlos, SP, Brasil: EDUFSCAR, 2005. 257 p. Dimensões: 21,0cm x 14,0cm x 2,0cm. Peso: 350g. Código: 163821. Código de barras: 9788576000488. ISBN 9788576000488.
- DIXIT, N.; KORTSCHOT, M.; SAIN, M.; GULATI, D. Effect of interactions between interface modifiers and viscosity modifiers on the performance and processibility of the rice hulls-hdpe composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, SAGE Publications Ltd STM, v. 25, n. 16, p. 1691–1699, 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/0731684406068412>>.
- DULEBOVÁ, L.; GARBACZ, T. The effect of particulate fillers on hardness of polymer composite. *Advances in Science and Technology Research Journal*, v. 11, p. 66–71, 2017.
- DUTTA, A. Fourier transform infrared spectroscopy. 2017. Disponível em: <[https://consensus.app/papers/fourier-transform-infrared-spectroscopy-dutta/7d9a16c607345b8ebb2413b657e52c99/?utm\\_source=chatgpt](https://consensus.app/papers/fourier-transform-infrared-spectroscopy-dutta/7d9a16c607345b8ebb2413b657e52c99/?utm_source=chatgpt)>.

- ELVERS, D.; SONG, C. H.; STEINBÜCHEL, A.; LEKER, J. Technology trends in biodegradable polymers: Evidence from patent analysis. *Polymer Reviews*, v. 56, n. 4, p. 584–606, 2016.
- EMBRAPA. *Juçara (Euterpe edulis M.): importância ecológica e alimentícia*. 2023. Relatório técnico.
- FENG, S.; WU, D.; LIU, H.; CHEN, C.; LIU, J.; YAO, Z.; XU, J.; ZHANG, M. Crystallization and creep of the graphite nanosheets based poly(butylene adipate-co-terephthalate) biocomposites. *Thermochimica Acta*, v. 587, p. 72–80, 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040603114001749>>.
- FERRAZ, P. F. P.; MENDES, R. F.; MARIN, D. B.; PAES, J. L.; CECCHIN, D.; BARBARI, M. Agricultural residues of lignocellulosic materials in cement composites. *Applied Sciences*, v. 10, n. 22, 2020. ISSN 2076-3417. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3417/10/22/8019>>.
- FERREIRA, F. V.; PINHEIRO, I. F.; MARIANO, M.; CIVIDANES, L. S.; COSTA, J. C.; NASCIMENTO, N. R.; KIMURA, S. P.; NETO, J. C.; LONA, L. M. Environmentally friendly polymer composites based on pbat reinforced with natural fibers from the amazon forest. *Polymer Composites*, v. 40, n. 8, p. 3351–3360, 2019. Disponível em: <<https://4spepublications.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pc.25196>>.
- FILHO, L. A. B.; SAMPAIO, P.; BLAIR, C.; MATOS, M. Updating the economic profile of açaí (*euterpe precatoria* mart. and *e. oleracea*) fruit in the states of amazonas and Pará. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, v. 8, n. 4, 2021.
- FIGLIARELLI, J.; GOMIDE, C.; LAHR, F. e. a. Physico-chemical and anatomical characterization of residual lignocellulosic fibers. *Cellulose*, v. 21, p. 3269–3277, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10570-014-0398-9>>.
- Flora do Brasil. *Arecaceae in Flora do Brasil 2020 em construção*. 2024. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB15726>>.
- FRANCISCONI, A. F.; CAUZ-SANTOS, L. A.; MARROQUÍN, J. A. M.; BERG, C. van den; ALVES-PEREIRA, A.; ALENCAR, L. Delmondes de; PISCANÇO-RODRIGUES, D.; ZANELLO, C. A.; COSTA, M. F.; LOPES, M. T. G.; VEASEY, E. A.; ZUCCHI, M. I. Complete chloroplast genomes and phylogeny in three euterpe palms (*e. edulis*, *e. oleracea* and *e. precatoria*) from different brazilian biomes. *PLOS ONE*, Public Library of Science, v. 17, p. 1–26, 07 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0266304>>.
- FRAZAO, L.; VALADAO, J.; CALEGARIO, C. Os objetivos de desenvolvimento sustentável (ods) da onu em estudos da Área de gestão: Uma revisão das abordagens teóricas utilizadas. In: . [S.l.: s.n.], 2022.
- FRIEDRICH, K. *Polymer composites for tribological applications*. [S.l.]: Elsevier, 2018. v. 1. 3-39 p.
- GALLEGO-GARCÍA, M. et al. Recent advances on physical technologies for the pretreatment of food waste and lignocellulosic residues. *Bioresource Technology*, v. 369, p. 128397, 2023.

- GAN, Z.; KUWABARA, K.; YAMAMOTO, M.; ABE, H.; DOI, Y. Solid-state structures and thermal properties of aliphatic–aromatic poly(butylene adipate-co-butylene terephthalate) copolyesters. *Polymer Degradation and Stability*, v. 83, n. 2, p. 289–300, 2004. ISSN 0141-3910. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014139100300274X>>.
- GANDHI, R. et al. Nano indentation hardness testing of pp-cnt composites. *Materials Today: Proceedings*, 2019.
- GEORGANTZINOS, S. Characterization and modelling of composites, volume iii. *J. Compos. Sci.*, v. 7, p. 446, 2023.
- GEORGE, A. Composite materials processing. John Wiley and Sons, Inc, 2015.
- GHOSH, A. K.; DWIVEDI, M. Advantages and applications of polymeric composites. In: \_\_\_\_\_. *Processability of Polymeric Composites*. New Delhi: Springer India, 2020. p. 29–57. ISBN 978-81-322-3933-8. Disponível em: <[https://doi.org/10.1007/978-81-322-3933-8\\_2](https://doi.org/10.1007/978-81-322-3933-8_2)>.
- GIBSON, R. *Principles of Composite Material Mechanics*. 4th. ed. [S.l.]: CRC Press, 2016.
- GINDL-ALTMUTTER, W.; OBERSRIEBNIG, M.; VEIGEL, S.; LIEBNER, F. Compatibility between cellulose and hydrophobic polymer provided by microfibrillated lignocellulose. *ChemSusChem*, v. 8, n. 1, p. 87–91, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/cssc.201402742>>.
- GODOY, R. C. B. d. et al. Juçara (euterpe edulis m.): importância ecológica e alimentícia. *Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Florestas)*, Volume, p. Pages, 2022. Colombo, PR.
- GOMES, J. W.; GODOI, G. S.; SOUZA, L. G. M. de; SOUZA, L. G. V. M. de. Absorção de água e propriedades mecânicas de compósitos poliméricos utilizando resíduos de mdf. *Polímeros, SciELO*, v. 27, 2017. ISSN 0104-1428.
- GUEDES, C. E. G.; OLIVEIRA, D. N. P. S. de; BEZERRA, J. B.; PENIDO, C. A. F. d. O.; FERREIRA, N. S.; BORGES, W. L.; SOUZA, T. M. Exploiting the amazonian açai palm leaves potential as reinforcement for cement composites through alkali and bleaching treatments. *Journal of Natural Fibers*, v. 19, n. 13, p. 6947–6960, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/15440478.2021.1941483>>.
- GUIMARÃES, L. A. d. O. P.; SOUZA, R. G. d. Palmeira juçara: patrimônio natural da mata atlântica no espírito santo. Incaper, Vitória, ES, 2017.
- GUO, G.; FINKENSTADT, V. L.; NIMMAGADDA, Y. Mechanical properties and water absorption behavior of injection-molded wood fiber/carbon fiber high-density polyethylene hybrid composites. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, v. 2, p. 690–700, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s42114-019-00116-5>>.
- GÜVEN, O.; MONTEIRO, S. N.; MOURA, E. A. B.; DRELICH, J. W. Re-emerging field of lignocellulosic fiber – polymer composites and ionizing radiation technology in their formulation. *Polymer Reviews*, v. 56, n. 4, p. 702–736, 2016.

- HABIBI, Y.; EL-ZAWAWY, W. K.; IBRAHIM, M.; DUFRESNE, A. Processing and characterization of reinforced polyethylene composites made with lignocellulosic fibers from egyptian agro-industrial residues. *Composites Science and Technology*, v. 68, p. 1877–1885, 2008.
- HAIR, J. F. Reflections on sem: An introspective, idiosyncratic journey to composite-based structural equation modeling. *SIGMIS Database*, v. 52, n. SI, p. 101–113, 2021.
- HAMDAN, N. Investigation of crystallinity characterization of bamboo fibers using xylanase from aspergillus nidulans. *Systematic Reviews in Pharmacy*, v. 11, p. 6–09, 07 2020.
- HASANOV, I. et al. The role of ionic liquids in the lignin separation from lignocellulosic biomass. *Energies*, v. 13, n. 18, p. 4864, 2020.
- HEBBAR, R.; ISLOOR, A.; ISMAIL, A. Chapter 12 - contact angle measurements. In: HILAL, N.; ISMAIL, A. F.; MATSUURA, T.; OATLEY-RADCLIFFE, D. (Ed.). *Membrane Characterization*. Elsevier, 2017. p. 219–255. ISBN 978-0-444-63776-5. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444637765000127>>.
- HEJNA, A.; SULYMAN, M.; PRZYBYSZ, M.; SAEB, M. R.; KLEIN, M.; FORMELA, K. On the correlation of lignocellulosic filler composition with the performance properties of poly(epsilon-caprolactone) based biocomposites. *Waste and Biomass Valorization*, v. 11, p. 1467–1479, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12649-018-0485-5>>.
- HENDERSON, A. *The genus Euterpe in Brazil*. Itajaí, SC: Herbário Barbosa Rodrigues, 2000.
- HINDRICHSEN, I.; KREUZER, M.; MADSEN, J.; KNUDSEN, K. B. Fiber and lignin analysis in concentrate, forage, and feces: Detergent versus enzymatic-chemical method. *Journal of Dairy Science*, v. 89, n. 6, p. 2168–2176, 2006. ISSN 0022-0302. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022030206722871>>.
- HOLMGREN, J.; LINDGREN, J. H.; RUDOLPHI, A. K.; JACOBSON, S. Properties of chemically modified lignocellulosic filler and its application in natural rubber biocomposites. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 141, n. 9, p. e55027, 2023.
- HSISSOU, R.; SEGHIRI, R.; BENZEKRI, Z.; HILALI, M.; RAFIK, M.; ELHARFI, A. Polymer composite materials: A comprehensive review. *Composite Structures*, v. 262, p. 113640, 2021. ISSN 0263-8223. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026382232100101X>>.
- HU, W.; CHEN, G.; LIU, Y.; LIU, Y.; LI, B.; FANG, Z. Transparent and hazy all-cellulose composite films with superior mechanical properties. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, American Chemical Society, v. 6, n. 5, p. 6974–6980, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b00814>>.
- HUANG, S. et al. Interphase and interfacial properties of composite materials. *Composite Materials*, p. 151–177, 2021.
- IBGE. *Levantamento sistemático da produção agrícola*. 2023. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1613>>.

ITABANA, B. E.; MOHANTY, A. K.; DICK, P.; SAIN, M.; BALI, A.; TIESSEN, M.; LIM, L.-T.; MISRA, M. Poly (butylene adipate-co-terephthalate) (pbat) – based biocomposites: A comprehensive review. *Macromolecular Materials and Engineering*, p. 2400179, 2024. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/mame.202400179>>.

ITABANA, B. E.; PAL, A. K.; MOHANTY, A. K.; MISRA, M. Biodegradable blown film composite from poly (butylene adipate-co-terephthalate) and talc: Effect of uniaxial stretching on mechanical and barrier properties. *Food Packaging and Shelf Life*, v. 39, p. 101147, 2023. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214289423001242>>.

JAIN, A. A.; MEHRA, A.; RANADE, V. V. Processing of tga data: Analysis of isoconversional and model fitting methods. *Fuel*, v. 165, p. 490–498, 2016.

JIAN, J.; XIANGBIN, Z.; XIANBO, H. An overview on synthesis, properties and applications of poly(butylene-adipate-co-terephthalate)–pbat. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, v. 3, n. 1, p. 19–26, 2020. ISSN 2542-5048. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542504820300014>>.

JIAO, J.; ZENG, X.; HUANG, X. An overview on synthesis, properties and applications of poly(butylene-adipate-co-terephthalate)–pbat. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, v. 3, n. 1, p. 19–26, 2020. ISSN 2542-5048. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542504820300014>>.

JUNIOR, J. P. da S.; REBELLO, F. K.; LIMA, H. V. de; SANTOS, M. A. S. dos; SANTOS, P. C. dos; LOPES, M. L. B. Socio-economics of acai production in rural communities in the brazilian amazon: A case study in the municipality of igarapé-miri, state of pará. *Journal of Agricultural Science*, 2019. Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:145999762>>.

KALU, E. I. et al. Impact test analysis of natural fibre reinforced polymer composites fabricated with bast fibres for industrial/household applications. *International Journal of Materials Engineering and Technology*, v. 22, n. 2, p. 123–140, 2023.

KASHFIPOUR, M.; MEHRA, N.; ZHU, J. A review on the role of interface in mechanical, thermal, and electrical properties of polymer composites. *Adv Compos Hybrid Mater*, v. 1, p. 415–439, 2018.

KAZEMI, M.; RAHIMI, A. Supports effect on tensile strength of the stereolithography parts. *Rapid Prototyping Journal*, v. 21, n. 1, p. 79–88, 2015.

KEYA, K. N.; KONA, N.; KOLY, F.; MARAZ, K. M.; ISLAM, M.; KHAN, R. Natural fiber reinforced polymer composites: history, types, advantages, and applications. v. 2019, p. 10.25082/MER.2019.02.006, 2019.

KIEMLE, S. N.; ZHANG, X.; ESKER, A. R.; TORIZ, G.; GATENHOLM, P.; COS-GROVE, D. J. Role of (1,3)(1,4)-beta-glucan in cell walls: Interaction with cellulose. *Biomacromolecules*, American Chemical Society, v. 15, n. 5, p. 1727–1736, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/bm5001247>>.

KNOPP, M. M.; LöBMANN, K.; ELDER, D. P.; RADES, T.; HOLM, R. Recent advances and potential applications of modulated differential scanning calorimetry (mdsc) in drug development. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, v. 87, p. 164–173, 2016.

KOAY, S. et al. A comprehensive study on the role of the surface wettability in composite materials. *Surface Science Reports*, v. 73, p. 123–146, 2018.

KONG, J.; YU, S. Fourier Transform Infrared Spectroscopic Analysis of Protein Secondary Structures. *Acta Biochimica et Biophysica Sinica*, v. 39, n. 8, p. 549–559, 08 2007. ISSN 1672-9145. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1745-7270.2007.00320.x>>.

KRASZNAI, D. J. et al. Compositional analysis of lignocellulosic biomass: conventional methodologies and future outlook. *Critical Reviews in Biotechnology*, v. 38, n. 2, p. 199–217, 2018.

KULKARNI, S. M.; KISHORE. Effects of surface treatments and size of fly ash particles on the compressive properties of epoxy based particulate composites. *Journal of Materials Science*, v. 37, p. 4321–4326, 2002. Disponível em: <<https://doi.org/10.1023/A:1020648418233>>.

LAI, J. C.; ANI, F. N.; HASSAN, A. Water absorption of lignocellulosic phenolic composites. *Polymers and Polymer Composites*, SAGE Publications Ltd STM, v. 16, n. 6, p. 379–387, 2008. ISSN 0967-3911. Accessed: 2024-11-01. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/096739110801600605>>.

LAURETO, J. J.; PEARCE, J. M. Anisotropic mechanical property variance between astm d638-14 type i and type iv fused filament fabricated specimens. *Polymer Testing*, v. 68, p. 294–301, 2018.

LAY, C. et al. Traditional knowledge of açai (euterpe precatoria mart. - arecaceae) usage in the sustainable development reserve - rds piagaçu purus – amazonas - brazil. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, v. 6, p. 127–134, 2021.

LEITE-BARBOSA, O.; OLIVEIRA, M. F. L. d.; BRAGA, F. C. F.; MONTEIRO, S. N.; OLIVEIRA, M. G. d.; VEIGA-JUNIOR, V. F. Impact of buriti oil from mauritia flexuosa palm tree on the rheological, thermal, and mechanical properties of linear low-density polyethylene for improved sustainability. *Polymers*, v. 16, n. 21, 2024. ISSN 2073-4360. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4360/16/21/3037>>.

LEITE-BARBOSA, O.; PINTO, C. C. d. O.; SILVA, J. M. Leite-da; AGUIAR, E. M. M. M. de; VEIGA-JUNIOR, V. F. Polymer composites reinforced with residues from amazonian agro-extractivism and timber industries: A sustainable approach to enhancing material properties and promoting bioeconomy. *Polymers*, v. 16, n. 23, 2024. ISSN 2073-4360. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4360/16/23/3282>>.

LEMOS, C.; CARDOSO, F.; NEUMANN, F.; FELIX, J.; TEIXEIRA, L. *Valorização de resíduos da indústria do açai: oportunidades e desafios*. Rio de Janeiro, 2021. Elaborado em 13 de dezembro de 2021.

LI, M.; JIA, Y.; SHEN, X.; SHEN, T.; TAN, Z.; ZHUANG, W.; ZHAO, G.; ZHU, C.; YING, H. Investigation into lignin modified pbat/thermoplastic starch composites: Thermal, mechanical, rheological and water absorption properties. *Industrial Crops and Products*, v. 171, p. 113916, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669021006804>>.

- LI, M.; JIA, Y.; SHEN, X.; SHEN, T.; TAN, Z.; ZHUANG, W.; ZHAO, G.; ZHU, C.; YING, H. Investigation into lignin modified pbat/thermoplastic starch composites: Thermal, mechanical, rheological and water absorption properties. *Industrial Crops and Products*, v. 171, p. 113916, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669021006804>>.
- LIAO, Z. et al. Ecoflex polymer of different shore hardnesses: Experimental investigations and constitutive modelling. *Mechanics of Materials*, 2020.
- LIMA, T. de; AZEVEDO, A. de; MARVILA, M.; CANDIDO, V.; FEDIUK, R.; MONTEIRO, S. Potential of using amazon natural fibers to reinforce cementitious composites: A review. *Polymers*, v. 14, p. 647, 2022.
- LIU, B. et al. Biodegradation behavior of degradable mulch with poly (butylene adipate-co-terephthalate) (pbat) and poly (butylene succinate) (pbs) in simulation marine environment. *Polymers*, v. 14, p. 1515, 2022.
- LIU, Z.; MENG, F.; TANG, X.; SU, C.; MU, Q.; JU, G. Research on properties of pbat/caco3 composite films modified with titanate coupling agent. *Polymers*, v. 15, n. 10, 2023. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4360/15/10/2379>>.
- LOGANATHAN, S.; VALAPA, R. B.; MISHRA, R. K.; PUGAZHENTHI, G. Thermogravimetric analysis for characterization of nanomaterials. *Thermal and Rheological Measurement Techniques for Nanomaterials Characterization*, Elsevier, p. 67–108, 2017.
- LOPES, E.; SOARES-FILHO, B.; SOUZA, F.; RAJÃO, R.; MERRY, F.; RIBEIRO, S. Mapping the socio-ecology of non timber forest products (ntfp) extraction in the brazilian amazon: The case of açaí (euterpe precatoria mart) in acre. *Landscape and Urban Planning*, 2019.
- LUO, Y. et al. The production of furfural directly from hemicellulose in lignocellulosic biomass: A review. *Catalysis Today*, v. 319, p. 14–24, 2019.
- MACIEL-SILVA, F. W.; BULLER, L. S.; GONÇALVES, M. L. M. B. B.; ROSTAGNO, M. A.; FORSTER-CARNEIRO, T. Sustainable development in the legal amazon: energy recovery from açaí seeds. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 15, n. 4, p. 1174–1189, 2021. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/bbb.2222>>.
- MAEDA, Y.; HARWELL, M. R. Guidelines for using the "q" test in meta-analysis. *Mid-Western educational researcher*, v. 28, p. 55–72, 2016.
- MAGHAMI, S.; SHAHROOZ, M.; MEHRABANI-ZEINABAD, A.; ZORNOZA, B.; SADEGHI, M. Characterization of the polymer/particle interphase in composite materials by molecular probing. *Polymer*, v. 205, p. 122792, 2020.
- MALTBY, D.; CARPITA, N. C.; MONTEZINOS, D.; KULOW, C.; DELMER, D. P. beta-1,3-Glucan in Developing Cotton Fibers: Structure, Localization, and Relationship of Synthesis to That of Secondary Wall Cellulose 1. *Plant Physiology*, v. 63, n. 6, p. 1158–1164, 06 1979. ISSN 0032-0889. Disponível em: <<https://doi.org/10.1104/pp.63.6.1158>>.
- MARTINS, G. R.; BRUM, F. L.; SILVA, D. M. M. C. da; BARBOSA, L. C.; MOHANABORGES, R.; SILVA, A. S. da. Preparation of hard palm seeds for matrix-assisted laser desorption/ionization-imaging mass spectrometry analysis. *Journal of Visualized*

*Experiments (JoVE)*, v. 196, p. 65650, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.3791/65650>>.

MARTINS, M.; PESSOA, J.; GONÇALVES, P. et al. Thermal and mechanical properties of the açai fiber/natural rubber composites. *J Mater Sci*, v. 43, p. 6531–6538, 2008.

MASŁOWSKI, M.; MIEDZIANOWSKA, J.; STRZELEC, K. Natural rubber composites filled with crop residues as an alternative to vulcanizates with common fillers. *Polymers*, v. 11, n. 6, 2019.

MATOS, J. et al. Economic profile of two species of genus euterpe, producers of açai fruits, from the par  and amazonas states - brazil. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, v. 2, p. 1822–1828, 2017.

MAZZANTI, V.; MOLLICA, F. Surface properties and processing relationships in polymer composites. *Advanced Materials Interfaces*, v. 7, n. 15, p. 2000378, 2020.

MCHUGH, M. L. Multiple comparison analysis testing in anova. *Biochemia Medica*, v. 21, p. 203–209, 2011.

MEHNDIRATTA, A.; BANDYOPADHYAYA, S.; KUMAR, V.; KUMAR, D. Experimental investigation of span length for flexural test of fiber reinforced polymer composite laminates. *Journal of materials research and technology*, v. 7, p. 89–95, 2017.

MELO, P. S.; SELANI, M. M.; GONÇALVES, R. H.; PAULINO, J. d. O.; MASSARIOLI, A. P.; ALENCAR, S. M. de. Açai seeds: An unexplored agro-industrial residue as a potential source of lipids, fibers, and antioxidant phenolic compounds. *Industrial Crops and Products*, v. 161, p. 113204, 2021.

MIEDZIANOWSKA, J.; MASŁOWSKI, M.; RYBIŃSKI, P.; STRZELEC, K. Properties of chemically modified (selected silanes) lignocellulosic filler and its application in natural rubber biocomposites. *Materials*, v. 13, p. 4163, 2020.

MITTAL, V.; LUCKACHAN, G. E.; CHERNEV, B.; MATSKO, N. B. Bio-polyester–date seed powder composites: Morphology and component migration. *Polymer Engineering & Science*, v. 55, n. 4, p. 877–888, 2015. Disponível em: <<https://aspepublications.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pen.23955>>.

MOHTAR, S. S.; Tengku Malim Busu, T. N. Z.; Md Noor, A. M.; SHAARI, N.; MAT, H. An ionic liquid treatment and fractionation of cellulose, hemicellulose and lignin from oil palm empty fruit bunch. *Carbohydrate Polymers*, v. 166, p. 291–299, 2017. ISSN 0144-8617. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144861717302400>>.

MONTANES, N.; QUILES-CARRILLO, L.; FERRANDIZ, S.; FENOLLAR, O.; BORONAT, T. Effects of lignocellulosic fillers from waste thyme on melt flow behavior and processability of wood plastic composites (wpc) with biobased poly(ethylene) by injection molding. *Journal of Polymers and the Environment*, v. 27, n. 4, p. 747–756, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10924-019-01388-0>>.

MONTEIRO, A. F.; MIGUEZ, I. S.; SILVA, J. P. R. B. et al. High concentration and yield production of mannose from açai (euterpe oleracea mart.) seeds via mannanase-catalyzed hydrolysis. *Scientific Reports*, v. 9, p. 10939, 2019.

MONTEIRO, S. N.; MARGEM, F. M.; LOIOLA, R. L.; ASSIS, F. S. de; OLIVEIRA, M. P. Characterization of banana fibers functional groups by infrared spectroscopy. *Materials Science Forum*, v. 775-776, p. 250 – 254, 2014. Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:137068222>>.

MUDALIGE, S.; SANJEEWA, P.; AMARASINGHE, D.; ATTYGALLE, D.; SAMARASEKARA, A.; WEERAGODA, S. Unlocking composite property secrets with sem. *2023 Moratuwa Engineering Research Conference (MERCon)*, p. 638–641, 2023.

MUNIYASAMY, S.; REDDY, M. M.; MISRA, M.; MOHANTY, A. Biodegradable green composites from bioethanol co-product and poly(butylene adipate-co-terephthalate). *Industrial Crops and Products*, v. 43, p. 812–819, 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669012005018>>.

MURILLO-FRANCO, S.; GALVIS-NIETO, J.; ORREGO, C. Physicochemical characterization of açai seeds (*euterpe oleracea*) from colombian pacific and their potential of mannan-oligosaccharides and sugar production via enzymatic hydrolysis. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2023.

MUTHURAJ, R.; MISRA, M.; MOHANTY, A. K. Binary blends of poly(butylene adipate-co-terephthalate) and poly(butylene succinate): A new matrix for biocomposites applications. In: . [s.n.], 2015. Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:135876384>>.

MVONDO, R. R. N.; MEUKAM, P.; JEONG, J.; MENESES, D. D. S.; NKENG, E. G. Influence of water content on the mechanical and chemical properties of tropical wood species. *Results in Physics*, v. 7, p. 2096–2103, 2017. ISSN 2211-3797. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211379717304862>>.

NAGARAJAN, V.; MOHANTY, A. K.; MISRA, M. Sustainable green composites: Value addition to agricultural residues and perennial grasses. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, v. 1, n. 3, p. 325–333, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/sc300084z>>.

NAJAFI, S. K.; TAJVIDI, M.; CHAHARMAHLI, M. Long-term water uptake behavior of lignocellulosic-high density polyethylene composites. *Journal of Applied Polymer Science*, John Wiley & Sons, Ltd, v. 102, n. 4, p. 3907–3911, 2006. ISSN 0021-8995. Accessed: 2024-11-01. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/app.24172>>.

NANA, A.; KAMSEU, E.; AKONO, A.-T.; NGOUNÉ, J.; Yankwa Djobo, J. N.; TCHAKOUTÉ, H. K.; BIGNOZZI, M. C.; LEONELLI, C. Particles size and distribution on the improvement of the mechanical performance of high strength solid solution based inorganic polymer composites: A microstructural approach. *Materials Chemistry and Physics*, v. 267, p. 124602, 2021. ISSN 0254-0584. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0254058421003850>>.

NECHITA, P.; IONESCU, S. Investigation on the thermal insulation properties of lightweight biocomposites based on lignocellulosic residues and natural polymers. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, v. 31, n. 11, p. 1497–1509, 2018.

NEVES, A. C. C.; ROHEN, L. A.; MANTOVANI, D. P.; CARVALHO, J. P.; VIEIRA, C. M. F.; LOPES, F. P.; SIMONASSI, N. T.; LUZ, F. S. d.; MONTEIRO, S. N. Comparative

- mechanical properties between biocomposites of epoxy and polyester matrices reinforced by hemp fiber. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 9, n. 2, p. 1296–1304, 2020.
- NIEDOBA, T.; PIĘTA, P. K. Applications of anova in mineral processing. *Mining Science*, v. 23, p. 43–54, 2016.
- NOGUEIRA, D.; MARASCA, N. S.; LATORRES, J. M.; COSTA, J. A. V.; MARTINS, V. G. Biodegradable films from açai seed extract and red bean flour for food packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, v. 2022, p. 1070, 2022.
- NUNES, E. de C.; SOUZA, A. G. de; ROSA, D. dos S. Use of a chain extender as a dispersing agent of the caco3 into pbat matrix. *Journal of Composite Materials*, SAGE Publications Ltd STM, v. 54, n. 10, p. 1373–1382, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/0021998319880282>>.
- OGAH, A. Optimisation of polymer composite production using process simulation. *Polymer Science*, v. 33, n. 1, p. 12–22, 2017.
- OLIVEIRA, J.; KOMESU, A.; MARTINS, L.; FILHO, R. M. Evaluation of microstructure of açai seeds biomass untreated and treated with h2so4 and naoh by sem, rdx and ftir. *Chemical Engineering Transactions*, v. 50, p. 379–384, 2016.
- OLIVEIRA, M. do Socorro P. de; OLIVEIRA, N. P. de; FREITAS, A. F. de; MATTIETTO, R. de A.; TEIXEIRA, D. H. L.; NETO, J. T. de F. Euterpe oleracea e e. precatória: açai. In: CORADIN, L.; CAMILLO, J.; VIEIRA, I. C. G. (Ed.). *Espécies nativas da flora brasileira de valor econômico atual ou potencial: plantas para o futuro: região Norte*. Brasília, DF: MMA, 2022, (Série Biodiversidade, 53). parte de livro Capítulo em livro técnico (CPATU), p. 1199–1214. Acesso: openAccess.
- ONU. *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. 2015. Accessed: 2024-06-11. Disponível em: <<https://sdgs.un.org/2030agenda>>.
- OPRAN, C. et al. Research regarding the impact behaviour of some polymeric biocomposite products for orthopedic use. *Mater. Plast.*, v. 54, n. 3, p. 438–442, 2017.
- ORNAGHI, H.; MONTICELI, F.; NEVES, R. et al. Influence of different cellulose/hemicellulose/lignin ratios on the thermal degradation behavior: prediction and optimization. *Biomass Conversion and Biorefinery*, v. 13, p. 7775–7782, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s13399-021-01651-2>>.
- PANWAR, A. S.; SINGH, A.; SEHGAL, S. Material characterization techniques in engineering applications: A review. *Materials Today: Proceedings*, v. 28, p. 1932–1937, 2020. ISSN 2214-7853. International Conference on Aspects of Materials Science and Engineering. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320339110>>.
- PARK, S.; BAE, K. Testing of carbon fibers and their composites. Springer, 2015.
- PARK, S.; BAKER, J. O.; HIMMEL, M. E.; PARILLA, P. A.; JOHNSON, D. K. Cellulose crystallinity index: measurement techniques and their impact on interpreting cellulase performance. *Biotechnology for Biofuels*, v. 3, n. 1, p. 10, 2010. ISSN 1754-6834. Disponível em: <<https://doi.org/10.1186/1754-6834-3-10>>.

- PARNIAKOV, O.; BALS, O.; BARBA, F. J.; MYKHAILYK, V.; LEOVKA, N.; VOROBIEV, E. Application of differential scanning calorimetry to estimate quality and nutritional properties of food products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, v. 58, n. 3, p. 362–385, 2016.
- PEPPER, M.; ALVES, F. Title of the paper. *Name of the Journal*, Volume, n. Number, p. Pages, 2017. Add any additional information if available.
- PERUMAL, C. A review on characteristic of polymer composites with natural fiber used as a reinforcement material. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, v. 6, p. 1213–1217, 01 2018.
- PESSÔA, T. S. et al. Açai waste benefiting by gasification process and its employment in the treatment of synthetic and raw textile wastewater. *Journal of Cleaner Production*, v. 240, p. 118047, 2019.
- PINHEIRO, I. F.; MORALES, A. R.; MEI, L. H. Polymeric biocomposites of poly (butylene adipate-co-terephthalate) reinforced with natural munguba fibers. *Cellulose*, v. 21, n. 6, p. 4381–4391, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10570-014-0387-z>>.
- QIN, P. et al. Superior gas barrier properties of biodegradable pbst vs. pbat copolyesters: A comparative study. *Polymers*, v. 13, p. 3449, 2021.
- QUEIROZ, L. S.; SOUZA, L. K. C. de; THOMAZ, K. T.; LIMA, E. T. L.; FILHO, G. N. da R.; NASCIMENTO, L. A. S. do; PIRES, L. H. d. O.; FAIAL, K. d. C. F.; COSTA, C. E. F. da. Activated carbon obtained from amazonian biomass tailings (acai seed): Modification, characterization, and use for removal of metal ions from water. *Journal of Environmental Management*, v. 270, p. 110868, 2020.
- QUEIROZ, M. H. *Biologia do fruto, da semente e da germinação do palmito (Euterpe edulis Martius)*. Itajaí, SC: Herbário Barbosa Rodrigues, 2000.
- QUIRINO, M. G. *Estudo de matriz polimérica produzida com resina natural e fibra da semente de açai (Euterpe precatória)*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal do Amazonas, Manaus, Brasil, 2010.
- RABYK, M.; GALISOVA, A.; JIRATOVA, M.; PATSULA, V.; SRBOVA, L.; LOUKOTOVA, L.; PARNICA, J.; JIRAK, D.; STEPANEK, P.; HRUBY, M. Mannan-based conjugates as a multimodal imaging platform for lymph nodes. *Journal of Materials Chemistry B*, v. 6, n. 17, p. 2584–2596, 2018.
- RAIMO, M. Impact of thermal properties on crystalline structure, polymorphism and morphology of polymer matrices in composites. *Materials*, v. 14, p. 2136, 2021.
- RAJABALINIA, N.; HAMZEHLOU, S.; MODIN, E.; CHUVILIN, A.; LEIZA, J.; ASUA, J. Coupling haadf-stem tomography and image reconstruction for the precise characterization of particle morphology of composite polymer latexes. *Macromolecules*, 2019.
- RAJAK, D. K.; PAGAR, D. D.; KUMAR, R.; PRUNCU, C. I. Recent progress of reinforcement materials: a comprehensive overview of composite materials. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 8, n. 6, p. 6354–6374, 2019.

- RAMACHANDRAN, A.; RANGAPPA, S. M.; KUSHVAHA, V.; KHAN, A.; SEINGCHIN, S.; DHAKAL, H. N. Modification of fibers and matrices in natural fiber reinforced polymer composites: A comprehensive review. *Macromolecular Rapid Communications*, v. 43, n. 17, p. 2100862, 2022. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/marc.202100862>>.
- RAMBO, M.; SCHMIDT, F.; FERREIRA, M. Analysis of the lignocellulosic components of biomass residues for biorefinery opportunities. *Talanta*, v. 144, p. 696–703, 2015. ISSN 0039-9140. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0039914015300862>>.
- RAMIAH, M. V. Thermogravimetric and differential thermal analysis of cellulose, hemicellulose, and lignin. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 14, n. 5, p. 1323–1337, 1970.
- RAMOS, R. R. F.; SIQUEIRA, D. D.; WELLEN, R. M. R.; LEITE, I. F.; GLENN, G. M.; MEDEIROS, E. S. Development of green composites based on polypropylene and corncob agricultural residue. *Journal of Polymers and the Environment*, v. 27, n. 8, p. 1677–1685, 2019. ISSN 1572-8919. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10924-019-01462-7>>.
- REDDY, A.; SHEKAR, K.; SINGARAVEL, B.; TAPAN, N.; RAJASRI, I. Effect of span length on flexural strength of glass fiber reinforced polymer matrix composite. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 1057, 2021.
- REIS, M. S.; REIS, A. *Euterpe edulis Martius: biologia, conservação e manejo*. Itajaí, SC: Herbário Barbosa Rodrigues, 2000.
- REN, J.-L.; GENG, Z.-C.; LIU, C.-F.; XU, F.; SUN, J.-X.; SUN, R.-C. Fractional isolation and structural characterisation of hemicellulosic polymers from delignified and ultrasonic irradiated sugarcane bagasse. *e-Polymers*, v. 6, n. 1, p. 067, 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1515/epoly.2006.6.1.855>>.
- ROMANZINI, D.; JUNIOR, H. L. O.; AMICO, S. C.; ZATTERA, A. J. Preparation and characterization of ramie-glass fiber reinforced polymer matrix hybrid composites. *Materials Research*, ABM, ABC, ABPol, v. 15, n. 3, p. 415–420, May 2012. ISSN 1516-1439. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1516-14392012005000050>>.
- ROSSETO, M.; RIGUETO, C. V.; KREIN, D. D.; BALBÉ, N. P.; MASSUDA, L. A.; DETTMER, A. Biodegradable polymers: Opportunities and challenges. In: SAND, A.; ZAKI, E. (Ed.). *Organic Polymers*. Rijeka: IntechOpen, 2019. cap. 7. Disponível em: <<https://doi.org/10.5772/intechopen.88146>>.
- ROWELL, R. M. Opportunities for lignocellulosic materials and composites. In: \_\_\_\_\_. *Emerging Technologies for Materials and Chemicals from Biomass*. [s.n.], 1992. cap. 2, p. 12–27. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/bk-1992-0476.ch002>>.
- RYBIŃSKI, P.; SYREK, B.; MASŁOWSKI, M.; MIEDZIANOWSKA, J.; STRZELEC, K.; ŻUKOWSKI, W.; BRADŁO, D. Influence of lignocellulose fillers on properties natural rubber composites. *Journal of Polymers and the Environment*, v. 26, n. 6, p. 2489–2501, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10924-017-1144-9>>.

- SALMAH, H.; LIM, B.; TEH, P. Rheological and thermal properties of palm kernel shell-filled low-density polyethylene composites with acrylic acid. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, SAGE Publications Ltd STM, v. 26, n. 9, p. 1155–1167, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/0892705711434193>>.
- SANTOS, M.; SHIBAO, F.; SILVA, F. Economia circular: conceitos e aplicação. *Revista Eletrônica Gestão e Serviços*, v. 10, p. 2808, 02 2020.
- SATO, M. K. et al. Biochar from acai agroindustry waste: Study of pyrolysis conditions. *Waste Management*, v. 96, p. 158–167, 2019.
- SCHAUSS, A. G. Açaí (*Euterpe oleracea* mart.): A macro and nutrient rich palm fruit from the amazon rain forest with demonstrated bioactivities in vitro and in vivo. Academic Press, p. 479–490, 2010.
- SCHULZ, M. et al. Juçara fruit (*Euterpe edulis* mart.): Sustainable exploitation of a source of bioactive compounds. *Food Research International*, v. 89, n. Part 1, p. 14–26, 2016.
- SEWDA, K.; MAITI, S. Effect of bark flour on melt rheological behavior of high density polyethylene. *Journal of Applied Polymer Science*, John Wiley & Sons, Ltd, v. 123, n. 4, p. 2122–2130, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/app.34715>>.
- SHAHARUDIN, S. H. et al. Melt flow index analysis for polymer composite materials. *Polymer Testing*, In press, 2023.
- SHANKAR, S.; RHIM, J. Preparation of antibacterial poly(lactide)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) composite films incorporated with grapefruit seed extract. *International journal of biological macromolecules*, v. 120 Pt A, p. 846–852, 2018.
- SHEN, D.; ZHANG, L.; XUE, J.; GUAN, S.; LIU, Q.; XIAO, R. Thermal degradation of xylan-based hemicellulose under oxidative atmosphere. *Carbohydrate Polymers*, v. 127, p. 363–371, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.03.067>>.
- SHI, X.; ITO, H.; KIKUTANI, T. Structure development and properties of high-speed melt spun poly(butylene terephthalate)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) bicomponent fibers. *Polymer*, Elsevier, v. 47, n. 2, p. 611–616, 2006.
- SILVA, A. F. d. et al. Innovative applications of açaí fiber in polymer composites. *Journal of Composite Materials*, 2023. Article in press.
- SILVA, D. M. M. C. da. *Caracterização e Processamento das Sementes da Juçara (Euterpe edulis) e Açaí-do-Amazonas (Euterpe precatoria) para a Produção de Manose*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Química, Rio de Janeiro, Brasil, abril 2024. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Bioquímica como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciência (Bioquímica). Orientadora: Ayla Sant’Ana da Silva.
- SILVA, E.; SILVA, A. da; RODRIGUES, Y. da et al. Ecocomposites based on high-impact polystyrene (hips) and amazon açaí (*Euterpe oleracea*) fibers: Influence of naoh treatment on its structural, thermal, and mechanical properties. *Mech Compos Mater*, v. 59, p. 147–158, 2023.

- SILVA, J. B. D.; SILVA, J. da; SOARES, B. G.; LIVI, S. Fully biodegradable composites based on poly(butylene adipate-co-terephthalate)/peach palm trees fiber. *Composites Part B-engineering*, v. 129, p. 117–123, 2017.
- SILVEIRA, J. T.; ROSA, A. P. C. da; MORAIS, M. G. de; VICTORIA, F. N.; COSTA, J. A. V. An integrative review of açaí (euterpe oleracea and euterpe precatoria): Traditional uses, phytochemical composition, market trends, and emerging applications. *Food Research International*, v. 173, n. Part 1, p. 113304, 2023.
- SINGHA, A.; RANA, R. K. Natural fiber reinforced polystyrene composites: Effect of fiber loading, fiber dimensions and surface modification on mechanical properties. *Materials and Design*, v. 41, p. 289–297, 2012. ISSN 0261-3069. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306912003019>>.
- SIYAMAK, S.; IBRAHIM, N.; ABDOLMOHAMMADI, S.; YUNUS, W.; RAHMAN, M. A. Enhancement of mechanical and thermal properties of oil palm empty fruit bunch fiber poly(butylene adipate-co-terephthalate) biocomposites by matrix esterification using succinic anhydride. *Molecules*, v. 17, p. 1969 – 1991, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/molecules17021969>>.
- SLUITER, A.; HAMES, B.; RUIZ, R.; SCARLATA, C.; SLUITER, J.; TEMPLETON, D.; CROCKER, D. *Determination of Structural Carbohydrates and Lignin in Biomass: Laboratory Analytical Procedure (LAP)*. Golden, Colorado, 2012. Revised August 2012. Contract No. DE-AC36-08GO28308. Disponível em: <<http://nrel.gov/docs/gen/fy13/42618.pdf>>.
- SONG, Y.; ZHANG, J.; ZHANG, X.; TAN, T. The correlation between cellulose allomorphs (i and ii) and conversion after removal of hemicellulose and lignin of lignocellulose. *Bioresource Technology*, v. 193, p. 164–170, 2015. ISSN 0960-8524. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852415008755>>.
- SOUTO, B. A.; SOUZA, V. L. C.; PERAZZINI, M. T. B.; PERAZZINI, H. Valorization of acai bio-residue as biomass for bioenergy: Determination of effective thermal conductivity by experimental approach, empirical correlations and artificial neural networks. *Journal of Cleaner Production*, v. 279, p. 123484, 2021.
- STANCIU, M.; SAVIN, A.; NASTAC, S. Mechanical and surface properties of lignocellulosic fibres reinforced composites. *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering*, v. 64, 2018.
- STEFANIDIS, S. D.; KALOGIANNIS, K. G.; ILIOPOULOU, E. F.; MICHAILOF, C. M.; PILAVACHI, P. A.; LAPPAS, A. A. A study of lignocellulosic biomass pyrolysis via the pyrolysis of cellulose, hemicellulose and lignin. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 105, p. 143–150, 2014. ISSN 0165-2370. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165237013002374>>.
- TAKAYAMA, T.; UCHIUMI, K.; ITO, H.; KAWAI, T.; TODO, M. Particle size distribution effects on physical properties of injection molded ha/pla composites. *Advanced Composite Materials*, Taylor & Francis, v. 22, n. 5, p. 327–337, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/09243046.2013.820123>>.
- TALWAR, S.; WANG, B.; YAN, L. Interphase and interfacial properties of composite materials. *Composite Materials*, p. 151–177, 2016.

- TAVARES, F. F. d. C.; ALMEIDA, M. D. C. d.; SILVA, J. A. P. d.; ARAÚJO, L. L.; CARDOZO, N. S. M.; SANTANA, R. M. C. Thermal treatment of açaí (*euterpe oleracea*) fiber for composite reinforcement. *Polímeros*, v. 30, n. 1, p. e2020003, 2020.
- TISSERAT, B.; LARSON, E.; GRAY, D.; DEXTER, N.; MEUNIER, C.; MOORE, L.; HAVERHALS, L. Ionic liquid-facilitated preparation of lignocellulosic composites. *International Journal of Polymer Science*, v. 2015, p. 181097, 2015.
- TIŠMA, M.; BUCIĆ-KOJIĆ, A.; PLANINIĆ, M. Bio-based products from lignocellulosic waste biomass: A state of the art. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, v. 35, 2021.
- TOGLIATTI, E.; LAPORTA, C. C.; GRIMALDI, M.; PITIROLLO, O.; CAVAZZA, A.; PUGLIESE, D.; MILANESE, D.; SCIANCALEPORE, C. Preparation and characterisation of pbat-based biocomposite materials reinforced by protein complex microparticles. *The 2nd International Online Conference on Polymer Science - Polymers and Nanotechnology for Industry 4.0*, 2021.
- TORMA, P. et al. Characterization, bioactive compounds and antioxidant potential of açaí (*euterpe oleracea*) genotypes. *Current Bioactive Compounds*, v. 15, n. 6, 2020.
- TREVISAN, A. C. D.; FANTINI, A. C.; SCHMITT-FILHO, A. L.; FARLEY, J. Market for amazonian açaí (*euterpe oleracea*) stimulates pulp production from atlantic forest juçara berries (*euterpe edulis*). *Agroecology and Sustainable Food Systems*, v. 39, n. 7, p. 762–781, 2015.
- TUKEY, J. W. The problem of multiple comparisons. Unpublished report, Princeton University. 1953.
- URBANEK, A. K. et al. Biochemical properties and biotechnological applications of microbial enzymes involved in the degradation of polyester-type plastics. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Proteins and Proteomics*, v. 1868, p. 140315, 2019.
- VAN, S. L. L. Thermal degradation. In: SCHNIEWIN, D.; ARNO, P. (Ed.). *Concise Encyclopedia of Wood & Wood-Based Materials*. Oxford: Pergamon Press, 1992.
- VELOZ, P. Value chains and soft commodities in amazonia: Regulatory prospects for commodified biodiversity according to the glocal production chain of açaí. *Journal of Land Use Science*, v. 15, n. 2-3, p. 389–405, 2020.
- VENKATESAN, R.; RAJESWARI, N.; TAMILSELVI, A. Antimicrobial, mechanical, barrier, and thermal properties of bio-based poly (butylene adipate-co-terephthalate) (pbat)/ag2o nanocomposite films for packaging application. *Polymers for Advanced Technologies*, Wiley Online Library, v. 29, n. 1, p. 61–68, 2018.
- VIAN, W.; DENTON, N. Hardness comparison of polymer specimens produced with different processes. 2018.
- VÄISÄNEN, T.; DAS, O.; TOMPPONEN, L. A review on new bio-based constituents for natural fiber-polymer composites. *Journal of Cleaner Production*, v. 149, p. 582–596, 2017.

- WANG, Z.; GANEWATTA, M. S.; TANG, C. Sustainable polymers from biomass: Bridging chemistry with materials and processing. *Progress in Polymer Science*, v. 101, p. 101197, 2020. ISSN 0079-6700. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079670019302035>>.
- WATAYA, C. H.; LIMA, R. A.; OLIVEIRA, R. R.; MOURA, E. A. B. Mechanical, morphological and thermal properties of açai fibers reinforced biodegradable polymer composites. In: \_\_\_\_\_. *Characterization of Minerals, Metals, and Materials 2015*. Cham: Springer International Publishing, 2016. p. 265–272. ISBN 978-3-319-48191-3. Disponível em: <[https://doi.org/10.1007/978-3-319-48191-3\\_33](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48191-3_33)>.
- WEI, X.-F.; BOHLÉN, M.; LINDBLAD, C.; HEDENQVIST, M.; HAKONEN, A. Microplastics generated from a biodegradable plastic in freshwater and seawater. *Water Research*, v. 198, p. 117123, 2021.
- WOICIECHOWSKI, A. L. et al. Lignocellulosic biomass: Acid and alkaline pretreatments and their effects on biomass recalcitrance – conventional processing and recent advances. *Bioresource Technology*, v. 304, p. 122848, 2020.
- XIAO, B.; SUN, X.; SUN, R. Chemical, structural, and thermal characterizations of alkali-soluble lignins and hemicelluloses, and cellulose from maize stems, rye straw, and rice straw. *Polymer Degradation and Stability*, v. 74, n. 2, p. 307–319, 2001. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014139100100163X>>.
- XIE, H. et al. Advanced characterization techniques for polymer composites. *Polymer Testing*, v. 75, p. 204–212, 2019.
- XIONG, S.-J.; PANG, B.; ZHOU, S.-J.; LI, M.-K.; YANG, S.; WANG, Y.-Y.; SHI, Q.; WANG, S.-F.; YUAN, T.-Q.; SUN, R.-C. Economically competitive biodegradable pbat/lignin composites: Effect of lignin methylation and compatibilizer. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, v. 8, n. 13, p. 5338–5346, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c00789>>.
- XU, F.; SHI, Y.-C.; WANG, D. X-ray scattering studies of lignocellulosic biomass: A review. *Carbohydrate Polymers*, v. 94, n. 2, p. 904–917, 2013. ISSN 0144-8617. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014486171300146X>>.
- YAO, F.; XU, P.; JIA, H.; LI, X.; YU, H.; LI, X. Thermogravimetric analysis on a resonant microcantilever. *Analytical Chemistry*, v. 94, n. 26, p. 9380–9388, 2022.
- YAP, S.; SREEKANTAN, S.; HASSAN, M.; SUDESH, K.; ONG, M. Characterization and biodegradability of rice husk-filled polymer composites. *Polymers*, v. 13, p. 104, 2020.
- YEO, J. Y.; CHIN, B. L. F.; TAN, J. K.; LOH, Y. S. Comparative studies on the pyrolysis of cellulose, hemicellulose, and lignin based on combined kinetics. *Journal of the Energy Institute*, v. 92, n. 1, p. 27–37, 2019. ISSN 1743-9671. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1743967117308127>>.
- YOO, C. G. et al. The critical role of lignin in lignocellulosic biomass conversion and recent pretreatment strategies: A comprehensive review. *Bioresource Technology*, v. 301, p. 122784, 2020.

- YU, S.; WANG, S.; LU, M. et al. Review of mems differential scanning calorimetry for biomolecular study. *Frontiers in Mechanical Engineering*, v. 12, p. 526–538, 2017.
- YU, T.; ZHANG, Z.; SONG, S.; BAI, Y.; WU, D. Tensile and flexural behaviors of additively manufactured continuous carbon fiber-reinforced polymer composites. *Composite Structures*, 2019.
- YUKHYMETS, P.; DMYTRIENKO, R.; RAMADAN, I.; BUKHAROV, S. Experimental characterization of composite material properties. Springer, 2018.
- ZAMUDIO, F.; GATTI, M.; HILGERT, N. I. et al. Insects or wind? new findings on the polinização system of euterpe edulis (arecaceae). *Arthropod-Plant Interactions*, v. 15, p. 503–516, 2021.
- ZHANG, C.-w.; NAIR, S. S.; CHEN, H.; YAN, N.; FARNOOD, R.; LI, F.-y. Thermally stable, enhanced water barrier, high strength starch bio-composite reinforced with lignin containing cellulose nanofibrils. *Carbohydrate Polymers*, v. 230, p. 115626, 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144861719312949>>.
- ZHANG, H.; HE, C.; YU, M.; FU, J. Texture feature extraction and classification of sem images of wheat straw/polypropylene composites in accelerated aging test. *Advances in Materials Science and Engineering*, v. 2015, p. 397845, 2015.
- ZHANG, P. Omnibus test of normality using the q statistic. *Journal of Applied Statistics*, v. 26, n. 4, p. 519–528, 1999.
- ZHENG, Q.; ZHANG, Y.; MONTAZERIAN, M.; GULBITEN, O.; MAURO, J. C.; ZANOTTO, E. D.; YUE, Y. Insights into thermodynamics and the world of materials. *Chemical Reviews*, v. 119, n. 13, p. 7848–7939, 2019.
- ZHU, M.; KNOPP, K.; ZHOU, K.-G. Lifting the mist of flatland: The recent progress in the characterizations of two-dimensional materials. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, v. 63, p. 72–93, 2017.
- ZIĄBKA, M.; DZIADEK, M. Effects of silver nanoparticles on the surface properties and cell compatibility of polymer composites. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology, and Medicine*, v. 14, n. 4, p. 951–962, 2018.
- ČREŠNAR, K. et al. The role of wood fibers in modifying surface properties of polymer composites. *Composite Interfaces*, v. 28, n. 1, p. 85–104, 2021.

## APÊNDICE A – CURVAS DE TG E DTG

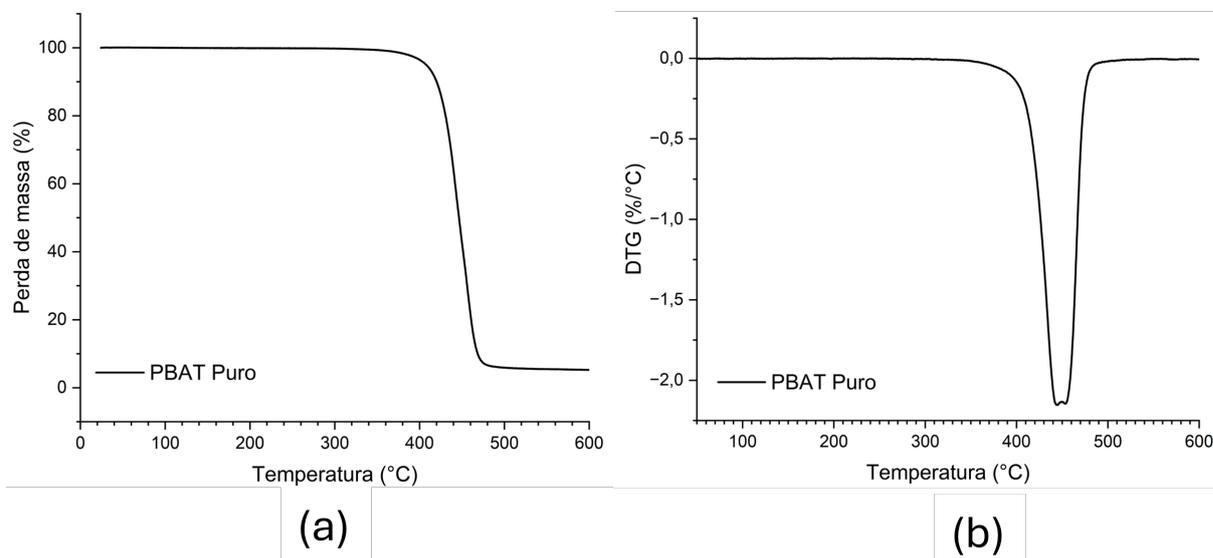


Figura 30 – Curvas de TG e DTG do PBAT puro.

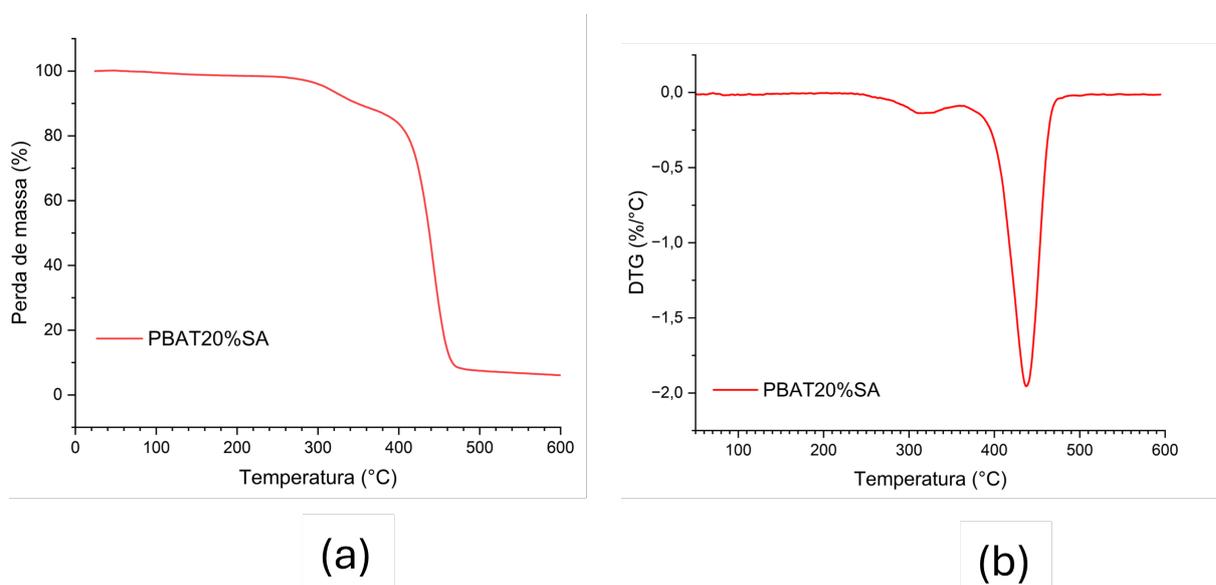


Figura 31 – Curvas de TG e DTG do PBAT com 20% de resíduo de semente de açaí.

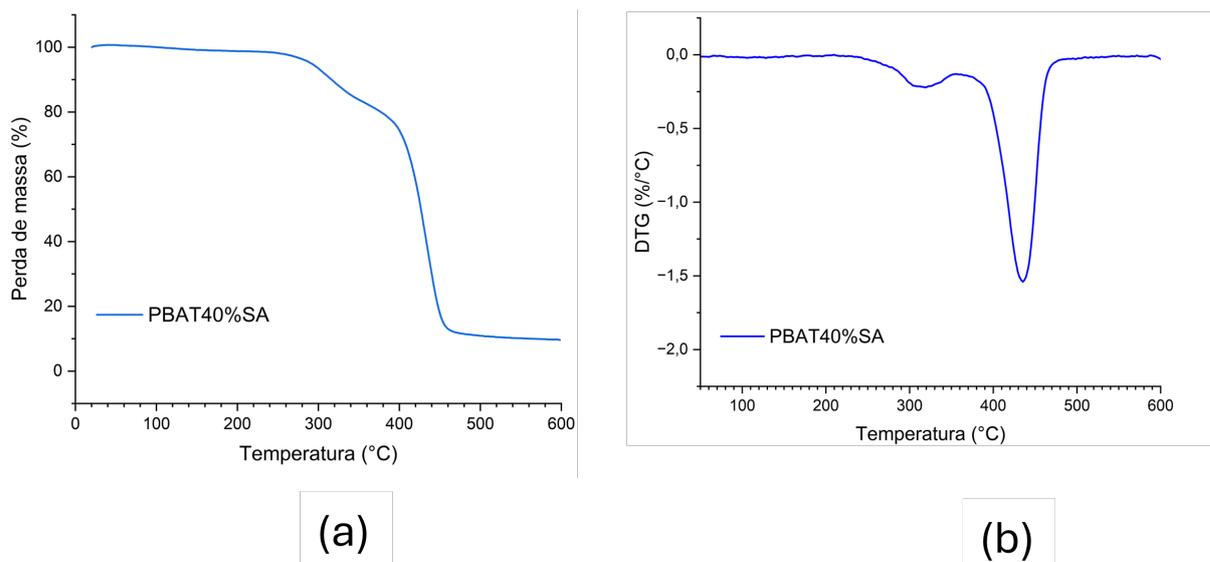
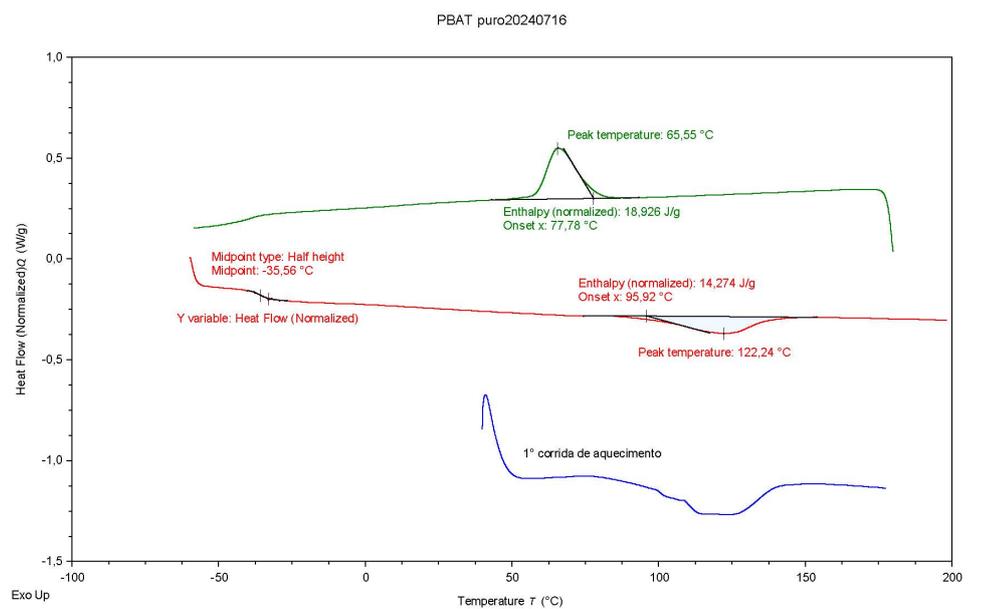


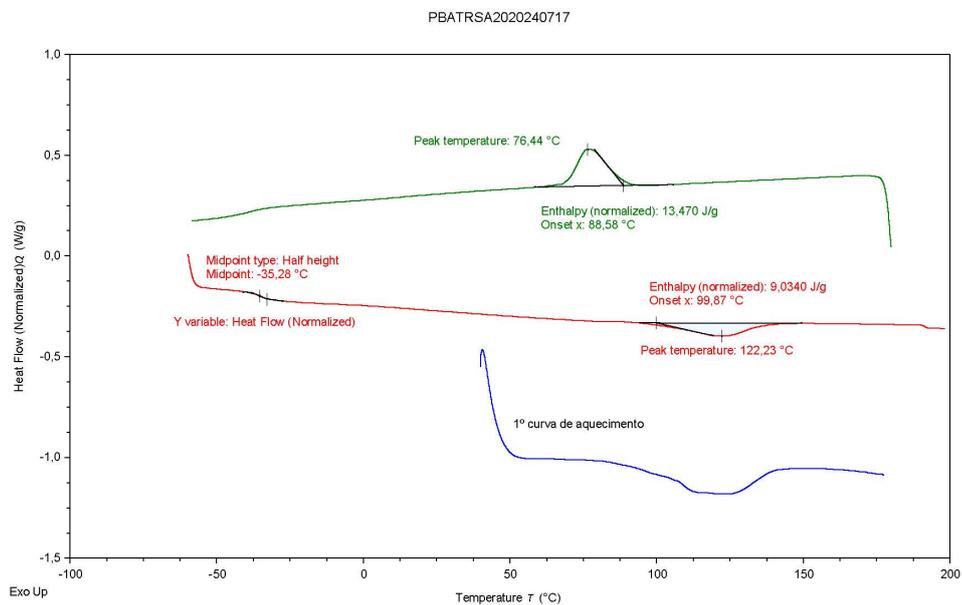
Figura 32 – Curvas de TG e DTG do PBAT com 40% de resíduo de semente de açaí.

## APÊNDICE B – CURVAS DE DSC



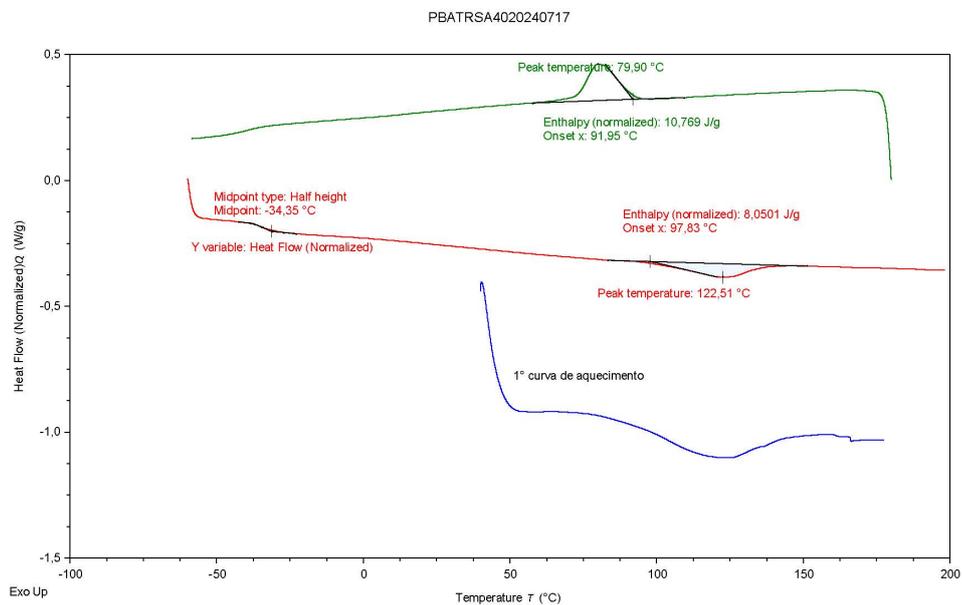
TA Instruments Trios V5.7.2.101

Figura 33 – Curva DSC do PBAT puro.



TA Instruments Trios V5.7.2.101

Figura 34 – Curva DSC do compósito PBAT com 20% de resíduo de semente de açaí.



TA Instruments Trios V5.7.2.101

Figura 35 – Curva DSC do compósito PBAT com 40% de resíduo de semente de açai.