

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

YAGO SOARES CHAVES

**CARACTERIZAÇÃO DO COMPÓSITO DE MATRIZ EPÓXI REFORÇADO
COM FIBRAS DE BABAÇU PARA APLICAÇÃO EM BLINDAGEM BALÍSTICA**

**RIO DE JANEIRO
2024**

YAGO SOARES CHAVES

CARACTERIZAÇÃO DO COMPÓSITO DE MATRIZ EPÓXI REFORÇADO
COM FIBRAS DE BABAÇU PARA APLICAÇÃO EM BLINDAGEM
BALÍSTICA

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): Lucio Fabio Cassiano Nascimento, D.Sc.
Sergio Neves Monteiro, Ph.D.

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).

Chaves, Yago Soares.

CARACTERIZAÇÃO DO COMPÓSITO DE MATRIZ EPÓXI REFORÇADO
COM FIBRAS DE BABAÇU PARA APLICAÇÃO EM BLINDAGEM BALÍSTICA

/ Yago Soares Chaves. – Rio de Janeiro, 2024.

129 f.

Orientador(es): Lucio Fabio Cassiano Nascimento e Sergio Neves Monteiro.

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

1. Fibras naturais lignocelulósicas. 2. Compósitos. 3. Balística. 4. Attalea
speciosa. i. Cassiano Nascimento, Lucio Fabio (orient.) ii. Neves Monteiro,
Sergio (orient.) iii. Título

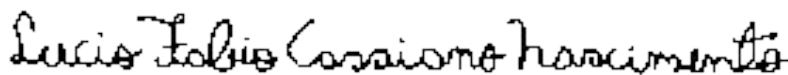
YAGO SOARES CHAVES

**CARACTERIZAÇÃO DO COMPÓSITO DE MATRIZ
EPÓXI REFORÇADO COM FIBRAS DE BABAÇU PARA
APLICAÇÃO EM BLINDAGEM BALÍSTICA**

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): Lucio Fabio Cassiano Nascimento e Sergio Neves Monteiro.

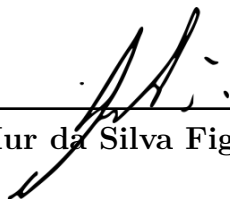
Aprovado em Rio de Janeiro, 23 de Fevereiro de 2024, pela seguinte banca examinadora:



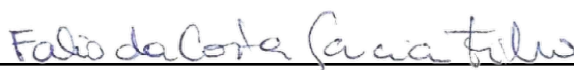
TC. Lucio Fabio Cassiano Nascimento - D.Sc. do IME - Presidente



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



Prof. André Ben-Hur da Silva Figueiredo - D.Sc. do IME



Prof. Fabio da Costa Garcia Filho - D.Sc. do CEFET/RJ



Prof. Patrícia Soares da Costa Pereira - D.Sc. da UERJ

Rio de Janeiro

2024

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”
(Arthur Schopenhauer)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradecer a Deus, por todas as conquistas realizadas, por me proporcionar forças para conseguir encarar o dia a dia de cabeça erguida, por me dar a oportunidade de conquistar os meus sonhos e por proporcionar saúde nesse momento tão delicado que vivemos no presente.

A minha família, por sempre me dar forças e todo o apoio para encarar as dificuldades que surgem longe de casa. A minha Claudia Cristina Estevam Soares, por sempre me incentivar a sempre correr atrás dos meus sonhos, pelas dicas ensinadas para sempre fazer e seguir o caminho certo, de me dar forças, pelas palavras que transmite a mim todos os dias, que me deixam mais forte para seguir na busca dos meus sonhos. Ao meu pai Manoel Antonio Chaves pela ajuda, pelas dicas, pelas palavras de todos os dias e pelo conhecimento proporcionado a mim para sempre seguir pelo caminho certo, por sempre me incentivar nos estudos e sempre ficar feliz pelas minhas conquistas. Ao meu irmão Ywilly Soares Chaves por sempre estar dando forças, dicas e sempre me incentivar nas minhas escolhas. A minha irmã Yanca Soares Chaves por sempre estar preocupada, pelas palavras transmitidas e por sempre me incentivar e apoiar em minhas decisões. A minha avó Maria de Fatima Estevam Soares por sempre se preocupar, por sempre me desejar tudo de bom todas as noites, pelo incentivo e forças desejadas. A todos os familiares que sempre me incentivam e desejam coisas boas. A minha namorada Esthefanie Santana por toda a força, todo o carinho, por todo incentivo mesmo estando distante e por sempre me apoiar na minha caminhada de todo dia. Aos amigos do Ceuma, e agora IME também, Ronald, Taliana, pelos dias divertidos, pelas histórias proporcionadas em São Luis e no Rio de Janeiro, em especial a Taliana por dividir apartamento comigo e sempre me aturar e me divertir durante todos os dias no rio de janeiro quanto em São Luis.

Aos amigos da DWA Engenharia, o Guilherme, matheus, felipe, Kalley, Celso, Augusto, Marcos, Lucas, Irmão e principalmente a Rysya e Arnaldo pela amizade e pela oportunidade ofertada.

Aos novos amigos que fiz no trainee de gestão pública, ao Luiz Gustavo meu gestor pela confiança ofertada e pela amizade, ensinamento e calma diária. A Luiza Nakamura pelos ensinamentos, pela amizade, pela calma e pelo Ioga. Ao Jorge Daniel pelos ensinamentos, pela calma, pela amizade e pelas risadas diárias. A Ariane pelos ensinamentos, pela calma e pela amizade. A Germana pela amizade, pelos ensinamentos e pela calma diária. A Amanda pelo incentivo para finalizar a dissertação, pela amizade, pela calma e pelos ensinamentos. Todos vocês são especiais para mim.

Aos amigos que obtive na cidade do rio de janeiro, que se tornaram minha segunda

família, a Thais Gajo por sempre me ajudar e apoiar, desejo que a Maitê venha ao mundo com toda a saúde do mundo. A Rayssa Machado por sempre me apoiar e por sempre me divertir. A Carolina Alencar pelas histórias, por sempre me incentivar e me ajudar.

Ao meu orientador Lúcio por todos os ensinamentos transmitidos, por todas as palavras de incentivo transmitidas, pelas ajudas científicas, pela paciência, pela confiança depositada, pela aprendizagem transmitida, pela presença quando precisava de ajuda e principalmente pela amizade. Muito obrigado por toda a ajuda! Ao meu coorientador Sergio Neves Monteiro pela confiança depositada, pela ajuda, pelas dúvidas tiradas e pelas palavras nas reuniões semanais.

Aos amigos do laboratório de fibras naturais: Artur, Michelle, Lucas, Rai, Juliana, Juliane, Wendell, Magno, Ulisses, Pedro e Matheus.

Especialmente aos amigos Rai felipe, Lucas Neuba, Michelle e antonio pela ajuda, para me ensinar a utilização da estufa, a me ajudar a entender os procedimentos de obtenção do ângulo microfilar, para me ajudar com o princípio de Arquimedes, para me ajudar com as imagens no MEV e principalmente pela amizade, muito obrigado. Ao Pedro Poubel pela amizade, pelas parcerias acadêmicas, pela ajuda e auxílio nos ensaios e pela grande amizade diária. Aos professores pertencentes ao programa de Pós-graduação em Ciências dos Materiais do Instituto Militar de Engenharia, por todo o conhecimento transmitido.

Ao Laboratório de Ensaios Não Destrutivos, Soldagem e Corrosão (LNDC) da UFRJ, por ajudar no ensaio de tração das fibras de babaçu, em especial ao técnico Brendon responsável pela realização dos ensaios mecânicos.

Ao Instituto de Pesquisas da Marinha (IPqM) por possibilitar a realização das análises de térmicas, em especial ao Foluke e Rubens por me ajudarem tanto a obter os resultados.

A CAPES (Coordenação de Apoio à Pessoal de Ensino Superior), pelo suporte financeiro deste presente trabalho.

RESUMO

A criminalidade urbana tem se destacado como uma preocupação central para os residentes de grandes cidades nas últimas décadas. Diante desse cenário, tanto indivíduos quanto instituições adaptam seu comportamento e estilo de vida para lidar com a realidade imposta pela crescente criminalidade urbana. Diante desse desafio, o presente trabalho propõe-se a estudar as propriedades químicas, térmicas, mecânicas e balísticas de compósitos reforçados com fibras naturais lignocelulósicas (CFNLs), com foco nas aplicações de blindagem corporal. No presente estudo, fibras naturais lignocelulósicas (FNLs) provenientes do babaçu (*Attalea speciosa*) foram empregadas como reforço na produção de compósitos, utilizando matriz epóxi-fibras em concentrações de 10%, 20% e 30% em volume de fibras. Realizou-se ensaios abrangentes para a caracterização química, térmica, balística e mecânica das fibras de babaçu. As fibras apresentaram uma densidade média de $0,59 \text{ g/cm}^3 \pm 0,18 \text{ g/cm}^3$, com diâmetros médios variando de 0,15 mm a 0,47 mm. A partir da caracterização química das fibras de babaçu, identificou-se um teor de umidade de 7,05%, com uma composição química específica, incluindo 2,43% de cinzas, 28,53% de lignina, 32,34% de hemicelulose e 37,97% de celulose. Os ensaios termogravimétricos realizados nas fibras de babaçu apresentaram perda de umidade em $37,8^\circ \text{C}$ e temperatura de início de degradação dos seus constituintes em $272,9^\circ \text{C}$. As propriedades mecânicas do babaçu apresentaram valores significativos, com resistência à tração máxima de $100,76 \pm 10,18 \text{ MPa}$, módulo de elasticidade máximo igual a $6,33 \pm 0,64 \text{ GPa}$ e deformação máxima de $2,98 \pm 0,30\%$. Os resultados da difração de raios-X retornaram um índice de cristalinidade de 78,25% e um ângulo microfibrilar de $7,64^\circ$. As micrografias capturadas pela microscopia eletrônica de varredura (MEV) revelaram uma superfície da fibra de babaçu com presença de poros, concentradores de tensão e depressões. Foram fabricados compósitos com frações de 0%, 10%, 20% e 30% de fibras. As análises termogravimétricas (TG) e calorimetria diferencial de varredura (DSC) indicaram uma estabilidade térmica consistente até 300°C . Os compósitos contendo 30% de volume de fibras destacaram-se, apresentando os melhores resultados para a absorção de energia no ensaio de impacto Izod. As superfícies de fratura dos corpos de prova revelaram uma transição nos mecanismos de fratura, passando de totalmente frágil para dúctil-frágil com o aumento das fibras no compósito. O ensaio de tração confirmou o reforço efetivo proporcionado pelas fibras, sendo que a amostra com 30% em volume de fibras de babaçu demonstrou um aumento significativo de 53,15% na resistência à tração, 64,80% no módulo de elasticidade e 39,34% na deformação. As propriedades balísticas variaram de 230,04 a 212,40 m/s para a energia de absorção e de 211,68 a 192,76 J, abrangendo frações de 10% a 30% em volume de fibras de babaçu para a munição de calibre 9 mm. Os resultados foram estatisticamente superiores para a munição de 9 mm, enquanto para o calibre 0.45 mm foram equivalentes aos estudos anteriores. Os resultados da caracterização da fibra e dos compósitos de babaçu revelaram um potencial significativo para a aplicação dessas fibras em compósitos de matriz epóxi, principalmente em engenharia. No entanto, para sua implementação efetiva em sistemas de blindagem multicamadas (SBMs), é essencial conduzir uma investigação mais abrangente das propriedades balísticas apresentadas.

Palavras-chave: Fibras naturais lignocelulósicas. Compósitos. Balística. *Attalea speciosa*.

ABSTRACT

Urban crime has become a central concern for residents of large cities in recent decades. Faced with this scenario, both individuals and institutions are adapting their behavior and lifestyle to deal with the reality imposed by growing urban crime. Faced with this challenge, this paper aims to study the chemical, thermal, mechanical and ballistic properties of composites reinforced with natural lignocellulosic fibers (NLCFs), with a focus on body armor applications. In this study, natural lignocellulosic fibers (NLFs) from babassu (*Attalea speciosa*) were used as reinforcements in the production of composites, using an epoxy-fiber matrix in concentrations of 10%, 20% and 30% by volume of fibers. Comprehensive tests were carried out for the chemical, thermal, ballistic and mechanical characterization of the babassu fibres. The fibers had an average density of $0.59 \text{ g/cm}^3 \pm 0.18 \text{ g/cm}^3$, with average diameters ranging from 0.15 mm to 0.47 mm. From the chemical characterization of the babassu fibres, a moisture content of 7.05% was identified, with a specific chemical composition including 2.43% ash, 28.53% lignin, 32.34% hemicellulose and 37.97% cellulose. Thermogravimetric tests carried out on babassu fibers showed a loss of moisture at 37.8°C and the onset temperature of degradation of its constituents at 272.9°C. The mechanical properties of babassu showed significant values, with maximum tensile strength of $100.76 \pm 10.18 \text{ MPa}$, maximum modulus of elasticity of $6.33 \pm 0.64 \text{ GPa}$ and maximum deformation of $2.98 \pm 0.30\%$. The X-ray diffraction results returned a crystallinity index of 78.25% and a microfibrillar angle of 7.64°. The micrographs captured by scanning electron microscopy (SEM) revealed a babassu fiber surface with the presence of pores, stress concentrators and depressions. Composites with fiber fractions of 0%, 10%, 20% and 30% were manufactured. Thermogravimetric (TG) and differential scanning calorimetry (DSC) analyses indicated consistent thermal stability up to 300°C. The composites containing 30% fiber volume stood out, showing the best results for energy absorption in the Izod impact test. The fracture surfaces of the specimens revealed a transition in fracture mechanisms from totally brittle to ductile-fragile with the increase in fibers in the composite. The tensile test confirmed the effective reinforcement provided by the fibers, with the sample containing 30% babassu fibers by volume showing a significant increase of 53.15% in tensile strength, 64.80% in modulus of elasticity and 39.34% in deformation. The ballistic properties ranged from 230.04 to 212.40 m/s for the absorption energy and from 211.68 to 192.76 J, covering fractions of 10% to 30% by volume of babassu fibers for the 9 mm caliber ammunition. The results were statistically superior for the 9 mm ammunition, while for the 0.45 mm caliber they were equivalent to previous studies. The results of the characterization of babassu fibre and composites revealed significant potential for the application of these fibres in epoxy matrix composites, especially in engineering. However, for their effective implementation in multilayer armor systems (SBMs), it is essential to conduct a more comprehensive investigation of the ballistic properties presented.

Keywords: Natural lignocellulosic fibers. Composites. ballistics. *Attalea speciosa*.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Classificação dos materiais empregados em blindagens balísticas.	22
Figura 2.2 – Níveis de blindagens segundo a norma ABNT NBR 15000.	24
Figura 2.3 – Indentação causada no material de referência (plastilina) em (a) antes do impacto e (b) após impacto.	25
Figura 2.4 – Curva da probabilidade de perfuração.	26
Figura 2.5 – Esquema de classificação para as moléculas poliméricas.	29
Figura 2.6 – Classificação dos polímeros quanto ao comportamento mecânico.	30
Figura 2.7 – Reação de produção da resina epóxi.	31
Figura 2.8 – Classificação das fibras.	34
Figura 2.9 – Representação esquemática de uma FNL.	35
Figura 2.10–Estrutura química da celulose.	36
Figura 2.11–Estrutura química da lignina.	36
Figura 2.12–Palmeira de babaçu.	38
Figura 2.13–Palmeira de babaçu.	39
Figura 2.14–Região da mata dos cocais.	39
Figura 2.15–Porcentagens e utilizações dos constituintes do coco babaçu.	40
Figura 2.16–Produtos produzidos com o coco babaçu.	41
Figura 2.17–Artesanato proveniente do Coco Babaçu.	42
Figura 2.18–Classificação dos vários tipos de compósitos.	43
Figura 2.19–Curva Tensão deformação para (a) fibra frágil e matriz dúctil e (b) compósito cuja matriz foi reforçada com fibras alinhadas, expostos a uma tensão uniaxial aplicada.	44
Figura 2.20–Teste de tensão e deformação da fibra de babaçu natural, tratada com 10% de NaOH e tratada com 20% de NaOH.	45
Figura 2.21–(a) Microscopia da fibra de coco babaçu sem tratamento químico (500x) e (b) Microscopia da fibra de coco babaçu tratada (2,5% NaOH) (500x)	46
Figura 3.1 – Fluxograma das etapas de caracterização da fibra de babaçu.	47
Figura 3.2 – Coco babaçu como recebido	48
Figura 3.3 – Fluxograma para obtenção das fibras de babaçu.	48
Figura 3.4 – (a) Coco babaçu imerso em água (b) fibras aparentes após período de imersão em água.	49
Figura 3.5 – Fibra de babaçu após desfibrilamento.	49
Figura 3.6 – Microscópio óptico Olympus – BX53M do IME.	50
Figura 3.7 – Balança hidrostática utilizada para a determinação da densidade pelo princípio de Arquimedes.	55

Figura 3.8 – Equipamento PANalytical de modelo X’pert Pro MRD System com fibra de babaçu montadas.	55
Figura 3.9 – Três curvas obtidas através do pico cristalino da fibra de babaçu. . . .	56
Figura 3.10–Representação da fabricação da placa de matriz de fibra de babaçu. . .	58
Figura 3.11–(a) Representação da geometria e dimensões do corpo de prova; (b) Pêndulo instrumentado utilizado no ensaio.	59
Figura 3.12–(a) Equipamento Instron 3365 utilizado na realização do ensaio de tração das fibras de babaçu, (b) e (c) detalhe da garra.	59
Figura 3.13–(a) Equipamento EMIC/INSTRON DL 3000 utilizado na realização do ensaio de tração do compósito epóxi-fibra de babaçu, (b) e (c) detalhe da garra.	60
Figura 3.14–(a) Metalizadora Dentonvacuum Desk V da UFRJ, (b) Fibras de babaçu metalizadas.	61
Figura 3.15–Equipamento MEV FEG 250 do IME.	61
Figura 3.16–Equipamento Shimadzu modelo DTG-60.	62
Figura 3.17–Equipamento Shimadzu modelo DSC 60.	63
Figura 3.18–Arma de ar comprimido modelo SSS, projecteis de chumbo de calibre 0.45.	64
Figura 3.19–Representação esquemática do ensaio balístico.	65
Figura 4.1 – Medição dos tamanhos das fibras de babaçu com um aumento de 5x. .	67
Figura 4.2 – Histograma da frequência por intervalo de diâmetro das fibras de babaçu.	68
Figura 4.3 – Dependência da densidade da fibra de babaçu em relação ao diâmetro.	69
Figura 4.4 – Dependência da densidade da fibra de babaçu em relação ao diâmetro.	70
Figura 4.5 – Espectro FTIR para fibras de babaçu.	73
Figura 4.6 – Curvas TG/DTG para as fibras de babaçu.	74
Figura 4.7 – Curva DSC para as fibras de babaçu.	76
Figura 4.8 – Difratoograma de fibras de babaçu in natura.	78
Figura 4.9 – Difratoograma das fibras de babaçu indexado pela ficha de celulose I β .	78
Figura 4.10–Micrografia da superfície longitudinal das fibras de babaçu. (a) 43x e (b) 200x; (c) 800x.	80
Figura 4.11–Resistência à tração máxima em função do diâmetro médio das fibras de babaçu.	82
Figura 4.12–Propriedades mecânicas em função do diâmetro médio das fibras de babaçu. (a) Módulo de elasticidade, (b) deformação máxima.	82
Figura 4.13–Análise estatística Weibull para: (a) Resistência à tração (b) Deformação; (c) Módulo de elasticidade.	84
Figura 4.14–Espectros de FTIR gerados para fibra, resina e compósitos epóxi/fibras de babaçu.	85

Figura 4.15–Banda de absorção em 1608 cm^{-1} . (a) Fibras de babaçu e epóxi e (b) Compósitos nas frações de 10, 20, 30% em volume de fibras.	86
Figura 4.16–Curvas TG para os compósitos epóxi/fibras de babaçu.	87
Figura 4.17–Curva DSC para resina epóxi DGEBA/TETA, fibra de babaçu e os compósitos epoxídicos reforçados com 10, 20 e 30% de reforço fibras de babaçu.	89
Figura 4.18–Energia de impacto Izod versus fração volumétrica de fibras de babaçu.	91
Figura 4.19–Microscopia eletrônica de varredura das superfícies de fratura do compósito epóxi-fibra com 10% de babaçu: (a) 80x; (b) 100x.	92
Figura 4.20–Microscopia eletrônica de varredura das superfícies de fratura do compósito epóxi-fibra com 20% de babaçu. (a) 80x; (b) 100x.	93
Figura 4.21–Microscopia eletrônica de varredura das superfícies de fratura do compósito epóxi-fibra com 30% de babaçu. (a) e (b)100x.	94
Figura 4.22–Resistência a tração em função da fração volumétrica de fibra de babaçu.	97
Figura 4.23–Módulo de elasticidade em função da fração volumétrica de fibra de babaçu.	98
Figura 4.24–Deformação em função da fração volumétrica de fibra de babaçu.	99
Figura 4.25–Microscopia eletrônica de varredura das superfícies de fratura do compósito epóxi-fibra com 10% de babaçu. (a) 80x ;(b)130x.	100
Figura 4.26–Microscopia eletrônica de varredura das superfícies de fratura do compósito epóxi-fibra com 20% de babaçu. (a) 60x ;(b)100x.	101
Figura 4.27–Microscopia eletrônica de varredura das superfícies de fratura do compósito epóxi-fibra com 30% de babaçu. (a) 100x; (b) 250x.	102
Figura 4.28–Curva de pontos experimentais do compósito epóxi com 30% em volume de fibras de babaçu.	105
Figura 4.29–Energia de absorção média para os compósitos nas frações de 10, 20, 30 de volume de fibras de babaçu para os ensaios de calibre 0.45 e 9 mm.	107
Figura 4.30–Amostras de 10, 20 e 30% reforço em fibras de babaçu utilizadas no ensaio balístico de velocidade residual. (a) antes, (b) depois, (c) durante (20%).	108
Figura 4.31–Micrografias MEV da região de impacto balístico com 10% de volume de fibras de babaçu (a) (0.45 mm) 130x, (b) (0.45 mm) 300x, (c) (9 mm) 80x e (d) (9 mm)300x	110
Figura 4.32–Micrografias MEV da região de impacto balístico com 20% de volume de fibras de babaçu (a) (0.45 mm) 60x, (b) (0.45 mm) 250x, (c) (9 mm) 80x e (d) (9 mm)150x	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Classificação do nível de proteção de blindagem balística.	23
Tabela 2.2 – Primeira ocorrência e primeira produção industrial de alguns polímeros comerciais.	28
Tabela 2.3 – Primeira ocorrência e primeira produção industrial de alguns polímeros comerciais.	31
Tabela 2.4 – Produção anual de fibras naturais comercialmente mais importantes e a produção anual dos países.	33
Tabela 2.5 – Constituição básica de algumas fibras vegetais.	34
Tabela 2.6 – Propriedades mecânicas para algumas fibras, em destaque as propriedades apresentadas pelos materiais sintéticos.	37
Tabela 3.1 – Identificação das amostras produzidas.	58
Tabela 4.1 – Densidade média das fibras de babaçu obtidas pelo princípio de Arquimedes.	68
Tabela 4.2 – Comparação da densidade da fibra de babaçu com a literatura.	69
Tabela 4.3 – Comparação da média do teor de umidade com a literatura.	71
Tabela 4.4 – Composição química da fibra de babaçu em comparação a dados do babaçu e outras FNLs.	72
Tabela 4.5 – Parâmetros termogravimétricos observados para as fibras de babaçu.	75
Tabela 4.6 – Resultados da análise DSC das fibras de babaçu.	77
Tabela 4.7 – 2θ e intensidade dos planos 101 e 200.	79
Tabela 4.8 – Propriedades mecânicas da fibra de babaçu.	81
Tabela 4.9 – Fibras de babaçu em comparação com outras FNLs	83
Tabela 4.10–Parâmetros termogravimétricos da resina epóxi e dos compósitos reforçados com fibras babaçu.	88
Tabela 4.11–Resultados do ensaio de impacto Izod para a resina epóxi e os compósitos reforçados com fibra de babaçu.	90
Tabela 4.12–Análise ANOVA dos resultados da energia de impacto Izod com compósitos contendo reforço de fibra de babaçu.	95
Tabela 4.13–Teste de Tukey para absorção de energia Izod de compósitos contendo porcentagens de fibra de babaçu.	95
Tabela 4.14–Propriedades mecânicas para resina epóxi e para os compósitos reforçados com fibras de babaçu.	96
Tabela 4.15–ANOVA da resistência à tração, módulo de elasticidade e deformação das amostras com 0, 10, 20, 30% de volume de fibras de babaçu.	103
Tabela 4.16–Teste de Tukey para resistência à tração, módulo de elasticidade e deformação de compósitos contendo porcentagens de fibra de babaçu.	104

Tabela 4.17–Parâmetros obtidos no ensaio de velocidade residual e velocidade limite para os calibres de 9 mm e 0.45 mm.	106
Tabela 4.18–ANOVA da energia de absorção para amostras com 10, 20, 30% em volumes de fibras de babaçu para os calibres de 0.45 e 9 mm.	107
Tabela 4.19–Comparação dos valores de energia absorvida e velocidade limite entre os compósitos reforçados com fibras de babaçu e aqueles reforçados com diferentes FNLs.	112

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMF	Ângulo Microfibrilar
CFNLs	Compósitos Reforçados com Fibras Naturais Lignocelulósicas
CP	Corpo de Prova
CPS	Contagem por Segundo
d.m.s.	Diferença Mínima Significativa
DGEBA	Diglicidil Éter do Bisfenol A
DRX	Difração de Raios X
DSC	Calorimetria Diferencial de Varredural (<i>Differential Scanning Calorimetry</i>)
FNLs	Fibras Naturais Lignocelulósicas
FTIR	Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier
GL	Grau de Liberdade
IC	Índice de Cristalinidade
Lc	Comprimento Crítico
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
min	Minuto
mm	Milímetro
TG	Análise Termogravimétrica
Vol	Volume

LISTA DE SÍMBOLOS

E	Módulo de Elasticidade
μm	Micrômetro
ρ_{Arq}	Densidade obtida pelo método de Arquimedes
$\sigma_{\text{Máx}}$	Resistência à Tração Máxima
E_{abs}	Energia de Absorção

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	18
1.2	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	19
1.3	OBJETIVOS DO TRABALHO	20
1.3.1	OBJETIVO GERAL	20
1.3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1	BLINDAGEM BALÍSTICA	22
2.2	POLÍMEROS	27
2.2.1	CONCEITOS GERAIS	27
2.2.2	RESINA EPÓXI	30
2.3	FIBRAS NATURAIS LIGNOCELULÓSICAS	32
2.3.1	FIBRAS DE BABAÇU	38
2.3.2	APLICAÇÕES DA FIBRA DE BABAÇU	41
2.4	MATERIAIS COMPÓSITOS	42
2.4.1	CONCEITOS GERAIS	42
2.4.2	COMPÓSITOS POLIMÉRICOS COM FIBRAS DE BABAÇU	45
3	MATERIAIS E MÉTODOS	47
3.1	ASPECTOS GERAIS	47
3.2	FIBRAS DE BABAÇU	48
3.3	CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS DE BABAÇU	50
3.3.1	HISTOGRAMA DE VARIAÇÃO DIAMETRAL	50
3.3.2	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE	51
3.3.3	DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA	51
3.3.3.1	DETERMINAÇÃO PERCENTUAL DO TEOR DE CINZAS	51
3.3.3.2	DETERMINAÇÃO DO PERCENTUAL DE TEOR DE EXTRATIVOS	52
3.3.3.3	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE LIGNINA	52
3.3.3.4	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE HEMICELULOSE	53
3.3.3.5	DETERMINAÇÃO DE ALFACELULOSE	53
3.3.4	DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE	54
3.3.5	DIFRAÇÃO DE RAIOS X	55
3.4	CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS	57
3.4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS EPÓXI-BABAÇU	57
3.4.2	ENSAIO DE IMPACTO IZOD	58

3.4.3	ENSAIO DE TRAÇÃO	59
3.5	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	61
3.6	ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER	62
3.7	ANÁLISES TÉRMICAS	62
3.7.1	ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TG)	62
3.7.2	CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA	63
3.8	ENSAIO BALÍSTICO DE VELOCIDADE RESIDUAL	63
3.9	MÉTODOS ESTATÍSTICOS	65
3.9.1	ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)	65
3.9.2	ANÁLISE DE WEIBULL	66
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
4.1	CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS DE BABAÇU	67
4.1.1	HISTOGRAMAS DE VARIAÇÃO DO DIÂMETRO	67
4.1.2	TEOR DE UMIDADE	70
4.1.3	COMPOSIÇÃO QUÍMICA	71
4.1.4	CARACTERIZAÇÃO POR FTIR	73
4.1.5	ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA	74
4.1.6	CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA	76
4.1.7	DIFRAÇÃO DE RAIOS X	77
4.1.8	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	79
4.1.9	ENSAIO DE TRAÇÃO	81
4.2	CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS	85
4.2.1	CARACTERIZAÇÃO POR FTIR	85
4.2.2	ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA	87
4.2.3	ANÁLISE DE CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA	89
4.2.4	ENSAIO DE IMPACTO IZOD	90
4.2.5	ENSAIO DE TRAÇÃO	96
4.2.6	ENSAIO BALÍSTICO DE VELOCIDADE RESIDUAL	104
5	CONCLUSÕES	114
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	118
	REFERÊNCIAS	119

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

Os conflitos armados ocorrem desde os primórdios da humanidade, e são desencadeadas por diversos fatores, sejam por questões financeiras, territoriais, políticas, religiosos, e associado ao crescimento de grupos armados extremistas. No Brasil desde algumas décadas a criminalidade urbana se confirma como um ponto que mais preocupam os cidadãos residentes de grandes cidades brasileiras. Diante desses fatos, os indivíduos e as instituições adaptam o seu comportamento e seu lazer para se situar a realidade que a criminalidade urbana provoca. Sendo essa mudança tomada por conviver no medo e insegurança, sob tensão de se tornarem vítimas da crescente criminalidade urbana.

As armas de fogo são capazes de dinamizar as relações de força e modificar situações de tensão para um ou outro lado, podem ser compreendidas sob vários matizes: soberania, cidadania, segurança pública, criminalidade, direito à legítima defesa. Nesse contexto de polissemia conceitual, a indústria e o mercado de armas se misturam com a história brasileira tão marcada por intervenções militares, revoltas e por uma violência sempre presente nas grandes cidades brasileiras provocadas pelo aumento da criminalidade (VIEIRA, 2021).

Os materiais de proteção balística que são atualmente utilizados são uma evolução das antigas formas de proteção dos combatentes utilizados para acompanhar o avanço dos armamentos utilizados em conflitos armados. O que possibilitou essa evolução dos materiais de proteção balística foi encontrar materiais que possibilitassem um menor peso aliado com uma proteção adequada, pois os materiais utilizados antigamente limitavam os combatentes por conta do seu grande peso que limitava o movimento de quem a utilizava, mas o cerâmico revestido pela aramida continua como o principal quando se trata dos coletes pertencentes ao Exército Brasileiro. Outros materiais foram desenvolvidos para a proteção balística para agregar as propriedades adequadas de quem as utilizasse. Materiais balísticos de proteção individual baseados em um único material, tal como placas de armadura de ligas de aço ou alumínio, conseguem fornecer proteção contra projéteis de munição 7.62 mm, nível III se forem muito espessos e/ou muito pesados. Nesse caso, sendo mais conveniente para veículos, mas não para proteção individual (MONTEIRO *et al.*, 2018; YAMANE, 2020).

Entretanto, influenciados por questões econômicas e visando contribuir com o desenvolvimento sustentável, materiais alternativos são estudados e aplicados como substituição para os materiais já utilizados nas blindagens. Entre todos os materiais pesquisados o que

mais se destaca nas aplicações são os compósitos reforçados com fibras naturais, os mesmos demonstram bom desempenho balístico ao apresentar boas propriedades (SILVEIRA *et al.*, 2024; WAMBUA *et al.*, 2007; BRAGA *et al.*, 2017).

O Brasil é um país que se destaca pela abundância de fibras naturais em seu território e também apresenta vantagens para a utilização das FNLs, tais como juta, sisal, fibra de bananeira, coco e outras constituem materiais sustentáveis, já possuindo aplicações correntes e outras aplicações ainda sendo pesquisadas. Porém, existem diversas espécies de vegetais presentes em diversas regiões do Brasil que não foram estudadas aplicações tecnológicas. Tal fato pode ajudar o desenvolvimento de regiões que não apresentam uma forte economia, assim ajudando na empregabilidade da população dessas regiões envolvida na produção das fibras. A quantidade de estudos relacionados a aplicação das fibras naturais lignocelulósicas em uma matriz polimérica para proteção balística confirma tal empregabilidade (LUZ *et al.*, 2015; SILVA *et al.*, 2018; BRAGA *et al.*, 2018; ABTEW *et al.*, 2019; OLIVEIRA *et al.*, 2019; NEUBA, 2020).

A palmeira de babaçu (*Attalea speciosa*) apresenta diversas aplicações na literatura, como aplicações em concreto com agregado, reforço em compósitos de matriz epóxi (FRANCO, 2010), reforço em compósitos de matriz poliéster, em chapas de madeira aglomeradas (LIMA *et al.*, 2006) e em filmes de poliestireno. A palmeira de babaçu pertence ao bioma conhecido como mata dos cocais, que se estende desde a floresta amazônica até a caatinga, estando mais presentes nos estados do Maranhão e Piauí.

O presente trabalho busca obter as propriedades mecânicas, térmicas, balísticas e a sua aplicação em compósitos de matriz epóxi da fibra de babaçu orientadas de forma aleatória, buscando avaliar suas propriedades relacionadas a aplicação balística, assim como futuras aplicações para o material.

1.2 Justificativa do Trabalho

O presente trabalho foi elaborado considerando na fabricação de novos materiais sustentáveis, que contribuam com o desenvolvimento sustentável e que possam desempenhar as propriedades similares aos materiais sintéticos já utilizados com um menor custo. Além dessas atribuições, desejam-se desenvolver estudos que buscam fabricar materiais compósitos para a proteção balística, que se torna um estudo de interesse do Exército Brasileiro. Deste modo o curso de Ciências dos Materiais do instituto militar de engenharia (IME) realizam diversas pesquisas em que visam utilização de materiais alternativos que possam substituir os sintéticos. Os compósitos reforçados com fibras naturais lignocelulósicas apresentam boas propriedades quando empregados em blindagens balísticas associados a um excelente custo-benefício e um baixo peso desse material proporcionado pelas características de baixa densidade da FNLs. Em busca de aumentar a utilização do material de

estudo e também contribuir com o desempenho sustentável com a economia da população de áreas não favorecidas economicamente, o presente trabalho buscar caracterizar a fibra de babaçu e utilizar como reforço em um compósito polimérico de matriz epóxi para aplicação em ensaios balísticos. Com a caracterização do material, dependendo de suas propriedades, pode ser utilizada em diversas aplicações em geral, assim tais resultados se apresentam como características originais deste estudo.

1.3 Objetivos do Trabalho

1.3.1 Objetivo Geral

O presente estudo visa aprimorar a compreensão da eficácia da fibra de babaçu como reforço em compósitos poliméricos de matriz epóxi. A pesquisa concentra-se na caracterização detalhada da fibra de babaçu, e os compósitos resultantes, com diferentes frações volumétricas da fibra, são submetidos a uma série de ensaios. O objetivo principal é analisar e comparar os resultados obtidos em relação às propriedades mecânicas, químicas, térmicas e balísticas com referência à literatura existente, considerando tanto a fibra de babaçu quanto outras FNLs.

Os ensaios realizados na fibra de babaçu abrangem diversas análises, incluindo a variação diametral das fibras por meio de microscopia óptica, teor de umidade, composição química, densidade da fibra, propriedades mecânicas, análise termogravimétrica (TGA e DTG), calorimetria diferencial de varredura (DSC), microscopia eletrônica de varredura (MEV), difração de Raios X (DRX), espectrometria de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e propriedades balísticas.

1.3.2 Objetivos Específicos

Na busca de alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram determinados:

- a) Avaliar a variação diametral da fibra de babaçu relacionando com a densidade e a tração;
- b) Avaliar a composição dos constituintes lignocelulósicos presentes nas fibras de babaçu;
- c) Caracterizar as fibras de babaçu através de análises de espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR);
- d) Realizar a caracterização térmica das fibras de babaçu através de TG, DTG e DSC;

- e) Determinar o Índice de cristalinidade e ângulo microfibrilar das fibras de babaçu através do emprego da Difração de raios X;
- f) Realizar análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície longitudinal da fibra de babaçu;
- g) Determinar as propriedades mecânicas das fibras de babaçu através do ensaio de tração;
- h) Avaliar a viabilidade de fabricação dos compósitos nas frações volumétricas de 0, 10, 20, 30% de fibras;
- i) Avaliar as propriedades vibracionais dos compósitos através dos ensaios de FTIR;
- j) Realizar a caracterização dos compósitos por meio de termogravimetria (TG) e analisar o comportamento térmico dos compósitos por meio da análise de calorimetria diferencial de varredura (DSC);
- k) Determinar a energia de impacto Izod absorvida pelos CFNLs e associá-la à fração volumétrica de fibras de babaçu. Posteriormente, analisar os mecanismos de falha presentes por meio da observação das superfícies de fratura dos corpos de prova de impacto utilizando microscopia eletrônica de varredura (MEV);
- l) Analisar as propriedades mecânicas dos compósitos com diversas frações volumétricas de fibras de babaçu por meio do ensaio de tração. Posteriormente, examinar as superfícies de fratura dos compósitos após os ensaios de tração usando microscopia eletrônica de varredura (MEV) para identificar os mecanismos de fratura;
- m) Analisar as propriedades balísticas dos compósitos em estudo por meio do Ensaio de Velocidade Residual, e realizar uma comparação do desempenho balístico dos compósitos de epóxi-fibras de babaçu com os resultados de obtidos com outros compósitos contendo FNLs.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Blindagem Balística

Segundo Meyers (1994), a blindagem corporal tem como objetivo proteger os indivíduos contra possíveis fragmentos gerados pelos projéteis da arma, desse modo a blindagem é essencial para a proteção em cenário de guerra moderna como no cenário de guerrilha urbana, que se agrava por diversas cidades ao redor do mundo. O grande avanço na melhoria das tecnologias ligadas à produção de armamentos gera a necessidade de pesquisas e estudos para melhorar a fabricação de blindagens modernas que possam proporcionar proteção adequada aos usuários (SILVEIRA *et al.*, 2021). A Figura 2.1 apresenta Até a Segunda Guerra Mundial, as armaduras eram compostas basicamente de metal. No entanto, o desenvolvimento de projéteis forçou o uso de armaduras metálicas maiores e mais pesadas. Em vez disso, novos materiais foram introduzidos e combinados para melhorar o desempenho das armaduras, como compósitos de fibra e cerâmica (BÜRGER *et al.*, 2012).

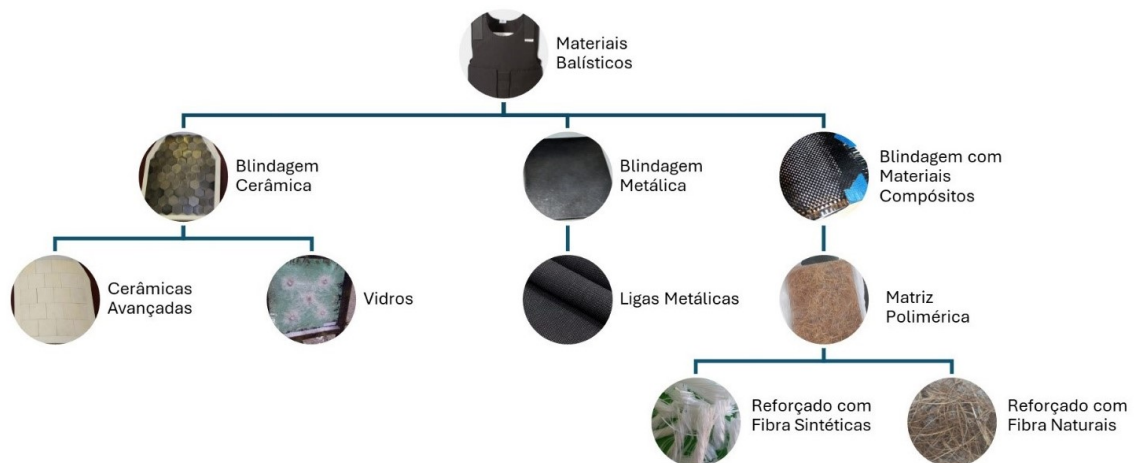


Figura 2.1 – Classificação dos materiais empregados em blindagens balísticas.

A Figura 2.1 apresenta os materiais que são mais utilizadas para aplicação em blindagens balísticas, as fibras mais utilizadas para proteção balística são a aramida e o Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (UHMWPE) (BÜRGER *et al.*, 2012; JACOBS; DINGENEN, 2001). Mas as armaduras compostas apenas por compósitos são ineficientes contra projéteis *Armor Piercing* (AP). Para proteção de projéteis AP, uma placa cerâmica é usada para quebrar as pontas dos projéteis. Assim, o compósito pode conter fragmentos

de cerâmica e projéteis. As cerâmicas mais utilizadas são a alumina, carbetto de silício e carbetto de boro (BÜRGER *et al.*, 2012).

Atualmente, nenhum material apresenta por si só as características requeridas para suportar a combinação de tensões mecânicas provenientes de um evento balístico. Um material cerâmico com elevada resistência à compressão, por exemplo, normalmente apresenta uma baixa resistência à tração, e ao ser submetido ao impacto balístico sofre esforços de tração na superfície oposta ao impacto (SILVA *et al.*, 2014).

Uma solução é a produção de blindagens mistas que combinam propriedades específicas de dois materiais. A blindagem mista é formada pela combinação de dois materiais com propriedades diferentes e complementares responsáveis por evitar a penetração do projétil (SILVA *et al.*, 2014).

Um sistema de blindagem multicamadas (MAS - *Multilayered Armor Systems*) completo, Figura 2.1, é geralmente composto de uma camada cerâmica, uma camada de material compósito que pode conter uma fibra natural lignocelulósica, e por fim uma terceira camada metálica (MONTEIRO *et al.*, 2015).

As proteções balísticas são determinadas de acordo com um padrão internacional (NIJ), no qual o nível de proteção é determinado pelo calibre da munição, massa do projétil e velocidade do projétil (Tabela 2.1). Ademais, tal instituto especifica normas e padrões de ensaio, bem como as distâncias e locais que serão efetuados os disparos do projétil.

Tabela 2.1 – Classificação do nível de proteção de blindagem balística.

Nível	Calibre	Massa (g)	Vel.Mínima (m/s)	Energia(J)
I	.22 Lr	2,6	310	125
	.36 SPL	10,2	239	291
II – A	9 mm	8	320	410
	.357 Mag.	10,2	369	694
II	9 mm	8	343	471
	.357 Mag.	10,2	410	857
III-A	9 mm	8	411	676
	.44 Mag.	15,6	411	318
III	7,62 x 51 mm	9,7	823	3285
IV	.30 - 06	10,8	823	3929

Fonte: Adaptado de NIJ (2000).

Há outras normas e padrões para avaliações de sistemas de blindagem balística. Um exemplo é a norma Brasileira ABNT NBR 15000 (ABNT, 2020) que preconiza as formas para realizar os ensaios balísticos no Brasil assim como mostrado na Figura 2.2. A mesma descreve como: “anteparo para oferecer resistência à penetração de projéteis provenientes de armas de fogo”. O decreto nº 10.030 da Presidência da república (2019)

trata dos sistemas de blindagem, enquadrando-as no tipo: Proteção Balística e dentro do grupo “Blindagem Balística”, assim, classificando-as como Produtos Controlados pelo Comando do Exército (PCE), caracterizando-as como: aqueles que apresentam algum poder destrutivo, propriedade que possa causar danos às pessoas, patrimônios ou indicação de necessidade de restrição de uso por motivo de incolumidade pública (BRASIL, 2019).

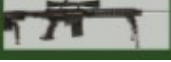
Níveis de Blindagem	Armamento	Projéteis	Munição de Ensaio	Massa do Projétil	Energia Cinética	Velocidade do Projétil	Número de Impactos
Uso Permitido	I		22 LRHV chumbo	2,6 g	133,12 J	230 +/- 12	05
			38Especial chumbo	10,2 g	342,12 J	259 +/- 15	05
	II-A		9 mm FMJ	8 g	440,9 J	332 +/- 12	05
			357Magnum JSP	10,2 g	740 J	381 +/- 15	05
	II		9 mm FMJ	8 g	512,66 J	358 +/- 12	05
			357Magnum JSP	10,2 g	921 J	425 +/- 15	05
	III-A		9 mm FMJ	8 g	725,9 J	426 +/- 15	05
			44Magnum SWC chumbo	15,55 g	1406 J	426 +/- 15	05
	III		M16/AR15 5,56x45mm FMJ	3,6 g	1795 J	975 +/- 15	05
			AK 47 7,62x39mm FMJ	4,1 g	1909 J	721 +/- 15	05
			.FALL 7,62x51mm FMJ	9,7 g	3405 J	840 +/- 15	05
Uso Restrito	IV		30-06 AP	10,8 g	3920 J	884 +/- 15	01

Figura 2.2 – Níveis de blindagens segundo a norma ABNT NBR 15000.

Fonte: Adaptado de ABNT (2020).

Ainda de acordo com a NIJ 0101.04 (NIJ, 2000), é possível verificar a eficácia do sistema de blindagem balística através de alguns métodos, entretanto, o mais imediato e simples consiste na verificação do trauma (indentação) causado na plastilina após a execução de ensaios 26 balísticos com munição 7,62 mm. Tal indentação não pode ser superior a 44 mm, caso contrário o dano pode ser considerado como letal para o corpo humano em uma ocorrência real. Ainda segundo a NIJ 0101.04 (NIJ, 2000) o alvo utilizado como material de referência é um bloco homogêneo de massa de modelar (plastilina) a base de óleo e não-endurecível, o qual é posto em contato à face posterior ao sistema de blindagem (Figura 2.3).

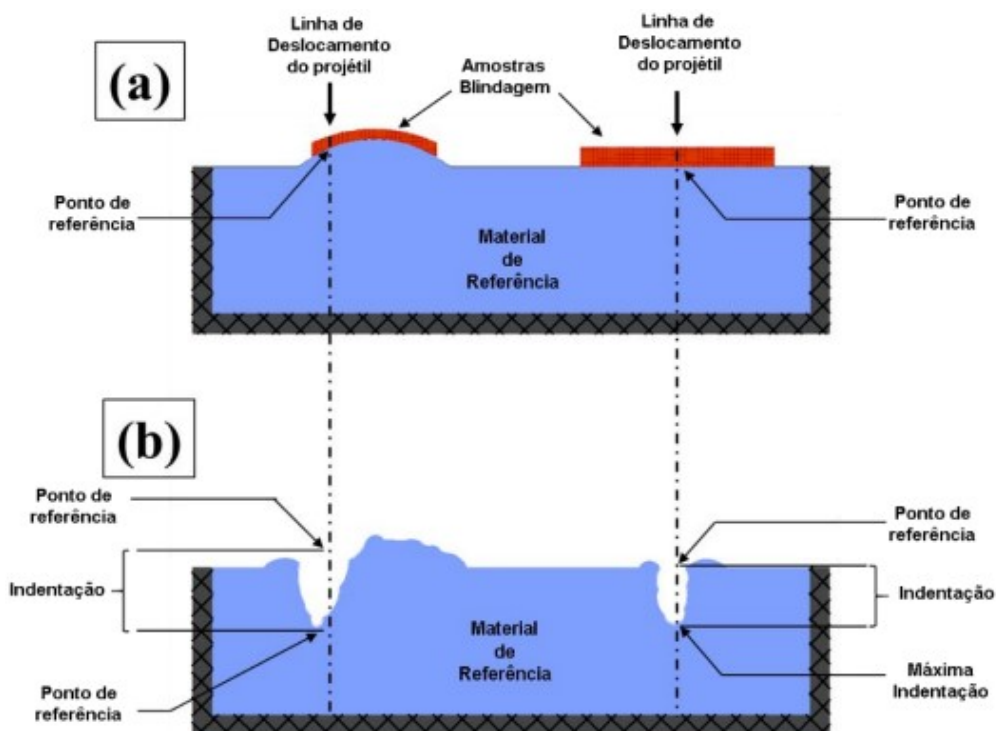


Figura 2.3 – Indentação causada no material de referência (plastilina) em (a) antes do impacto e (b) após impacto.

Fonte: Adaptado de ABNT (2020), Junio (2020).

Algumas formas de se avaliar a eficácia de blindagens são as que possuem maior importância baseiam-se nas medidas de velocidade de impacto do projétil no alvo, a outra forma de se avaliar sistemas balísticos é baseado em estudos probabilísticos em que o método se apoia na probabilidade de ocorrer ou não perfuração do alvo (OLIVEIRA, 2018; ??). Objetivo principal das avaliações são determinação a velocidade limite (V_L), velocidade mínima em que o projétil consegue atravessar uma blindagem. O principal estimador da velocidade limite é o parâmetro conhecido como limite balístico (V_{50}), caracterizada como a velocidade na qual a probabilidade de perfuração seria 50% (Figura 2.4).

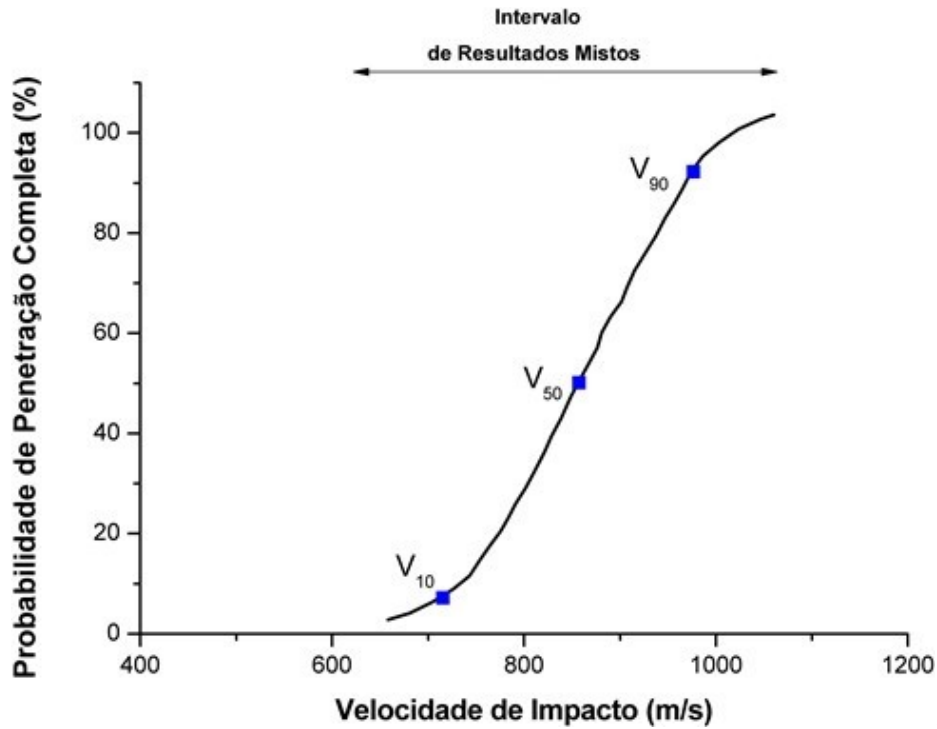


Figura 2.4 – Curva da probabilidade de perfuração.

Fonte: Adaptado de Zukas (1980), Wang *et al.* (2014), Junio (2020).

O limite balístico conforme determinado pela NIJ 0101.06 (NIJ, 2008), para um determinado tipo de projétil, trata-se da velocidade na qual se espera que o projétil perfurar a armadura 50% do tempo. Porém durante a determinação do limite balístico em alguns casos não se consegue calcular o limite balístico devido ao tipo de projétil utilizado, principalmente os que apresentam velocidades superiores a 800 m/s, como a munição de calibre 7,62 x 51 mm. No teste são necessário três tiros que penetrem a blindagem e outros três que sejam barrados. Com essas informações são obtidos os valores de velocidade do projétil e com esse dado é possível obter o valor V_{50} (WANG *et al.*, 2014; JUNIO, 2020; BRAGA, 2015).

Em consequência da dificuldade para obter o valor de V_{50} para projéteis que apresentem alta velocidade, é utilizado um modelo analítico para ter uma estimativa da velocidade limite (V_L), no qual é baseado em diversos parâmetros, sendo uma delas a energia de impacto absorvida pela blindagem (MORYE *et al.*, 2000). Sendo essa energia absorvida (E_{abs}) pode ser estimada pelo cálculo da diferença da energia cinética, conforme a Eq. 2.1.

$$E_{abs} = \frac{M(V_0^2 - V_R^2)}{2} \quad (2.1)$$

Onde: V_0 é Velocidade do projétil imediatamente antes do impacto; V_R : Velocidade residual do projétil após perfurar o alvo; M: Massa do projétil.

No caso em que a velocidade residual (V_R) for equivalente a zero, temos o sistema de proteção balística que foi capaz de absorver toda a energia cinética do projétil, ou seja, o caso em que o projétil foi totalmente barrado pela blindagem. Tendo essa condição pode-se obter o valor da velocidade limite através da Eq. 2.2

$$VL = \sqrt{\frac{2E_{\text{abs}}}{2}} \quad (2.2)$$

2.2 Polímeros

2.2.1 Conceitos Gerais

A palavra polímero origina-se do grego poli (muitos) e mero (unidade de repetição). Assim, um polímero é uma macromolécula composta por muitas (dezenas de milhares) de unidades de repetição denominadas meros, ligadas por ligação covalente. A matéria prima para a produção de um polímero é o monômero, isto é, uma molécula com uma (mono) unidade de repetição. Dependendo do tipo do monômero (estrutura química), do número médio de meros por cadeia e do tipo de ligação covalente, poderemos dividir os polímeros em três grandes classes: Plásticos, Borrachas e Fibras (CANEVAROLO, 2002).

O primeiro contato do homem com materiais poliméricos (resinosos ou graxas extraídas) se deu na Antiguidade, com os egípcios e romanos que os usaram para carimbar, colar documentos e vedar vasilhames. No século XVI, com o advento dos descobrimentos, espanhóis e portugueses tiveram o primeiro contato com o produto extraído de uma árvore natural das Américas (*Havea brasiliensis*). Este extrato, produto da coagulação e secagem do látex, apresentava características de alta elasticidade e flexibilidade não encontrados em produtos existentes na época. Levado para a Europa, adquiriu o nome de borracha pela sua capacidade de apagar marcas de lápis e a sua utilização foi bastante restrita até a descoberta da técnica de vulcanização (CANEVAROLO, 2002).

Até o final da Primeira Grande Guerra Mundial, todas as descobertas nesta área aconteceram por acaso, por meio de regras empíricas, as primeiras produções industriais se deram no ano de 1933 como mostrado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Primeira ocorrência e primeira produção industrial de alguns polímeros comerciais.

Polímero	1ª Ocorrência	1ª Produção industrial
PVC	1915	1933
PS	1900	1936/1937
PEBD (LDPE)	1933	1939
Nylon	1930	1940
PEAD (HDPE)	1953	1955
PP	1954	1959
PC	1953	1958

Fonte: Adaptado de Canevarolo (2002).

Porém no ano de 1920 o cientista alemão Hermann Staudinger, propõe uma teoria que a mais tardar ficaria conhecida como a teoria da macromolécula. Esta nova classe de materiais era apresentada como compostos formados por moléculas de grande tamanho. Em contrapartida o químico norte americano Wallace H. Carothers, formalizou a partir de 1929, as reações de condensação que deram origem aos poliésteres e às poliamidas. O professor Pierre-Gilles de Gennes em 1991 conseguiu interpletar como acontece a movimentação da macromolécula propondo a teoria da reptação. Insistindo em navegar na contramão no ano 2000, os pesquisadores Alan Heeger, Alan MacDiarmid e Hideki descobriram polímeros condutores, contrariando as utilizações dos polímeros como isolantes elétricos (CANEVAROLO, 2002).

O Brasil também teve sua contribuição para o desenvolvimento da ciência dos materiais poliméricos, através da pesquisadora Eloisa Bisoto Mano que em seis décadas de trabalho, foi responsável pela criação do primeiro grupo de pesquisas em polímeros do país, se consagrando assim pela criação do Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano (IMA), da Universidade Federal do Rio de Janeiro (CANEVAROLO, 2019; ??).

Os polímeros podem ser encontrados de formas naturais ou produzido de forma sintética aplicando técnicas para melhorar suas propriedades. Os polímeros naturais são aqueles que são encontrados na natureza como a : madeira, fibras vegetais, borracha, couro, lã, seda dentre outros. Os polímeros sintéticos aplicam as modernas ferramentas de pesquisa científica tornaram possível a determinação das estruturas moleculares desse grupo de materiais, bem como o desenvolvimento de inúmeros polímeros, que são sintetizados a partir de moléculas orgânicas pequenas, assim apresentando propriedades superiores aos polímeros naturais (CALLISTER, 2013).

Para cada tipo de material polimérico existe uma grande variedade de aplicações, pois uma das suas formas de classificação é de acordo com a sua aplicação final. Porém a classificação mais importante dos polímeros são de acordo com: à estrutura química

(polímeros de cadeias carbônicas ou heterogêneas), o método de preparação (polímeros de adição ou condensação), desempenho mecânico (termoplásticos convencionais, especiais, de engenharia ou de engenharia especiais) e comportamento mecânico (plásticos, elastômeros ou fibras) (CANEVAROLO, 2019; CALLISTER, 2013; JUNIO, 2020).

as moléculas poliméricas podem ser caracterizadas em termos dos seus tamanhos, formas e estruturas. O tamanho molecular é especificado em termos do peso molecular (ou do grau de polimerização). A forma molecular está relacionada com o grau de torção, enrolamento e dobramento da cadeia. Essas características moleculares estão apresentadas no diagrama taxonômico mostrado na Figura 2.5.

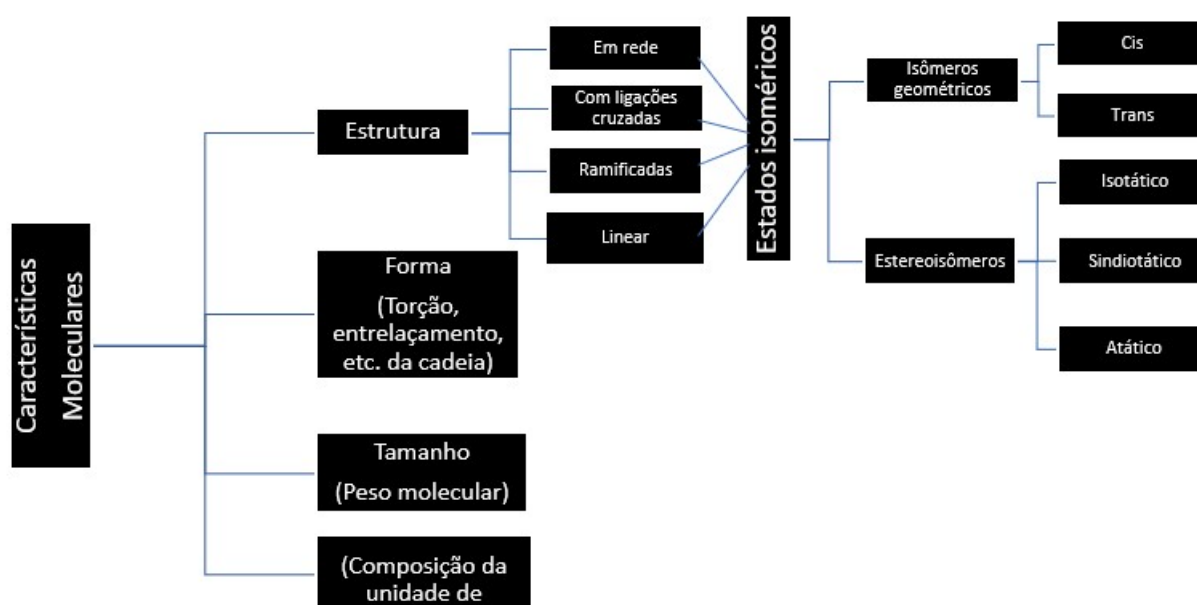


Figura 2.5 – Esquema de classificação para as moléculas poliméricas.

Fonte: Adaptado de Callister (2013).

Um dos principais parâmetros para sensibilidade dos polímeros é a variação de temperatura, pois a resposta de um polímero a esforços mecânicos em temperaturas elevadas está relacionada com sua estrutura molecular dominante. Então por conta da resposta de cada polímero, um esquema de classificação para esses materiais é feito de acordo com seu comportamento frente a uma elevação na temperatura. Os termoplásticos (ou polímeros termoplásticos) e os termorrígidos (ou polímeros termorrígidos) são as duas subdivisões (CALLISTER, 2013; JUNIO, 2020).

Os termoplásticos amolecem e se liquefazem quando são expostos a uma alta temperatura, e endurecem quando são resfriados. Já os polímeros termorrígidos são polímeros em rede. Eles tornam-se permanentemente rígidos durante a formação da rede e não amolecem sob aquecimento. Os polímeros em rede apresentam ligações cruzadas covalentes entre as cadeias moleculares adjacentes (CALLISTER, 2013).

Os elastômeros apresentam propriedades que fazem o material apresentar alto grau de elasticidade, muito semelhante a uma borracha das propriedades fascinantes dos materiais elastoméricos é sua elasticidade, isto é, eles possuem a capacidade de serem deformados até níveis de deformação bastante grandes, e então retornarem elasticamente, como uma mola, à sua forma original. Essa característica é resultante das ligações cruzadas, sendo esse comportamento elastomérico foi observado pela primeira vez na borracha natural, porém com o avanço científico trouxeram a síntese de um grande número de elastômeros com uma ampla variedade de propriedades (CALLISTER, 2013).

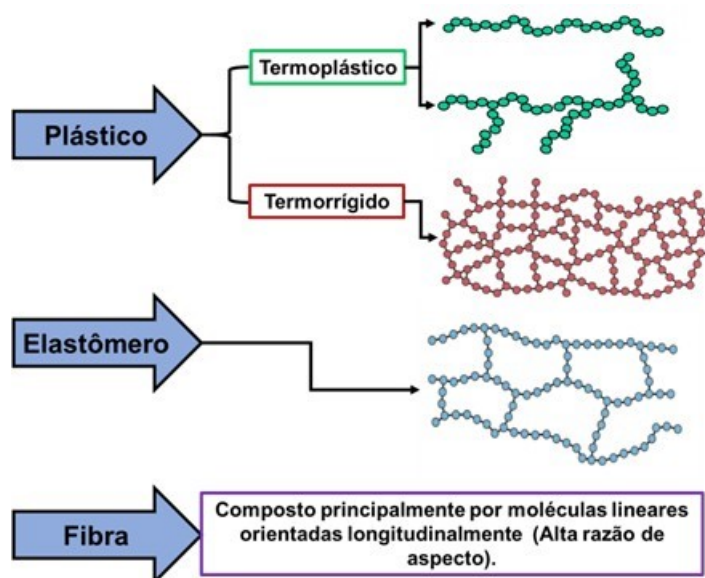


Figura 2.6 – Classificação dos polímeros quanto ao comportamento mecânico.

Fonte: Adaptado de Callister (2013), Junio (2020).

2.2.2 Resina Epóxi

A palavra epóxi deriva do grego “EP” (sobre ou entre) e do inglês “OXI” (oxigênio), que possui um significado de “oxigênio entre carbonos”. Os estudos sobre a resina epóxi já são pesquisados desde a década de 40, onde sua aplicação era bem diversificada devido ao baixo custo da resina epóxi agregado com sua boa resistência (ASKELAND; WRIGHT, 2023).

A resina epóxi é classificada como um polímero termofixos, ou seja, amolece uma vez com o aquecimento, sofre o processo de cura no qual se tem uma transformação química irreversível, com a formação de ligações cruzadas, tornando-se rígido. Posteriores aquecimentos não mais alteram seu estado físico, ou seja, não amolece mais, tornando-se infusível e insolúvel. Sendo essa característica também responsável pela sua grande diversidade de aplicações (ASKELAND; WRIGHT, 2023; CANEVAROLO, 2019).

A epícloridrina (1-cloro-2,3-epóxi propano) é o componente que possui o grupo epóxi, o qual necessita reagir com espécies químicas que apresentem hidrogênios trocáveis

para se atingir as propriedades exigidas por um termorrígido. O bisfenol A (2,2-bis 4'-hidroxifenilpropano) se destaca entre as espécies químicas disponíveis, sendo a mais comum a possuir tais hidrogênios ativos (ASKELAND; WRIGHT, 2018; JUNIO, 2020).

A reação que ocorrem entre esses compostos produz a resina Diglicidil éter bisfenol – A (DGEBA) a qual pode ser observada na Figura 2.7.

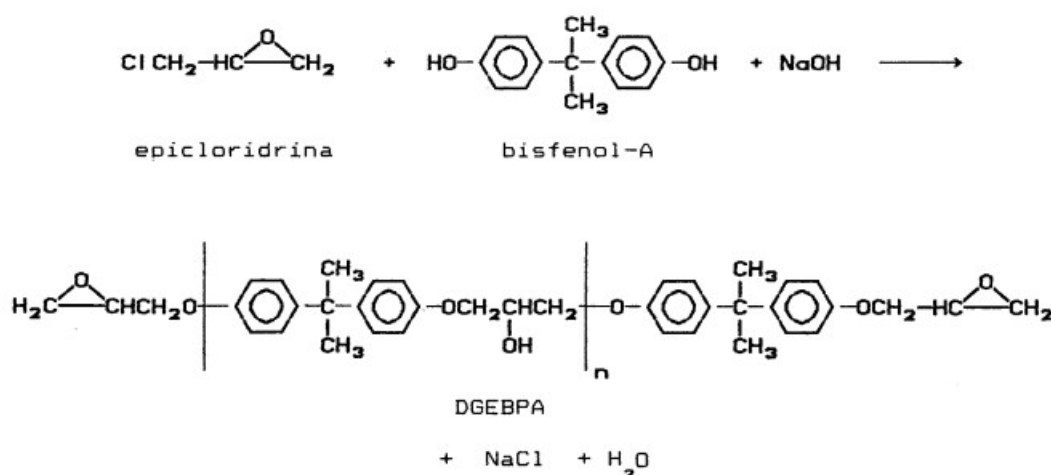


Figura 2.7 – Reação de produção da resina epóxi.

As resinas epóxi são geralmente utilizadas em aplicações estruturais (adesivos e revestimentos), devido ao seu fácil processamento, boas propriedades elétricas e apresentar alta tensão de adesão, contudo, apresentam baixa resistência à fratura. A boa adesão apresentada por esses polímeros é devida a polaridade dos grupos éteres e hidroxilas presentes no composto, servindo para criar forças de interação entre as moléculas, elevando sua empregabilidade como adesivos (JUNIO, 2020).

A resina epóxi (DGEBA) será utilizada como o material de aplicação da matriz para produção do compósitos de polímero-fibra de babaçu no estudo do presente trabalho. Callister (2013) abordam alguns valores para as propriedades das resinas epóxi, os quais estão representados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Primeira ocorrência e primeira produção industrial de alguns polímeros comerciais.

Massa Específica (g/cm ³)	Módulo de Elasticidade (GPa)	LRT (MPa)	Alongamento Percentual (%)	Tenacidade à Fratura (Mpa.m ^{1/2})
1,10 a 1,40	2,41	27,6 a 90,0	3 a 6	0,6

Fonte: Adaptado de Callister (2013).

A matriz polimérica empregada em conjunto para a fabricação de um compósito com adição de fibras de babaçu para balística é de extrema relevância, pois a mesma tem função de desempenhar uma ligação e transmissão de cargas para o reforço (Fibra de babaçu), e realizar uma camada de proteção da fibra e atuar como barreira de propagação de trincas (COSTA *et al.*, 2019; JUNIO, 2020).

2.3 Fibras Naturais Lignocelulósicas

As fibras naturais são conhecidas por ser um recurso renovável e amplamente utilizados por milênios por meio de materiais derivados dessas fibras como cordas, cestas e esteiras. Essas fibras são adquiridas de variadas fontes de origem animal, mineral e vegetal como as lignocelulósicas (BLEDZKI; GASSAN, 1999; NEUBA, 2020).

Pesquisas na área de fibras naturais e seus compostos concordaram com o crescimento dessas fontes renováveis (ao contrário das fontes tradicionais de energia, ou seja, carvão, petróleo e gás que são limitados). As fibras lignocelulósicas disponíveis têm vários pontos de incompatibilidade com algumas matrizes poliméricas, um exemplo é a alta absorção de umidade pelas fibras (BLEDZKI; GASSAN, 1999; SILVEIRA *et al.*, 2024).

O aumento da utilização de fibras naturais lignocelulósicas em diversos setores de tecnologia, como apresentado John e Thomas (2008) quando abordam sobre as fibras de bananas utilizadas nos modelos de Classe A pela montadora Mercedes Benz. No Brasil também já foram utilizados as fibras naturais lignocelulósicas na indústria automobilística, na ocasião as fibras de algodão, juta, rami e coco são aplicadas em: revestimentos interno, painéis e plásticos (MATTOSE; FRAGALLE, 1996; JOSEPH; CARVALHO, 1999). Os dados observados para produção anual de algumas fibras naturais em diferentes países estão representados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Produção anual de fibras naturais comercialmente mais importantes e a produção anual dos países.

Fibras	Espécie	Países	Produção Mundial (10 ³ tons)
Coco	<i>Cocos nucifera</i>	Índia, Vietnam, Sri Lanka	100
Kenaf	<i>Hibiscus cannabinus</i>	Índia, Bangladesh, Estados Unidos	970
Linhaça	<i>Linum usitatissimum</i>	Canadá, França, Bélgica	830
Bambu	> <i>que 1250 espécies</i>	China, Índia, Indonésia	30000
Abacá	<i>Musa textilis</i>	Filipinas, Equador, Costa Rica	70
Juta	<i>Corchorus capsularis</i>	Índia, Bangladesh	2500
Sisal	<i>Agave sisalana</i>	Tanzânia, Brasil, Quênia	378
Rami	<i>Boehmeria nivea</i>	China, Brasil, Filipinas	100
Algodão	<i>Gossypium sp.</i>	China, Índia, Estados Unidos	25000
Banana	<i>Musa indica</i>	Brasil, Índia	200
Seda	<i>Bicho-da-seda</i>	China, Índia, Europa	202
Lã	<i>Ovelha, alpaca ou camelo</i>	Austrália, Nova Zelândia, China	2000
Cânhamo	<i>Cannabis sativa</i>	China, França, Filipinas	215
Abacaxi	<i>Ananas comosus</i>	Filipinas, Tailândia, Indonésia	74
Agave	<i>Agave fourcroydes</i>	Colômbia, Cuba, México	56
Sumaúma	<i>Ceiba pentandra</i>	China, Índia	316
Bagaço	-	Brasil, Índia, China	75000

Fonte: Adaptado de Lotfi *et al.* (2021).

A grande utilização de FNLs se dá principalmente devido às suas características únicas, como a abundância, biodegradabilidade, baixa densidade, natureza não tóxica, menor abrasividade aos equipamentos de transformação e propriedades mecânicas úteis, para não mencionar seu baixo custo (TOMCZAK; SYDENSTRICKER; SATYANARAYANA, 2007).

Segundo Canevarolo (2002), as fibras são materiais que apresentam as suas cadeias orientadas em uma direção preferencial (sentido longitudinal da fibra), satisfazendo a relação de largura e diâmetro maior ou igual a 100 vezes, sendo esse parâmetro conhecido como razão de aspecto e quanto maior a razão de aspecto maior será a resistência da fibra. As fibras quando estão inseridas em um compósito, podem ser submetida a uma grande variação de deformações mecânicas (estiramento, torção, cisalhamento e abrasão), as quais devem apresentar limite de resistência e módulo de elasticidade elevados (CALLISTER, 2013).

Em relação à composição, as fibras podem ser orgânicas ou inorgânicas. As fibras orgânicas se dividem, ainda, em naturais ou artificiais. Existem controvérsias relativas a alguns tipos de fibras e sua classificação, principalmente no que se refere às fibras de celulose. Apesar de provenientes da natureza (plantas fibrosas ou madeira), o pré-tratamento antes

do seu emprego ainda sucintas opiniões contraditórias (BLEDZKI; REIHMANE; GASSAN, 1996; BARBOSA, 2011).

Dentro da primeira classificação, as fibras podem ser agrupadas em diversos sub-grupos (vegetal, animal ou mineral). As fibras naturais, em especial as lignocelulósicas são obtidas em vegetais e constituem bons exemplos de materiais ecologicamente corretos (MONTEIRO *et al.*, 2011).

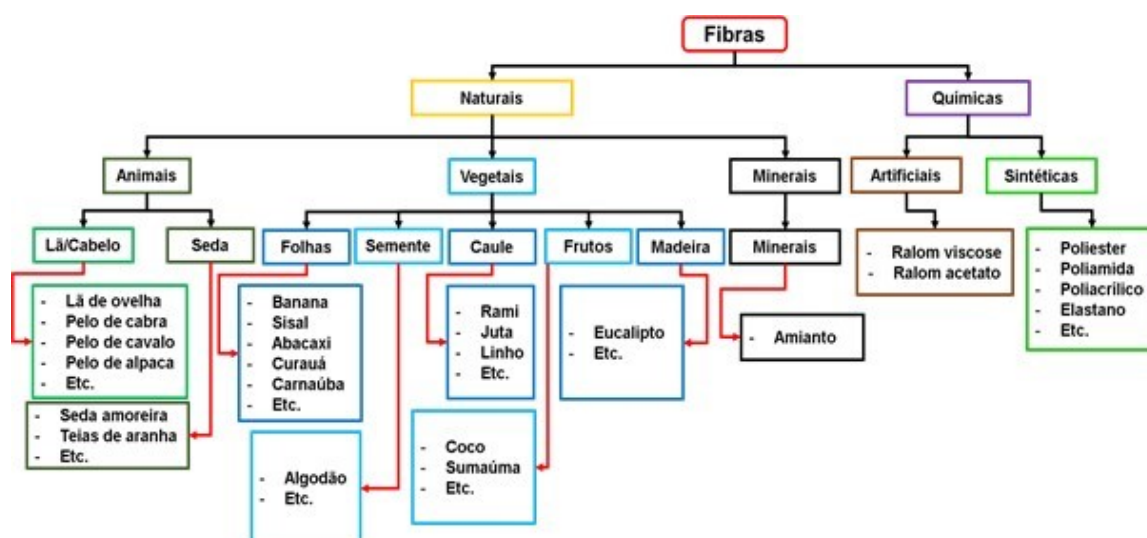


Figura 2.8 – Classificação das fibras.

Fonte: Junio (2020).

Segundo Bledzki e Gassan (1999), vários parâmetros influenciam as propriedades, composição química entre outros, sendo eles as condições climáticas, idade, tipo de solo situado a fibra e o processo de nutrição digestiva influenciam não só a estrutura da fibra vegetal, mas também na sua composição química. As fibras vegetais são denominadas de lignocelulósicas por terem celulose em sua constituição básica, hemicelulose, lignina além de quantidades de pectina, sais inorgânicos, substâncias nitrogenadas, corantes naturais, que são incluídos no que se denomina de fração de solúveis. Na Tabela 2.5 veremos a composição de algumas fibras vegetais:

Tabela 2.5 – Constituição básica de algumas fibras vegetais.

Constituição	Algodão	Juta	Linho	Rami	Sisal
Celulose	82,7	64,4	64,1	68,6	65,8
Hemicelulose	5,7	12,0	16,7	13,1	12,0
Lignina	-	11,8	2,0	0,6	9,9
Pectina	5,7	0,2	1,8	1,9	0,8
Solúvel a água	1,0	1,1	3,9	5,5	1,2
Cera	0,6	0,5	1,5	0,3	0,3
Água	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0

Fonte: Adaptado de Bledzki e Gassan (1999).

Com exceção do algodão, os componentes das fibras vegetais são a celulose, hemicelulose, lignina, pectina, ceras e substâncias solúveis em água. A celulose e a hemicelulose são componentes básicos no que se diz respeito às propriedades físicas das fibras (BARBOSA, 2011).

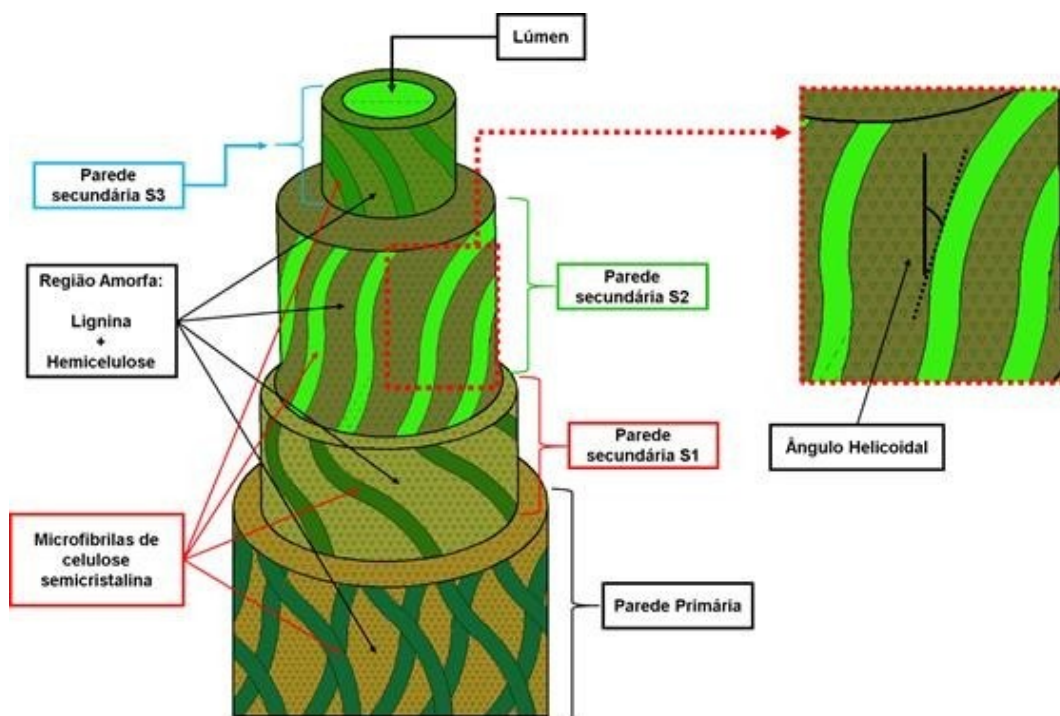


Figura 2.9 – Representação esquemática de uma FNL.

Fonte: Junio (2020).

A Figura 2.9 representa uma FNL, detalhando todos seus constituintes. As fibras são constituídas por uma parede primária e secundária, sendo que a parede secundária é constituída por três camadas (S1, S2 e S3), em que as microfibrilas estão arranjadas de forma helicoidal. O ângulo helicoidal entre o eixo longitudinal da fibra e as microfibrilas é chamado de ângulo microfibrilar (JOHN; THOMAS, 2008), o qual é característico para cada espécie de planta e a mesma determina algumas propriedades importantes da fibra.

A celulose é um polímero natural, pois ele é sintetizado pela própria natureza, sendo considerada um carboidrato presente em quase todos os vegetais. A celulose apresenta uma estrutura química constituída por unidades de glicose ligadas por átomos de oxigênio, formando longas cadeias poliméricas e as propriedades mecânicas das fibras vegetais dependem do tipo de celulose, pois cada tipo de celulose tem sua geometria própria (CANEVAROLO, 2019; BARBOSA, 2011). A celobiose representada na Figura 2.10 é a unidade que se repete da celulose, composta por moléculas de glicose esterificadas por ligações β -1-4-glicosídicas.

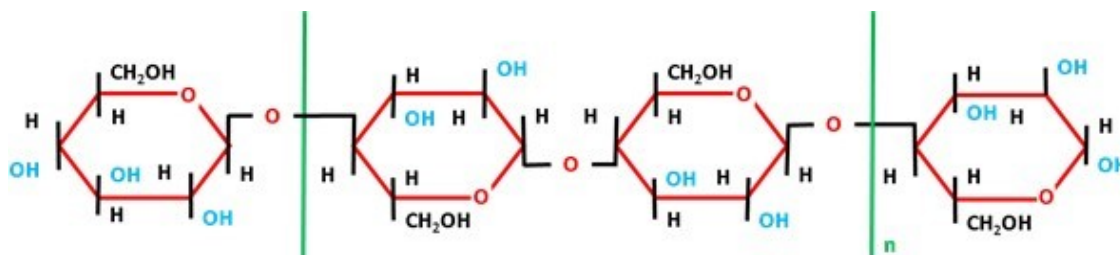


Figura 2.10 – Estrutura química da celulose.

A lignina é o segundo componente mais abundante da parede celular, caracterizada como ligante amorfo, hidrofóbico, de alto grau de polimerização e com caráter aromático (BLEDZKI; GASSAN, 1999). Fornece resistência à compressão ao tecido celular e às fibras. Sua concentração nas fibras influencia a estrutura, as propriedades, a morfologia, a flexibilidade e a taxa de hidrólise. Fibras com alto teor de lignina são de excelente qualidade e bastante flexíveis (AGARWAL *et al.*, 1990). A estrutura química da lignina pode ser observada na Figura 2.11.

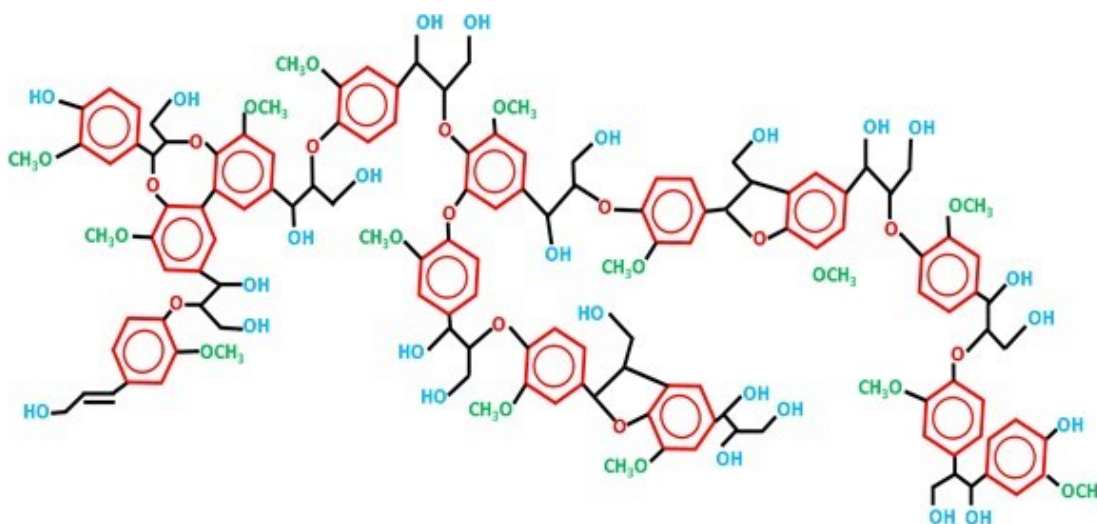


Figura 2.11 – Estrutura química da lignina.

Outro constituinte importante que compõe as FNLs é a hemicelulose, designada como polissacarídeo de cadeias ramificadas, o qual apresenta baixa massa molecular, normalmente a hemicelulose atua como um elemento de ligação entre a celulose e a lignina, não estando diretamente correlacionada à resistência e dureza das fibras. Ao contrário da celulose, os constituintes da hemicelulose diferem de planta para planta (FENGEL; WEGENER, 2011; AGARWAL *et al.*, 1990; JUNIO, 2020). As FNLs apresentam grande diversidade em termo de suas propriedades, isso pode ser resultado de diversos fatores: proporção de seus constituintes (celulose, hemicelulose e lignina), o ângulo microfibrilar, local em que a planta foi cultivada, idade da planta, temperatura do local, dentre outros fatores (MOHANTY *et al.*, 2000; KALIA; KAITH; KAUR, 2011).

A aplicação da FNLs em setores industriais depende de muitos fatores, pois a mesma tem muitas desvantagens, podemos citar algumas como a não uniformidade, limitação dimensional, sensibilidade a altas temperaturas e heterogeneidade microestrutura. Ao comparar fibras naturais às sintéticas fica evidenciado o seu caráter hidrofílico, ou seja, as fibras naturais absorvem muita umidade e fator dificulta a aplicação em matrizes poliméricas que são o oposto das fibras (geral hidrofóbicas) (SILVEIRA *et al.*, 2024). A água presente nas fibras pode agir como agente dificultador da interação entre fibra e matriz polimérica (compósitos), podendo ainda causar vazios no interior da matriz através da evaporação, assim criando concentradores de tensão e reduzindo a resistência dos compósitos. A comparação entre algumas propriedades mecânicas apresentadas pelas FNLs em relação às fibras sintéticas pode ser observada na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Propriedades mecânicas para algumas fibras, em destaque as propriedades apresentadas pelos materiais sintéticos.

Fibras	Densidade ρ (g/cm ³)	Tensão Máxima σ (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Máximo σ/ρ (MPa.cm ³ /g)
Bambu (<i>Bambusa vulgaris</i>)	1,03 – 0,49	106	-	-
Banana (<i>Musa sapientum</i>)	0,67 – 1,50	700 - 800	27 - 32	1194
Buriti (<i>Mauritia flexuosa</i>)	0,63 – 1,12	129 – 254	-	403
Coco (<i>Cocos nucifera</i>)	1,15 – 1,52	95 – 220	4 – 6	191
Algodão (<i>Gossypium M.</i>)	1,51 - 1,60	287 – 800	6 – 13	530
Curauá (<i>Ananas erectifolium</i>)	0,57 – 0,92	117 – 3000	27 – 80	2193
Linho (<i>Linum esitatissimum</i>)	1,30 – 1,50	344 – 1035	26 – 28	496
Juta (<i>Corchorus capsularis</i>)	1,30 – 1,45	393 – 800	13 – 27	615
Piassava (<i>Attalea funifera</i>)	1,10 – 1,45	109 – 1750	5 – 6	1591
Abacaxi (<i>Ananas comosus</i>)	1,44 – 1,56	362 – 1627	35 – 83	1130
Rami (<i>Boehmeria nivea</i>)	1,5	400 – 1620	61 – 128	1080
Sisal (<i>Agave sisalana</i>)	1,26 – 1,50	287 – 913	9 – 28	725
Madeira macia	0,46 – 1,50	112 – 1000	11 – 40	2174
Vidro	2,50 – 2,58	2000 – 3450	70 – 73	1380
Carbono	1,78 – 1,81	2500 – 6350	230 – 400	3567
Aramida	1,44	3000 – 4100	63 – 131	2847

Fonte: Adaptado de Monteiro *et al.* (2011).

As FNLs apresentam algumas vantagens em relação as fibras sintéticas como: custo baixo, maior flexibilidade, baixa massa específica, não abrasividade e possibilidade de desenvolvimento social e econômico. O fato de serem materiais biodegradáveis e recursos renováveis e reutilizáveis, as quais são utilizados como materiais de fontes de renda para regiões em desenvolvimento, em especial as regiões mais pobres do Brasil (MONTEIRO *et al.*, 2011).

2.3.1 Fibras de Babaçu

O babaçu é da família Arecaceae do gênero *Attalea*, cuja o nome científico da espécie originária no Brasil é *Attalea speciosa*, a palmeira que pode chegar até 20m de altura. O fruto do babaçu com sementes oleaginosas e comestíveis com elevado número de cocos por cacho (150 a 250) e uma quantidade média de quatro cachos por palmeira. Os frutos têm formato elipsoidal, medindo de 8 a 15 cm de comprimento e cinco a sete de diâmetro, pesando de 90 a 280 g (LORENZINE *et al.*, 1996).



Figura 2.12 – Palmeira de babaçu.

Fonte: Próprio Autor.

No Brasil, encontram-se vários babaçuais espalhados ao sul da bacia amazônica até o nordeste, ainda tem ocorrência da espécie *Attalea speciosa* na Bolívia.

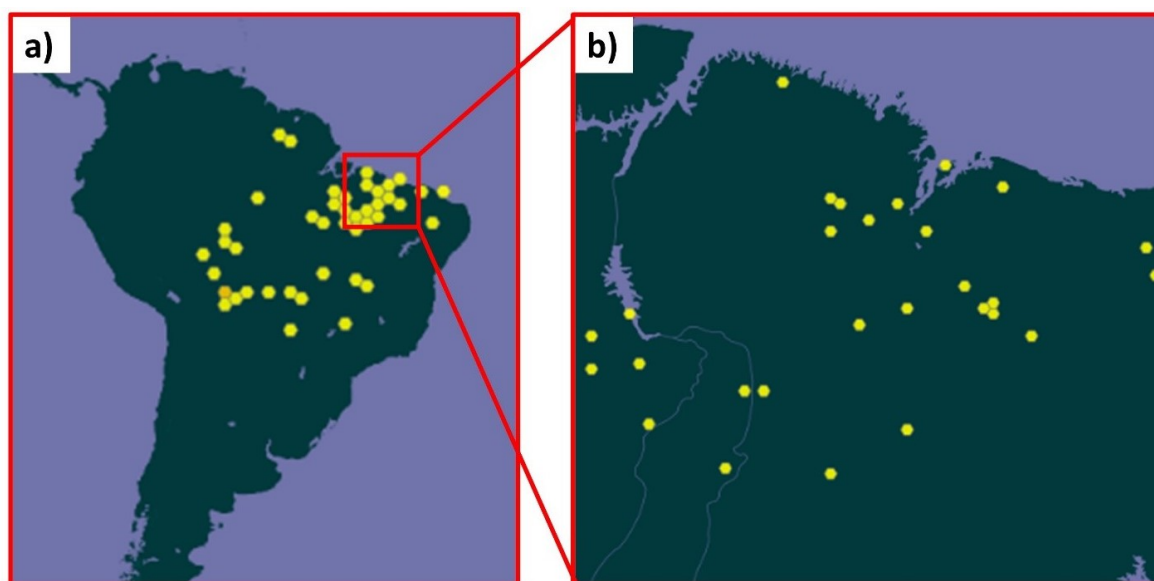


Figura 2.13 – Palmeira de babaçu.

Os estados do Maranhão, Piauí e Tocantins concentram as maiores extensões de matas onde predominam os babaquais no Brasil, formando, muitas vezes e espontaneamente, agrupamentos homogêneos, bastante densos e escuros, tal a proximidade entre os grandes coqueiros. A região compreendida pelos estados do Maranhão, Piauí e Tocantins é considerada a de maior concentração de plantas oleaginosas do mundo e fonte da maior produção extrativista vegetal, sendo essa região conhecida como mata dos cocais, como mostrado na Figura 2.14.



Figura 2.14 – Região da mata dos cocais.

Segundo Alves (2019), o babaçu é a maior fonte mundial de óleo silvestre para uso doméstico, tendo utilização industrial em perfumaria, saboaria e lubrificação, sendo esses produtos fabricados utilizando seu fruto. O babaçu é considerado o maior recurso oleífero nativo do mundo. É um dos principais produtos extrativistas do Brasil, contribuindo, de maneira significativa, para a economia de alguns estados da federação (ALVES, 2019; FRANCO, 2010).

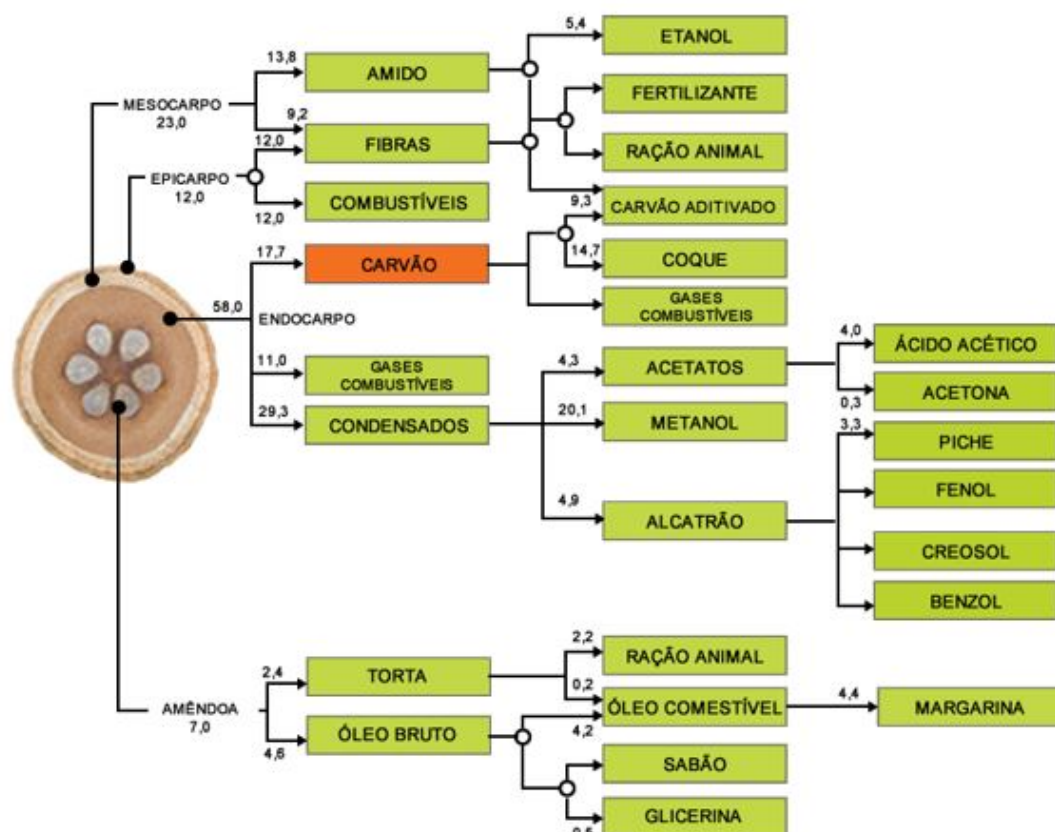


Figura 2.15 – Porcentagens e utilizações dos constituintes do coco babaçu.

Fonte: Anderson e May (1985).

Os estados do Maranhão e Piauí continuam como os principais produtores de coco babaçu do país, no entanto, Tocantins, Ceará e Pará também são referência na produção do coco e da amêndoa de babaçu, gerando renda para as quebradeiras de coco.

A produção da amêndoa tem importância relevante na geração de renda de milhares de famílias que sobrevivem da quebra do coco babaçu, pois estima-se que mais de 300 mil mulheres vivam dessa atividade. O coco babaçu após sua maturação ele cai no chão, onde é colhido pelos trabalhadores que fazem o seu uso, e também é apanhado subindo na própria palmeira, quando coletado é transportado em cestas de palha, normalmente em lombo de animais, quando não é possível, a quebra do coco é realizada ao pé da palmeira. Os frutos são quebrados de forma rudimentar, geralmente por mulheres, utilizando o machado como

ferramenta de corte e uma barra de madeira para a ação mecânica. O babaçu é um fruto que pode ser integralmente aproveitado (FRANCO, 2010).

2.3.2 Aplicações da Fibra de Babaçu

O babaçu possui um ponto muito importante em relação a outras fontes de matéria-prima, pois na palmeira tudo é aproveitável. O seu tronco é utilizado como viga nas construções das casas. As folhas para a cobertura das casas, cercas e fabricação de pequenos utensílios como cofos e abanos. Do coco retiram-se as amêndoas, usadas no fabrico do óleo conhecido como azeite, o mesocarpo onde se prepara uma farinha que tem propriedades médicas e a casca, empregada na produção de carvão. Tudo isso é utilizado no dia-a-dia das famílias (NETO, 1999)

Segundo o MDA (2009) já foram catalogados mais de 60 subprodutos resultantes do babaçu, muitos fabricados oriundos do coco, desde óleo, azeite e leite, para consumo in natura e para indústrias de alimentos, material de limpeza, higiene pessoal e cosméticos, além de carvão adubos e outros subprodutos.

O coco babaçu produz dois tipos de óleos sendo um é destinado para fins comestíveis e outro para fins industriais (óleo láurico). Para fins alimentares tem-se o azeite de coco, com potencial para concorrer com outros óleos vegetais. Já para fins industriais o óleo pode assumir várias características. É comumente empregado na fabricação de sabões, em substituição às gorduras de origem animal e mineral, e como matéria-prima para obtenção de tensoativos para fins industriais e cosméticos (fabricação de sabão, shampoo, loções para o corpo, etc.). Recentemente o óleo de coco babaçu tem ganhado destaque na produção de biocombustível (NASCIMENTO *et al.*, 2009; MOREIRA, 2013).



Figura 2.16 – Produtos produzidos com o coco babaçu.

Diversos utensílios são derivados do babaçu. De cosméticos a itens de beleza a carvão são obtidos da elaboração do babaçu. Tal fatia comercial do coco tem possibilitado

uma maior agregação de valor ao produto, permitindo que comunidades tradicionais se insiram em centros consumidores de todo o mundo (MOREIRA, 2013).



Figura 2.17 – Artesanato proveniente do Coco Babaçu.

Torna-se evidente a utilização a prática do extrativismo vegetal pelas famílias que dependem do babaçu como fonte de renda. Percebe-se que na maioria das vezes a palmeira é utilizado apenas na sintetização do óleo e do carvão vegetal em ramo industrial, sendo marginalizadas as demais capacidades de uso da matéria-prima, como apresentado anteriormente (MOREIRA, 2013).

2.4 Materiais Compósitos

2.4.1 Conceitos Gerais

Os materiais compósitos são materiais formados por dois ou mais materiais que em muitos dos casos são de classes distintas, a fim de se obter propriedades que não seriam possíveis com apenas um material, feito artificialmente, em contraste com um material que ocorre ou que se forma naturalmente. Além disso, as fases constituintes devem ser quimicamente diferentes e estar separadas por uma interface distinta. Em seu projeto de fabricação, são combinados diversos materiais como metais, cerâmicas e polímeros para criação de uma nova geração de “materiais extraordinários” (CALLISTER, 2013). Outras

denominações que os compósitos recebem são apresentadas por Chawla (2012), em que também podem ser nomeados como conjugados ou reforçados.

A maioria dos compósitos foi criada para melhorar combinações de características mecânicas, tais como rigidez, tenacidade e resistências às condições do ambiente, e a elevadas temperaturas. As propriedades apresentadas nos materiais compósitos podem ser o resultado de diversos fatores, como a geometria de sua fase dispersa, a sua distribuição no compósito, orientação e afinidade entre os constituintes (NETO; PARDINI, 2016; CALLISTER, 2013).

Diante das características apresentadas por esses materiais, seu emprego em aplicações de engenharia cresce de forma elevada, por exemplo, os engenheiros aeronáuticos buscando materiais estruturais que apresentem baixa massa específica, sejam resistentes, rígidos e tenham resistência à abrasão e ao impacto, e que não sejam corroídos com facilidade. Dentre as áreas em que são aplicadas podem-se destacar a aeroespacial, indústria automobilística, construção civil e biomedicina. As matrizes poliméricas possuem maior empregabilidade no meio industrial, devido a facilidade de processamento, custo e peso relativamente baixo (NETO; PARDINI, 2016; CALLISTER, 2013; JUNIO, 2020).

Segundo Callister (2013), os compósitos apresentam quatro divisões principais: compósitos reforçados com partículas, compósitos reforçados com fibras, compósitos estruturais, e nanocompósitos. Uma representação esquemática pode ser observada na figura 2.18.

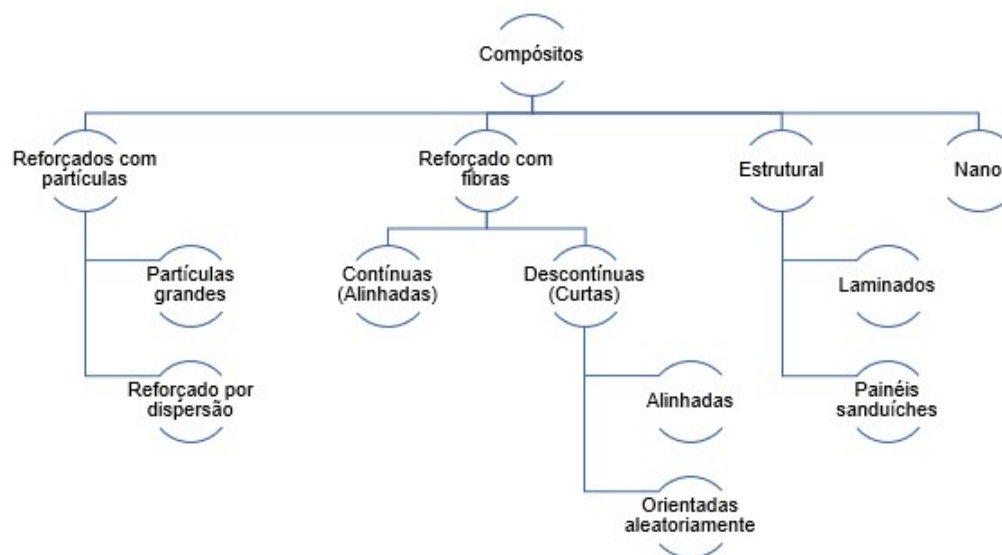


Figura 2.18 – Classificação dos vários tipos de compósitos.

Fonte: Callister (2013).

Os compósitos que são tecnologicamente mais importantes são aqueles em que a fase dispersa está na forma de fibras, ela apresentam elevado módulo de elasticidade e

resistência específica, assim possibilitando diversas aplicações tecnológicas. As propriedades desejadas em projetos dos compósitos reforçados com fibras incluem alta resistência e rigidez em relação a seu peso. Os compósitos reforçados com fibras são subclassificados levando em consideração o comprimento das fibras. Os compósitos com fibras curtas apresentam pouco aumento significativo de resistência (CALLISTER, 2013).

A regra das misturas pode prever algumas propriedades dos compósitos reforçados com fibras contínuas e alinhadas como as propriedades mecânicas e o módulo de elasticidade. A Eq. 2.3, representa a regra das misturas a qual pode ser obtida pela média ponderada das propriedades das fases presentes.

$$E_{\text{comp}} = E_m \cdot V_m + E_f \cdot V_f \quad (2.3)$$

Onde: E_{comp} : Módulo de elasticidade do compósito; E_m : Módulo de elasticidade da matriz; E_f : Módulo de elasticidade da fibra; V_m : Fração volumétrica da matriz; V_f : Fração volumétrica da fibra.

A representação do comportamento tensão-deformação para uma fibra frágil e matriz dúctil, juntamente com o comportamento do compósito submetidos a uma tensão uniaxial podem ser observados na Figura 2.19 (CALLISTER, 2013).

Os comportamentos tensão-deformação para as fases fibra e matriz, representados esquematicamente na Figura 2.19, considerando que a fibra seja frágil e que a fase matriz seja dúctil. Também é indicado as resistências à ruptura, e deformações em tração para a fibra e a matriz, σ_f e σ_m (CALLISTER, 2013).

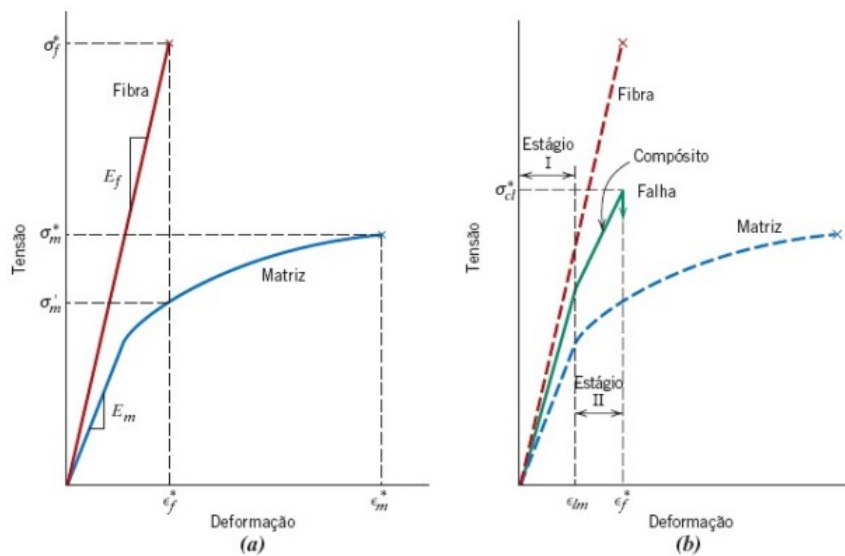


Figura 2.19 – Curva Tensão deformação para (a) fibra frágil e matriz dúctil e (b) compósito cuja matriz foi reforçada com fibras alinhadas, expostos a uma tensão uniaxial aplicada.

Fonte: Callister (2013).

A fase matriz é responsável por grande parte do desempenho do material compósito, pois transfere grande parte das cargas para fase reforço, e pequena porção é suportada pela própria fase. A fase matriz deve ser essencialmente dúctil e a fibra deve apresentar um módulo de elasticidade muito superior (CALLISTER, 2013).

As propriedades finais dos materiais dependem da interação da interface entre as fases matriz e reforço. A efetividade da fibra depende de determinada característica, o comprimento crítico da fibra (L_c), pois a mesma é necessário para que haja aumento efetivo na resistência e na rigidez de um material compósito. O comprimento crítico é diretamente dependente do diâmetro e a resistência a tração da fibra, conforme representado na equação 2.4 (CALLISTER, 2013).

$$L_c = \frac{\sigma_f \cdot d}{2 \cdot \tau_c} \quad (2.4)$$

Onde: L_c : Comprimento crítico da fibra; σ_f : Limite de resistência à tração da fibra; d – Diâmetro da fibra; τ_c – Tensão de escoamento ao cisalhamento da matriz.

2.4.2 Compósitos Poliméricos com Fibras de Babaçu

A fibra de babaçu como material de estudo para aplicação em matriz polimérica em uma CFNLs é um campo de pesquisa relativamente novo. Porém, encontram-se alguns estudos em que a fibra é aplicada como reforço em compósitos de matrizes poliméricas. Santos *et al.* (2011) verifica a aplicação da fibra de babaçu em filmes de poliestireno. Foi verificado seu tratamento superficial (alcalinização com hidróxido de sódio) para melhorar o caráter hidrofílico presente nas FNLs e assim melhorar a interface entre as regiões fibra-matriz, consequentemente as suas propriedades. O estudo realizado com tratamento superficial da fibra, foi comprovado que o tratamento realizado com NaOH obteve os melhores resultados.

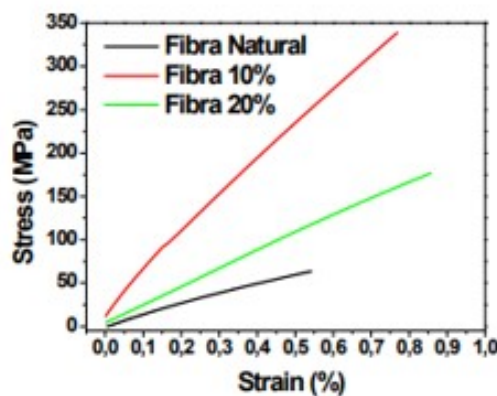


Figura 2.20 – Teste de tensão e deformação da fibra de babaçu natural, tratada com 10% de NaOH e tratada com 20% de NaOH.

Fonte: Santos *et al.* (2011).

Na busca do aproveitamento da fibra do epicarpo do coco babaçu em um compósito de matriz epóxi, o autor Franco (2010) avalia a aplicação das fibras de babaçu com um tratamento alcalino com NaOH com quantias de 2,5% e 5,0%.

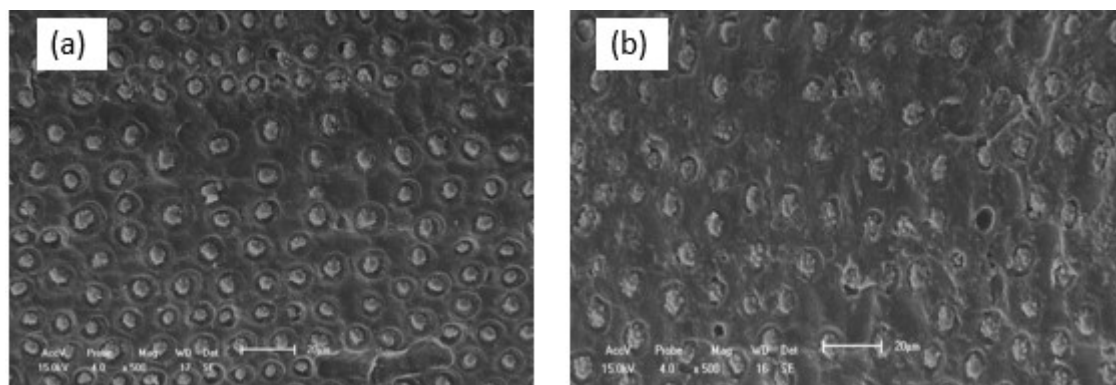


Figura 2.21 – (a) Microscopia da fibra de coco babaçu sem tratamento químico (500x) e (b) Microscopia da fibra de coco babaçu tratada (2,5% NaOH) (500x)

Fonte: Franco (2010).

Após os ensaios realizado por Franco (2010), foi concluído que as fases de degradação térmica das fibras de babaçu, através de análise térmica de TG, apresentaram que as fibras com tratamento químico de alcalinização, melhoram a estabilidade térmica da fibra, quando comparada as fibras sem tratamento. As análises no DSC indicam que as fibras apresentaram um resultado coerente com outras FNLs.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Aspectos Gerais

O foco do trabalho consistiu em realizar uma caracterização térmica e mecânica de fibras de babaçu, para o desenvolvimento do trabalho uma sequência de etapas foi proposto, conforme é demonstrado na Figura 3.1.

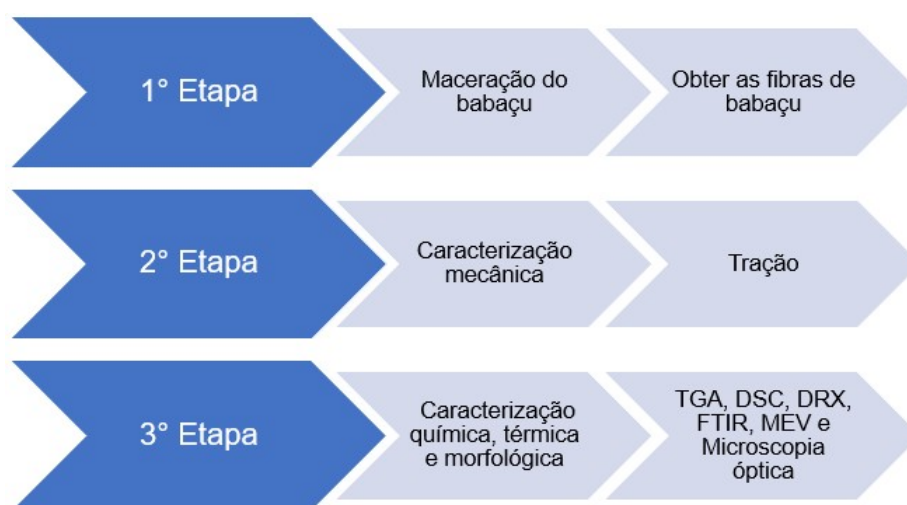


Figura 3.1 – Fluxograma das etapas de caracterização da fibra de babaçu.

Fonte: Próprio Autor.

A primeira etapa consistiu no preparo do babaçu para obtenção das fibras, através do processo de maceração, que consiste na imersão da fibra na água para melhorar a trabalhabilidade no processo de retirada das fibras do coco babaçu.

Na segunda etapa será realizado uma medição do diâmetro característico da fibra assim gerando o histograma da distribuição desses diâmetros, e assim descobrir a densidade e a densidade utilizando a análise de picnometria gasosa e densidade por método de Arquimedes. As caracterizações em relação a estrutura, composição química e caracterização térmica, também foram realizadas, pois assim será possível compreender como essas características intrínsecas à fibra influenciam em suas propriedades físicas e mecânicas.

Na terceira etapa buscou entender as propriedades mecânicas da fibra de babaçu com a realização de ensaios nas fibras para caracterizar as fibras e comparar seus resultados obtidos com a literatura existente.

3.2 Fibras de Babaçu

As fibras de babaçu, oriundas o coco que foram utilizadas neste trabalho foram adquiridas de uma vegetação local, as quais vieram da cidade de Santana do Maranhão do estado do Maranhão. O material foi disponibilizado em forma de fruto maduros, dessa forma foram submetidas a imersão em água inicialmente, porém após 24 horas foi verificado que as fibras não estavam totalmente viável para obter as fibras, então foi prolongado a imersão em água para 7 dias.



Figura 3.2 – Coco babaçu como recebido

Fonte: Próprio Autor.

O coco babaçu que foi submetido uma série de etapas para a obtenção das fibras presentes na casca do coco, as etapas adotadas estão representadas na Figura 3.3.

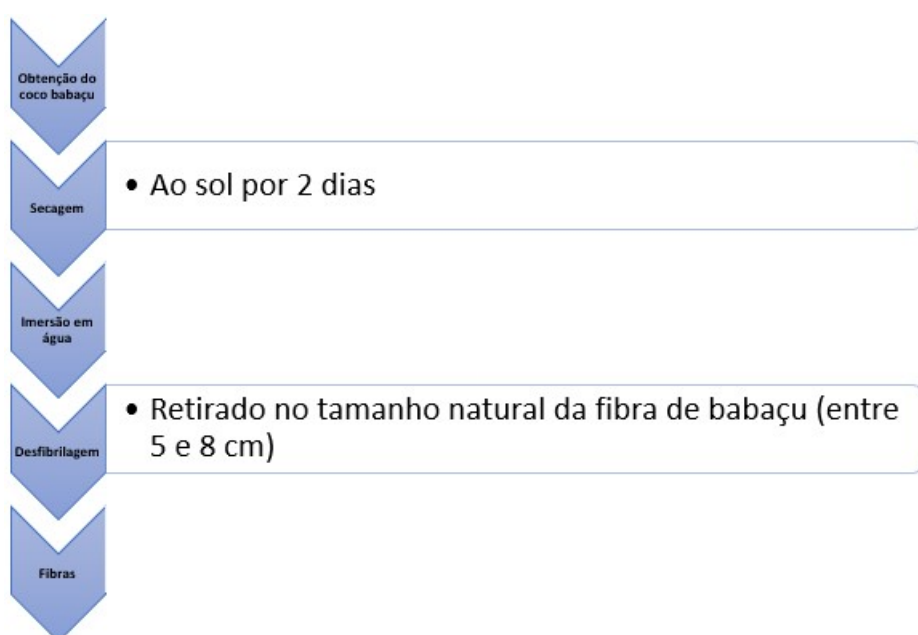


Figura 3.3 – Fluxograma para obtenção das fibras de babaçu.

Fonte: Próprio Autor.

A técnica de imersão do coco babaçu em água foi essencial para obtenção das fibras de babaçu, pois ao se realizar o retiro das fibras presentes na casca foi observado a ruptura da fibra, tornando o processo inviável. A água que foi absorvida pelas fibras presentes na casca proporciona hidratação e flexibilidade necessárias para o desfio. A etapa de imersão das fibras de babaçu em água pode ser observada na Figura 3.4.

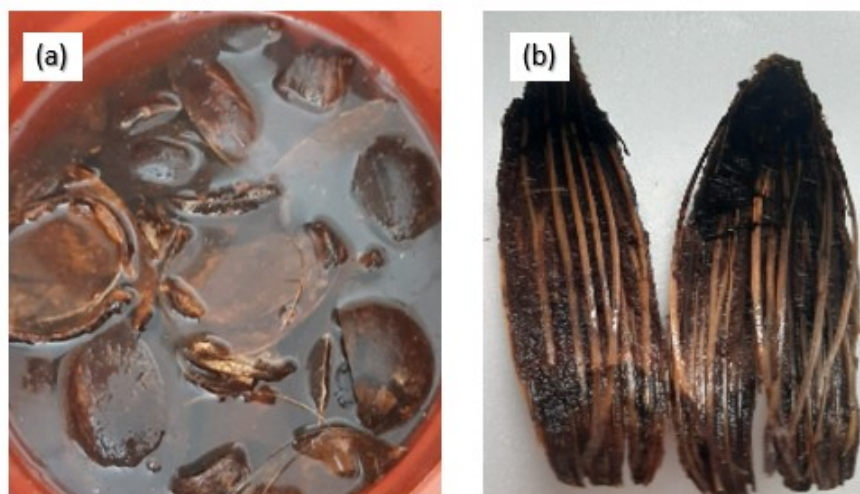


Figura 3.4 – (a) Coco babaçu imerso em água (b) fibras aparentes após período de imersão em água.

Fonte: Próprio Autor.

O desfibrilamento foi realizado logo após a retirada do babaçu da água, nessa etapa a única ferramenta utilizada foi um aparato para ajudar a pentear e assim facilitar na retirada da fibra da casca. Após a imersão em água as fibras se soltaram da casca conforme mostrado na figura 3.5, sendo assim possível a retirada com facilidade.



Figura 3.5 – Fibra de babaçu após desfibrilamento.

Fonte: Próprio Autor.

3.3 Caracterização das Fibras de Babaçu

3.3.1 Histograma de Variação Diametral

No estudo foi observado que cada fibra de babaçu apresentava uma elevada variação diametral, então foi empregado o método de determinação do diâmetro médio. A primeira etapa de caracterização da fibra de babaçu foi a análise da variação diametral, inicialmente foram selecionadas cem fibras de babaçu. O equipamento utilizado para realização da análise de variação diametral foi o microscópio óptico com câmera digital embutida (Olympus – BX53M) com as configurações de amplitude utilizada de 5x no modo campo escuro. (Figura 3.6), pertencente ao laboratório de metalografia do IME.

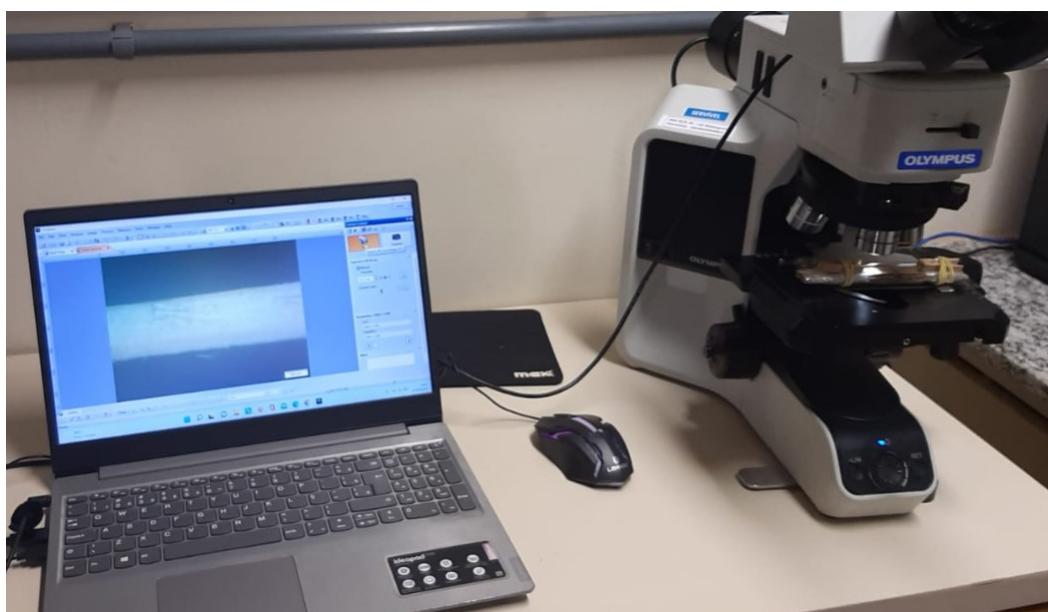


Figura 3.6 – Microscópio óptico Olympus – BX53M do IME.

Fonte: Próprio Autor.

As cem fibras foram medidas em três pontos distintos ao longo do seu comprimento da fibra. Em cada ponto foram realizadas seis leituras, sendo que três dessas a 0° outras três a 90°, totalizando 18 pontos de coleta de dados ao longo do comprimento da fibra. A microscopia óptica foi importante para a determinação da geometria da seção transversal das fibras. Para cada fibra de babaçu foi observado uma média das observações para 0° e 90° foram tomadas como diâmetro maior e menor da elipse. Conforme encontrado a média diametral, os valores encontrados foram divididos em seis intervalos, para que fosse construído o histograma da variação diametral. As análises aplicadas às fibras, foram utilizados os valores médios obtidos, e encontra-se as propriedades por diâmetro. Com a utilização de uma régua foi medido o comprimento de cada uma das cem fibras, após encontrado o comprimento, foi encontrada a média para o comprimento observado, para assim a determinação do histograma.

3.3.2 Determinação do Teor de Umidade

Para determinar o teor de umidade da fibra de babaçu, uma amostra pesando aproximadamente 2,0 g deve ser cuidadosamente medida e colocada em recipiente próprio (SWEYGERS *et al.*, 2022). A amostra, juntamente com o recipiente, é então colocada em um forno com temperatura controlada de 105 ± 2 °C por 3 horas. Este processo deve ser repetido até que uma massa consistente seja obtida, indicando que não há mais variação no teor de umidade. O teor de umidade é calculado usando a Eq 3.1, conforme descrito em estudos anteriores (MORAIS; ROSA; MARCONCINI, 2011).

$$TU\% = \frac{MRAU - MRAS}{MAU} \cdot 100\% \quad (3.1)$$

Onde: (MAU) é a massa da amostra úmida, (MRAU) é a massa do recipiente/conjunto de amostra úmida, (MRAS) é a massa do recipiente/conjunto de amostra seca e (TU%) é o teor de umidade.

3.3.3 Determinação da Composição Química

Com a finalidade de determinar a porcentagem dos constituintes lignocelulósicos presentes nas fibras de babaçu, empregou-se a metodologia proposta por Morais et al. (2010). Os ensaios foram realizados no IMA – Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano da Universidade Federal do Rio de Janeiro realizado no laboratório de processos químicos. A quantificação da fração dos constituintes envolve uma série de etapas, as quais serão minuciosamente descritas a seguir:

3.3.3.1 Determinação Percentual do Teor de Cinzas

Para determinar a porcentagem de cinzas, foram seguidos os seguintes passos. Primeiramente, 2,0 g de fibra seca de babaçu foram cuidadosamente pesados e colocados em um cadinho pré-calcinado, que foi aquecido a 600 °C por 30 min. O cadinho contendo a fibra foi então transferido para uma mufla em temperatura ambiente. No interior da mufla foi aplicada uma rampa de aquecimento de 9,6 °C por minuto, aumentando gradativamente a temperatura até atingir a temperatura alvo de trabalho de 600 °C em 1 h. Esta temperatura foi mantida durante três horas para garantir a combustão completa da fibra. Após o período de três horas, a temperatura do forno foi gradualmente reduzida para 200°C e mantida constante durante uma hora. Neste ponto, o conjunto de amostras do cadinho foi cuidadosamente removido do forno e colocado em um dessecador para esfriar e evitar a absorção de umidade. O percentual do teor de cinzas é calculado utilizando a Eq 3.2.

$$TC\% = \frac{MRAC - MR}{MA} \cdot 100\% \quad (3.2)$$

Onde: (MR) é a massa do recipiente, (MA) é a massa da amostra, (MRAC) é a massa do conjunto de calcinado e (TC%) é o teor de cinzas.

3.3.3.2 Determinação do Percentual de Teor de Extrativos

A determinação do teor extraível da fibra de babaçu foi realizada pelo método de extração Soxhlet. Antes de iniciar o procedimento, foi assegurado que o equipamento utilizado estava devidamente limpo e isento de gordura. Um cartucho contendo aproximadamente 4.000 g de matéria seca da planta foi preparado e inserido no equipamento. Em seguida, uma mistura de tolueno/etanol na proporção de 1:1 (v/v) foi adicionada a um frasco Erlenmeyer de 500 mL. O sistema foi refluxado por um período de quatro a cinco horas, com um mínimo de 24 ciclos de refluxo.

Após o término do tempo de extração, o solvente utilizado foi recuperado em rotaevaporador. O extrato resultante foi transferido para uma placa de Petri pré-limpa e seca, evitando possíveis perdas (se necessário, foram utilizados pequenos volumes de solvente fresco). A placa foi então colocada em estufa a 105 ± 2 °C por 1 h e posteriormente resfriada em dessecador. Após resfriamento, o prato foi pesado. Este processo de aquecimento e pesagem foi repetido por 30 minutos até a obtenção de massa constante. A Equação 3.3 foi usada para determinar o conteúdo extraível

$$TE\% = \frac{MRE - MRRS}{MA} \cdot 100\% \quad (3.3)$$

Onde: (MRE) é a massa do conjunto placa-extrativos, (MA) é a massa da amostra, (MRRS) é a massa do conjunto placa-resíduo de solvente e (TE%) é o teor de extrativos.

3.3.3.3 Determinação do Teor de Lignina

A determinação da lignina requer o uso de aproximadamente 1,0 g de amostra finamente moída, que deve ser desprovida de umidade e extrativos. A amostra de babaçu deve ser cuidadosamente colocada em uma grelha e misturada com pelo menos 300 mL de ácido sulfúrico 72% (p/p), que foi resfriado a uma temperatura de 10 a 15 °C antes do uso. A mistura deve ser agitada vigorosamente com um pilão durante 15 minutos até que todas as partículas visíveis estejam dissolvidas. Em seguida, a solução deve ser transferida para um bquer e deixada em repouso por 24 horas.

Seguindo as etapas anteriores, foram adicionados 306 mL de água destilada ao balão de Becker para diluir a concentração de ácido sulfúrico para 4%. O conteúdo foi transferido quantitativamente para um Erlenmeyer de 500 mL e colocado em placa quente. Um condensador foi conectado ao frasco e iniciou o refluxo, mantendo o material sob refluxo por um período de 4 horas.

Após a conclusão dos procedimentos acima mencionados, foi montado um sistema de filtração utilizando um kitassat de 1000 mL e uma bomba de vácuo. O precipitado foi coletado em funil e lavado até seu pH ser semelhante ao da água utilizada. Posteriormente, o funil foi colocado em estufa regulada para 105 ± 2 °C por um período de três horas, deixando-o secar até atingir peso constante. Finalmente, o peso combinado do funil e da lignina foi medido utilizando uma balança analítica de alta precisão com precisão de 0,0001 g. A Eq. 3.4 fornece a formulação para determinar o teor de lignina.

$$TLI\% = \left(\frac{MFL - MF}{MA \cdot 100} \right) - TC\% \quad (3.4)$$

TLI

Onde: (MF) é a massa do funil seco, (MA) é a massa da amostra, (MFL) é a massa do funil somada à massa de lignina após secagem em estufa e (TC%) é o teor de cinzas.

3.3.3.4 Derterminação do Teor de Hemicelulose

As fibras secas de babaçu, isentas de extrativos, foram submetidas à extração com solução de hidróxido de potássio a 24%. As fibras foram cobertas com a solução e o processo de extração foi realizado em temperatura ambiente por 24 horas.

Para prosseguir, a massa do funil de vidro sinterizado deve ser medida com precisão. Posteriormente, o funil foi colocado em cima de um kitassato de 1000 mL e conectado a uma bomba de vácuo. O conteúdo do frasco foi transferido para o funil e o precipitado foi lavado com água destilada até atingir pH neutro. Posteriormente, o funil foi posicionado em estufa a 105 ± 2 °C e deixado secar por no mínimo 18 horas até atingir peso constante. A formulação para determinação do teor de holocelulose pode ser encontrada na Eq. 3.5.

$$TH\% = \frac{MFH - MF}{MA} \cdot 100 \quad (3.5)$$

Onde: (MF) é a massa do funil seco, (MA) é a massa da amostra, (MFH) é a massa do funil somada à massa de hemicelulose e (TH%) é o teor de hemicelulose.

3.3.3.5 Determinação de Alfacelulose

Foi utilizada a hemicelulose seca do teste anterior, pesada até cerca de 1,0 g e colocada em um cadinho de pelo menos 100 mL. Foram adicionados 15 mL de solução de hidróxido de sódio a 17,5%, com espera de dois minutos de contato entre a solução e a celulose e em seguida o material foi triturado por oito minutos. Em seguida, foram adicionados 40 mL de água destilada ao almofariz e o conteúdo foi transferido quantitativamente para o funil. O precipitado coletado no funil deve ser enxaguado até que o filtrado tenha pH neutro. O funil deve então ser seco a 105 ± 2 °C (>18 h), colocado

no dessecador e pesado até peso constante (massa de alfacelulose). A Eq. 3.6 mostra o método para determinação do teor de alfacelulose.

$$TA\% = \frac{MFA - MF}{MAH} \cdot 100 \quad (3.6)$$

Onde: (MF) é a massa do funil seco, (MAH) é a massa da amostra de hemicelulose, (MFA) é a massa do funil somada à massa de alfacelulose e (TA%) é o teor de alfacelulose.

3.3.4 Determinação da Densidade

Os métodos utilizados para se encontrar a densidade das fibras foram o princípio de Arquimedes (ASTM, 2010; TRUONG *et al.*, 2009; ASTM, 1990) e por densidade por picnometria gasosa. Porém, a densidade encontrada pelo método da picnometria gasosa mostrou uma densidade muito maior que o esperado para as FNLs, então o método de Arquimedes foi utilizado.

Para avaliação das fibras pelo princípio de Arquimedes foram utilizadas cem fibras com variação de comprimento de 40 a 70 mm. Os equipamentos utilizados consistem em uma balança hidrostática Gehaka – BK300, béquer de 250 ml e 200 ml de gasolina. As fibras foram colocadas em estufa por 24 h a 80° C para a realização do ensaio. Conforme prescrito na norma ASTM D3800-99 (ASTM, 2010), foram seguidas todas as etapas utilizando água como líquido de imersão, porém a balança não detectou variação do peso durante a leitura, apresentando uma densidade muito abaixo do previsto para as FNLs. Tendo em vista, utilizou-se como líquido de imersão para o ensaio de determinação da densidade, a qual apresenta valores de densidade em torno de 0,76 g/cm³ à temperatura ambiente. A determinação da densidade por princípio de Arquimedes se baseia na Eq. 3.7.

$$\rho_{\text{arq}} = \frac{P_{\text{as}}}{(P_{\text{am}} + P_{\text{ai}}) \cdot \rho_{\text{liq}}} \quad (3.7)$$

Onde: ρ_{arq} : densidade da amostra; P_{AS} : peso da amostra seca; P_{AM} : peso da amostra úmida; P_{ai} : Peso da amostra imersa; ρ_{liq} : densidade do líquido utilizado.

A metodologia adotada na determinação da densidade das fibras é ilustrada na Figura 3.7.



Figura 3.7 – Balança hidrostática utilizada para a determinação da densidade pelo princípio de Arquimedes.

Fonte: Próprio Autor.

3.3.5 Difração de Raios X

A difração de raios x permite obter o perfil de difração da fibra de babaçu in natura e assim determinar parâmetros como o ângulo microfilar (AMF) e o índice de cristalinidade (I_c). A análise foi realizada no Laboratório de Cristalografia do IME, utilizando o equipamento Xpert Pro MRD System da PANalytics com radiação Cobalto $K\alpha$ (1,789 Å), com velocidade de varredura de 4° por minuto e com uma potência de 40 mA x 40 kV e varredura de 10° a 60° (Figura 3.8).

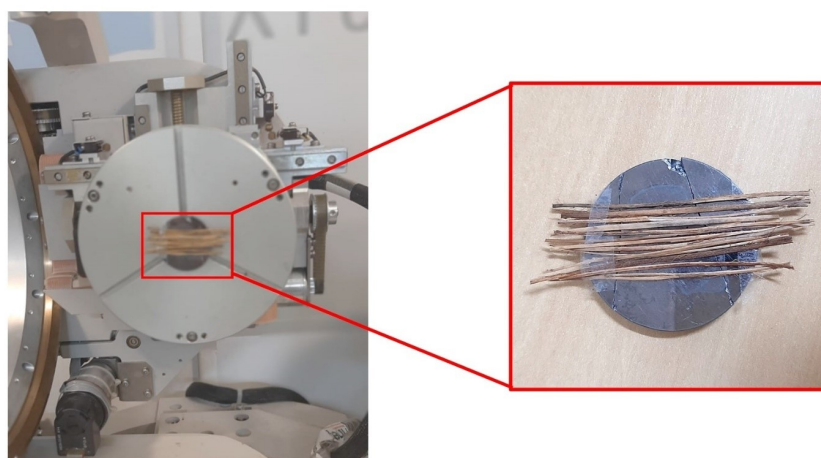


Figura 3.8 – Equipamento PANalytical de modelo X'pert Pro MRD System com fibra de babaçu montadas.

Fonte: Próprio Autor.

Para realização das análises, as fibras de babaçu foram levadas a estufa a 75° C a 24 hrs, cortadas com 60 mm de largura e montadas em paralelo sobre uma pastilha de silício monocristalino conforme Figura 3.8.

Para obter o valor correspondente ao ângulo microfibrilar (AMF) o perfil de difração da fibra de babaçu obtido na análise de DRX precisa passar por uma série de tratamentos no Software Highscore Plus como a retirada da linha de base do difratograma. Logo em seguida o Software Origin Pro será utilizado para indexar os picos de difração utilizando a ficha de celulose beta de número 00-056-1718. Após indexado será determinada a gaussiana associado ao segundo pico de difração para plotagem da primeira e segunda derivada da gaussiana, assim juntando as três curvas em um único gráfico, assim como representado na Figura 3.9.

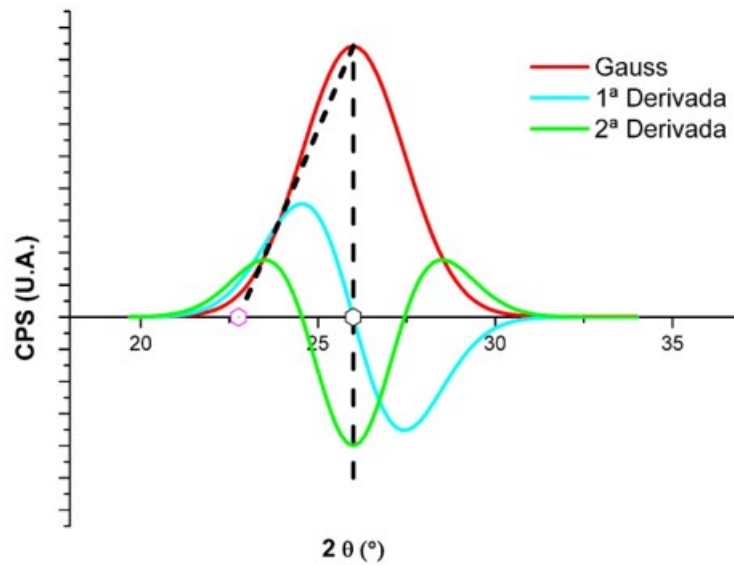


Figura 3.9 – Três curvas obtidas através do pico cristalino da fibra de babaçu.

Fonte: Próprio Autor.

Analizando o gráfico gerado da junção das três curvas é possível observar a interceptação da curva de gauss, da primeira e segunda derivada, sendo assim esse valor interceptado nomeado de valor “T” utilizado para calcular o ângulo microfibrilar (KRETSCHMANN *et al.*, 1998; ÖZPARPUCU *et al.*, 2019; REIS *et al.*, 2019; SILVEIRA *et al.*, 2023). a Eq. 3.8 demonstra o calculo para encontrar o ângulo microfibrilar.

$$AMF = -12,198T^3 + 113,67T^2 - 348,4T + 358,09 \quad (3.8)$$

Para realização do cálculo do índice de cristalinidade (I_c) o método proposto por Segal *et al.* (1959) foi utilizado. Para realização do calculo, utiliza-se os picos de intensidades cristalinos e amorfos conforme a Eq. 3.9.

$$I_c \frac{I_{002} - I_{101}}{I_{002}} \cdot 100\% \quad (3.9)$$

Onde: I_{002} : Intensidade máxima dos picos associados às fases cristalinas; I_{101} : Intensidade máxima dos picos associados às fases amorfas; I_c : índice de cristalinidade.

3.4 Caracterização dos Compósitos

3.4.1 Caracterização dos Compósitos Epóxi-Babaçu

Os compósitos foram confeccionados incorporando fibras em diferentes proporções volumétricas: 0%, 10%, 20% e 30%. Previamente, as fibras de babaçu foram submetidas a uma etapa de secagem em estufa a 30°C por 24 horas. Os compósitos resultantes foram empregados em ensaios abrangendo aspectos mecânicos, térmicos e de caracterização. Os autores Cunha *et al.* (2023), empregaram um método de compressão de placas compósitas. Na fabricação dessas placas, foi adotada uma matriz metálica com um volume interno de 214,2 cm³ (dimensões de 15 x 12 x 1,19 cm) e a prensa utilizada pertence à marca SKAY, com capacidade de 30 toneladas.

Para a produção das placas compósitas foram seguidos as seguintes etapas:

1. Limpeza das superfícies internas das peças que compõem a matriz metálica;
2. Recobrimento das superfícies da matriz metálica com graxa de silicone (Epoxyfiber-EX300);
3. Pesagem das matérias-primas (fibra de babaçu e resina epóxi) de acordo com suas proporções volumétricas. Montagem da matriz (tampa inferior + camisa flutuante);
4. Em um recipiente realizar a mistura da resina epóxi (Epoxyfiber-MC 130) com o endurecedor (Epoxyfiber- FD 129);
5. Alocar os calços sobre a “camisa flutuante” para modelar as placas com espessura de 1mm;
6. Levar a matriz metálica a prensa para preparação para receber a fibra e resina epóxi;
7. Preenchimento da matriz metálica com a resina pronta juntamente com as fibras, dispostas de forma aleatória;
8. Fechamento da matriz metálica para receber a carga;
9. Aplicação de uma pré-carga de 1 tonelada para retirar os vazios da placa;
10. Aplicação da carga final de 5 toneladas por 24 horas;

11. Desmolde da placa.

A Figura 3.10 ilustra as fases envolvidas no processo de fabricação da placa compósita de epóxi-fibra.



Figura 3.10 – Representação da fabricação da placa de matriz de fibra de babaçu.

Fonte: Próprio Autor.

Após a desmoldagem etapa de desmoldagem, a placa compósita recebe uma identificação conforme representado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Identificação das amostras produzidas.

Identificação da amostra	Significado
EP	Placa contendo somente epóxi
EB10%	Placa de Epóxi contendo 10% de fibra de babaçu
EB20%	Placa de Epóxi contendo 20% de fibra de babaçu
EB20%	Placa de Epóxi contendo 20% de fibra de babaçu

Fonte: Próprio Autor.

3.4.2 Ensaio de Impacto Izod

O ensaio de impacto Izod foi realizado de acordo com a norma ASTM D 256-10 (ASTM, 2018), utilizando um equipamento Panantec ATMI modelo PCD - 300, com capacidade para 300 J pertencente ao laboratório de Ensaio de Materias do Instituto Federal do Maranhão (IFMA). Para a viabilidade estatística dos ensaios, foram produzidos sete corpos de prova com dimensões de $63,5 \times 12,7 \times 10$ mm, nas frações de 0, 10, 20 e 30% em volumes de fibras de babaçu. O entalhe foi realizado manualmente com um entalhador, com uma profundidade de 2,54 mm e um ângulo de 45° . Para realizar os cortes

das placas conforme as dimensões apresentadas na Figura 3.11(a), foram cortados de forma não preferencial por não ter uma distribuição orientada.

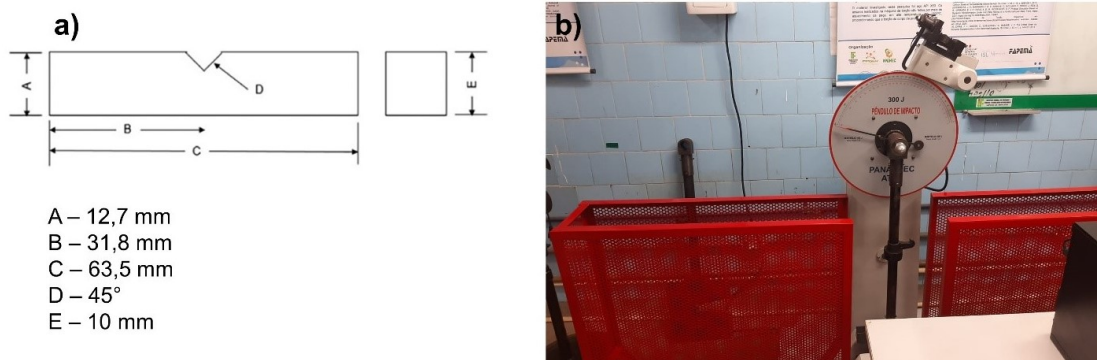


Figura 3.11 – (a) Representação da geometria e dimensões do corpo de prova; (b) Pêndulo instrumentado utilizado no ensaio.

Fonte: Adaptado de Raut, Bhosale e Kolekar (2022).

3.4.3 Ensaio de Tração

O ensaio de tração foi realizado em duas etapas. Na primeira etapa, na análise das fibras de babaçu foi realizado em parceria com o Laboratório de Ensaio Não-Destrutivos, Corrosão e Soldagem (LNDC) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) com equipamento Instron 3365 (Figura 3.12), foi utilizada célula de carga de 2 kN a uma taxa de tração de 0,2 mm/min.

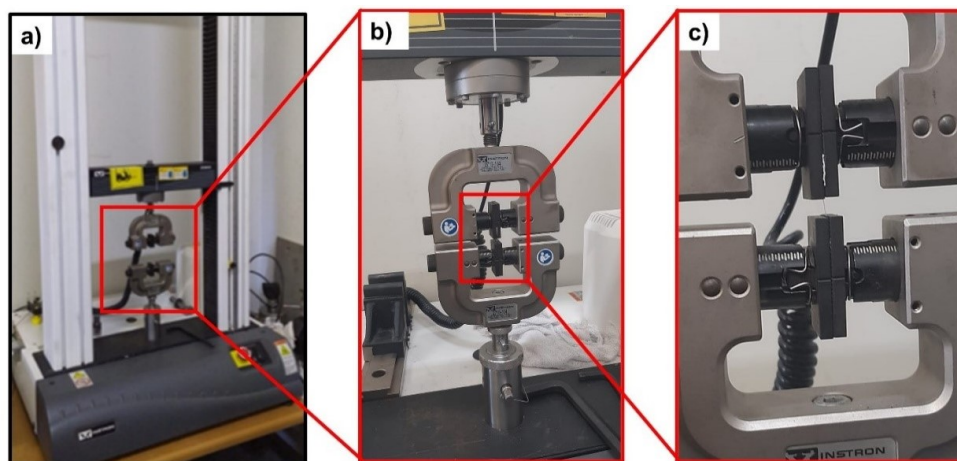


Figura 3.12 – (a) Equipamento Instron 3365 utilizado na realização do ensaio de tração das fibras de babaçu, (b) e (c) detalhe da garra.

Fonte: Próprio Autor.

As orientações do ensaio foram seguidos conforme a norma ASTM C1557-14 (ASTM, 2020), os dados da relacionados a seção transversal das fibras foi determinada através do diâmetro médio das fibras de babaçu as quais foram obtidas no Laboratório de Metalografia

do IME. O ensaio de tração buscou verificar a variação da tensão máxima no limite de ruptura em 6 intervalos de diâmetro, sendo 46 fibras ensaiadas ao total, assim é possível relacionar a relação de tração média máxima com o diâmetro da seção transversal de cada intervalo.

Ja para a realização dos ensaios de tração para os compostos de epóxi-fibra foram realizados conforme a norma da ASTM D3039/D3039M17 (ASTM, 2017). As placas foram fabricadas com frações de 0, 10, 20 e 30% em volume de fibras de babaçu. Os corpos de prova foram cortados nas dimensões de 120 x 12 x 2 mm, foram produzidos 8 corpos de prova para cada fração volumetrica de reforço, totalizando 32 Cps. Os compósitos foram ensaiados no equipamento da EMIC/INSTRON DL 3000, pertecente ao laboratório de Ensaio de Materias do Instituto Federal do Maranhão (IFMA), como é apresentado na Figura 3.13.

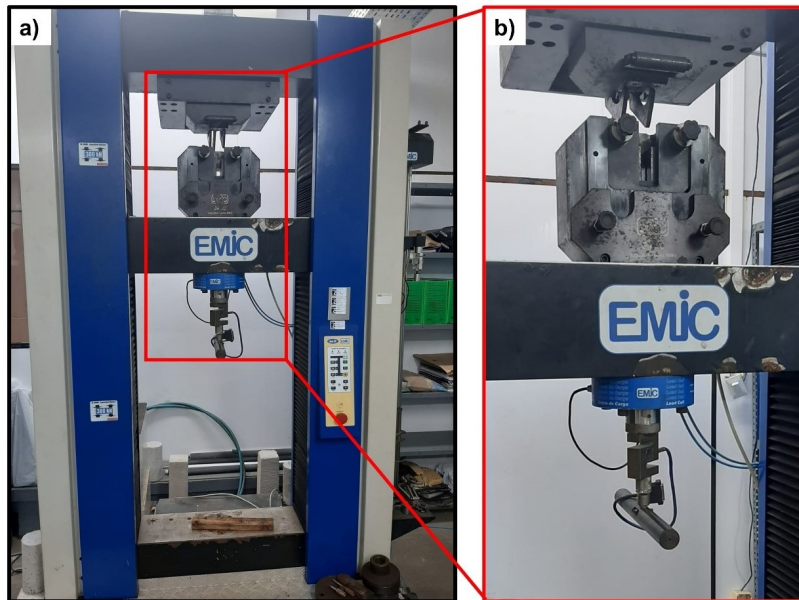


Figura 3.13 – (a) Equipamento EMIC/INSTRON DL 3000 utilizado na realização do ensaio de tração do compósito epóxi-fibra de babaçu, (b) e (c) detalhe da garra.

Fonte: Próprio Autor.

Para se obter os valores da tensão máxima à tração Eq. 3.10 e módulo de elasticidade foram utilizadas a Eq. 3.11.

$$\sigma_{\text{Máx}} = \frac{F_{\text{Máx}}}{A_0} \quad (3.10)$$

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (3.11)$$

Onde: $\sigma_{\text{Máx}}$ - Tensão máxima de engenharia; $F_{\text{Máx}}$ - Força máxima; A_0 - Área inicial da seção do corpo de prova. E - Módulo de elasticidade; σ - Tensão; ϵ - Deformação associada na região elástica.

3.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Para analisar a morfologia da fibra de babaçu, foi utilizado microscopia eletrônica de varredura (MEV). As FNLs são consideradas polímeros naturais e pelo seguinte fato foi necessário realizar a metalização das amostras (Figura 3.14). Para metalizar as amostras foram levadas no laboratório multiusuário de Microscopia Eletrônica e Microanálise da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) utilizado o equipamento Dentonvacuum Desk V metalizar as mesmas.

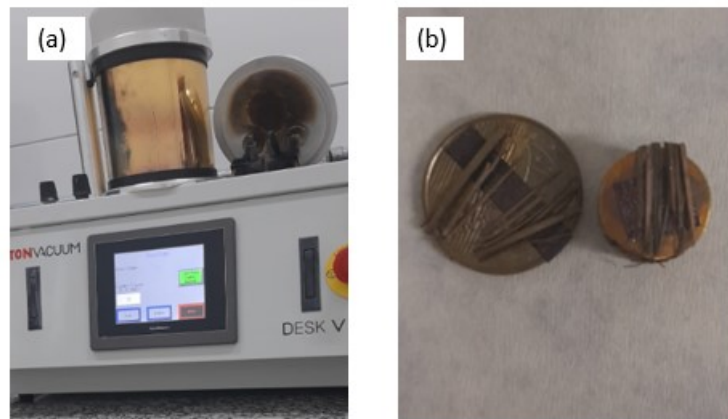


Figura 3.14 – (a) Metalizadora Dentonvacuum Desk V da UFRJ, (b) Fibras de babaçu metalizadas.

Após a etapa de metalização, as fibras já podem ser analisadas no MEV e gerar as micrografias, as mesmas foram obtidas utilizando um MEV da FEI, de modelo quanta FEG 250 no laboratório do IME, conforme é apresentado na Figura 3.15.



Figura 3.15 – Equipamento MEV FEG 250 do IME.

3.6 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier

A análise FTIR das fibras de babaçu foi realizada em espectrômetro PerkinElmer Spectrum Two, com faixa espectral variando de 4.000 a 650 cm^{-1} . pertencente ao laboratório de materiais cerâmicos do IME. As fibras de babaçu e compósitos epóxi-fibra foram moídas e o pó de babaçu foi misturado ao brometo de potássio (KBr) no qual foram prensados pellets para a execução das análises.

A escolha de realizar a análise química nos compósitos contendo 10%, 20% e 30% de fibra de babaçu teve como objetivo avaliar a interação química entre as interfaces epóxi-fibra. Os dados resultantes serão processados utilizando o software Origin Pro, gerando os espectros correspondentes da porcentagem de transmitância (%) em relação ao número de onda (cm^{-1}).

3.7 Análises Térmicas

3.7.1 Análise Termogravimétrica (TG)

Para conduzir a análise termogravimétrica das fibras de babaçu e dos compósitos epóxi-fibra, uma quantidade específica de material foi triturada e colocada em cadinhos de platina sob atmosfera de nitrogênio. O processo envolveu uma variação de temperatura até 600°C, com uma taxa de aquecimento de 10°C/min. O ensaio foi conduzido nas instalações do Instituto de Pesquisas da Marinha (IPQM) utilizando o equipamento Shimadzu modelo DTG-60H, conforme representado na Figura 3.16. A análise termogravimétrica proporciona a obtenção das temperaturas correspondentes a cada fase da degradação dos componentes estruturais da fibra, além de identificar as perdas de umidade.



Figura 3.16 – Equipamento Shimadzu modelo DTG-60.

3.7.2 Calorimetria Diferencial de Varredura

Para realizar as análises de DSC as fibras de babaçu e compósitos epóxi-fibras foram triturados e colocadas em cadinho de alumínio, seguindo as mesmas etapas da análise de TGA, o ensaio foi realizado no Instituto de Pesquisas da Marinha (IPQM) equipamento utilizado na análise foi o Shimadzu modelo DSC 60 (Figura 3.17). Para a obter a análise foi necessário triturar a amostra com 10 mg de fibra de babaçu, e foi submetida em atmosfera de nitrogênio com vazão de 50 ml/min, taxa de aquecimento de 10°C/min no intervalo de 25 a 600°C.



Figura 3.17 – Equipamento Shimadzu modelo DSC 60.

3.8 Ensaio Balístico de Velocidade Residual

Com o objetivo de avaliar a capacidade de absorção de energia cinética das placas compósitas contendo diferentes frações volumétricas de fibra de babaçu (10, 20 e 30%), foram confeccionadas um total de 02 amostra para cada fração, com dimensões de 15 x 12 x 1 cm³.

Os ensaios balísticos foram realizados com 2 tipos de armamentos distintos, sendo primeiro ensaios realizado com uma espingarda de ar comprimido modelo SSS e Gunpower (Figura 3.18), equipada com dois cilindros comunicantes (0,5 L e 6 L) e uma pressão estimada de 28 MPa. O projétil utilizado foi um chumbo de calibre 0.45 (Figura 3.18(b)) com 1 cm de diâmetro e 14,4 g de peso.

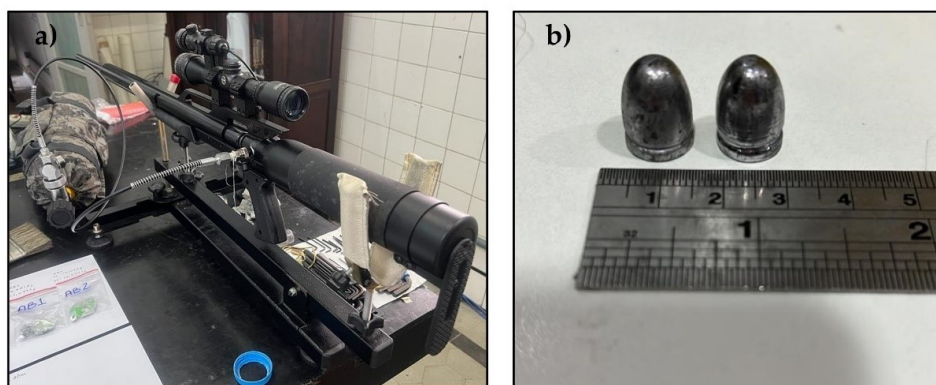


Figura 3.18 – Arma de ar comprimido modelo SSS, projectéis de chumbo de calibre 0.45.

Utilizou-se um cronógrafo balístico Air Chrony modelo MK3, com uma precisão de 0,15 m/s, para a medição da velocidade de impacto. Além disso, um cronógrafo balístico ProChrono modelo Pal, com precisão de 0,31 m/s, foi empregado para mensurar a velocidade residual.

No segundo ensaio balístico, empregou-se um radar Doppler WEIBEL SL-520P (Figura 3.19), pertencente ao Centro de Avaliações do Exército (CAEx). Com base nos dados adquiridos pelos radares de ambos os armamentos, realizou-se o cálculo utilizando as Equações 2.1 e 2.2. Cada grupo analisado contemplou 5 disparos, contribuindo para a determinação da velocidade residual. Os ensaios balísticos no CAEx foram realizados nas seguintes condições:

1. Munição: Calibre 9 mm com massa de 8 g, fornecida comercialmente ao Exército Brasileiro;
2. Dispositivo: Provete Calibre 9 mm;
3. Distância do Alvo: 15 metros, de acordo com a norma NIJ 0101.06 (NIJ, 2008);
4. Ângulo de incidência no alvo: 90°.

A representação do esquema balístico realizado no CAEx é apresentado na Figura 3.19.

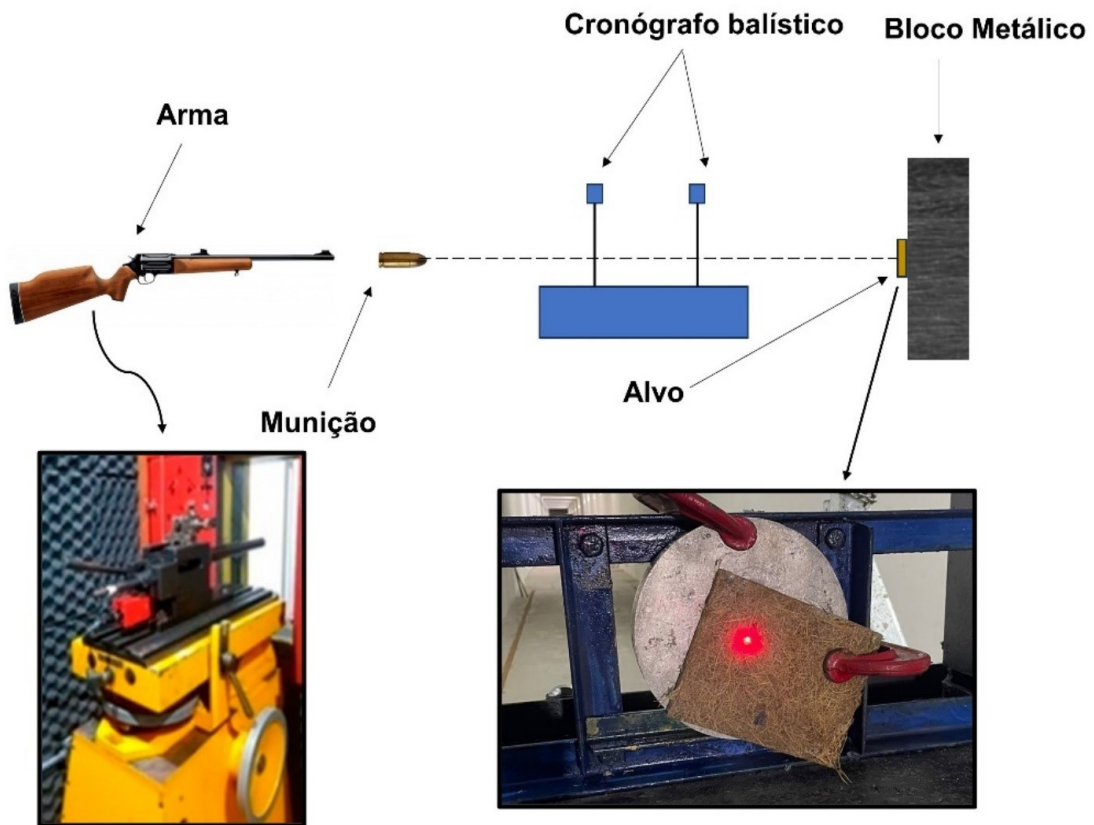


Figura 3.19 – Representação esquemática do ensaio balístico.

Fonte: Adaptado de Marchi *et al.* (2023).

3.9 Métodos Estatísticos

3.9.1 Análise de Variância (ANOVA)

A análise de variância (ANOVA) é um teste estatístico empregado para comparar os tratamentos aplicados, com o objetivo de avaliar a variação nas propriedades a serem observadas. Esse teste fundamenta-se na distribuição amostral do teste "F", visando identificar diferenças entre as médias (CARVALHO *et al.*, 2022).

Os resultados dos ensaios balísticos, tração e izod foram submetidos a ANOVA, com um nível de confiança de 95% para todos os testes. A análise também permitiu avaliar se o número de fibras utilizadas como reforço dos compósitos influencia os resultados obtidos. Para verificar a presença de diferenças significativas entre os valores médios dos resultados, o teste de Tukey, também conhecido como teste de diferença mínima significativa (DMS), conforme calculado pela Eq. 3.12.

$$d.m.s. = q \cdot \sqrt{\frac{QMR}{r}} \quad (3.12)$$

Onde: QMR – quadrado médio do resíduo; r – número de repetições de tratamento; q – amplitude total.

3.9.2 Análise de Weibull

A análise estatística de Weibull desempenha um papel crucial em várias áreas da engenharia. A flexibilidade da distribuição de Weibull permite adaptar-se a uma variedade de padrões de falhas, tornando-a altamente versátil com a capacidade de ajustar-se a diferentes cenários por meio da modificação de apenas alguns parâmetros (ABERNETHY *et al.*, 1983).

As propriedades obtidas em cada valor de densidade e análise mecânica das fibras de babaçu foram interpretadas estaticamente utilizando o software Weibull Analysis, que fornece os correspondentes parâmetros de escala (θ), o parâmetro de forma (β) e os parâmetros de ajuste de precisão (R^2). É baseado na função de distribuição de frequência cumulativa de Weibull ($F(x)$), Eq. 3.13. Onde β , é uma inclinação linear da função (LUKO, 1999).

$$\ln \ln \left[\ln \ln \left(\frac{1}{1 - F(x)} \right) \right] = \beta \ln \ln(x) - [\beta \ln \ln(\theta)] \quad (3.13)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização das Fibras de Babaçu

4.1.1 Histogramas de Variação do Diâmetro

As FNLs apresentam algumas desvantagens, como suas propriedades heterogêneas. Essas características também se manifestam no que diz respeito ao diâmetro, o qual demonstra amplas variações ao longo do comprimento das fibras. No caso específico das fibras de babaçu, observou-se uma notável disparidade nos diâmetros entre diferentes fibras. Para avaliar essa variação de diâmetro nas 100 fibras de babaçu, utilizou-se o método de distribuição de frequência, com medições realizadas por meio de um microscópio óptico. A Figura 4.1 ilustra a microscopia óptica de uma fibra de babaçu, evidenciando significativa heterogeneidade em seu diâmetro ao longo do comprimento.

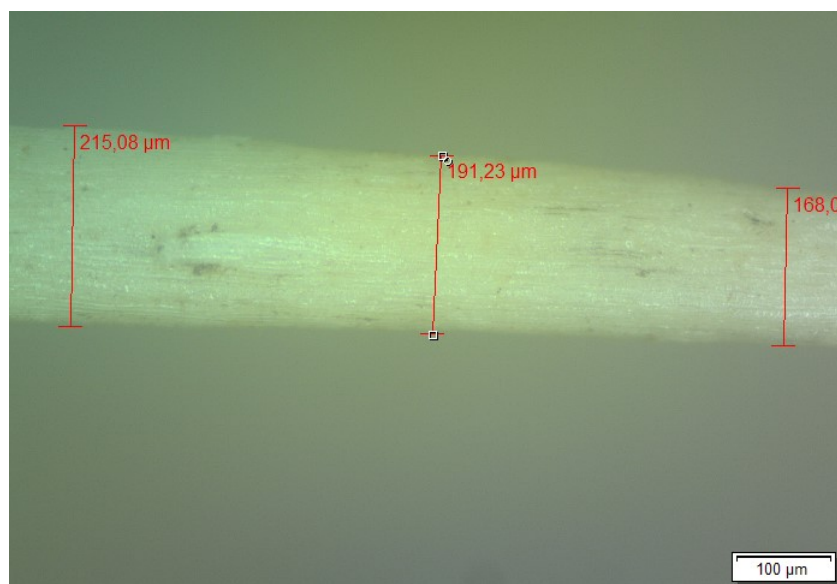


Figura 4.1 – Medição dos tamanhos das fibras de babaçu com um aumento de 5x.

Fonte: Próprio Autor.

Analisando a Figura 4.1 é possível observar a diferença na variação do diâmetro da fibra ao decorrer de seu comprimento. A diferença pode ser explicada pela fibra de babaçu apresentar uma enorme variação em seu comprimento, se diferenciando de outras fibras.

Diversos fatores podem influenciar essa variação diametral na fibra de babaçu, incluindo o processo de extração das fibras do coco de babaçu, a etapa de secagem da fibra, a imersão em água e o manuseio do equipamento durante a análise. Os resultados da análise da variação diametral da fibra de babaçu estão apresentados na Figura 4.2.

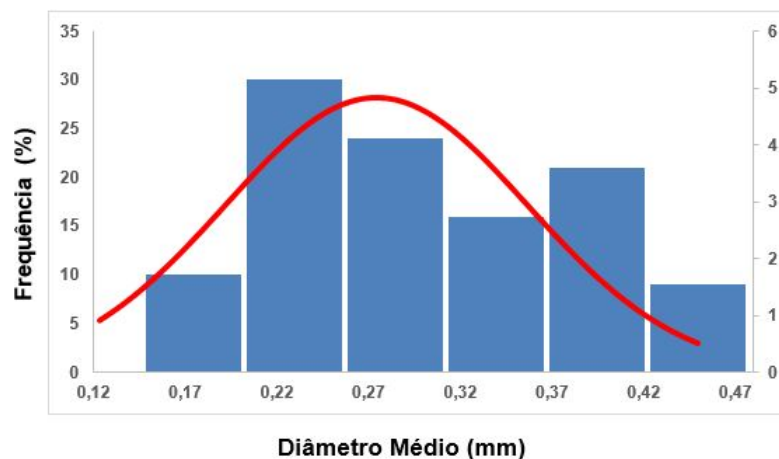


Figura 4.2 – Histograma da frequência por intervalo de diâmetro das fibras de babaçu.

Fonte: Próprio Autor.

O histograma foi definido entre os valores mínimo (0,15 mm) e máximo (0,47 mm). Os primeiros intervalos com fibras mais finas variaram de 0,15 a 0,19 mm com quantidade de 10 fibras. As fibras de maior diâmetro estão localizadas no sexto intervalo, apresentando grande número de diâmetros em 0,47 mm e menor frequência. Esses valores médios podem estar relacionados a dificuldades em desembaraçar fibras mais espessas, devido à sua grande quantidade de defeitos internos, bem como por quebrarem com maior facilidade. A distribuição do valor de frequência indica um valor médio de diâmetro de 0,27 mm.

Tabela 4.1 – Densidade média das fibras de babaçu obtidas pelo princípio de Arquimedes.

Intervalo de diâmetro médio (mm)	Densidade média (g/cm ³)
0,15 – 0,19	0,79 ± 0,03
0,19 – 0,25	0,70 ± 0,04
0,25 – 0,31	0,66 ± 0,03
0,31 – 0,36	0,53 ± 0,04
0,36 – 0,41	0,42 ± 0,03
0,41 – 0,47	0,27 ± 0,01

Fonte: Próprio Autor.

Pode-se analisar na tabela 4.1 uma tendência no aumento da densidade com a diminuição do diâmetro das fibras, essa característica está associada com a propriedade presente nas fibras mais finas, nas quais vão promover uma redução das imperfeições internas (MONTEIRO *et al.*, 2011).

A densidade média obtida no método de Arquimedes variou de $0,27 \pm 0,01$ a $0,79 \pm 0,03$ g/cm³ com uma média de $0,61 \pm 0,18$ g/cm³, a faixa é condizente com para a característica presente em fibras finas, onde as imperfeições internas são reduzidas, o resultado também foi comparado com os encontrados por Lima *et al.* (2006), Azevedo e Paiva (2014) e Rodrigues (2019) conforme representado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Comparação da densidade da fibra de babaçu com a literatura.

Densidade média (g/cm ³)	Refêrencias
0,61 ± 0,18	Presente trabalho
0,70	Lima <i>et al.</i> (2006)
0,41	Azevedo e Paiva (2014)
1,14	Rodrigues (2019)

Fonte: Próprio Autor.

Na Tabela 4.2 podemos observar a similaridade com alguns resultados da literatura sobre a densidade das fibras de babaçu com os resultados obtidos com o método de Arquimedes. Através dos dados apresentados na Tabela 4.1 foi realizado a plotagem da curva da densidade para cada intervalo de diâmetro estudado, sendo ilustrada na Figura 4.3.

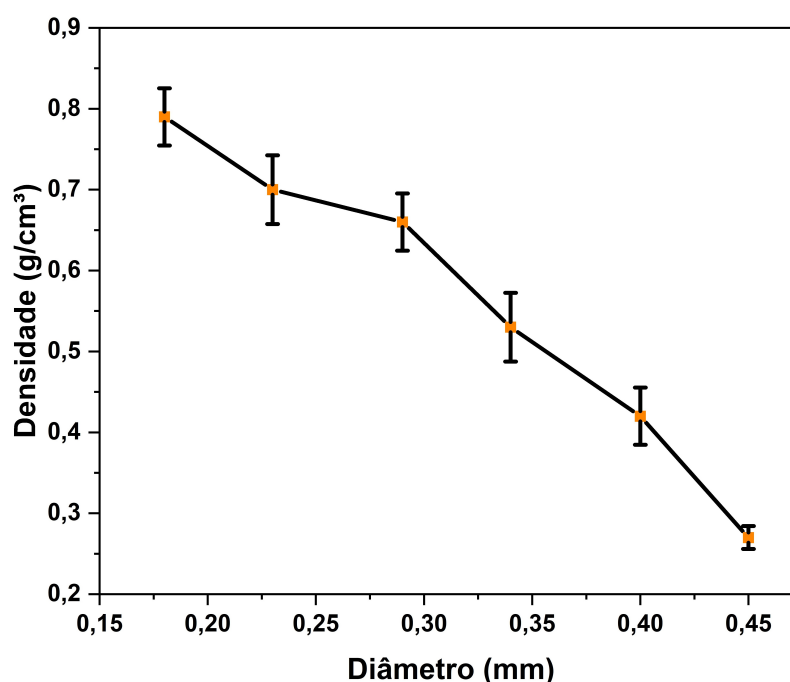


Figura 4.3 – Dependência da densidade da fibra de babaçu em relação ao diâmetro.

Fonte: Próprio Autor.

A Figura 4.3 apresenta de forma mais clara o conceito apresentando por Monteiro *et al.* (2011) em que podemos observar a redução da densidade com o aumento diâmetro médio das fibras de babaçu. Essa característica também é apresentada em diversos estudos que abordam a influência da densidade nas propriedades das FNLs (SATYANARAYANA;

ARIZAGA; WYPYCH, 2009; SATYANARAYANA *et al.*, 2011; BARBOSA, 2011; REIS *et al.*, 2019).

Utilizando o programa Weibull Analysis foi possível obter os parâmetros β (módulo de Weibull) e R^2 (ajuste de precisão). Valores de R^2 superiores a 0,9 indicam boa qualidade para um ajuste linear. O parâmetro (θ), por sua vez, indica o valor aproximadamente central da distribuição característica (BEVITORI *et al.*, 2010; FERREIRA; NASCIMENTO; MONTEIRO, 2018). A Figura 4.4 apresenta a análise de Weibull para os resultados de densidade para as fibras de babaçu.

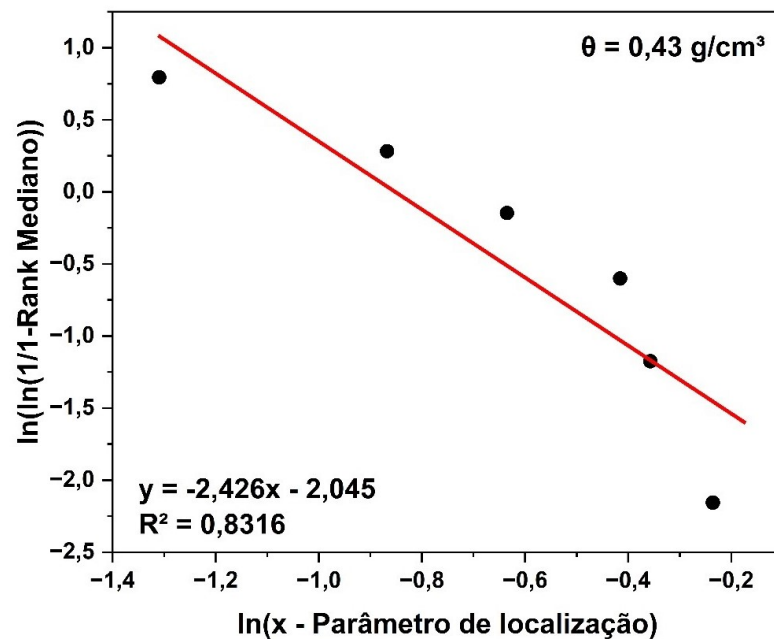


Figura 4.4 – Dependência da densidade da fibra de babaçu em relação ao diâmetro.

Fonte: Próprio Autor.

Através desta análise, observou-se que os valores de (θ) seguiram a mesma tendência presente na média dos diâmetros da fibra de babaçu. Além disso, o parâmetro R^2 apresentou um valor próximo a 0,90, evidenciando uma precisão notável no ajuste. Essa precisão sustenta a consistente concordância da densidade característica com a média, conferindo assim confiabilidade aos valores estatísticos obtidos. A densidade característica foi de $0,43 \text{ g/cm}^3$ contra $0,59 \text{ g/cm}^3 \pm 0,18$, sendo um valor próximo ao encontrado, essa consistência fortalece a confiabilidade da análise, sugerindo uma boa representatividade da densidade característica de Weibull para a amostra em questão.

4.1.2 Teor de Umidade

A expressiva presença de umidade está intrinsecamente ligada à composição da fibra, a qual exibe uma natureza hidrofílica. Essa característica pode exercer uma influência direta sobre as propriedades mecânicas e químicas do material. No contexto da implementação

de FNLs em compósitos de matriz polimérica, a natureza hidrofílica torna-se um desafio, destacando a importância de estratégias específicas para mitigar esse fator e otimizar o desempenho do compósito (FARUK *et al.*, 2012; SILVA *et al.*, 2009). A Tabela 4.3 apresenta o valor obtido para o teor de umidade para a fibra de babaçu.

Tabela 4.3 – Comparação da média do teor de umidade com a literatura.

Fibra	Teor de umidade (TU%)	Referência
Babaçu	7,05	PT*
Juta	12,60	BLEDZKI <i>et al.</i> , 1996
Figueira	9,33	MOSHI <i>et al.</i> , 2020
Cacto	5,80	BALAJI <i>et al.</i> , 2017
Soapbark	12,00	PALANISAMY <i>et al.</i> , 2021

Fonte: Próprio Autor.

Ao compararmos o teor de umidade da fibra de babaçu com os dados apresentados por outros autores, conforme a Tabela 4.3, é evidente que o valor obtido pela fibra de babaçu é inferior quando comparado a algumas fibras mencionadas na literatura, sendo superior apenas ao cacto (BLEDZKI; REIHMANE; GASSAN, 1996; MOSHI *et al.*, 2020; BALAJI; NAGARAJAN, 2017; PALANISAMY *et al.*, 2021). Essa discrepância pode ser atribuída a diversos fatores que exercem influência direta sobre as propriedades das FNLs, com destaque para o local de cultivo, a idade da planta e as condições de armazenamento (MONTEIRO *et al.*, 2011).

4.1.3 Composição Química

A organização das fibras lignocelulósicas, compreendendo celulose, hemicelulose e lignina, dentro da estrutura da fibra é um processo complexo. Uma compreensão precisa da composição e disposição desses componentes é crucial para a utilização eficaz de fibras naturais na produção de compósitos de matriz polimérica. Os valores de teor de umidade e composição química das fibras de babaçu são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Composição química da fibra de babaçu em comparação a dados do babaçu e outras FNLs.

Fibra	TE%	TC%	TL%	TH%	THE%	TA%	Ref.
Babaçu	15,72	2,43	28,53	70,31	32,34	37,97	PT*
Babaçu	8,50	-	21,9	74,50	8,90	65,50	FURTADO <i>et al.</i> , 2020
Juta	0,50	-	12,00	74,60	13,60	61,00	BLEDZKI <i>et al.</i> , 1996
Mudar	-	2,50	18,00	76,00	-	57,00	ASHORI <i>et al.</i> , 2009
Figueira	-	3,96	10,13	-	13,86	55,38	MOSHI <i>et al.</i> , 2020
Cacto	-	-	13,70	-	8,20	67,40	BALAJI <i>et al.</i> , 2017
Soapbark	-	5,00	18,00	-	20,00	37,00	PALANISAMY <i>et al.</i> , 2021

Fonte: Próprio Autor.

Dentre os NLFs estudados, a fibra de babaçu apresenta maior teor de extrativos, principalmente ceras, o que pode estar associado à presença de pó ceroso na fibra analisada. Substâncias cerosas em fibras naturais geralmente influenciam a molhabilidade e as propriedades de adesão (MOHANTY *et al.*, 2000).

Quanto ao teor de cinzas, a fibra de babaçu apresenta valor semelhante às demais fibras listadas. Observou-se maior teor de lignina nas amostras de fibras analisadas (28,53%), em comparação aos demais dados apresentados. O conteúdo de lignina nas fibras desempenha um papel fundamental na estrutura, propriedades e morfologia. A lignina desempenha o papel de ligante amorfo entre as fibrilas, promovendo a ligação entre a celulose e a hemicelulose. Está presente em todas as camadas da parede celular da fibra, com maior concentração nas camadas primária e secundária (MOHANTY *et al.*, 2000; FELDMAN, 1985).

A concentração de hemicelulose encontrada na presente pesquisa (32,34%) foi superior às demais fibras analisadas, o que indica uma excelente propriedade de elasticidade da fibra de babaçu. Além de ser solúvel em água, a presença da hemicelulose também desempenha um papel importante ao impedir o contato direto entre as microfibrilas (SPINACÉ *et al.*, 2009).

O teor de celulose encontrado na fibra de babaçu foi de 37,97%, mostrando-se inferior a algumas outras fibras citadas. Porém, o parâmetro celulose na fibra ainda indica boas propriedades mecânicas, uma vez que a celulose desempenha um papel crucial na resistência da parede celular das células vegetais. Portanto, está diretamente relacionado ao

desempenho mecânico das fibras (DEMOSTHENES *et al.*, 2020; SUMESH; KANTHAVEL; KAVIMANI, 2020).

4.1.4 Caracterização por FTIR

O espectro FTIR da fibra de babaçu está representado na Figura 4.5. A curva da fibra de babaçu apresenta semelhanças com diversas outras FNLs mencionadas na literatura.

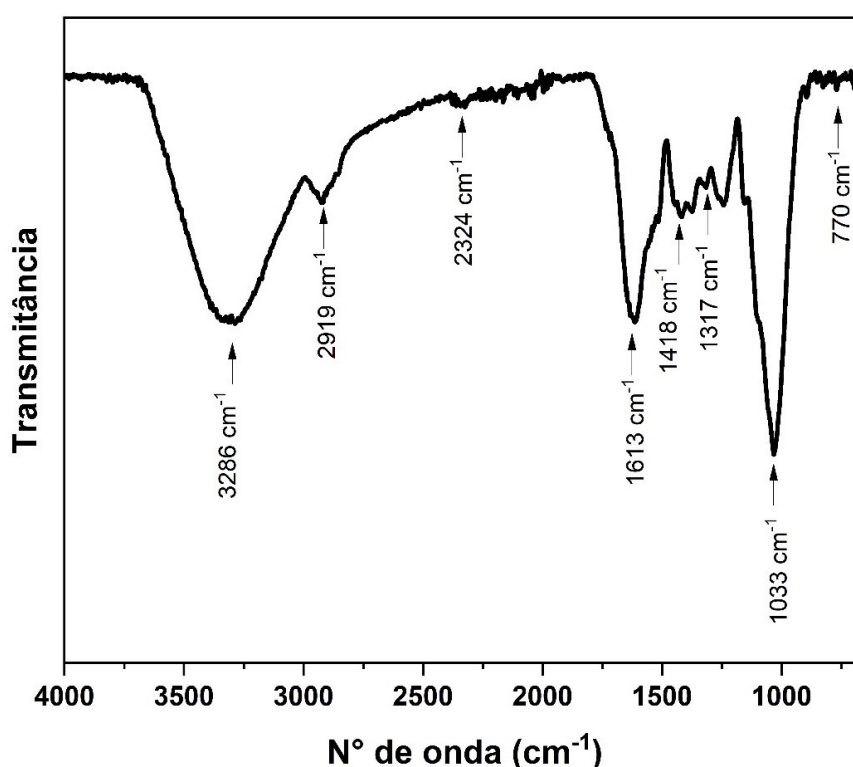


Figura 4.5 – Espectro FTIR para fibras de babaçu.

Fonte: Próprio Autor.

A maior banda encontrada é 3286 cm⁻¹, que é atribuída ao alongamento da ligação (OH) (BELOUADAH; ATI; ROKBI, 2015). A faixa de 2.919 cm⁻¹ é característica de qualquer macromolécula presente nos componentes de celulose e hemicelulose existentes na fibra natural (MOURA *et al.*, 2021). A banda localizada em 1613 cm⁻¹ é atribuída a grupos funcionais (ácidos carboxílico, alifático e cetônico) pertencentes à lignina e à hemicelulose (BELOUADAH; ATI; ROKBI, 2015; ABRAHAM *et al.*, 2011). A banda localizada em 1317 cm⁻¹ refere-se à vibração oscilante da ligação CH₂ (BEHERA *et al.*, 2023; SILVEIRA *et al.*, 2022). A banda presente em 1033 cm⁻¹ é frequentemente encontrada em NLFs e é atribuída a grupos dentro da celulose e alguns carboidratos (BELOUADAH; ATI; ROKBI, 2015). Finalmente, a banda localizada em 770 cm⁻¹ está relacionada a vibrações de ésteres e anéis aromáticos monossustituídos devido à fração de lignina da fibra de babaçu (VIEIRA *et al.*, 2011).

4.1.5 Análise Termogravimétrica

As principais destinações das FNLs quando aplicadas em compósitos são para trabalhar com matrizes poliméricas. As fibras naturais possuem grande limitação a altas temperaturas por esse motivo se faz de extrema importância estudar o comportamento térmico das fibras naturais. Para viabilizar futuras aplicações em polímeros com processamentos a altas temperaturas é necessário entender quais as etapas de degradação e perda de massa e a temperatura exata de cada uma dessas etapas. Estudos realizados por Saleem *et al.* (2008) e Antich *et al.* (2006) mostram que as FNLs empregados em polímeros tem várias vantagens, porém a grande desvantagem é restringir o uso do compósito, pois as FNLs tem temperatura média de 220 °C (SEKI *et al.*, 2013) apresenta a perda de massa em determinada faixa de temperatura de alguns constituintes das FNLs como: celulose (240 – 350 °C), hemicelulose (200 – 260 °C) e lignina (280 – 500 °C). A curva termogravimétrica (TG) e a sua derivada (DTG) obtidas para as fibras de babaçu estão apresentadas na Figura 4.6.

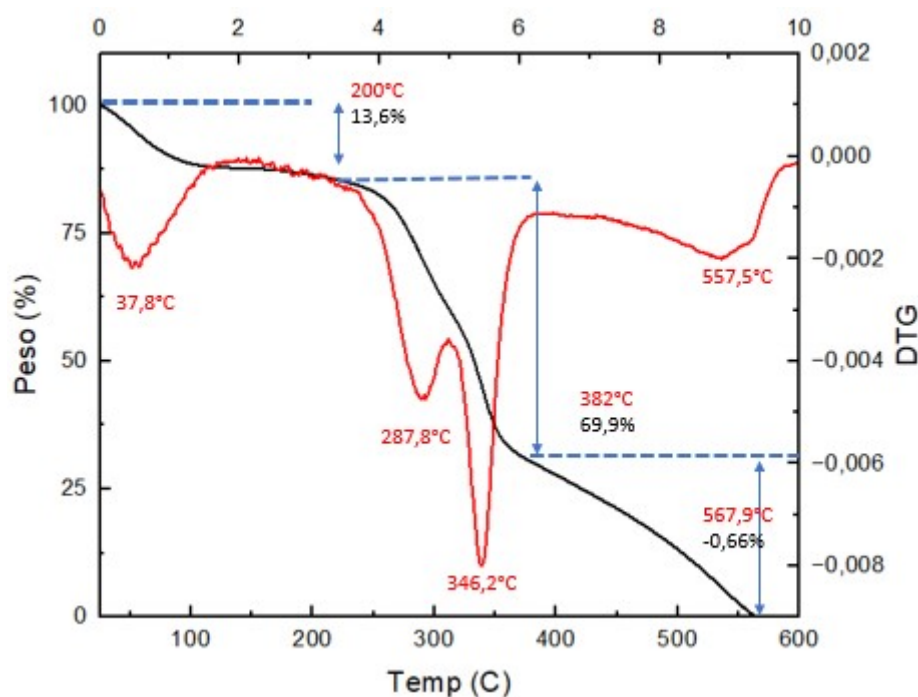


Figura 4.6 – Curvas TG/DTG para as fibras de babaçu.

Fonte: Próprio Autor.

Os dados relativos aos eventos térmicos ocorridos na análise de TG/DTG Figura 4.6, estão apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Parâmetros termogravimétricos observados para as fibras de babaçu.

Perda de massa após 200°C (%)	Temp. de início de degradação (°C)	Temp. de Máxima taxa de degradação(°C)	Perda de massa após segundo estágio (%)	Perda de massa até 600°C (%)
13,6	272,9	363	70,4	100

Fonte: Próprio Autor.

As curvas obtidas através do resultado do ensaio de TG e DTG das fibras de babaçu demonstram as etapas dos eventos térmicos que ocorrem durante o ensaio, onde na primeira etapa de redução de massa significativa foi observada a uma temperatura de 37,8°C, estendendo-se até 200 °C, com redução de 13,6% da massa da fibra de babaçu, essa perda de massa se dar de forma mais demorada. Essa perda de massa pode ser um indício da evaporação da água presente na fibra, assim evidenciando a característica hidrofílica das fibras (FRANCO, 2010; SARAVANAKUMAR *et al.*, 2013).

A maior perda de massa aconteceu na segunda etapa de degradação onde cerca de 69,9% da massa da fibra de babaçu foi perdida, sendo registrado na faixa de 205° a 382°C. A 382 °C iniciou-se a terceira etapa de degradação da fibra de babaçu. Esta etapa terminou em 564 °C devido à degradação total da fibra. Os resultados encontrados se amostram bem próximos com os obtidos pelo autor Franco (2010) que explica essa perda de massa é explicado pela decomposição da hemicelulose, lignina e quebra das ligações.

A curva de DTG apresenta que a etapa de degradação ocorreu de forma rápida, comparando com a primeira etapa, essa etapa de degradação da fibra de babaçu é responsável pela degradação dos principais constituintes das FNLs (SEKI *et al.*, 2013). Na curva DTG, podemos verificar três picos principais ao decorrer da análise. O primeiro pico ocorreu em 37,8 °C, temperatura onde se inicia o processo de degradação das fibras de babaçu. O segundo pico foi observado a 287,8 °C, seguido pelo terceiro pico a 346,2 °C. Esses picos referem-se ao segundo estágio de degradação na curva TGA e são mais intensos à medida que ocorre uma aceleração da degradação da fibra devido à perda da hemicelulose e das ligações glicosídicas da celulose que pode ser explicado pela degradação dos constituintes como a hemicelulose e as ligações glicosídicas da celulose (INDRAN; RAJ; SREENIVASAN, 2014). O último pico de degradação, presente na terceira etapa de degradação da fibra, está localizado em 557,5 °C, este pico indica a degradação final da fibra de babaçu e sua completa transformação em cinza após o teste., que pode ser explicado pela perda dos constituintes celulose I e α -celulose (LAVOR; FERNANDES; SOUSA, 2008; VRINCEANU *et al.*, 2013; BHATNAGAR, 2016; LIMA *et al.*, 2019).

4.1.6 Calorimetria Diferencial de Varredura

A análise térmica por calorimetria diferencial de varredura (DSC) utiliza o fluxo de calor para realizar transformações térmicas nos materiais em função da variação da temperatura, a análise permite observar as etapas de absorção de energia (endotérmicos) ou liberação de energia (exotérmicos). As fibras de babaçu foram analisadas e os dados obtidos no procedimento estão representados na Figura 4.7.

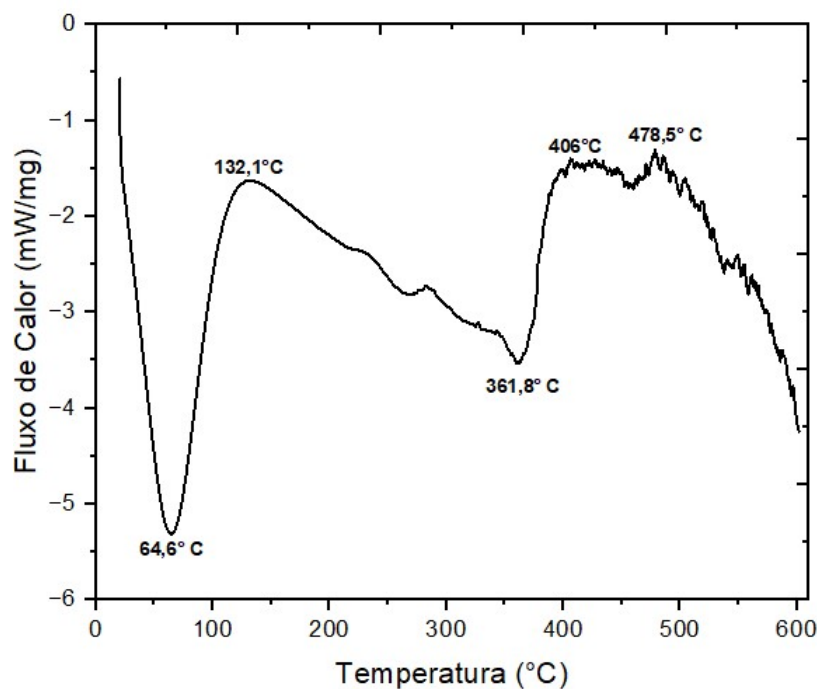


Figura 4.7 – Curva DSC para as fibras de babaçu.

Fonte: Próprio Autor.

A Figura 4.7 mostra a curva DSC da fibra de babaçu seguida dos dados obtidos na Tabela 4.6. A curva DSC apresenta um pico endotérmico a 67,8 °C associado à perda de água na fibra por vaporização, corroborando os resultados do TGA, Figura ??, que indicam uma perda de massa referente à remoção de água e umidade antes de 100 °C (SEKI *et al.*, 2013). Observa-se a presença de três picos de caráter exotérmico associados à degradação de celulose, hemicelulose e lignina. O primeiro pico exotérmico em 132,1. °C pode estar relacionado à decomposição da lignina e parte da degradação da celulose I. O segundo pico exotérmico é observado a 406 °C, esta reação exotérmica está associada à degradação dos constituintes da hemicelulose e à decomposição da α -celulose (VRINCEANU *et al.*, 2013). O terceiro pico exotérmico ocorre em torno de 478,5 °C e está relacionado à degradação final da lignina e da celulose (SILVEIRA *et al.*, 2022).

Tabela 4.6 – Resultados da análise DSC das fibras de babaçu.

Temperatura de pico (°C)	Natureza do Pico
64,6	Endotérmico
132,1	Exotérmico
361,8	Endotérmico
406	Exotérmico
478,5	Exotérmico

Fonte: Próprio Autor.

4.1.7 Difração de Raios X

A Difração de Raios X é uma técnica muito importante para o estudos das FNLs, pois através delas é possível obter algumas propriedades mecânicas e características das fibras, dentre elas destacam-se o índice de cristalinidade e ângulo microfibrilar. O índice de cristalinidade e o teor de celulose estão diretamente relacionados, pois esse constituinte é a única parte cristalina nesses materiais e quanto maior os seus valores, maiores serão as suas propriedades mecânicas.

O ângulo microfibrilar é um indicador de melhorias das propriedades da fibra natural e seu índice de propriedades são influenciadas por diversos parâmetros, como ângulo é influenciado por diversas características da planta como a idade da planta, pois as plantas com pouca idade necessitam de maiores flexibilidades para que o tronco se curve com o vento sem quebrar. O contrário ocorre em árvores velhas onde é necessária uma maior rigidez para que a árvore suporte o aumento de peso do caule e copa (PAGE *et al.*, 1972; REIS *et al.*, 2019). As análises das propriedades da fibra são obtidas através da análise e tratamento do difratograma gerado, a Figura 4.8 apresenta o difratograma para as fibras de babaçu in natura.

A Figura 4.8 apresenta o difratograma obtido na análise da fibra de babaçu in natura onde o padrão de difração obtido após a análise apresentou similaridade com o padrão de difração de outras fibras, sendo essa característica comum para as FNLs por conta de sua constituição. A determinação das propriedades cristalinas das fibras de babaçu, só é possível através do Software Origin Pro, onde os dados referentes ao padrão de difração da fibra de babaçu. Para identificar a ficha cristalográfica referente ao difratograma obtido da análise foi utilizado o Software High Score Plus, juntamente com o uso da ficha cristalográfica 00-056-1718 (Celulose beta), a indexação dos picos apresentados pode ser observada na Figura 4.9.

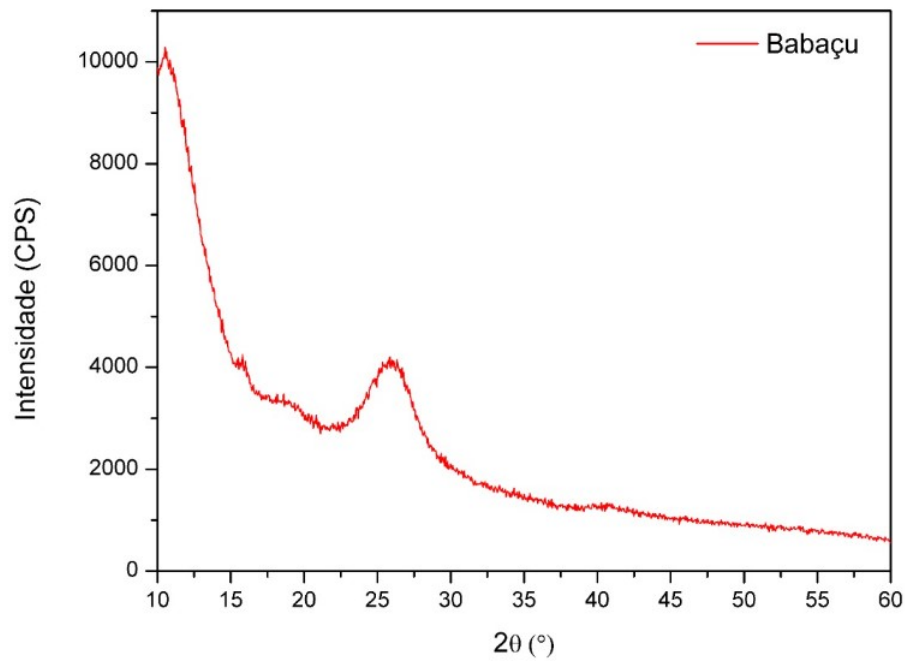


Figura 4.8 – Difratoograma de fibras de babaçu in natura.

Fonte: Próprio Autor.

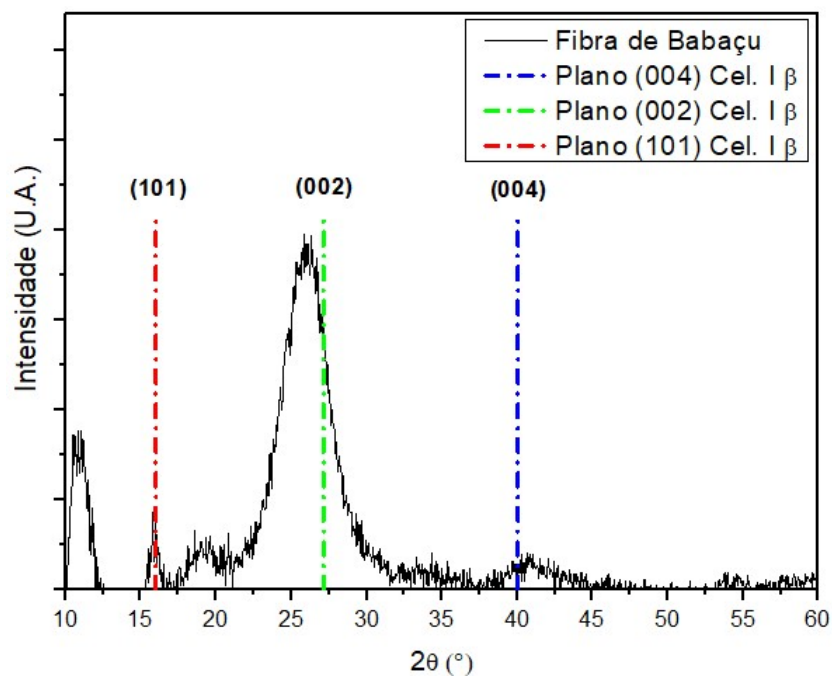


Figura 4.9 – Difratoograma das fibras de babaçu indexado pela ficha de celulose I β .

Fonte: Próprio Autor.

As fibras de babaçu apresentam comportamento semicristalino, igual a outras FNLs, ressaltando os planos (101), (200) e (004) listados pela ficha cristalográfica da celulose I β (REIS *et al.*, 2019). Após realizar o tratamento e análise conforme apresentado na Figura 4.9, o difratograma apresenta os picos referentes aos listados pela ficha cristalográfica da

celulose I β , e utilizando as intensidades apresentadas pelos picos referentes aos planos (101) e (200) foi determinado o índice de cristalinidade (I_c) das fibras de babaçu.

Tabela 4.7 – 2θ e intensidade dos planos 101 e 200.

Planos	2θ	Intensidade (CPS)
101	16°	429,56
200	$25,15^\circ$	1974,71

Fonte: Próprio Autor.

Utilizando os dados apresentados na tabela 4.6 podemos encontrar para as fibras de babaçu um índice de cristalinidade (I_c) de 78,25%, para o cálculo foi utilizada a Eq. 3.6, o utilizando a intensidade 429,56 cps referente ao plano (101) referente ao pico situado em $2\theta = 16^\circ$ é relacionado aos constituintes amorfos da fibra. A celulose parte cristalina presente na fibra é caracterizada pelo plano (200) que apresenta intensidade de 1974,71 cps, referente ao pico situado em $2\theta = 25,02$.

Os dados encontrados para o índice de cristalinidade para as fibras de babaçu se apresentam similaridade com os encontrados com outras FNLs, de acordo com dados apresentados por diversos pesquisadores (SATYANARAYANA; ARIZAGA; WYPYCH, 2009; DEMOSTHENES *et al.*, 2020; JUNIO, 2020; NEUBA, 2020).

Para obter o ângulo microfibrilar (AMF) foi utilizado o difratograma da fibra de babaçu in natura e tomado o plano (200) referente ao plano cristalino da fibra, e com a utilização do Software Origin Pro, foi possível calcular o ângulo microfibrilar (AMF) da fibra de babaçu. Analisando a Figura 4.9 é possível observar que o pico associado ao plano (200) apresenta maior intensidade, sendo o característico da fase cristalina (celulose), e utilizado como referência para o obter o AMF (SEGAL *et al.*, 1959; DONALDSON, 2008). A fibra de babaçu obteve um ângulo microfibrilar de $7,64^\circ$, o valor obtido é baixo, assim podendo indicar boas propriedades apresentadas pela fibra de babaçu, sendo similares a outras FNLs como as fibras de guaruman, curauá e cânhamo, carnaúba, junco-sete-ilhas e caranã (SATYANARAYANA; ARIZAGA; WYPYCH, 2009; REIS *et al.*, 2019; JUNIO *et al.*, 2022; SOUZA, 2020).

4.1.8 Microscopia Eletrônica de Varredura

As fibras naturais lignocelulósicas apresentam algumas características que às tornam tão diferentes entre si, sendo o fator responsável por essa diferença e pela elevada variabilidade de suas propriedades. Diversos autores abordam sobre a variabilidade das propriedades mecânicas apresentadas pelas FNLs em relação a morfologia de sua superfície obtidas por microscopia por elas, destacando a rugosidade superficial, variação diametral e

concentração de defeitos. A associação entre as propriedades mecânicas e as características microscópicas, podem ser observadas nas imagens geradas por microscopia eletrônica de varredura (MONTEIRO *et al.*, 2009; DEMOSTHENES *et al.*, 2020; REIS *et al.*, 2019; JUNIO *et al.*, 2022). Buscando encontrar as características relacionadas a superfície das fibras de babaçu, foi utilizado a análise por microscopia eletrônica de varredura. Os resultados obtidos da seção transversal da fibra de babaçu são apresentadas na Figura 4.10.

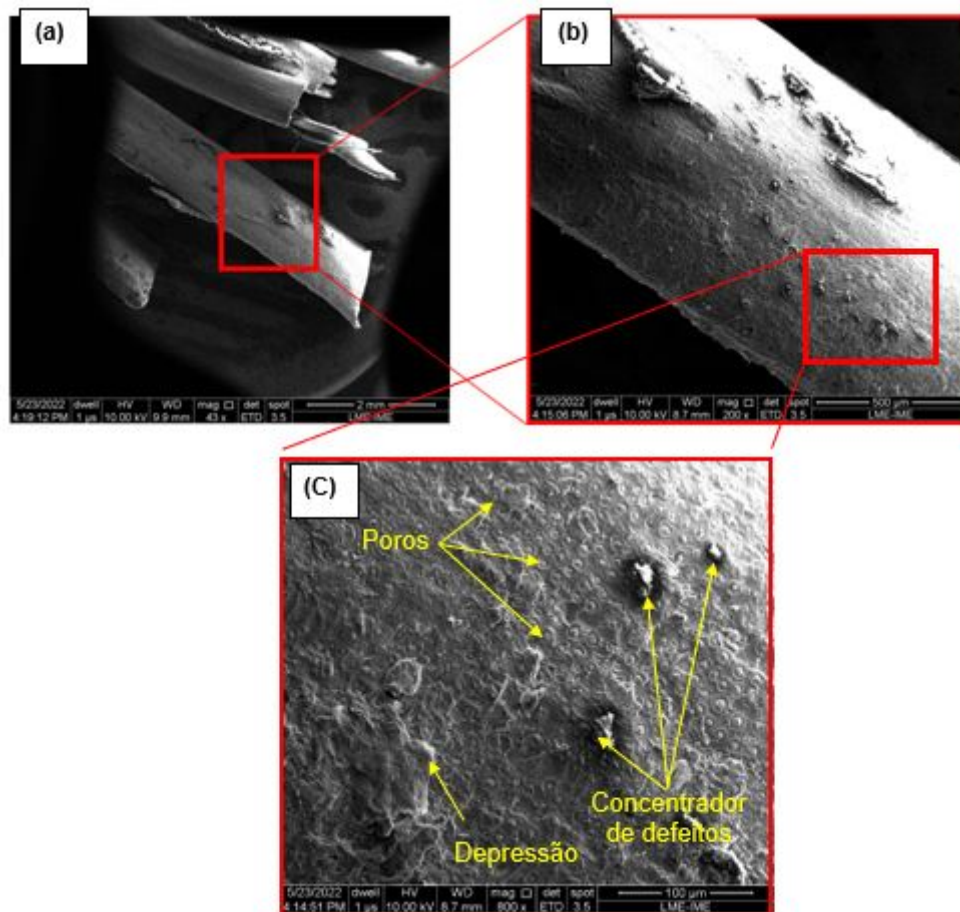


Figura 4.10 – Micrografia da superfície longitudinal das fibras de babaçu. (a) 43x e (b) 200x; (c) 800x.

Fonte: Próprio Autor.

A Figura 4.10 apresenta as micrografias das superfícies das fibras de babaçu em diferentes ampliações. Pode se observar na Figura 4.8 (c) a presença de porosidade superficial que se estende por toda o comprimento útil da fibra de babaçu, a superfície da fibra não apresenta rugosidade nas micrografias obtidas. Também são observados defeitos superficiais presentes na fibra, podemos observar uma depressão superficial, também é possível observar alguns concentradores de defeitos. Alguns autores citam que os defeitos superficiais são características pertinentes nas FNLs, e por conta desse fator observa-se uma redução significativa das propriedades mecânicas das fibras naturais (MONTEIRO *et al.*, 2009; SATYANARAYANA *et al.*, 2011; REIS *et al.*, 2019).

4.1.9 Ensaio de Tração

As características mecânicas das Fibras Naturais Lignocelulósicas (FNLs) são influenciadas por vários fatores, como discutido anteriormente. Entre esses elementos, destacam-se o ângulo microfibrilar, índice de cristalinidade, morfologia superficial e constituintes presentes. No contexto da aplicação destas fibras naturais lignocelulósicas em compósitos, as propriedades da fibra desempenham um papel crucial na determinação de sua adequação para diferentes usos. Portanto, a análise das propriedades mecânicas das fibras de babaçu é de suma importância, pois fornece informações essenciais para identificar aplicações ideais para essas fibras. Os ensaios de tração foram conduzidos nas fibras e os resultados estão apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Propriedades mecânicas da fibra de babaçu.

Intervalo do diâmetro	Resistência à tração máxima (MPa)	Deformação máxima (%)	Módulo de elasticidade (GPa)
0,15 – 0,19	100,76 ± 10,18	1,59 ± 0,16	6,33 ± 0,64
0,19 – 0,25	76,41 ± 7,72	2,98 ± 0,30	2,56 ± 0,26
0,25 – 0,31	47,61 ± 5,32	2,05 ± 0,20	2,32 ± 0,23
0,31 – 0,36	31,18 ± 3,15	1,08 ± 0,11	2,87 ± 0,29
0,36 – 0,41	24,97 ± 2,52	1,94 ± 0,20	1,28 ± 0,13
0,41 – 0,47	17,96 ± 0,61	1,56 ± 0,15	1,15 ± 0,11

Fonte: Próprio Autor.

Os resultados do teste de tração (Resistência à tração, módulo de elasticidade e alongamento) com base na ASTM-D3379 são mostrados na Tabela 4.8 e na Figura 4.11. As propriedades mecânicas dos NLFs são influenciadas por vários fatores, como o ângulo das microfibrilas, índice de cristalinidade, morfologia da superfície e os constituintes presentes. Ao selecionar um NLF para aplicação de compósito polimérico, esses fatores devem ser levados em consideração. Os resultados na Figura ?? indicam que a redução do diâmetro da fibra do babaçu provoca um aumento na resistência à tração. A faixa de diâmetro 0,15 – 0,19 mm exibiu valores de resistência à tração de 100,76 ± 10,18 MPa, valor superior à faixa de 0,41 – 0,47 mm, que obteve o menor valor médio de resistência à tração: 17,96 ± 0,61 MPa. Os intervalos intermediários de diâmetro apresentaram valores de UTS tendendo a aumentar à medida que o diâmetro das fibras de babaçu diminuiu.

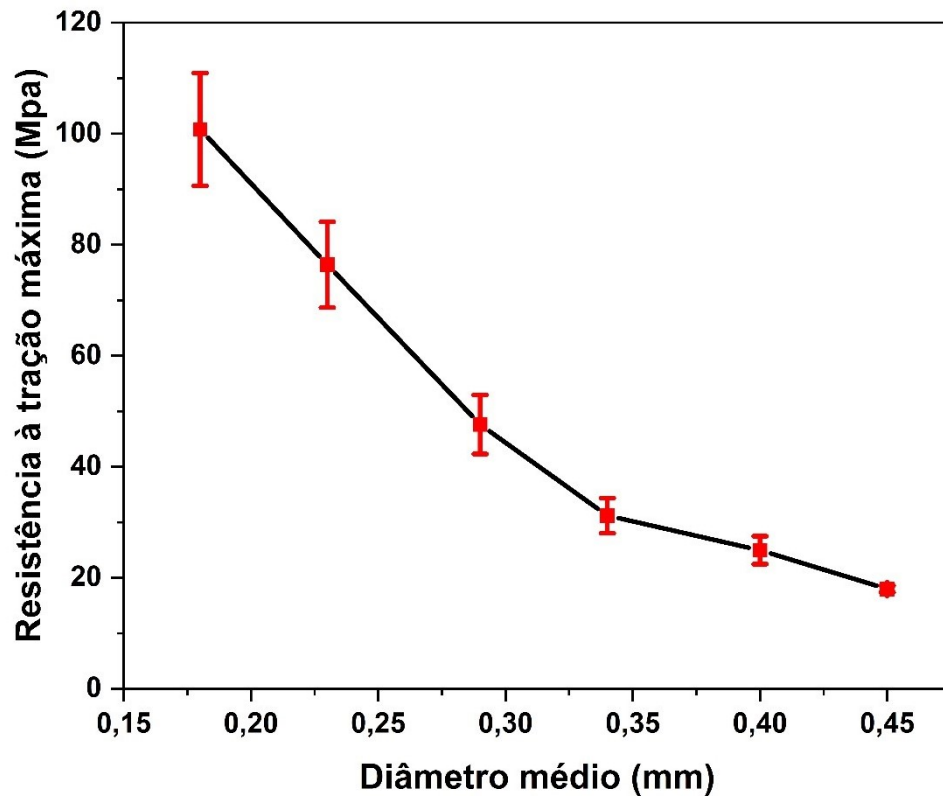


Figura 4.11 – Resistência à tração máxima em função do diâmetro médio das fibras de babaçu.

Fonte: Próprio Autor.

Na Figura 4.11, é perceptível um aumento notável na resistência à tração máxima à medida que o diâmetro diminui. Conforme explicado por Monteiro *et al.* (2010), esse fenômeno pode ser compreendido pela diminuição dos defeitos internos nas fibras mais finas.

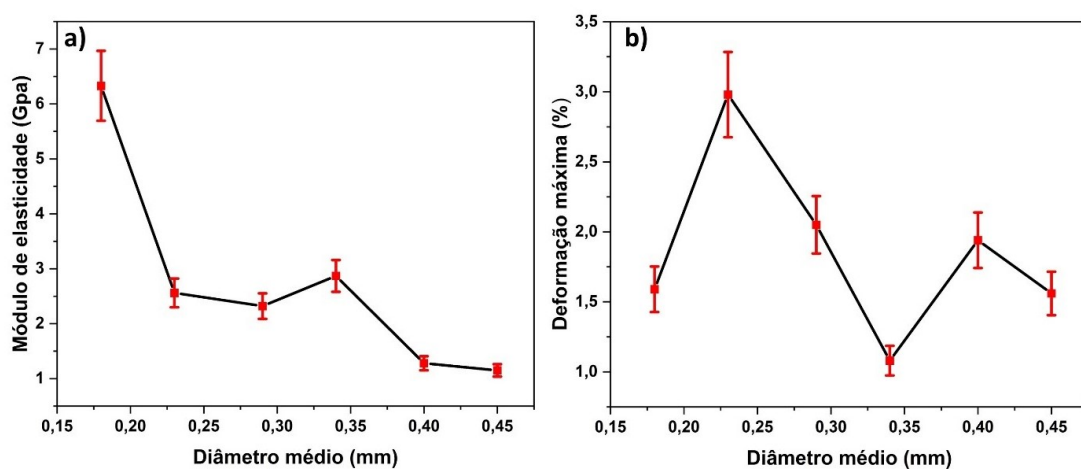


Figura 4.12 – Propriedades mecânicas em função do diâmetro médio das fibras de babaçu. (a) Módulo de elasticidade, (b) deformação máxima.

Fonte: Próprio Autor.

Os resultados do módulo de elasticidade representados na Figura 4.12 indicam uma tendência de redução em função do aumento do diâmetro das fibras. Mas apenas no intervalo 0,36–0,41 mm é mostrado um aumento no módulo de elasticidade das fibras ($2,87 \pm 0,29$ GPa). Como o módulo de elasticidade está diretamente relacionado ao alongamento do material, uma variação no módulo de elasticidade resulta em mudanças bruscas no alongamento do babaçu.

A explicação para esse fato reside no intervalo de variação do diâmetro médio da fibra de babaçu, que demonstrou a menor deformação máxima. O módulo de elasticidade, intrinsecamente ligado à deformação do material, apresentou, assim, um aumento súbito. A subsequente queda pode ser atribuída ao aumento da deformação, sendo que o intervalo de variação de diâmetro entre 0,18 mm e 0,23 mm exibiu o maior módulo de elasticidade. Este acontecimento pode ser compreendido pela característica desse intervalo em ter a segunda menor deformação máxima, resultando em uma notável resistência à tração máxima.

O valor máximo encontrados para a tração das fibras de babaçu no intervalo de menor diâmetro encontrado foi de $100,76 \pm 10,18$ MPa, em relação a seu módulo de elasticidade máxima a fibra obteve um valor de $6,33 \pm 0,64$ GPa, em relação a deformação máxima obteve um valor de $2,98 \pm 0,30$ %. A comparação entre os resultados da fibra de babaçu obtidas no presente trabalho com a literatura estão representadas na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Fibras de babaçu em comparação com outras FNLs

FNLs	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação máxima (%)	Referências
Coco	135	5	-	Monteiro et al., (2011)
Sisal	478	19	-	
Juta	597	20	-	
Babaçu	23,70	2,13	1,27	Andrade e Nóbrega.,(2009)
Babaçu	63,1	-	-	Santos et al.,(2010)
Babaçu	100,76	6,33	2,98	PT*

*PT – Presente trabalho.

Fonte: Próprio Autor.

Os dados de tração da fibra de babaçu foram submetidos a uma análise estatística utilizando o modelo de Weibull. Esta análise possibilitou a avaliação da confiabilidade das amostras, sendo que valores de R^2 superiores a 0,9 indicam uma qualidade significativa para o ajuste linear.

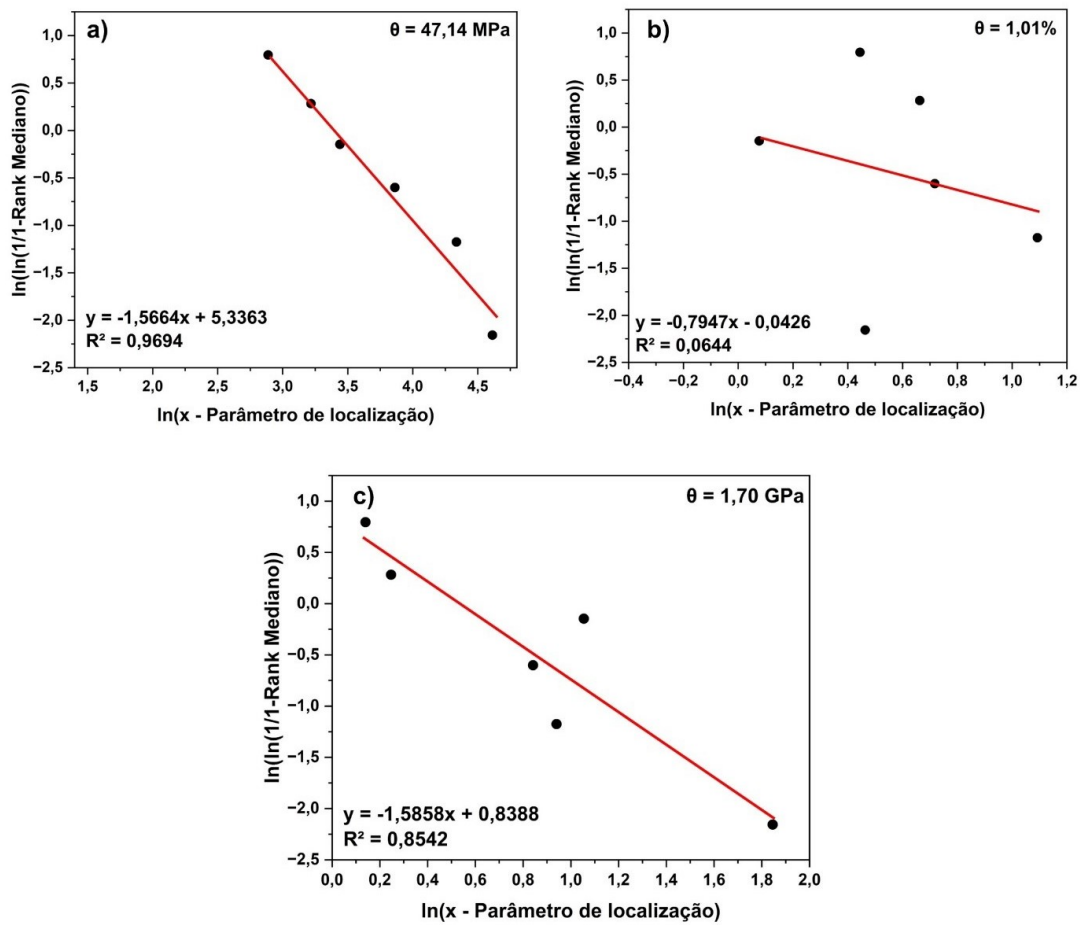


Figura 4.13 – Análise estatística Weibull para: (a) Resistência à tração (b) Deformação; (c) Módulo de elasticidade.

Fonte: Próprio Autor.

A análise dos valores da resistência à tração na Fig. 4.13 (a) mostra um valor R^2 de 0,9694, e também mostra uma baixa dispersão. Os gráficos desta figura também mostram o mesmo comportamento discutido na seção anterior, como o valor das propriedades aumenta com a diminuição do diâmetro. Em outras palavras, pode-se dizer que quanto mais fina for a fibra, melhor será o resistência à tração. Os valores de β e R^2 mantêm estatisticamente o inverso do valor apresentado no coeficiente B da função gerada em cada gráfico (β) com o valor característico máximo para cada propriedade analisada (θ) (NAIK; FRONK, 2016). Assim, foi encontrada correlação de uma equação com a função matemática de acordo com a análise dos gráficos para ajuste dos valores. Para os valores de deformação e módulo de elasticidade apresentaram um valor R^2 abaixo de 0,90, o que significa que os valores atípicos ou padrões não lineares nos dados podem afetar a qualidade do ajuste linear proposto pela análise de Weibull. A detecção e tratamento adequado desses elementos são essenciais para melhorar a confiabilidade do modelo (PIRES; CALEGARIO, 2007).

Para o resistência à tração, o valor máximo (θ) calculado através da análise de

Weibull foi de 47,14 MPa. O valor médio apresentado em $49,82 \text{ MPa} \pm 30$ obtido pela análise de média será justificado pelo ajuste de precisão (R^2) que foi realizado na análise. O valor máximo do módulo de elasticidade característico foi de 1,70 GPa, comparado à média encontrada nos intervalos de $2,75 \text{ GPa} \pm 1,72$ com desvio padrão maior. A deformação média característica encontrada de 1,01% comparada à média dos intervalos de $1,87\% \pm 0,57$ apresentou pequena dispersão, o que é explicado pela baixa precisão de ajuste encontrada.

4.2 Caracterização dos Compósitos

4.2.1 Caracterização por FTIR

Os compósitos, os quais incluem porcentagens de 0%, 10%, 20% e 30% de volume de fibra de babaçu, juntamente com a resina DGEBA-TETA, foram submetidos à análise por FTIR. Os espectros resultantes dessa análise estão representados na Figura 4.14.

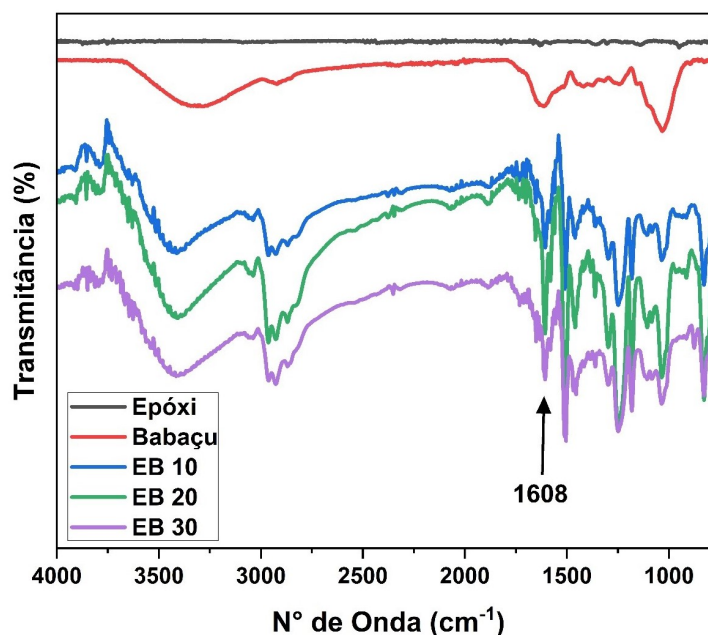


Figura 4.14 – Espectros de FTIR gerados para fibra, resina e compósitos epóxi/fibras de babaçu.

Fonte: Próprio Autor.

Ao analisar a Figura 4.14, é possível realizar uma comparação entre os espectros da resina epóxi, das fibras de babaçu e dos compósitos epóxi-fibra. Essa comparação é realizada através da identificação das bandas de absorção associadas aos constituintes lignocelulósicos presentes nas fibras de babaçu, as quais também estão evidenciadas nos espectros obtidos durante a análise FTIR dos compósitos. A banda distintiva de 1608 cm^{-1} , relacionada ao estiramento das ligações $\text{C}=\text{O}$ de grupos funcionais (como ácidos

carboxílicos, alifáticos e cetonas), é identificada, sugerindo a possível presença de lignina e hemicelulose nestes componentes (ABRAHAM *et al.*, 2011; REIS *et al.*, 2019; TAVARES *et al.*, 2020). Importante notar que essa banda não é significativamente absorvida no espectro da matriz epóxi, indicando a possível correlação com a presença de constituintes lignocelulósicos aderidos à matriz.

A Figura 4.15 destaca a banda em 1608 cm^{-1} , mostrando os espectros de fibras de babaçu, resina epóxi e compósitos com 10%, 20% e 30%. Essa análise oferece uma compreensão detalhada das características vibracionais, permitindo a avaliação das interações entre os componentes. A identificação e comparação dos espectros são cruciais para entender a influência dos diferentes teores de compósito na estrutura molecular e nas propriedades resultantes.

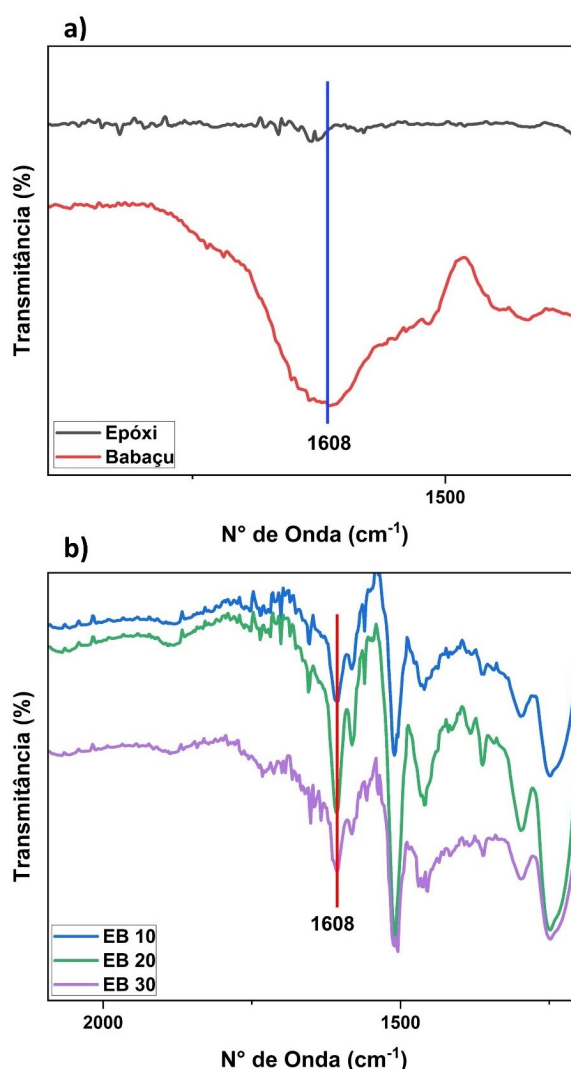


Figura 4.15 – Banda de absorção em 1608 cm^{-1} . (a) Fibras de babaçu e epóxi e (b) Compósitos nas frações de 10, 20, 30% em volume de fibras.

Fonte: Próprio Autor.

Observando atentamente a Figura 4.15, é evidente que à medida que a proporção de fibras de babaçu na matriz epóxi aumenta, ocorre um incremento na absorção relativa na banda de 1608 cm^{-1} . Este padrão de comportamento assemelha-se ao apresentado pelas próprias fibras, indicando uma correlação significativa entre a composição do compósito e as características espectrais observadas. Esse fenômeno sugere uma influência direta da quantidade de fibras de babaçu na resposta vibracional da matriz epóxi, destacando a sensibilidade do material compósito às variações na concentração de fibras (SOUZA *et al.*, 2009).

4.2.2 Análise Termogravimétrica

Os compósitos de epóxi/fibras de babaçu, juntamente com a resina epóxi, foram submetidos a ensaios térmicos de Termogravimetria (TG) e Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC), com o objetivo de obter informações abrangentes sobre o comportamento térmico desses materiais. As curvas resultantes desses ensaios térmicos são representadas na Figura 4.16, fornecendo uma análise detalhada das propriedades térmicas dos compósitos estudados.

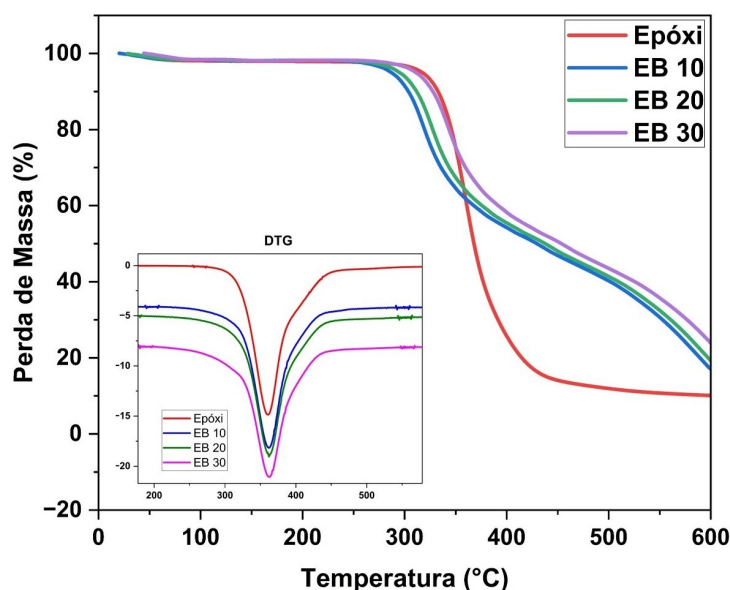


Figura 4.16 – Curvas TG para os compósitos epóxi/fibras de babaçu.

Fonte: Próprio Autor.

Ao analisar a Figura 4.16, observa-se que a perda de massa para a resina epóxi DGEBA-TETA é bastante reduzida, totalizando aproximadamente 1,09% até a temperatura de 290°C . Esse fenômeno pode ser atribuído, em parte, à escassez de umidade nas resinas poliméricas sintéticas e à sua natureza intrinsecamente hidrofóbica. A expressiva diminuição de massa ocorre até a temperatura de $344,74^{\circ}\text{C}$, associado diretamente à degradação e ruptura das cadeias poliméricas, atingindo uma perda significativa de 85,02%. Uma terceira

fase do processo térmico emerge na faixa de temperatura entre 425 e 600°C, resultando em uma proporção de cinzas final de aproximadamente 11,13%. Este último estágio é crucial para compreender a estabilidade térmica e a resistência ao calor da resina epóxi DGEBA-TETA, destacando a presença residual de componentes inorgânicos após as etapas anteriores de degradação e volatilização. A tabela 4.10 apresenta todos os eventos térmicos ocorridos na Figura 4.16.

Tabela 4.10 – Parâmetros termogravimétricos da resina epóxi e dos compósitos reforçados com fibras babaçu.

Amostras	EP	10	20	30
Perda de massa após 200 °C (%)	2,1	1,79	1,77	1,82
T. de início de degradação (°C)	325,54	305,03	316,31	323,85
T. máxima taxa de degradação(°C)	434,31	370,60	368,99	385,51
Perda de massa após segundo estágio (%)	87,36	53,70	55,68	57,41
Perda de massa até 600°C (%)	90,11	83,22	82,89	79,17

Fonte: Próprio Autor.

O aumento na proporção de fibra de babaçu resulta no retardamento do início da degradação do material, uma vez que a resina epóxi apresenta uma temperatura de início de degradação de 325,54 °C. No entanto, quando incorporada em um compósito com 10% de fração volumétrica de fibra de babaçu, a temperatura de início de degradação é reduzida para 305,03 °C, sendo que a temperatura é de 323,85 para o compósito contendo 30% de fração volumétrica de babaçu. A temperatura máxima de degradação da resina epoxi é atingida a 434,31°C, enquanto que no compósito contendo 10% de fração volumétrica, esse ponto é alcançado a 370,60°C, e de 385,51°C para o compósito contendo 30% de fração volumétrica de babaçu.. Esse fenômeno sugere que a presença da fibra de babaçu exerce uma influência significativa no ponto em que a degradação térmica se inicia, proporcionando assim uma maior estabilidade térmica ao compósito (NASCIMENTO *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2021).

Em relação à perda de massa do material, observa-se que, após atingir 200°C, a resina epóxi apresenta uma redução de 2,1% em sua massa. Por outro lado, o compósito com adição de fibra de babaçu registra uma perda menor, atingindo 1,79% de massa perdida. No caso do compósito contendo 10% de adição volumétrica, a perda de massa é de 1,82%, e para o compósito com 30% de fração volumétrica de fibra de babaçu. A adição da fibra de babaçu revela uma influência significativa na capacidade do compósito resistir à perda de massa, conferindo-lhe uma notável estabilidade térmica quando contrastada

com a resina epóxi em sua forma pura (DEMOSTHENES *et al.*, 2020; SILVA *et al.*, 2021; SUTRISNO; RAHAYU; ADHIKA, 2019).

A perda de massa até 600°C para o epóxi é de 90,11%, enquanto nos compósitos contendo diferentes frações de fibra de babaçu, essa variação é observada, atingindo 83,22% para o compósito com 10% de fibra e 79,17% para o compósito com 30% de fibra. Este cenário destaca a influência significativa da adição de fibra de babaçu na estabilidade térmica do compósito, conferindo-lhe maior resistência à perda de massa. Esse resultado sugere que a presença da fibra de babaçu desempenha um papel crucial ao proporcionar uma resistência adicional à degradação térmica, fortalecendo assim a estabilidade do compósito em temperaturas elevadas (SILVA *et al.*, 2021).

4.2.3 Análise de Calorimetria Diferencial de Varredura

Na Figura 4.17, é evidenciado o comportamento térmico da resina epóxi, bem como dos compósitos epóxi-fibra, nos quais o reforço varia entre 10% e 30% em volume de fibras de babaçu. Estes materiais foram submetidos ao ensaio de DSC para a análise de suas propriedades térmicas.

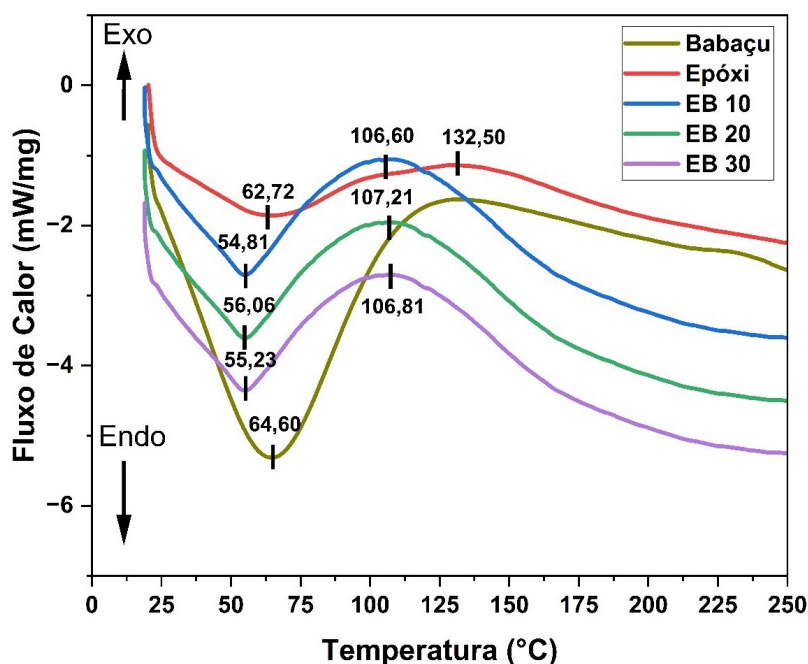


Figura 4.17 – Curva DSC para resina epóxi DGEBA/TETA, fibra de babaçu e os compósitos epoxídicos reforçados com 10, 20 e 30% de reforço fibras de babaçu.

Fonte: Próprio Autor.

Ao analisar a Figura 4.17, torna-se possível observar os picos endotérmicos, notavelmente a 62,72°C para a resina epóxi, enquanto nos compósitos com reforço de fibras de babaçu, esses picos variam de 54,81°C a 56,06°C. Este pico está associado à perda de

umidade na resina epóxi. No entanto, nos compósitos com reforço de fibras de babaçu, a degradação ocorre em temperaturas inferiores às da resina, devido à perda precoce de umidade nesses materiais compósitos (SILVA *et al.*, 2021).

Na análise da Figura 4.17, destacam-se picos exotérmicos observados a uma temperatura de 132,50 °C para a resina epóxi. Por outro lado, nos compósitos com reforço de fibra de babaçu, esses picos ocorrem entre 106°C e 108°C. Esses eventos exotérmicos, registrados entre as temperaturas de 119°C a 122,9°C, podem ser associados a um processo de pós-cura do material. Notavelmente, o tempo de cura desses compósitos é inferior ao da resina epóxi pura. Nascimento *et al.* (2019) explicam que as fibras naturais atuam como catalisadores para a reação de cura, retardando assim o tempo de cura do material.

4.2.4 Ensaio de Impacto Izod

O principal objetivo do ensaio de impacto é determinar a dureza do material, a capacidade dinâmica de absorver energia. Esta capacidade de suportar cargas dinâmicas é conhecida como resistência ao impacto (MAOU *et al.*, 2023). A Tabela 4.11 compara a resistência ao impacto Izod entalhado entre a amostra de resina epóxi pura e os compósitos de epóxi, reforçados com até 30 vol% de fibras de babaçu.

Tabela 4.11 – Resultados do ensaio de impacto Izod para a resina epóxi e os compósitos reforçados com fibra de babaçu.

Amostras	Energia absorvida (J/m)			
	0%	10%	20%	30%
1	22,05	25,42	45,02	51,97
2	24,96	28,47	49,82	69,25
3	28,01	48,21	54,29	56,14
4	21,06	39,24	42,02	67,41
5	31,48	37,51	59,25	59,52
6	20,88	36,24	58,25	56,14
7	29,41	42,87	56,7	71,78
8	23,84	45,74	61,33	68,03
Média	24,40	38,38	55,50	63,47
Des. Pad	4,01	7,94	7,02	7,44

Fonte: Próprio Autor.

Ao analisar as informações provenientes do ensaio de impacto Izod constados na Tabela 4.11, nota-se uma aumento na energia absorvida proporcional ao incremento na quantidade volumétrica de reforço das fibras de babaçu. Simultaneamente, é possível identificar um acréscimo no desvio padrão em relação aos valores associados a cada fração apresentada. A fim de aprimorar a compreensão dos dados disponíveis na Tabela 4.11, foi

gerado um gráfico que representa o comportamento da energia média absorvida em relação à fração de fibras de babaçu presente nos compósitos, conforme ilustrado na Figura 4.18.

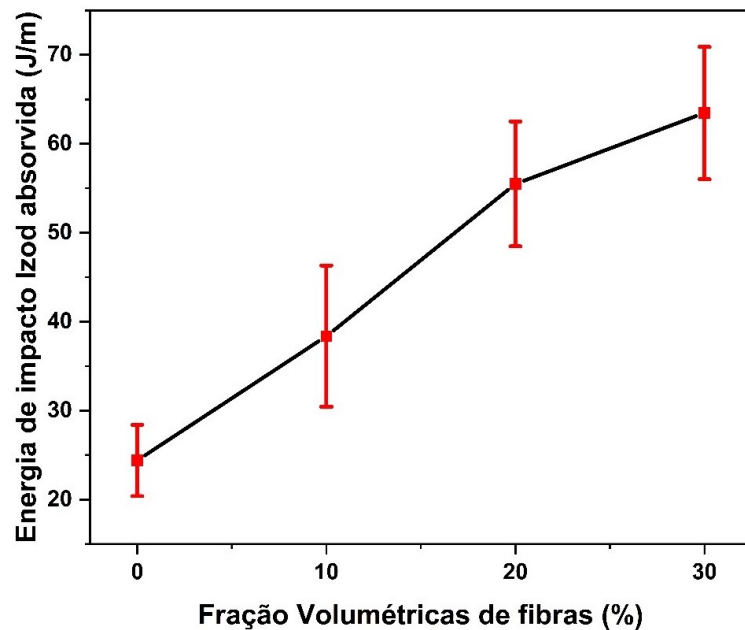


Figura 4.18 – Energia de impacto Izod versus fração volumétrica de fibras de babaçu.

Fonte: Próprio Autor.

Pode-se observar que, em comparação com os compósitos de 10% e 20%, a amostra contendo 30 vol% de fibra de babaçu apresentou maior capacidade de absorção de energia, atingindo $62,53 \pm 7,43$ J/m. Esse valor representa um aumento de 17% em relação à amostra com 20% de fibras de babaçu. A total ruptura de todos os corpos de prova submetidos ao ensaio valida de forma consistente os resultados obtidos.

A análise visual dos corpos de prova após o rompimento confirma inequivocamente a ocorrência de fratura frágil para a resina epóxi pura, evidenciada por uma superfície lisa e espelhada, conforme descrito por Callister (2013). Este padrão visual é característico de uma quebra abrupta e sem deformação plástica significativa, indicando a natureza frágil do material. O incremento na energia de impacto proporcional ao aumento da quantidade de fibras de babaçu no compósito pode estar associado a distintos mecanismos de fratura nos compósitos com 10%, 20% e 30% em volume de fibras de babaçu. Para consolidar e aprofundar a compreensão acerca da evolução desses mecanismos de fratura nos materiais testados, as imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das superfícies de fratura das amostras são apresentadas nas Figura 4.19, 4.20 e 4.21.

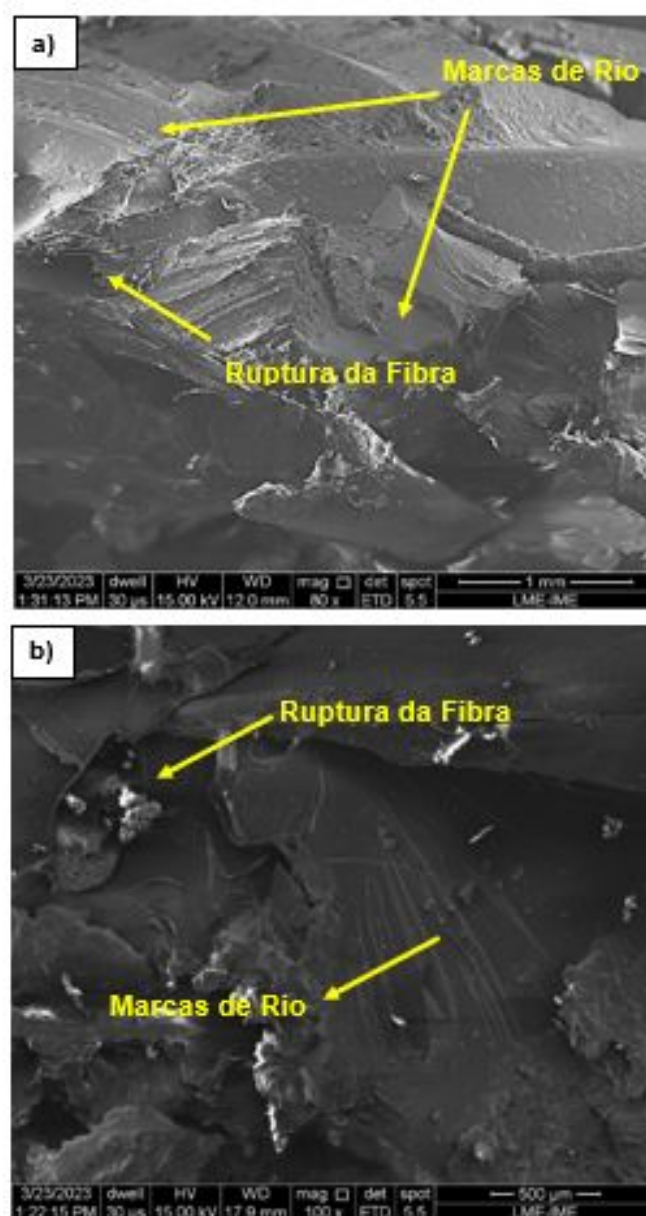


Figura 4.19 – Microscopia eletrônica de varredura das superfícies de fratura do compósito epóxi-fibra com 10% de babaçu: (a) 80x; (b) 100x.

Fonte: Próprio Autor.

Na micrografia do compósito contendo 10% de volume de fibras de babaçu é possível observar o principal mecanismo de fraqueza relacionado a resina epóxi, o mecanismo de fratura frágil, evidenciado pela presença de “marcas de rio” (Figura 4.19(a e b)). Além das marcas de rio é possível notar outros mecanismos de fraturas como a ruptura da fibra (Figura 4.19(a e b)), mecanismo que podem estar relacionado às elevadas energias de impacto apresentadas para essas frações.

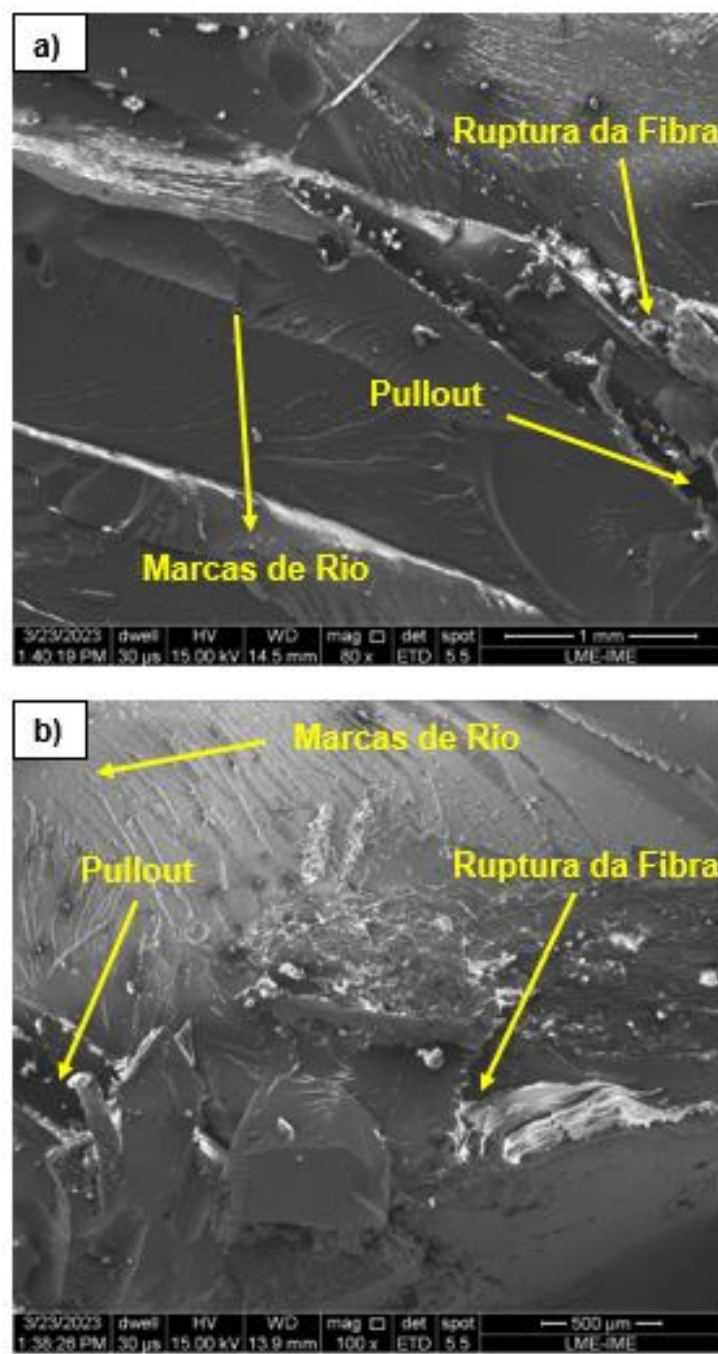


Figura 4.20 – Microscopia eletrônica de varredura das superfícies de fratura do compósito epóxi-fibra com 20% de babaçu. (a) 80x; (b) 100x.

Fonte: Próprio Autor.

Quanto aos compósitos reforçados com 20% de fibras de babaçu, torna-se perceptível uma notável prevalência de mecanismos de fratura envolvendo as fibras, que, por sua vez, exibem sinais evidentes de ruptura e arrancamento (Figuras 4.20(a e b)). Além disso, a presença proeminente das características "marcas de rio" (Figuras 4.20(a e b)) na superfície do compósito destaca o tipo predominante de fratura nas matrizes epoxídicas.

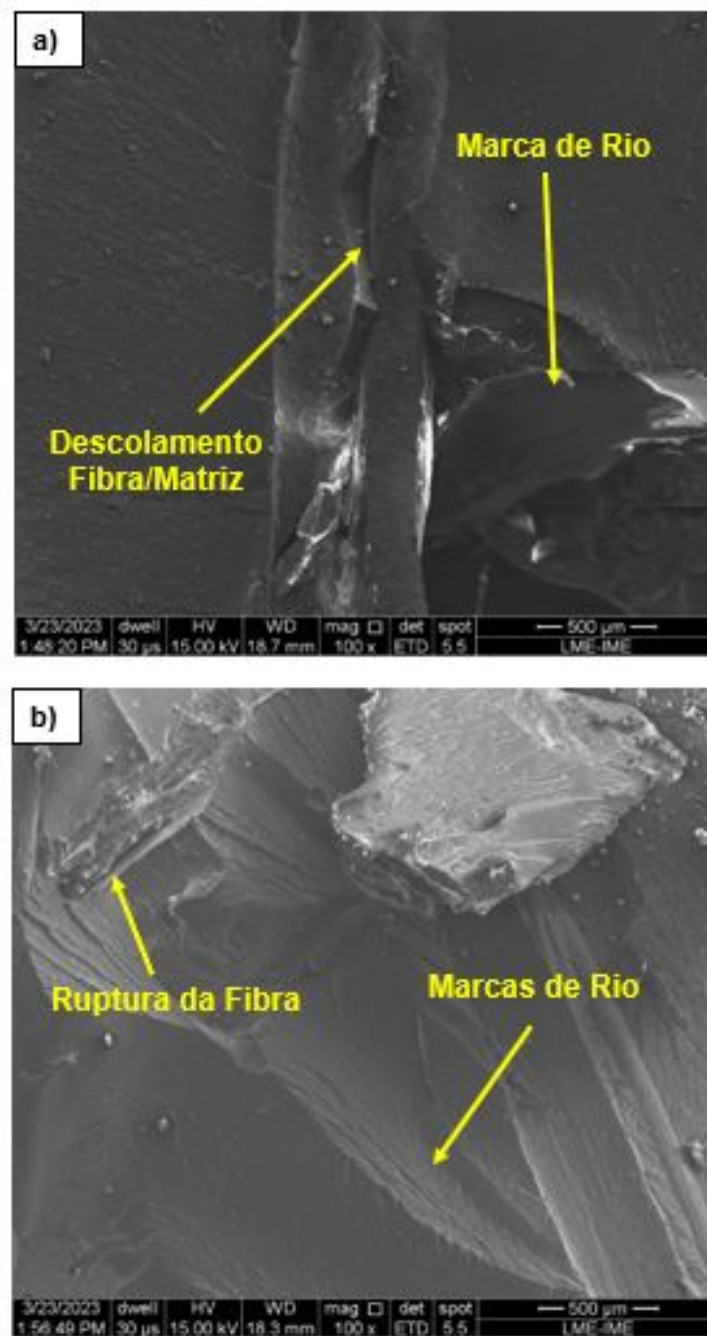


Figura 4.21 – Microscopia eletrônica de varredura das superfícies de fratura do compósito epóxi-fibra com 30% de babaçu. (a) e (b)100x.

Fonte: Próprio Autor.

Na micrografia apresentada na Figura 4.21, são evidenciados os mesmos mecanismos de fratura previamente observados nas Figuras 4.19 e 4.20, tais como a ruptura da fibra (Figura 4.21(b)) e as marcantes "marcas de rio" (Figura 4.21(a e b)). Destaca-se, na Figura 4.21(b), um mecanismo comum em compósitos que possuem elevadas frações volumétricas de reforço das FNLs: a falha na interface matriz/fibra. Este fenômeno é abordado por Ferreira, Nascimento e Monteiro (2018), Costa *et al.* (2019), os quais explicam que o mecanismo de ruptura envolve trincas que se propagam preferencialmente entre a

superfície das FNLs e a matriz epoxídica, devido à baixa resistência interfacial. Essa análise aprofundada dos mecanismos de fratura proporciona uma compreensão mais abrangente do comportamento do compósito frente às cargas mecânicas.

Os resultados do ensaio de impacto Izod foram submetidos à análise de variância (ANOVA) para avaliar a confiabilidade das amostras, abrangendo variações de 0 a 30% em volume de fibra de babaçu. Os resultados desta análise estão detalhadamente apresentados na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Análise ANOVA dos resultados da energia de impacto Izod com compostos contendo reforço de fibra de babaçu.

Causas de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado médio	F_{Calc}	F_{Tab}
Tratamentos	3	6541,31	2180,44	47,46	2,95
Resíduos	28	1286,35	45,91		
Total	31	7827,65			

Fonte: Próprio Autor.

Com base nos resultados da ANOVA apresentados na Tabela 4.12, a hipótese de que os valores médios são iguais é rejeitada a um nível de significância de 5%. De fato, o teste estatístico indicou que o valor calculado de F (47,46) é maior que o valor crítico de F (tabelado) (2,95). Portanto, pode-se concluir que o conteúdo volumétrico das fibras de babaçu nos compósitos de matriz epóxi tem um impacto significativo na energia de impacto Izod. Além disso, o teste de Tukey (Tabela 4.13) foi realizado para comparar as médias, com um nível de confiança de 95%, a fim de determinar qual conteúdo volumétrico de fibras de babaçu fornece os melhores resultados em termos de energia de impacto Izod.

Tabela 4.13 – Teste de Tukey para absorção de energia Izod de compósitos contendo porcentagens de fibra de babaçu.

Energia de impacto Izod (d.m.s = 9,25)			
Amostras	N	Média	Grupo
0 vol%	8	24,20	A
10 vol%	8	38,38	A
20 vol%	8	55,50	B
30 vol%	8	63,47	C

Fonte: Próprio Autor.

Com base nos dados apresentados na Tabela 4.13, a diferença média significativa (d.m.s.) calculado foi de 9,25. Portanto, diferenças maiores que esse valor são consideradas

estatisticamente significativas, indicando que pelo menos 10 vol% de fibras de babaçu devem ser incorporadas para se obter um reforço efetivo em compósitos epóxi-fibra de babaçu. Não houve diferenças significativas nas médias entre as amostras de 0 vol e 10 vol, enquanto as amostras de 20 vol e 30 vol apresentaram diferenças estatisticamente significativas em relação à média.

4.2.5 Ensaio de Tração

Os resultados para os compósitos de matriz epóxi reforçados com diferentes frações volumétricas de fibras de babaçu (0, 10, 20 e 30%) estão detalhadamente apresentados na Tabela 4.14. Essa análise destaca as variações nas propriedades dos compósitos em relação à quantidade de reforço de fibras de babaçu.

Tabela 4.14 – Propriedades mecânicas para resina epóxi e para os compósitos reforçados com fibras de babaçu.

Resistência à Tração (MPa)				
Amostras	0%	10%	20%	30%
1	32,52	34,82	29,47	42,17
2	28,35	37,09	42,03	54,03
3	28,92	28,75	51,89	56,19
4	35,82	42,52	34,89	35,28
5	28,14	27,52	40,89	41,77
6	30,19	40,97	52,72	43,89
7	27,42	36,98	28,17	46,55
8	29,58	27,78	35,44	49,18
Média	30,12	34,55	39,44	46,13
Des. Pad	2,79	5,92	9,28	6,87
Módulo de Elasticidade (GPa)				
Amostras	0%	10%	20%	30%
1	1,92	2,35	2,23	3,08
2	1,62	2,69	3,08	2,87
3	1,77	3,02	2,41	3,05
4	1,89	2,01	2,38	2,71
5	1,65	2,41	2,92	2,88
6	1,87	2,92	2,72	2,65
7	1,85	2,44	2,87	3,32
8	1,76	2,81	3,12	3,02
Média	1,79	2,58	2,72	2,95
Des. Pad	0,11	0,34	0,36	0,22
Deformação total (%)				
Amostras	0%	10%	20%	30%
1	1,27	1,42	1,54	1,67
2	0,87	1,20	1,32	1,72
3	1,15	1,36	1,61	1,74
4	1,34	1,81	1,48	1,81
5	1,22	1,42	1,67	1,52
6	1,41	1,32	1,31	1,65
7	1,11	1,85	1,73	1,82
8	1,37	1,54	1,69	1,64
Média	1,22	1,49	1,54	1,70
Des. Pad	0,14	0,23	0,16	0,10

Fonte: Próprio Autor.

A partir dos resultados adquiridos no ensaio de tração para os compósitos, os quais incluem diferentes frações volumétricas de fibra de babaçu que variam de 0 a 30% de frações volumétricas de fibras, conforme evidenciado na Tabela 4.14, foi plotado um gráfico (Figuras 4.22, 4.23 e 4.24) que exibe as curvas correspondentes aos valores de resistência à tração, módulo de elasticidade e deformação. Esse gráfico proporciona uma representação visual abrangente das propriedades mecânicas dos compósitos em relação às variações na quantidade de fibras de babaçu, permitindo uma análise mais aprofundada do comportamento do material.

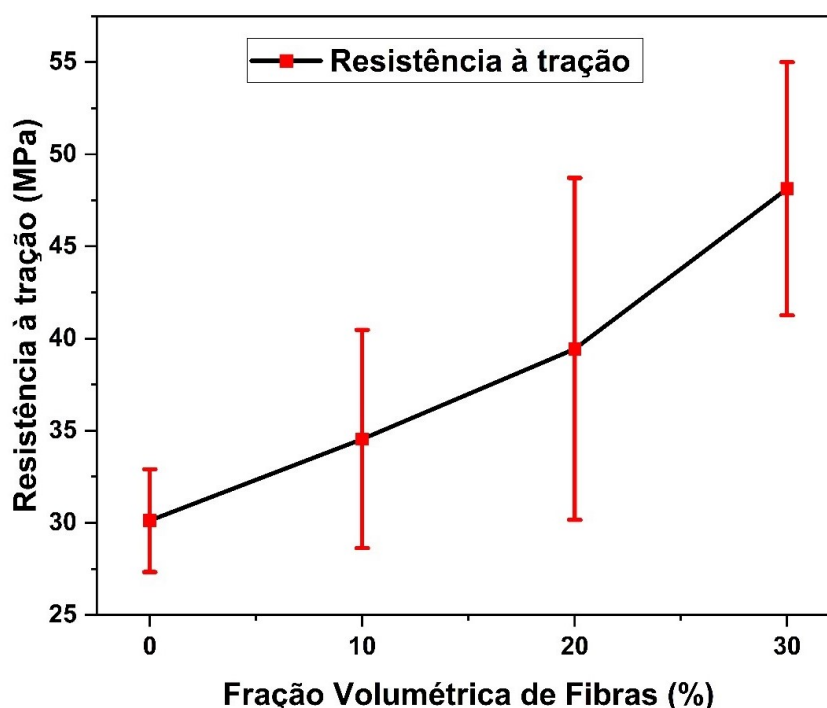


Figura 4.22 – Resistência a tração em função da fração volumetrica de fibra de babaçu.

Fonte: Próprio Autor.

Ao analisar a Tabela 4.13 e a Figura 4.2, verifica-se que os valores obtidos para a resistência à tração nos compósitos reforçados com fibras de babaçu superam aqueles da resina epóxi DGEBA/TETA. Notavelmente, o compósito com 30% de fibras de babaçu como reforço apresentou um aumento expressivo de 53% na resistência à tração em comparação com a resina epóxi. Em relação ao compósito com 10% de fibras, observou-se um aumento de 33%, enquanto o compósito com 20% em volume de fibras registrou um aumento de 17%. Esses resultados destacam a significativa melhoria nas propriedades mecânicas conferidas pelo reforço de fibras de babaçu nos compósitos (MANIVEL *et al.*, 2021).

Os valores representados na Figura 4.22 demonstram consistência com a literatura, especialmente ao serem comparados com os resultados de Sature e Mache (2015). Este estudo, centrado na caracterização mecânica e absorção de água em compósitos híbridos

reforçados com juta e cânhamo, exibiu uma fração volumétrica de até 40% de fibras de reforço. Constatou-se que o compósito epoxídico com fibra de juta atingiu 58,03 MPa, enquanto o compósito com fibra de cânhamo alcançou 75,14 MPa para a mesma fração volumétrica. Ao considerar o compósito contendo 30% em volume de fibras de babaçu, obteve-se um valor de $46,13 \pm 6,87$ MPa, o que se revela próximo ao valor registrado para o cânhamo, notando-se que esse último foi obtido para uma fração de 40%. Essa correspondência sugere uma notável eficácia do reforço com fibras de babaçu em compósitos, alinhando-se com os resultados de estudos anteriores sobre materiais similares.

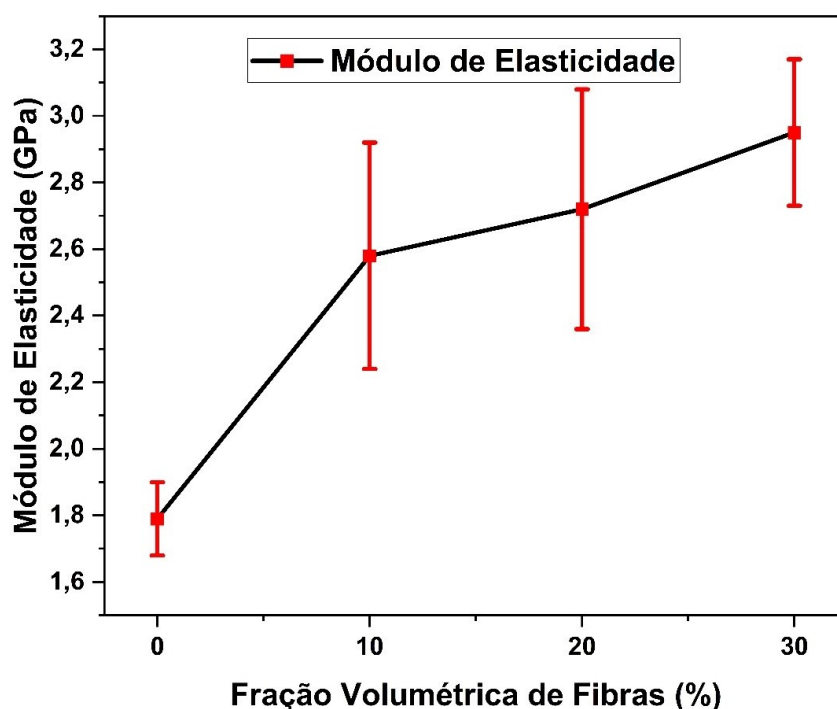


Figura 4.23 – Módulo de elasticidade em função da fração volumétrica de fibra de babaçu.

Fonte: Próprio Autor.

Ao analisar a Figura 4.23, observa-se uma clara tendência de aumento do módulo de elasticidade nos compósitos à medida que a fração volumétrica de fibras aumenta (PRAMUDIA; UMAMI; PRIHANTOKO, 2022). Em comparação com a resina epóxi, destaca-se que o compósito com 30% de volume de fibras de babaçu registrou um expressivo aumento de 64% em seu módulo de elasticidade. Em relação ao compósito com 10% de volume de fibras, observou-se um aumento de 19%, enquanto o compósito com 20% apresentou um incremento de 9%. As variações nos valores do módulo de elasticidade entre as frações volumétricas de 10% a 30% foram relativamente próximas, com pouca variação significativa dentro do desvio padrão.

O estudo conduzido por Lau *et al.* (2018) realizou uma análise comparativa de compósitos que empregam uma matriz de epóxi com fibras de cânhamo, contrastando com uma matriz semelhante incorporando fibras de juta. Os resultados destacaram que

o compósito de cânhamo apresentou uma resistência máxima à tração de 75 MPa e um módulo de elasticidade de 3,33 GPa, enquanto o compósito de juta registrou valores de 58 MPa para resistência à tração e 4 GPa para o módulo de elasticidade. No contexto dos compósitos contendo juta, os resultados são comparáveis aos obtidos com 30% de fibras de babaçu, com um valor de resistência à tração de $46,13 \pm 6,87$ MPa e um módulo de elasticidade de $2,95 \pm 0,22$ GPa.

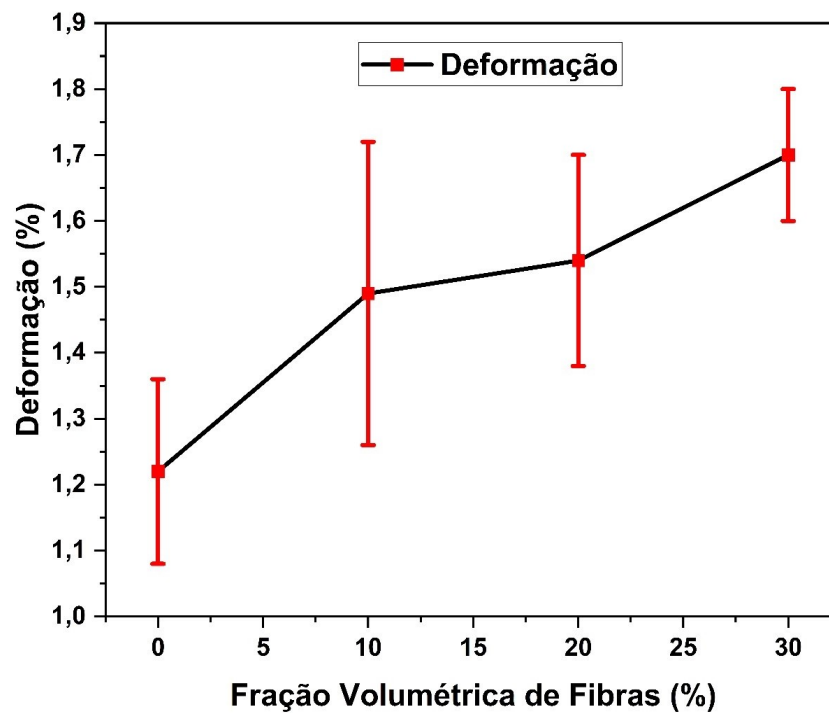


Figura 4.24 – Deformação em função da fração volumétrica de fibra de babaçu.

Fonte: Próprio Autor.

Ao analisar a Figura 4.24, verifica-se a mesma tendência previamente relatada para a resistência à tração e o módulo de elasticidade, evidenciando um aumento nas propriedades mecânicas em resposta ao incremento do reforço com fibras de babaçu. Em comparação com a resina epóxi, destaca-se que o compósito contendo 30% de fibras de babaçu registrou um aumento de 39% em sua deformação. Relativamente ao compósito com 10% de reforço de fibras de babaçu, houve um acréscimo de 14% em sua deformação, enquanto em comparação com o compósito contendo 20% de fibras de babaçu, o aumento da deformação foi de 11%.

Em investigações acerca da utilização de fibras de babaçu como reforço em compósitos, Moura *et al.* (2021) foi estudado o compósitos de babaçu com a adição do plastificante glicerol, resultando em uma resistência à tração de $31,67 \pm 1,07$ MPa, um módulo de Young de aproximadamente 0,12 GPa e um alongamento de $10,63 \pm 1,6\%$. É relevante salientar que os resultados obtidos para o reforço com babaçu neste estudo superam aqueles obtidos pelos autores. Essa disparidade pode ser atribuída à aplicação específica da fibra, uma vez

que o glicerol e a resina epóxi apresentam propriedades substancialmente distintas.

Como seria de esperar, uma vez que as fibras têm geralmente maior resistência e rigidez em comparação com a matriz, é comum que a resistência e a rigidez do compósito aumentem à medida que a proporção de fibras é aumentada. No entanto, isto depende da resistência interfacial adequada entre a fibra e a matriz, uma vez que esta resistência pode ser reduzida em casos que envolvam matrizes fortemente hidrofóbicas (PICKERING; EFENDY; LE, 2016). As Figuras 4.25, 4.26 e 4.27 apresentam as micrografias obtidas por MEV que revelam a superfície de fratura dos compósitos, bem como os diferentes modos de rutura que ocorreram durante o ensaio de tração.

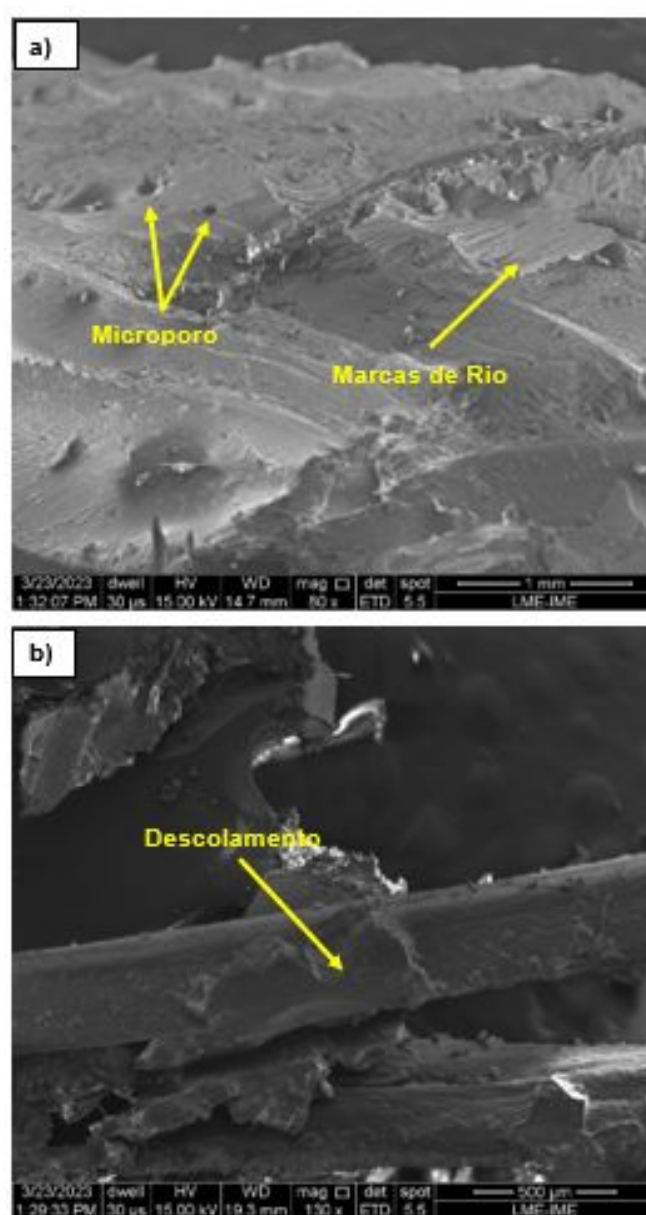


Figura 4.25 – Microscopia eletrônica de varredura das superfícies de fratura do compósito epóxi-fibra com 10% de babaçu. (a) 80x ;(b)130x.

Fonte: Próprio Autor.

Na Figura 4.25(a), é possível observar a presença de marcas de rio, indicando um padrão característico das matrizes epóxicas. Além disso, nota-se uma rugosidade superficial mínima, que está intrinsecamente ligada à natureza de fratura frágil da matriz epóxica. A Figura 4.25(b) destaca claramente o descolamento entre a fibra e a matriz, revelando uma configuração irregular. Essa característica é associada a uma peculiaridade no comportamento do compósito epóxi/fibra, sugerindo uma maior capacidade de absorção de energia (COSTA *et al.*, 2020).

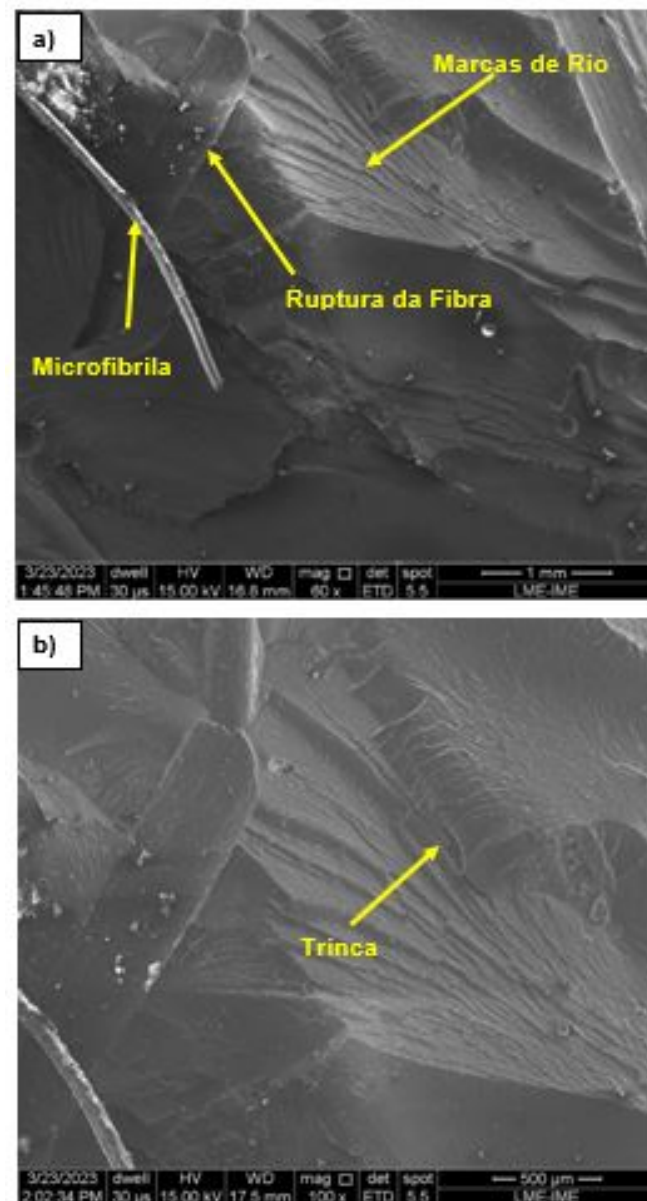


Figura 4.26 – Microscopia eletrônica de varredura das superfícies de fratura do compósito epóxi-fibra com 20% de babaçu. (a) 60x ;(b)100x.

Fonte: Próprio Autor.

Nas Figuras 4.26(a e b), destacam-se duas observações importantes. Primeiramente, a presença de marcas de rio sugere um padrão comum associado à fratura frágil da matriz

epóxica. Além disso, é notável a ruptura da fibra de babaçu, evidenciando um mecanismo de falha que envolve trincas propagando-se preferencialmente entre a superfície das FNLs (Fibras Naturais Longas) e a matriz epoxídica.

As trincas observadas apontam para um potencial mecanismo de falha na matriz epóxi, formando-se dentro da matriz e encontrando bloqueios e interrupções nas fibras. É fundamental destacar que esses mecanismos de falha, tanto na fibra quanto na interface fibra/matriz, desempenham um papel crucial no aumento da resistência mecânica, especialmente quando comparados às amostras dos grupos sob condições de 10% (SOUZA *et al.*, 2022).

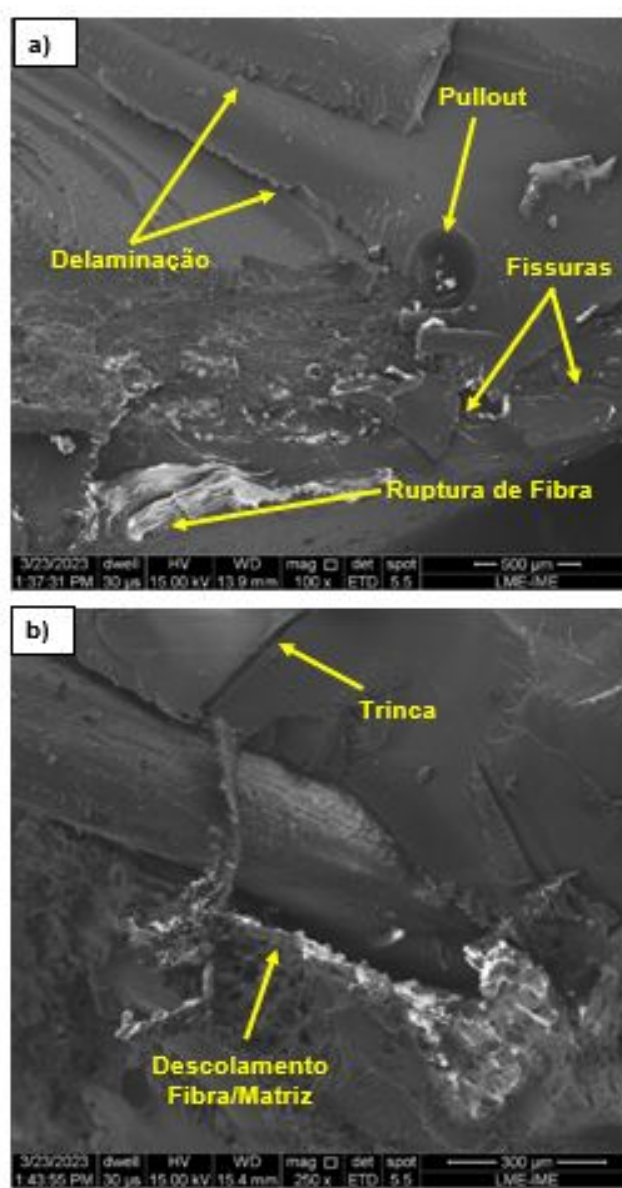


Figura 4.27 – Microscopia eletrônica de varredura das superfícies de fratura do compósito epóxi-fibra com 30% de babaçu. (a) 100x; (b) 250x.

Fonte: Próprio Autor.

Na Figura 4.27(a), observa-se a delaminação no compósito contendo 30% de volumes de fibras. Esse mecanismo de fratura está associado ao desprendimento interfacial da matriz epóxica. Além disso, são observadas fraturas tanto na fibra quanto na matriz. Essa combinação de mecanismos permite uma maior absorção de energia durante ensaios mecânicos. Já na Figura 4.27(b), destaca-se o deslocamento da fibra/matriz, indicando uma absorção de energia ainda maior na interface (COSTA *et al.*, 2020). Esse fenômeno evidencia a complexidade do comportamento do compósito, sugerindo que a interação entre a fibra e a matriz desempenha um papel significativo na capacidade de absorção de energia do material. Essas observações são cruciais para a compreensão e otimização das propriedades mecânicas do compósito em estudo.

Aplicando a ANOVA, os resultados dos ensaios de resistência à tração das fibras de babaçu foram submetidos a uma análise estatística, visando obter um nível de confiança superior a 95% (DAVID *et al.*, 2024; BEKRAOUI; QOUBAA; ESSADIQI, 2023). Essa abordagem não apenas proporcionou uma avaliação confiável dos dados, mas também permitiu investigar a possível influência do número de fibras utilizadas como reforço nos compósitos (NEUBA *et al.*, 2023; GOPALAN *et al.*, 2023). Os resultados da análise estatística, incluindo resistência à tração, módulo de elasticidade e deformação, estão apresentados na Tabela 4.15.

Tabela 4.15 – ANOVA da resistência à tração, módulo de elasticidade e deformação das amostras com 0, 10, 20, 30% de volume de fibras de babaçu.

Resistência à Tração					
Causas de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado médio	F _{calc}	F _{Tab}
Tratamentos	3	1131.53	377.18	8.56	2.95
Resíduo	28	1234.2	44.08		
Total	31	2365.73			
Módulo de Elasticidade					
Causas de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado médio	F _{calc}	F _{Tab}
Tratamentos	3	6.04	2.02	27.95	2.95
Resíduo	28	2.02	0,07		
Total	31	8.06			
Deformação					
Causas de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado médio	F _{calc}	F _{Tab}
Tratamentos	3	0.96	0.32	10.60	2.95
Resíduo	28	0.84	0,03		
Total	31	1.80			

Fonte: Próprio Autor.

Observando a Tabela 4.15 as propriedades de resistência à tração, módulo de elasticidade e deformação total, os valores de FCalc (8,56), (27,95) e (10,60), respectivamente, são superiores ao valor crítico de F encontrado (2,95). Por conseguinte, rejeita-se a hipótese nula de diferenças estatisticamente significativas entre as propriedades dos diferentes tipos a um nível de confiança de 95%. Para confirmar os resultados da ANOVA, foi efetuado o teste de Tukey (Tabela 4.16) para as propriedades mecânicas de tração.

Tabela 4.16 – Teste de Tukey para resistência à tração, módulo de elasticidade e deformação de compósitos contendo porcentagens de fibra de babaçu.

Resistência à Tração (d.m.s = 9.06)			
Amostras	N	Média	Grupo
0 vol%	8	30.12	A
10 vol%	8	34.55	AB
20 vol%	8	39.44	BC
30 vol%	8	46.13	C
Módulo de Elasticidade (d.m.s = 32.63)			
Amostras	N	Média	Grupo
0 vol%	8	1.79	A
10 vol%	8	2.58	B
20 vol%	8	2.72	B
30 vol%	8	2.95	B
Deformação total (%) (d.m.s = 28.19)			
Amostras	N	Média	Grupo
0 vol%	8	1.22	A
10 vol%	8	1.49	B
20 vol%	8	1.54	B
30 vol%	8	1.70	B

Fonte: Próprio Autor.

Os d.m.s obtidos para as propriedades de resistência à tração, módulo de elasticidade e deformação foram (9,05), (32,63) e (28,19), respectivamente. Estes resultados indicam qual o tratamento que apresenta uma diferença nos seus valores médios. Quando os valores médios dos grupos comparados dois a dois são maiores que o HSD, considera-se que existe uma diferença entre os valores médios avaliados. Para os valores de resistência à tração. A Tabela 4.16 mostra que os valores diferem com o aumento da percentagem de fibra, enquanto que para o módulo de elasticidade e a deformação não há diferença com o aumento da percentagem de fibra, o valor não difere a um nível de confiança de 95%.

4.2.6 Ensaio Balístico de Velocidade Residual

Foram fabricadas placas em diferentes frações volumétricas com o objetivo de analisar as propriedades balísticas. Para avaliar essas propriedades, realizamos o ensaio

de velocidade residual. Com os dados resultantes do ensaio balístico, pudemos estimar parâmetros cruciais, como os valores de absorção de energia (E_{abs}) e a velocidade residual (V_L) para cada amostra. Os resultados do ensaio balístico foram calculados utilizando as Equações (2.1) e (2.2), respectivamente.

Os resultados revelam que diversos fatores exercem influência no desempenho de cada amostra, destacando-se a porcentagem de fibras utilizadas como reforço. A Figura 4.28 ilustra os pontos experimentais obtidos a partir do espectro de radar Doppler para uma amostra contendo 30% em volume de fibras de babaçu. Esses dados foram adquiridos durante o ensaio realizado no CAEx, empregando um armamento de calibre 9 mm. A curva polinomial contínua ajustada acompanha os resultados, fornecendo uma representação visual do comportamento da amostra.

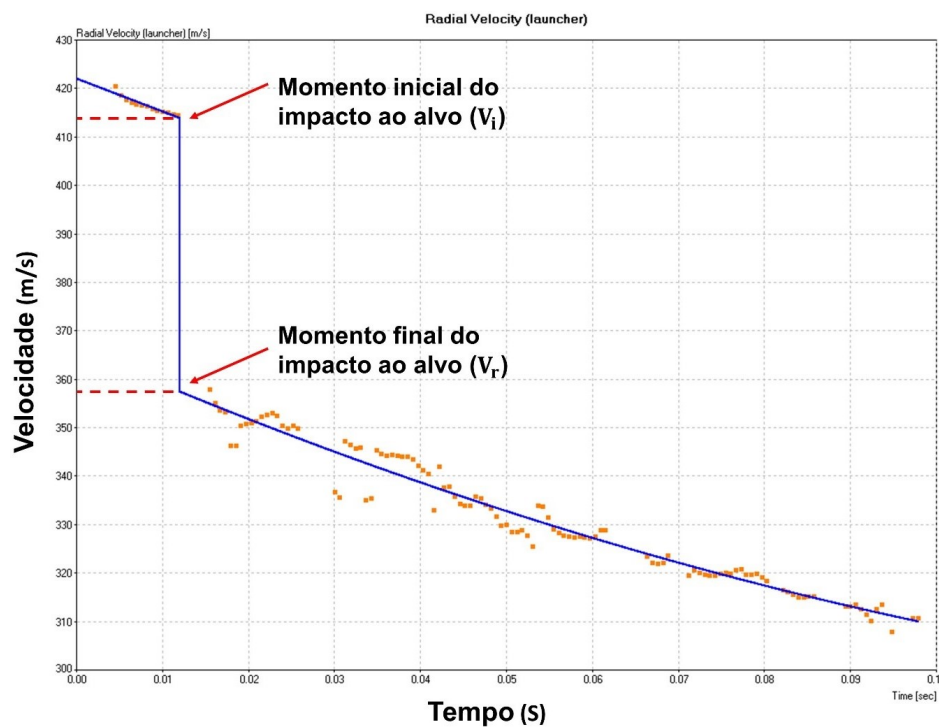


Figura 4.28 – Curva de pontos experimentais do compósito epóxi com 30% em volume de fibras de babaçu.

Fonte: Próprio Autor.

É observado uma queda abrupta da velocidade do projétil, que atinge cerca de 413 m/s, evidencia o momento crucial do impacto no alvo. Nesse contexto, a velocidade de impacto (V_i) é determinada como a velocidade do projétil no instante do impacto, enquanto a velocidade residual (V_r) representa a mínima velocidade alcançada após esse impacto.

Com base nos dados obtidos de V_i e V_r para os ensaios realizados para os calibres 0.45 (Armamento com ar comprimido) e 9 mm (Armamento de fogo), tornou-se possível a determinação da velocidade limite (V_L) e da energia absorvida (E_{abs}). Os resultados

correspondentes a esses parâmetros estão detalhados na Tabela 4.17, apresentando a velocidade média de impacto do projétil (V_i), a velocidade residual média (V_r), a energia absorvida (E_{abs}). Adicionalmente, a tabela inclui a estimativa da velocidade limite (V_L), consolidando informações essenciais para uma compreensão abrangente das características do impacto e da capacidade de absorção de energia no sistema em estudo.

Tabela 4.17 – Parâmetros obtidos no ensaio de velocidade residual e velocidade limite para os calibres de 9 mm e 0.45 mm.

9 mm				
Amostra	V_i (m/s)	V_r (m/s)	E_{abs} (J)	V_L (m/s)
EB 10	$415,83 \pm 3,89$	$346,73 \pm 9,85$	$211,68 \pm 18,37$	$230,04 \pm 10,18$
EB 20	$414,65 \pm 4,99$	$352,97 \pm 5,12$	$206,59 \pm 21,50$	$227,22 \pm 12,04$
EB 30	$411,56 \pm 6,03$	$354,29 \pm 10,74$	$192,76 \pm 22,64$	$212,4 \pm 16,07$
0.45 mm				
Amostra	V_i (m/s)	V_r (m/s)	E_{abs} (J)	V_L (m/s)
EB 10	$260,18 \pm 1,06$	$183,40 \pm 13,45$	$202,68 \pm 44,86$	$165,91 \pm 18,71$
EB 20	$259,44 \pm 1,03$	$197,00 \pm 13,62$	$163,23 \pm 41,07$	$148,22 \pm 19,47$
EB 30	$258,90 \pm 0,90$	$198,20 \pm 14,01$	$156,68 \pm 38,11$	$145,74 \pm 17,19$

Fonte: Próprio Autor.

Para compreender os dados apresentados na Tabela 4.17, realizou-se uma representação gráfica (Figura 4.29) com o intuito de avaliar os parâmetros de energia absorvida pelos compósitos que incorporam reforço de fibras de babaçu.

Ao analisar os dados apresentados na Tabela ??e na Figura 4.29, é evidente que tanto para o armamento de calibre 0.45 quanto para o calibre de 9 mm, há uma variação nos resultados de energia absorvida. Notavelmente, observa-se uma diminuição nos valores médios de energia absorvida nos compósitos, tanto ao passar de 10% para 20% em volume de fibras, quanto de 20% para 30%. Esse padrão de redução na energia absorvida é consistentemente identificado em outros estudos, sugerindo uma tendência geral nesse comportamento para compósitos similares (CUNHA *et al.*, 2023; SOUZA *et al.*, 2022; MARCHI *et al.*, 2023).

O compósito que incorpora 10% de volume como reforço de fibras de babaçu exibiu a maior média observada em comparação com os demais compósitos. Essa característica pode ser atribuída à ação mais intensa dos mecanismos de fratura frágil da resina epóxi, conforme destacado por Marchi *et al.* (2023).

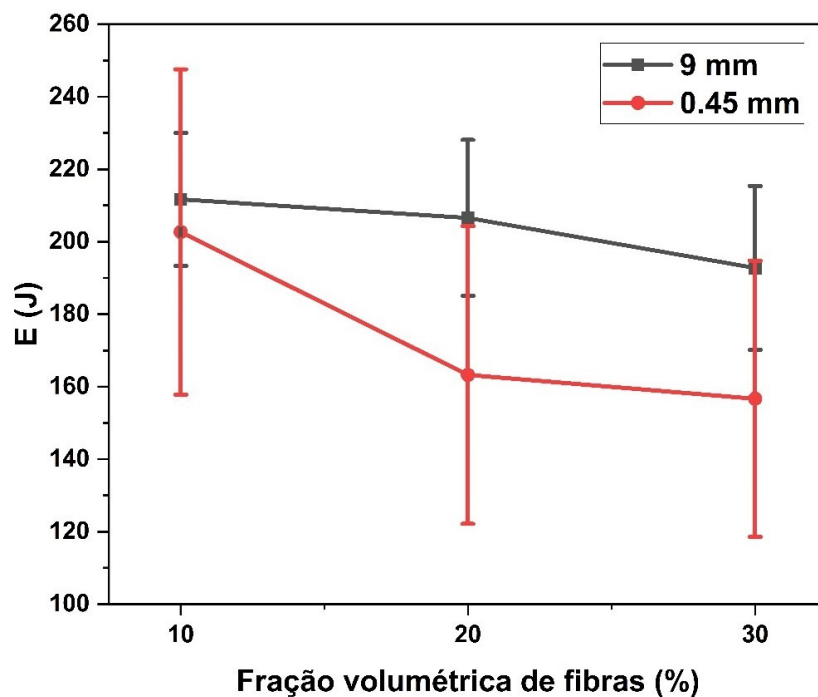


Figura 4.29 – Energia de absorção média para os compósitos nas frações de 10, 20, 30 de volume de fibras de babaçu para os ensaios de calibre 0.45 e 9 mm.

Fonte: Próprio Autor.

Uma análise de variância (ANOVA) foi conduzida para investigar a presença de diferenças significativas entre os resultados obtidos para a energia absorvida (EABS) nos compósitos reforçados com fibras de babaçu, com variações volumétricas entre 10% e 30%. Os valores de F calculado (F_{calc}) e F tabelado (F_{tab}) estão apresentados na Tabela 4.18.

Tabela 4.18 – ANOVA da energia de absorção para amostras com 10, 20, 30% em volumes de fibras de babaçu para os calibres de 0.45 e 9 mm.

0.45 mm					
Causas de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado médio	F_{Calc}	F_{Tab}
Tratamentos	2	6192,29	3096,11	1,8	3,89
Resíduos	12	20604,3	1717,03		
Total	14	26796,5			
9 mm					
Causas de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado médio	F_{Calc}	F_{Tab}
Tratamentos	2	978,941	489,471	1,119	3,68
Resíduos	15	6561,35	437,423		
Total	17	7540,29			

Fonte: Próprio Autor.

Os resultados provenientes da análise estatística destacada na Tabela $t_{4.18}$ indicam que o valor calculado de F_{calc} é consideravelmente inferior ao valor tabelado de F para os calibres de 0.45 e 9 mm. Consequentemente, com uma confiança de 95%, aceita-se a hipótese de que as médias dos diferentes tratamentos são equivalentes. Assim sendo, é possível afirmar que a fração volumétrica de fibras no compósito não exerce uma influência direta na absorção de energia cinética proveniente do projétil.

A Figura 4.30 mostra as fraturas das amostras de 10, 20 e 30 vol% antes e depois do ensaio balístico.

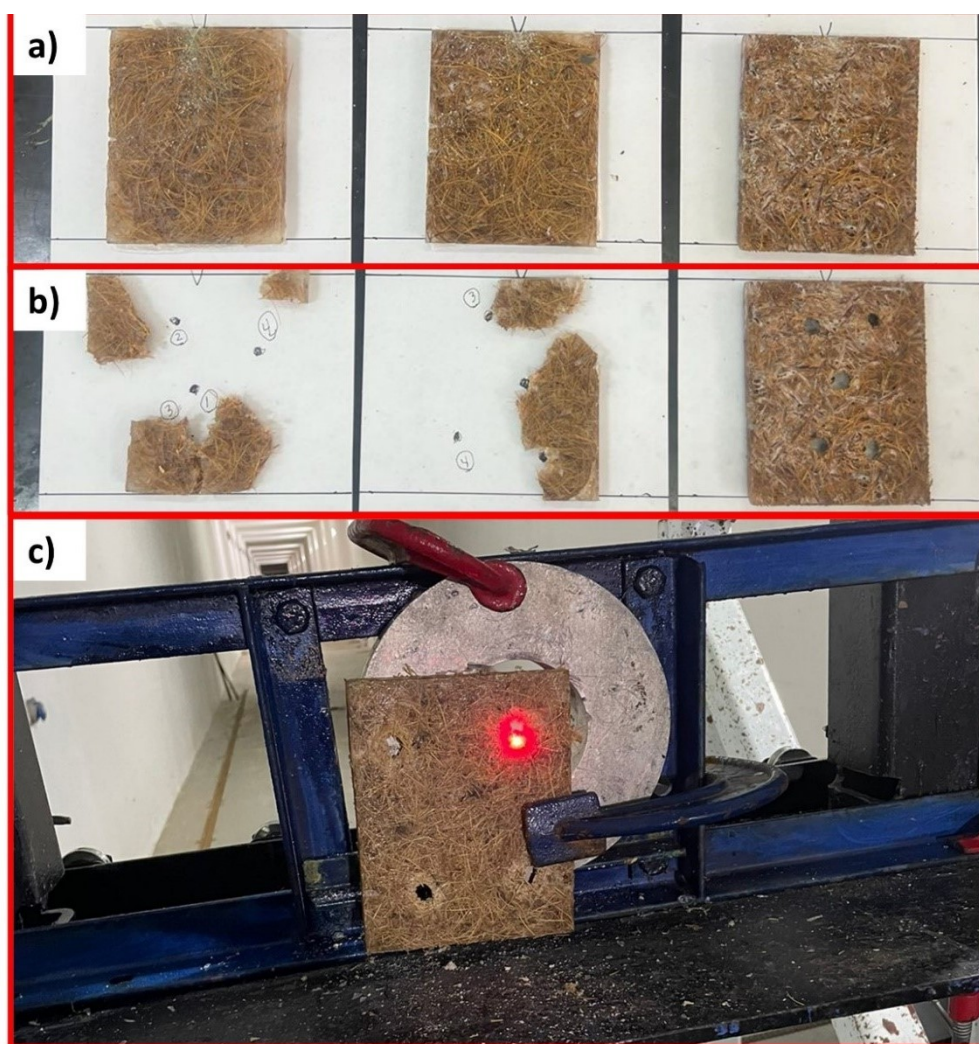


Figura 4.30 – Amostras de 10, 20 e 30% reforço em fibras de babaçu utilizadas no ensaio balístico de velocidade residual. (a) antes, (b) depois, (c) durante (20%).

Fonte: Próprio Autor.

Ao analisar as Figuras 4.30(a e b), observa-se que as amostras com frações de 10% e 20% em volume de fibras de babaçu nos ensaios balísticos de calibre 0.45 mm não exibiram um padrão de fratura preferencialmente orientado, resultando na fragmentação total das amostras. No caso do calibre 9 mm, apenas as amostras com 10% apresentaram

fragmentação total. Para as amostras de 20% e 30% no calibre 9 mm, foi observado um padrão de fraturação, com as amostras mantendo sua integridade mesmo após o ensaio balístico, evidenciando fratura na região impactada pela munição. O mesmo padrão foi observado na amostra com 30% no calibre 0.45 mm. O padrão de fragmentação total nas amostras de 10% em volume de fibras não é desejável em contextos de armadura balística, onde é crucial que o material possa resistir a múltiplos disparos de arma de fogo. No entanto, a amostra com 30% de fraturação apresentou um comportamento mais robusto, mantendo sua integridade mesmo após cinco disparos de munição dos calibres 0.45 mm e 9 mm, sem sinais visíveis de ruptura. Esse fato aponta para uma condição mais promissora em termos de aplicabilidade em cenários de proteção balística.

Uma explicação para a fragmentação completa das amostras de compósito com 10% (calibres 0.45 mm e 9 mm) e 20% (calibre 0.45 mm) em volume de fibras de reforço pode ser associada às características frágeis de sua matriz epoxídica. Isso se deve ao papel crucial desempenhado pela matriz epoxídica na dissipação da energia resultante do impacto da munição no compósito. Além disso, a quantidade de reforço também pode ser uma das razões subjacentes à fragmentação, uma vez que a matriz terá dificuldade em transferir cargas para o reforço que contém as fibras. Este fenômeno é evidenciado pela análise da placa de compósito com 30% em volume de fibras de babaçu, onde a transferência de carga é mais eficaz, resultando em uma maior capacidade de absorção da energia gerada durante o disparo da munição (PRASAD *et al.*, 2022; MONTEIRO *et al.*, 2009; GEETHIKA; RAO, 2017; LEE *et al.*, 2005). Os mecanismos de falha, assim como a ineficiência na dissipação de energia devido à ausência de fibras no reforço, são claramente evidentes na análise por MEV mostrados nas Figuras 4.31 e 4.32.

Ao analisar a Figura 4.31, podemos observar os mecanismos de fratura em ação no compósito com 10% em fração de volume de fibras de babaçu após o ensaio balístico com armamentos de calibre 0.45 mm e 9 mm. A análise estatística de ANOVA revelou que, embora os valores dos compósitos sejam estatisticamente iguais, o compósito de 10% exibiu um maior valor de energia absorvida em relação aos demais. Essa característica está diretamente correlacionada com os mecanismos de falha associados à fratura frágil da matriz epoxídica, combinada com a absorção de energia pelo reforço de fibras.

Na Figura 4.31(a) e (b), são evidenciados os mecanismos atuantes durante o ensaio balístico com armamento de calibre 0.45. Observam-se trincas formadas nas regiões de interface fibra/matriz, juntamente com o descolamento da fibra da interface. Tais mecanismos desempenham um papel crucial na absorção de energia, em conjunto com as trincas geradas no processo (SOUZA *et al.*, 2022; SILVA *et al.*, 2022).

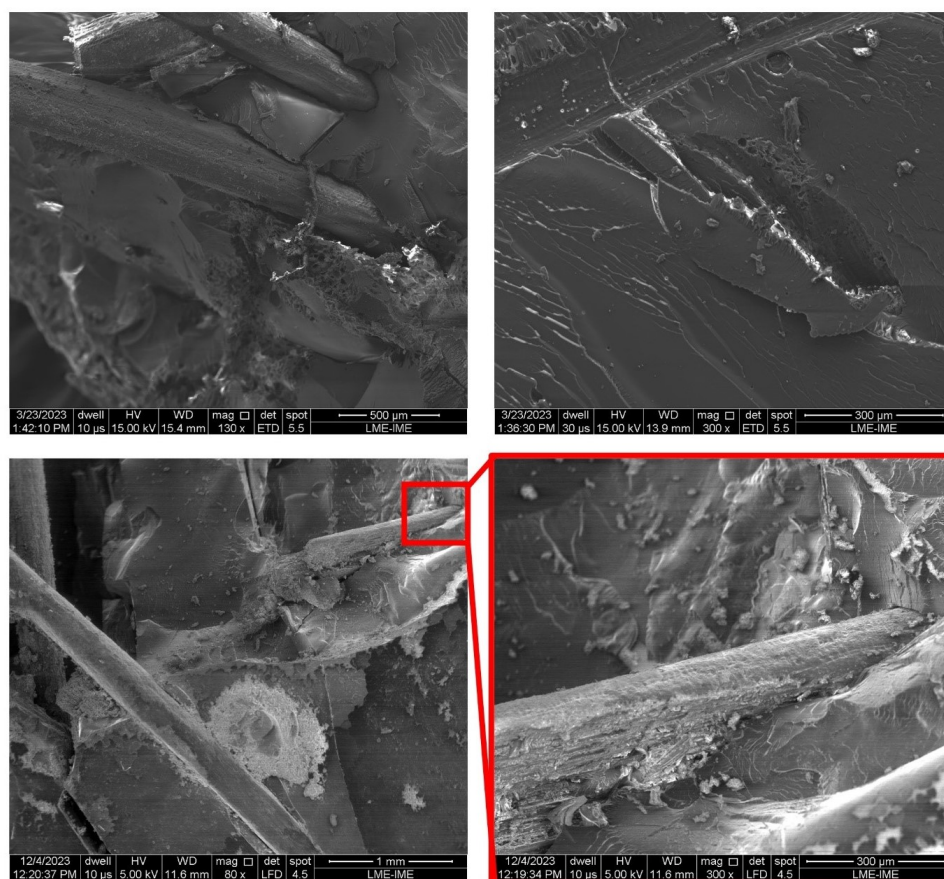


Figura 4.31 – Micrografias MEV da região de impacto balístico com 10% de volume de fibras de babaçu (a) (0.45 mm) 130x, (b) (0.45 mm) 300x, (c) (9 mm) 80x e (d) (9 mm)300x

Fonte: Próprio Autor.

Na Figura 4.31(c e d), o compósito de 10% em volume de fibras de babaçu foi ensaiada com o armamento de calibre 9 mm, notamos a presença dos mesmos mecanismos de falha associados às matrizes epoxídicas. No entanto, destaca-se uma adesão eficaz entre a fibra e a matriz, sugerindo uma maior capacidade de absorção de cargas durante o ensaio balístico. Essa coesão entre a fibra e a matriz pode indicar uma resistência aprimorada do compósito frente às tensões geradas pelo impacto do projétil (NEUBA *et al.*, 2023).

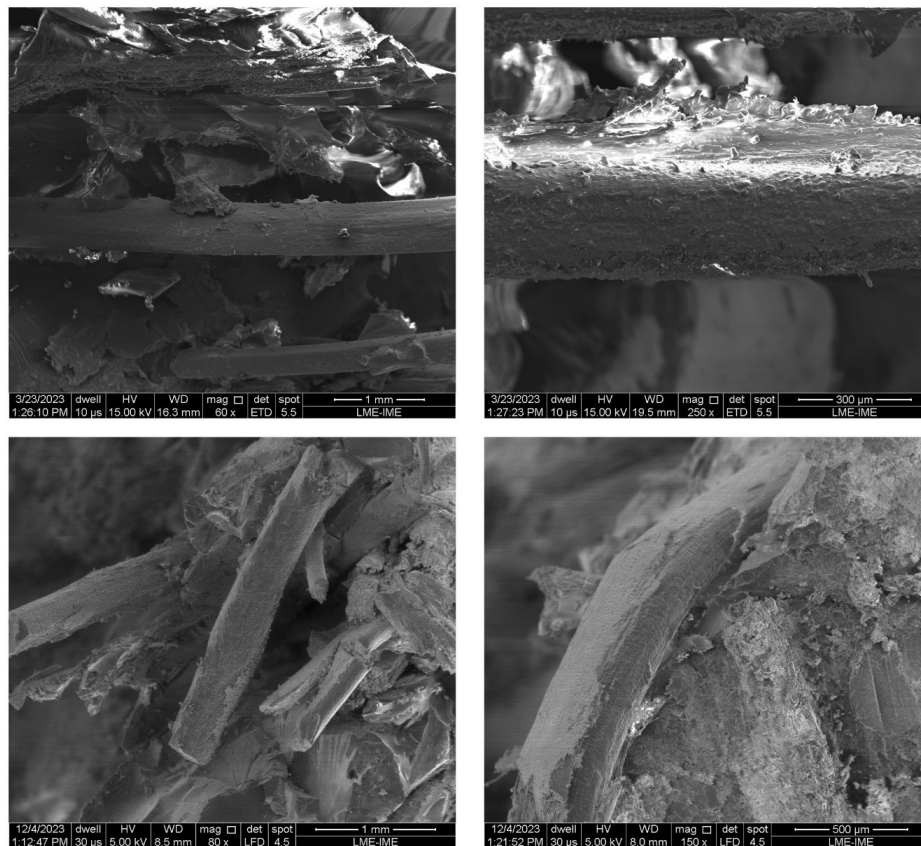


Figura 4.32 – Micrografias MEV da região de impacto balístico com 20% de volume de fibras de babaçu (a) (0.45 mm) 60x, (b) (0.45 mm) 250x, (c) (9 mm) 80x e (d) (9 mm) 150x

Fonte: Próprio Autor.

Nos compósitos que incorporam 30% de fibras de babaçu, a intensidade da região de impacto balístico é evidente, conforme ilustrado nas Figuras 4.32(c) e (d). A alta concentração de fibras torna desafiadora a identificação de mecanismos de fratura atuantes, mas é possível discernir marcas de rio, indicativas de mecanismos de fratura frágil originados da matriz epoxídica. À medida que a fração volumétrica de fibras no compósito aumenta, a resistência ao impacto do material também se eleva, permitindo que mecanismos de fratura mais complexos entrem em cena (FILHO *et al.*, 2020). Essa observação ressalta a resposta diferenciada do compósito conforme a variação na quantidade de fibras de babaçu, influenciando diretamente sua capacidade de resistir a impactos balísticos.

Os compósitos com 30% de fibras demonstraram uma integridade mais robusta, tanto na amostra balística, conforme evidenciado na Figura 4.30(c), quanto nas Figuras 4.32(c) e (d). Silva *et al.* (2022) explicam que o aumento da concentração de fibras está diretamente relacionado ao aumento da densidade de arrancamento da fibra. Isso pode estar associado a propriedades mecânicas significativas em comparação com outros grupos, indicando uma resposta mais resistente e resiliente do material à ação balística.

A fim de realizar uma comparação entre as fibras de babaçu e outras fibras frequentemente utilizadas como reforço em compósitos de matrizes epoxídicas, a Tabela 4.19 apresenta um comparativo dos valores residuais (V_r) obtidos nos ensaios de velocidade residual, bem como da energia absorvida (E_{abs}) e velocidade limite (V_L). Essa análise abrange os resultados do presente trabalho e de investigações anteriores conduzidas por outros pesquisadores.

Tabela 4.19 – Comparação dos valores de energia absorvida e velocidade limite entre os compósitos reforçados com fibras de babaçu e aqueles reforçados com diferentes FNLs.

FNLs	Calibre	VL (m/s)	Eabs (J)	Referências
10% Babaçu	9mm	230,04 $\pm$ 10,18	211,68 $\pm$ 18,37	PT*
30% Babaçu	9mm	212,40 $\pm$ 16,07	192,76 $\pm$ 22,64	PT*
10% Babaçu	0.45mm	165,91 $\pm$ 18,71	202,68 $\pm$ 44,86	PT*
30% Babaçu	0.45mm	145,74 $\pm$ 17,19	156,68 $\pm$ 38,11	PT*
10% Junco	7,62mm	209,93 $\pm$ 15,02	214,85 $\pm$ 31,46	NEUBA <i>et al.</i> , 2023
30% Junco	7,62mm	167,18 $\pm$ 39,05	213,74 $\pm$ 10,56	NEUBA <i>et al.</i> , 2023
30% Kenaf	0,22mm	244,57 $\pm$ 87,05	94,81 $\pm$ 12,01	SILVA <i>et al.</i> , 2022
30% Caranan	0,22mm	48,17 $\pm$ 8,25	186,00	SOUZA <i>et al.</i> , 2022
10% Ubim	7,62mm	195,98 $\pm$ 13,57	187,03 $\pm$ 25,99	MARCHI <i>et al.</i> , 2023
30% Ubim	7,62mm	159,42 $\pm$ 26,32	180,79 $\pm$ 14,93	MARCHI <i>et al.</i> , 2023

Fonte: Próprio Autor.

Ao analisar os resultados dos compósitos com 10% e 30% de reforço em fibras de babaçu frente à munição calibre 9 mm, destaca-se a superioridade em termos de velocidade limite em comparação com as fibras de Junco Sete Ilhas (209,93 $\pm$ 15,02 m/s). Em relação à energia absorvida, o desempenho foi estatisticamente igual (214,85 $\pm$ 31,46 J). No caso do reforço com 30% em fibras de babaçu, os resultados para Junco Sete Ilhas foram estatisticamente similares, apresentando (167,18 $\pm$ 39,05 m/s) e (213,74 $\pm$ 10,56 J) (NEUBA *et al.*, 2023).

Comparando com o compósito reforçado com fibras de Kenaf, observa-se que a velocidade limite do compósito com 30% em volume de fibra de babaçu é inferior à apresentada pelo compósito com 30% em Kenaf (244,57 $\pm$ 87,05 m/s). Em relação à energia absorvida, os calibres 9 mm e 0.45 mm mostraram-se superiores ao resultado do compósito com 30% de fibra de Kenaf (94,81 $\pm$ 12,01 J) (SILVA *et al.*, 2022).

Analisando o compósito com 30% em volume de fibras de caranã, os resultados dos calibres 9 mm e 0.45 mm foram superiores aos obtidos por Silva *et al.* (2022) com (48,17

$\pm 8,25$ m/s) e (186,00 J) (SOUZA *et al.*, 2022).

Comparando com o compósito de fibras de ubim, em relação à velocidade limite, o resultado obtido pela munição calibre 9 mm foi superior ao obtido com 10% de fibras de ubim ($195,98 \pm 13,57$ m/s), mas o resultado do calibre 0.45 mm foi inferior ao do compósito com 10% de fibras de ubim. No que diz respeito ao reforço com 30% em volume de fibras, a mesma tendência é observada em relação à velocidade limite. O compósito com 30% em fibras de babaçu, pós-ensaio balístico com munição calibre 9 mm, mostrou-se superior aos resultados de energia de absorção do compósito com 30% de fibra de ubim ($159,42 \pm 26,32$ J). No entanto, em comparação com o resultado obtido com 30% em fibra de babaçu no ensaio de calibre 0.45 mm, o compósito com 30% de fibra de ubim revelou-se superior (MARCHI *et al.*, 2023).

5 CONCLUSÕES

- Por meio da análise da variação diametral das fibras, obteve-se um diâmetro médio de 0,27 mm. A densidade média das fibras apresentou um valor médio de 0,59 g/cm³, com um desvio padrão de 0,18 g/cm³, superando a densidade média característica encontrada na análise estatística de Weibull, que retornou um valor de 0,43 g/cm³. A densidade observada para as fibras de babaçu está dentro da faixa de densidades de outras fibras estudadas. Foi analisado o aumento da densidade à medida que o diâmetro da fibra diminui, o que é uma característica da redução dos defeitos internos da fibra conforme ocorre a diminuição do diâmetro;
- A partir da caracterização química realizada nas fibras de babaçu, foi determinado um teor de umidade de 7,05%, valor inferior aos obtidos por algumas FNLs. Além disso, a fibra de babaçu apresentou 2,43% de cinzas, 28,53% de lignina, 32,34% de hemicelulose e 37,97% de celulose. Em comparação com outras FNLs, destaca-se que a fibra de babaçu apresentou um percentual de celulose menor em relação à maioria das fibras analisadas;
- A análise por FTIR da fibra de babaçu obteve resultados conforme o esperado, evidenciando bandas associadas às vibrações moleculares de grupos funcionais inerentes aos constituintes fundamentais das FNLs, como celulose, hemicelulose e lignina;
- O ensaio de TG revelou dois patamares com notável perda de massa para as fibras de babaçu. O primeiro ocorre a 37,8°C, indicando o início da perda de umidade. O segundo patamar se situa entre 205°C e 382°C, com uma perda de massa de 69,9%, associada à degradação dos principais constituintes das FNLs. Antes de atingir os 600°C, a fibra já havia perdido completamente sua massa;
- Na análise de DSC, observou-se a presença de um pico endotérmico a 64,6°C e três picos exotérmicos localizados em 132,1°C, 406°C e 478,5°C. Esses eventos térmicos coincidem com as temperaturas correspondentes às perdas de massa evidenciadas nas curvas de TG;
- Através da análise de DRX, foi gerado um difratograma para as fibras de babaçu, desse difratograma com tratamentos de softwares e cálculos matemáticos foi obtido o valor de 78,25% para o índice de cristalinidade e ângulo microfibrilar com o valor de 7,64°;
- As micrografias obtidas pelo MEV permitiram identificar a morfologia superficial da fibra de babaçu, observando a presença de defeitos superficiais presentes nas

superfícies das fibras. São identificados defeitos como depressão, concentrador de defeitos e porosidade superficial;

- Os ensaios de tração nas fibras de babaçu permitiram obter os valores referente as propriedades mecânicas das fibras, obteve-se uma resistência à tração máxima de $100,76 \pm 10,18$ MPa, módulo de elasticidade máximo igual a $6,33 \pm 0,64$ GPa e uma deformação máxima de $2,98 \pm 0,30\%$. Foi possível confirmar a variação de propriedades como resistência máxima a tração e módulo de elasticidade com a diminuição do diâmetro da fibra, sendo o intervalo que obteve mais resistência localizado entre 0,15mm a 0,19 mm. O valor médio da resistência à tração encontrado para as fibras de babaçu foi de $49,82 \text{ MPa} \pm 30$, demonstrando-se superior ao valor médio característico calculado pela análise de Weibull, que foi de 47,14 MPa. Da mesma forma, o valor médio para o módulo de elasticidade foi de $2,75 \text{ GPa} \pm 1,72$, apresentando uma superioridade em relação ao valor médio característico do módulo de elasticidade, que foi de 1,70 GPa. Quanto à deformação média, observou-se um valor de $1,87\% \pm 0,57$, sendo este superior à deformação média característica encontrada, que foi de 1,01%;
- Ao confeccionar os compósitos com reforço em frações volumétricas de 10%, 20% e 30% de fibras de babaçu, foi confirmada a viabilidade destes para serem submetidos aos ensaios de caracterização balística, mecânica, térmica e química;
- A análise por FTIR realizada nos compósitos contendo 10%, 20% e 30% de fibras de babaçu revelou uma redução na transmitância da banda em 1608 cm^{-1} , atribuída ao estiramento das ligações C=O de grupos funcionais possivelmente pertencentes aos constituintes lignocelulósicos das fibras. À medida que o reforço de fibras de babaçu aumenta no compósito, observa-se um aumento na absorção dessa banda;
- Os ensaios de TG dos compósitos contendo reforço em fibras de babaçu revelaram um comportamento semelhante entre eles, indicando uma diminuição na estabilidade térmica dos compósitos quando comparados à resina epóxi pura. Em média, os compósitos apresentaram perda de massa na faixa de 305,03 a 323,85 °C, marcando o início da degradação. A taxa máxima de degradação ocorreu entre 370,60 a 385,51 °C, e após atingir 600 °C, houve uma degradação de 79,17 a 90,11 °C. Este fato corrobora a melhoria na estabilidade térmica dos compósitos com o acréscimo de fibras de babaçu em comparação com a degradação total da fibra
- As curvas de DSC revelam a presença de picos endotérmicos e exotérmicos, destacando uma variação nos picos endotérmicos de 54,81 a 56,06 °C, relacionados às perdas de umidade nos compósitos. Essa variação está associada ao aumento do reforço de fibras de babaçu na matriz epoxídica. Quanto aos picos exotérmicos, eles surgem

entre 106°C e 108°C nos compósitos com fibras de babaçu, sendo explicados como parte de um processo de pós-cura do material;

- O ensaio de impacto Izod demonstrou que, à medida que o reforço de fibras de babaçu na matriz epoxídica aumenta, ocorre um incremento na absorção de energia de impacto. O valor máximo obtido para a energia de impacto Izod foi registrado no percentual de 30% de fibras de babaçu, atingindo $63,47 \pm 7,44$ J/m. A análise estatística de ANOVA revelou a rejeição da hipótese de que os valores médios são iguais a um nível de significância de 5%. O teste de Tukey indicou que o compósito com 30% de volume em fibras de babaçu apresenta os melhores resultados, diferindo significativamente das médias obtidas por 10% e 20%. As imagens de MEV da superfície de fratura evidenciaram uma evolução nos mecanismos de falha, observando-se a transição de um compósito frágil (10%) para um compósito dúctil-frágil (30%), conforme evidenciado pelos mecanismos de falha atuantes em cada compósito;
- Através dos ensaios de tração realizados nos compósitos com reforço de fibras de babaçu, foram obtidos os valores das propriedades mecânicas. A resistência à tração foi de $34,55 \pm 5,92$ MPa para o compósito com 10% de reforço em fibras de babaçu, $39,44 \pm 9,28$ MPa para o compósito com 20% e $46,13 \pm 6,87$ MPa para o compósito com 30% de reforço de fibras de babaçu. O módulo de elasticidade apresentou valores de $2,58 \pm 0,34$ GPa para 10% de reforço, $2,72 \pm 0,36$ GPa para 20% e $2,95 \pm 0,22$ GPa para 30% de reforço. Quanto à deformação, os valores foram de $1,49 \pm 0,23\%$ para 10% de reforço em fibras de babaçu, $1,54 \pm 0,16\%$ para 20% e $1,70 \pm 0,10\%$ para 30% de reforço. A análise de variância (ANOVA) indicou que, para os resultados de tração, módulo de elasticidade e deformação das fibras de babaçu, rejeita-se a hipótese nula de diferenças estatisticamente significativas entre as propriedades dos diferentes tipos, a um nível de confiança de 95%. O teste de Turkey mostrou que, para o módulo de elasticidade e deformação, as médias são estatisticamente iguais para 10%, 20% e 30% de reforço em fibras de babaçu. No entanto, para a resistência à tração, o teste de Turkey revelou que cada aumento percentual de fibra no reforço difere estatisticamente entre si. As micrografias de MEV evidenciaram os mecanismos de falha atuantes após o ensaio de tração. Para os compósitos de 10%, observou-se a presença de marcas de rio e descolamento. Nos compósitos de 20%, foi possível visualizar a ruptura da fibra, marcas de rio e trincas. Já nos compósitos de 30%, notou-se a presença de delaminação, descolamento da interface fibra/matriz, pullout e ruptura da fibra, contribuindo para o aumento da resistência mecânica do compósito;
- Os valores de energia absorvida (E_{abs}) e velocidade limite (V_L) obtidos para os compósitos, variando entre 10% e 30% em reforço de fibras de babaçu, testados com

munições de calibre 0.45 mm e 9 mm, demonstraram estatisticamente superiores para a munição de 9 mm em comparação com outros estudos. No caso do calibre 0.45 mm, os resultados foram estatisticamente iguais em relação aos encontrados por outros pesquisadores. As propriedades balísticas encontradas variaram de 230,04 a 212,40 m/s para a energia de absorção e de 211,68 a 192,76 J para variação de 10% a 30% em volume de fibras de babaçu. Esses resultados indicam a viabilidade da utilização dos compósitos epóxi-fibras de babaçu em aplicações balísticas. Curiosamente, o compósito de 10% apresentou os maiores valores de parâmetros balísticos em comparação com o compósito de 30%. Essa característica está diretamente relacionada aos mecanismos de falha associados à fratura frágil da matriz epoxídica, combinada com a absorção de energia pelo reforço de fibras. Diante dos resultados obtidos nos ensaios balísticos, é possível concluir que as placas compostas não apresentaram viabilidade para a blindagem balística de nível II-A para o calibre de 9 mm. Quanto ao calibre 0.45 mm, não há viabilidade para aplicação balística no nível I. Para ambos os armamentos, esse nível de desempenho poderia ser alcançado com a fabricação de uma placa contendo 40% de fibras de babaçu, conforme indicado pela instabilidade dimensional observada em diversos estudos envolvendo reforço de 40% de FNLs.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados e conclusões deste trabalho, sugere-se:

- Investigar o desempenho balístico de uma blindagem multicamada, onde a camada intermediária consiste em compósito de matriz epóxi reforçado com fibras de babaçu em diferentes proporções volumétricas;
- Explorar a viabilidade de fabricação de compósitos com fração volumétrica de 40% ou mais em reforço de fibras de babaçu, visando identificar qual percentual proporciona melhorias nas propriedades mecânicas;
- Investigar os efeitos de tratamentos químicos ou físicos na superfície da fibra de babaçu, visando avaliar as melhorias nas propriedades tanto das fibras quanto do compósito que as contém como reforço.
- Avaliar o comportamento mecânico de reforço de fibras de babaçu em diferentes matrizes poliméricas;
- Avaliar o comportamento balístico, mecânico e térmico de um compósito híbrido, composto por fibras de babaçu e outra fibra natural;
- Investigar a influencia da funcionalização com óxido de grafeno sobre as propriedades do conjunto matriz/fibras de babaçu;
- Utilizar tecido de fibra de babaçu afim de aumentar as propriedades do tecido de fibra e dos compósitos;
- Aplicar fibra de babaçu em formato de pó para realização de compósitos obtidos por meio de manufatura aditiva afim de investigar suas propriedades.

REFERÊNCIAS

- ABERNETHY, R. B.; BRENNEMAN, J.; MEDLIN, C.; REINMAN, G. L. Weibull analysis handbook. Aero Propulsion Laboratory, Air Force Wright Aeronautical Laboratories, Air ... , 1983.
- ABRAHAM, E.; DEEPA, B.; POTHAN, L. A.; JACOB, M.; THOMAS, S.; CVELBAR, U.; ANANDJIWALA, R. Extraction of nanocellulose fibrils from lignocellulosic fibres: A novel approach. **Carbohydrate Polymers**, Elsevier, v. 86, n. 4, p. 1468–1475, 2011.
- ABTEW, M. A.; BOUSSU, F.; BRUNIAUX, P.; LOGHIN, C.; CRISTIAN, I. Ballistic impact mechanisms—a review on textiles and fibre-reinforced composites impact responses. **Composite structures**, Elsevier, v. 223, p. 110966, 2019.
- AGARWAL, B.; BROUTMAN, L.; AGARWAL, B.; BROUTMAN, L. **Analysis and performance of fiber composites Second edition**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1990.
- ALVES, E. Babau: Programa nacional de pesquisa. Elsevier, 2019.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D30**: Standards and literature references for composite materials. West Conshohocken, 1990.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D3800**: Standard test method for density of high-modulus fibers. West Conshohocken, 2010.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D3039**: Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. West Conshohocken, 2017.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D256**: Standard test methods for determining the izod pendulum impact resistance of plastics. West Conshohocken, 2018.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C1557**: Standard test method for tensile strength and young's modulus of fibers. West Conshohocken, 2020.
- ANDERSON, A.; MAY, P. A palmeira de muitas vidas. **Ciência Hoje**, v. 4, n. 20, p. 58–64, 1985.
- ANTICH, P.; VÁZQUEZ, A.; MONDRAGON, I.; BERNAL, C. Mechanical behavior of high impact polystyrene reinforced with short sisal fibers. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, Elsevier, v. 37, n. 1, p. 139–150, 2006.
- ASKELAND, D. R.; WRIGHT, W. J. **Essentials of materials science and engineering**. [S.l.]: Cengage Learning, 2018.
- ASKELAND, D. R.; WRIGHT, W. J. **Ciência e engenharia dos materiais**. [S.l.]: Cengage Learning, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15000**: Armour systems — ballistic protection part 2: Classification, requirements and test methods for flat materials. Rio de Janeiro, 2020.

- AZEVEDO, L.; PAIVA, R. Desenvolvimento de painéis mdf utilizando a fibra do coco babaçu e eucalipto. In: **Anais do XXI Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais-CBECIMAT**. [S.l.: s.n.], 2014.
- BALAJI, A.; NAGARAJAN, K. Characterization of alkali treated and untreated new cellulosic fiber from saharan aloe vera cactus leaves. **Carbohydrate Polymers**, Elsevier, v. 174, p. 200–208, 2017.
- BARBOSA, A. de P. **Características estruturais e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de Buriti**. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual do Norte Fluminense, Rio de Janeiro, 2011.
- BEHERA, S.; MOHANTY, J.; NATH, G.; MAHANTA, T. K. Exploring properties of short randomly oriented rattan fiber reinforced epoxy composite for automotive application. **Journal of Natural Fibers**, Taylor & Francis, v. 20, n. 1, p. 2163024, 2023.
- BEKRAOUI, N.; QOUBAA, Z. E.; ESSADIQI, E. Experimental optimization of multi-quality laser cutting characteristics of jute/epoxy laminate: full factorial design and grey relational analysis. **Lasers in Manufacturing and Materials Processing**, Springer, v. 10, n. 3, p. 443–470, 2023.
- BELOUADAH, Z.; ATI, A.; ROKBI, M. Characterization of new natural cellulosic fiber from lygeum spartum l. **Carbohydrate polymers**, Elsevier, v. 134, p. 429–437, 2015.
- BEVITORI, A.; SILVA, I. D.; LOPES, F.; MONTEIRO, S. Diameter dependence of tensile strength by weibull analysis: Part ii jute fiber. **Matéria (Rio de Janeiro)**, SciELO Brasil, v. 15, p. 117–123, 2010.
- BHATNAGAR, A. **Lightweight ballistic composites: military and law-enforcement applications**. [S.l.]: Woodhead Publishing, 2016.
- BLEDZKI, A.; GASSAN, J. Composites reinforced with cellulose based fibres. **Progress in polymer science**, Elsevier, v. 24, n. 2, p. 221–274, 1999.
- BLEDZKI, A.; REIHMANE, S.; GASSAN, J. Properties and modification methods for vegetable fibers for natural fiber composites. **Journal of applied polymer science**, Wiley Online Library, v. 59, n. 8, p. 1329–1336, 1996.
- BRAGA, F. d. O.; LUZ, F. S.; MONTEIRO, S. N.; JR, E. P. L.; LOURO, L. H. L.; GOMES, A. V. Desempenho balístico de uma blindagem cerâmica multicamada com modificação na geometria de impacto. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, ABM- Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, v. 72, n. 72, p. 3828–3835, 2017.
- BRAGA, F. de O. **Comportamento balístico de uma blindagem multicamada utilizando compósito poliéster-curauá como camada intermediária**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2015.
- BRAGA, F. de O.; MILANEZI, T. L.; MONTEIRO, S. N.; LOURO, L. H. L.; GOMES, A. V.; JR, É. P. L. Ballistic comparison between epoxy-ramie and epoxy-aramid composites in multilayered armor systems. **Journal of materials research and technology**, Elsevier, v. 7, n. 4, p. 541–549, 2018.

- BÜRGER, D.; FARIA, A. R. D.; ALMEIDA, S. F. D.; MELO, F. C. D.; DONADON, M. V. Ballistic impact simulation of an armour-piercing projectile on hybrid ceramic/fiber reinforced composite armours. **International Journal of Impact Engineering**, Elsevier, v. 43, p. 63–77, 2012.
- CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. [S.l.]: LTC, 2013.
- CANEVAROLO, S. V. Ciência dos polímeros. **Artiliber editora, São Paulo**, v. 24, 2002.
- CANEVAROLO, S. V. **Polymer science: a textbook for engineers and technologists**. [S.l.]: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2019.
- CARVALHO, A. M. X. d.; SOUZA, M. R. d.; MARQUES, T. B.; SOUZA, D. L. d.; SOUZA, E. F. M. d. Familywise type i error of anova and anova on ranks in factorial experiments. **Ciência Rural**, SciELO Brasil, v. 53, p. e20220146, 2022.
- CHAWLA, K. K. **Composite materials: science and engineering**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012.
- COSTA, U. O.; NASCIMENTO, L. F. C.; GARCIA, J. M.; MONTEIRO, S. N.; LUZ, F. S. d.; PINHEIRO, W. A.; FILHO, F. d. C. G. Effect of graphene oxide coating on natural fiber composite for multilayered ballistic armor. **Polymers**, MDPI, v. 11, n. 8, p. 1356, 2019.
- COSTA, U. O.; NASCIMENTO, L. F. C.; GARCIA, J. M.; BEZERRA, W. B. A.; MONTEIRO, S. N. Evaluation of izod impact and bend properties of epoxy composites reinforced with mallow fibers. **Journal of materials research and technology**, Elsevier, v. 9, n. 1, p. 373–382, 2020.
- CUNHA, J. d. S. C. da; NASCIMENTO, L. F. C.; COSTA, U. O.; BEZERRA, W. B. A.; OLIVEIRA, M. S.; MARQUES, M. d. F. V.; SOARES, A. P. S.; MONTEIRO, S. N. Ballistic behavior of epoxy composites reinforced with amazon titica vine fibers (heteropsis flexuosa) in multilayered armor system and as stand-alone target. **Polymers**, MDPI, v. 15, n. 17, p. 3550, 2023.
- DAVID, A. G.; RAMALINGAM, V. S.; CHANDRAN, A. P.; RAMACHANDRAN, A.; SELVAM, A. Statistical modelling and assessment of surface roughness in drilling of hybrid fiber composite. **Multidisciplinary Science Journal**, v. 6, n. 2, p. 2024019–2024019, 2024.
- DEMOSTHENES, L. C. da C.; NASCIMENTO, L. F. C.; MONTEIRO, S. N.; COSTA, U. O.; FILHO, F. da C. G.; LUZ, F. S. da; OLIVEIRA, M. S.; RAMOS, F. J. H. T. V.; PEREIRA, A. C.; BRAGA, F. O. Thermal and structural characterization of buriti fibers and their relevance in fabric reinforced composites. **Journal of Materials Research and technology**, Elsevier, v. 9, n. 1, p. 115–123, 2020.
- DONALDSON, L. Microfibril angle: measurement, variation and relationships—a review. **Iawa Journal**, Brill, v. 29, n. 4, p. 345–386, 2008.
- FARUK, O.; BLEDZKI, A. K.; FINK, H.-P.; SAIN, M. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. **Progress in polymer science**, Elsevier, v. 37, n. 11, p. 1552–1596, 2012.

FELDMAN, D. Wood—chemistry, ultrastructure, reactions, by d. fengel and g. wegner, walter de gruyter, berlin and new york, 1984, 613 pp. price: 245 dm. **Journal of Polymer Science: Polymer Letters Edition**, v. 23, n. 11, p. 601–602, 1985.

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood: chemistry, ultrastructure, reactions**. [S.l.]: Walter de Gruyter, 2011.

FERREIRA, A. d. S.; NASCIMENTO, D. C. d. O.; MONTEIRO, S. N. Izod impact energy study of re-forced polisher matrix compounds with curauas fibers aligned and epoxy matrix reinforced with piassava fibers. **Matéria (Rio de Janeiro)**, SciELO Brasil, v. 23, p. e12238, 2018.

FILHO, F. da C. G.; LUZ, F. S. da; OLIVEIRA, M. S.; PEREIRA, A. C.; COSTA, U. O.; MONTEIRO, S. N. Thermal behavior of graphene oxide-coated piassava fiber and their epoxy composites. **Journal of Materials Research and Technology**, Elsevier, v. 9, n. 3, p. 5343–5351, 2020.

FRANCO, F. J. P. **Aproveitamento da fibra do epicarpo do coco babaçu em compósito com matriz epóxi: estudo do efeito do tratamento da fibra**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2010.

GEETHIKA, V. N.; RAO, V. D. P. Study of tensile strength of agave americana fibre reinforced hybrid composites. **Materials Today: Proceedings**, Elsevier, v. 4, n. 8, p. 7760–7769, 2017.

GOPALAN, V.; RAJARAJAN, S.; WILSON, M.; VENKATESAN, J.; ELANGO, M.; NATARAJAN, S.; RAJAKUMAR, S. Studies on fly ash/coir/sugarcane reinforced epoxy polymer matrix composite. **Materialwissenschaft und Werkstofftechnik**, Wiley Online Library, v. 54, n. 2, p. 215–228, 2023.

INDRAN, S.; RAJ, R. E.; SREENIVASAN, V. Characterization of new natural cellulosic fiber from cissus quadrangularis root. **Carbohydrate polymers**, Elsevier, v. 110, p. 423–429, 2014.

JACOBS, M.; DINGENEN, J. V. Ballistic protection mechanisms in personal armour. **Journal of materials science**, Springer, v. 36, n. 13, p. 3137–3142, 2001.

JOHN, M. J.; THOMAS, S. Biofibres and biocomposites. **Carbohydrate polymers**, Elsevier, v. 71, n. 3, p. 343–364, 2008.

JOSEPH, K.; CARVALHO, L. Propriedades de compósitos poliéster insaturado/tecido híbrido de juta-algodão.”, in. In: **Anais do 5º Congresso Brasileiro de Polímeros**. [S.l.: s.n.], 1999. p. 834.

JUNIO, R. F. P. **Caracterização do compósito epóxi-fibra de carnaúba para emprego em blindagem balística**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2020.

JUNIO, R. F. P.; NEUBA, L. de M.; SOUZA, A. T.; PEREIRA, A. C.; NASCIMENTO, L. F. C.; MONTEIRO, S. N. Thermochemical and structural characterization of promising carnauba novel leaf fiber (copernicia prunifera). **Journal of Materials Research and Technology**, Elsevier, v. 18, p. 4714–4723, 2022.

- KALIA, S.; KAITH, B.; KAUR, I. **Cellulose fibers: bio-and nano-polymer composites: green chemistry and technology**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2011.
- KRETSCHMANN, D. E.; ALDEN, H. A.; VERRILL, S. *et al.* Variations of microfibril angle in loblolly pine: comparison of iodine crystallization and x-ray diffraction techniques. **Microfibril angle in wood**. New Zealand: University of Canterbury, p. 157–176, 1998.
- LAU, K.-t.; HUNG, P.-y.; ZHU, M.-H.; HUI, D. Properties of natural fibre composites for structural engineering applications. **Composites Part B: Engineering**, Elsevier, v. 136, p. 222–233, 2018.
- LAVOR, C. T. B.; FERNANDES, A. A. O.; SOUSA, F. M. de. Efeito de materiais isolantes térmicos em aviários no desempenho de frango de corte. **Revista Ciência Agronômica**, Universidade Federal do Ceará, v. 39, n. 2, p. 308–316, 2008.
- LEE, S. M.; CHO, D.; PARK, W. H.; LEE, S. G.; HAN, S. O.; DRZAL, L. T. Novel silk/poly (butylene succinate) biocomposites: the effect of short fibre content on their mechanical and thermal properties. **Composites Science and Technology**, Elsevier, v. 65, n. 3-4, p. 647–657, 2005.
- LIMA, A. M.; VIDAURRE, G. B.; LIMA, R. d. M.; BRITO, E. O. Utilização de fibras (epicarpo) de babaçu como matéria-prima alternativa na produção de chapas de madeira aglomerada. **Revista Árvore**, SciELO Brasil, v. 30, p. 645–650, 2006.
- LIMA, R. N.; PAIXÃO, R. L.; MARQUES, R. B.; MALVEIRA, J. Q.; FURTINI, J. A. O.; RIOS, M. A. d. S. Investigação do potencial do talo e da palha da carnaúba para utilização como biocombustível. **Matéria (Rio de Janeiro)**, SciELO Brasil, v. 24, p. e12375, 2019.
- LORENZINE, H.; SOUSA, H.; COELHO, L.; MEDEIROS, J.; NIKOLAUS, B. Palmeiras no brasil. **São Paulo, Plantarum, Nova Odessa**, p. 70, 1996.
- LOTFI, A.; LI, H.; DAO, D. V.; PRUSTY, G. Natural fiber–reinforced composites: A review on material, manufacturing, and machinability. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 34, n. 2, p. 238–284, 2021.
- LUKO, S. N. A review of the weibull distribution and selected engineering applications. **SAE transactions**, JSTOR, p. 398–412, 1999.
- LUZ, F. S. d.; JUNIOR, E. P. L.; LOURO, L. H. L.; MONTEIRO, S. N. Ballistic test of multilayered armor with intermediate epoxy composite reinforced with jute fabric. **Materials Research**, SciELO Brasil, v. 18, p. 170–177, 2015.
- MANIVEL, P.; DHAMOTHARAN, S.; PRAKASAM, R. J.; KISHORE, G. Evaluation of tensile, flexural and impact strength of gongura fiber reinforced epoxy composite. In: AIP PUBLISHING. **AIP Conference Proceedings**. [S.l.], 2021. v. 2317, n. 1.
- MAOU, S.; MEFTAH, Y.; BOUCHAMIA, I.; BENYAGHLA, A. Alkali-treated date palm fiber-reinforced unsaturated polyester composites: thermo-mechanical performances and structural applications. **Iranian Polymer Journal**, Springer, v. 32, n. 12, p. 1581–1593, 2023.

- MARCHI, B. Z.; SILVEIRA, P. H. P. M. d.; BEZERRA, W. B. A.; NASCIMENTO, L. F. C.; LOPES, F. P. D.; CANDIDO, V. S.; SILVA, A. C. R. d.; MONTEIRO, S. N. Ballistic performance, thermal and chemical characterization of ubim fiber (*geonoma baculifera*) reinforced epoxy matrix composites. **Polymers**, MDPI, v. 15, n. 15, p. 3220, 2023.
- MATTOSO, L.; FRAGALLE, E. Uso de fibras vegetais na indústria automobilística: necessidade ecológica, oportunidade para o brasil. **Polímeros Ciência e Tecnologia**, p. 9–13, 1996.
- MEYERS, M. A. **Dynamic behavior of materials**. [S.l.]: John wiley & sons, 1994.
- MOHANTY, A.; MISRA, M.; ; HINRICHSEN, G. Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: An overview. **Macromolecular materials and Engineering**, Wiley Online Library, v. 276, n. 1, p. 1–24, 2000.
- MONTEIRO, S. N.; LOPES, F. P. D.; BARBOSA, A. P.; BEVITORI, A. B.; SILVA, I. L. A. D.; COSTA, L. L. D. Natural lignocellulosic fibers as engineering materials—an overview. **Metallurgical and Materials Transactions A**, Springer, v. 42, p. 2963–2974, 2011.
- MONTEIRO, S. N.; LOPES, F. P. D.; FERREIRA, A. S.; NASCIMENTO, D. C. O. Natural-fiber polymer-matrix composites: cheaper, tougher, and environmentally friendly. **Jom**, Springer, v. 61, p. 17–22, 2009.
- MONTEIRO, S. N.; LOURO, L. H. L.; TRINDADE, W.; ELIAS, C. N.; FERREIRA, C. L.; LIMA, E. de S.; WEBER, R. P.; SUAREZ, J. C. M.; FIGUEIREDO, A. B.-H. D. S.; PINHEIRO, W. A. *et al.* Natural curaua fiber-reinforced composites in multilayered ballistic armor. **Metallurgical and Materials Transactions A**, Springer, v. 46, p. 4567–4577, 2015.
- MONTEIRO, S. N.; PEREIRA, A. C.; FERREIRA, C. L.; JÚNIOR, É. P.; WEBER, R. P.; ASSIS, F. S. d. Performance of plain woven jute fabric-reinforced polyester matrix composite in multilayered ballistic system. **Polymers**, MDPI, v. 10, n. 3, p. 230, 2018.
- MONTEIRO, S. N.; SATYANARAYANA, K.; FERREIRA, A.; NASCIMENTO, D.; LOPES, F.; SILVA, I.; BEVITORI, A.; INÁCIO, W.; NETO, J. B.; PORTELA, T. Selection of high strength natural fibers. **Matéria (Rio de Janeiro)**, SciELO Brasil, v. 15, p. 488–505, 2010.
- MORAIS, J. P. S.; ROSA, M. d. F.; MARCONCINI, J. M. Procedimento para análise lignocelulósica. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2011., 2011.
- MOREIRA, D. **Comportamento balístico de uma blindagem multicamada utilizando compósito poliéster-curauá como camada intermediária**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2013.
- MORYE, S.; HINE, P.; DUCKETT, R.; CARR, D.; WARD, I. Modelling of the energy absorption by polymer composites upon ballistic impact. **Composites science and technology**, Elsevier, v. 60, n. 14, p. 2631–2642, 2000.
- MOSHI, A. A. M.; RAVINDRAN, D.; BHARATHI, S. S.; INDRAN, S.; SARAVANA-KUMAR, S.; LIU, Y. Characterization of a new cellulosic natural fiber extracted from the root of ficus religiosa tree. **International Journal of Biological Macromolecules**, Elsevier, v. 142, p. 212–221, 2020.

- MOURA, C. V. R. d.; SOUSA, D. d. C.; MOURA, E. M. d.; ARAÚJO, E. C. E. d.; SITTOLIN, I. M. New biodegradable composites from starch and fibers of the babassu coconut. **Polímeros**, SciELO Brasil, v. 31, p. e2021007, 2021.
- NAIK, D. L.; FRONK, T. H. Weibull distribution analysis of the tensile strength of the kenaf bast fiber. **Fibers and Polymers**, Springer, v. 17, p. 1696–1701, 2016.
- NASCIMENTO, L. F. C.; LUZ, F. S. da; COSTA, U. O.; BRAGA, F. d. O.; JÚNIOR, É. P. L.; MONTEIRO, S. N. Curing kinetic parameters of epoxy composite reinforced with mallow fibers. **Materials**, MDPI, v. 12, n. 23, p. 3939, 2019.
- NASCIMENTO, U. M.; VASCONCELOS, A.; AZEVEDO, E. B.; SILVA, F. C. Otimização da produção de biodiesel a partir de óleo de coco babaçu com aquecimento por microondas. **Eclética Química**, SciELO Brasil, v. 34, p. 37–48, 2009.
- NATIONAL INSTITUTE OF JUSTICE. **NIJ 0101.06**: Ballistic resistance of personal body armor. [S.l.], 2008.
- NETO, F. L.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. [S.l.]: Editora Blucher, 2016.
- NETO, J. S. As quebradeiras de coco no meio norte (paper 121). **Papers do NAEA**, v. 1, n. 1, 1999.
- NEUBA, D. de M. **Caracterização e avaliação balística de compósitos epóxi reforçados com fibras de junco-sete-ilhas**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2020.
- NEUBA, L. de M.; PEREIRA, A. C.; JUNIO, R. F. P.; SOUZA, A. T.; CHAVES, Y. S.; OLIVEIRA, M. P.; MONTEIRO, S. N. Ballistic performance of cyperus malaccensis sedge fibers reinforcing epoxy matrix as a standalone target. **Journal of Materials Research and Technology**, Elsevier, v. 23, p. 4367–4375, 2023.
- NIJ STANDARDS. **NIJ 0101.04**: Ballistic resistance of law enforcement and corrections standards and testing program. [S.l.], 2000.
- OLIVEIRA, M. S. **Comportamento balístico de blindagem multicamada com compósito de epóxi reforçado com tecido de fique**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2018.
- OLIVEIRA, M. S.; FILHO, F. da C. G.; PEREIRA, A. C.; NUNES, L. F.; LUZ, F. S. da; BRAGA, F. de O.; COLORADO, H. A.; MONTEIRO, S. N. Ballistic performance and statistical evaluation of multilayered armor with epoxy-fique fabric composites using the weibull analysis. **Journal of Materials Research and Technology**, Elsevier, v. 8, n. 6, p. 5899–5908, 2019.
- ÖZPARPUCU, M.; GIERLINGER, N.; CESARINO, I.; BURGERT, I.; BOERJAN, W.; RÜGGERBERG, M. Significant influence of lignin on axial elastic modulus of poplar wood at low microfibril angles under wet conditions. **Journal of experimental botany**, Oxford University Press UK, v. 70, n. 15, p. 4039–4047, 2019.
- PAGE, D.; HOSSEINY, E.; WINKLER, K.; BAIN, R. The mechanical properties of single wood-pulp fibres. i. a new approach. 1972.

- PALANISAMY, S.; KALIMUTHU, M.; PALANIAPPAN, M.; ALAVUDEEN, A.; RAJINI, N.; SANTULLI, C. Morphological characterization of soapbark fibers. **Journal of Materials Science Research and Reviews**, v. 8, n. 1, p. 19–26, 2021.
- PICKERING, K. L.; EFENDY, M. A.; LE, T. M. A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, Elsevier, v. 83, p. 98–112, 2016.
- PIRES, L. M.; CALEGARIO, N. Ajuste de modelos estocásticos lineares e não-lineares para a descrição do perfil longitudinal de árvores. **Revista Árvore**, SciELO Brasil, v. 31, p. 845–852, 2007.
- PRAMUDIA, M.; UMAMI, M. K.; PRIHANTOKO, A. Effect of fiber volume fraction on tensile strength and fracture analysis of corn husk reinforced epoxy resin composite. In: EDP SCIENCES. **MATEC Web of Conferences**. [S.l.], 2022. v. 372, p. 02005.
- PRASAD, L.; SINGH, V.; PATEL, R. V.; YADAV, A.; KUMAR, V.; WINCZEK, J. Physical and mechanical properties of rambans (agave) fiber reinforced with polyester composite materials. **Journal of Natural Fibers**, Taylor & Francis, v. 19, n. 13, p. 6104–6118, 2022.
- RAUT, N. P.; BHOSALE, S.; KOLEKAR, A. B. Application of taguchi methodology in evaluating the izod impact strength of fdm 3d printed component. **Materials Today: Proceedings**, Elsevier, 2022.
- REIS, R. H. M.; CÂNDIDO, V. S.; NUNES, L. F.; MONTEIRO, S. N. Chemical and morphological characterization of guaruman fiber. In: SPRINGER. **Green Materials Engineering: An EPD Symposium in Honor of Sergio Monteiro**. [S.l.], 2019. p. 107–113.
- RODRIGUES, P. R. B. **Produção de alumina sinterizada a partir do pó e otimização dos parâmetros de sinterização para máxima resistência mecânica**. Palmas: [s.n.], 2019.
- SALEEM, Z.; RENNEBAUM, H.; PUDEL, F.; GRIMM, E. Treating bast fibres with pectinase improves mechanical characteristics of reinforced thermoplastic composites. **Composites Science and Technology**, Elsevier, v. 68, n. 2, p. 471–476, 2008.
- SANTOS, L.; OLIVEIRA, T.; VEGA, M.; JUNIOR, J. Análise térmica e mecânica de fibras de babaçu e sua aplicação em filmes de poliestireno/babaçu. **34^a Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química**, 2011.
- SARAVANAKUMAR, S.; KUMARAVEL, A.; NAGARAJAN, T.; SUDHAKAR, P.; BASKARAN, R. Characterization of a novel natural cellulosic fiber from prosopis juliflora bark. **Carbohydrate polymers**, Elsevier, v. 92, n. 2, p. 1928–1933, 2013.
- SATURE, P.; MACHE, A. Mechanical characterization and water absorption studies on jute/hemp reinforced hybrid composites. **American Journal of Materials Science**, v. 5, n. 3C, p. 133–139, 2015.
- SATYANARAYANA, K. G.; ARIZAGA, G. G.; WYPYCH, F. Biodegradable composites based on lignocellulosic fibers—an overview. **Progress in polymer science**, Elsevier, v. 34, n. 9, p. 982–1021, 2009.

- SATYANARAYANA, K. G.; MONTEIRO, S. N.; LOPES, F. P. D.; MARGEM, F. M.; SANTAFE, H. P. G.; COSTA, L. L. da. Dimensional analysis and surface morphology as selective criteria of lignocellulosic fibers as reinforcement in polymeric matrices. **Cellulose Fibers: Bio-and Nano-Polymer Composites: Green Chemistry and Technology**, Springer, p. 215–240, 2011.
- SEGAL, L.; CREELY, J. J.; JR, A. M.; CONRAD, C. An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the x-ray diffractometer. **Textile research journal**, Sage Publications Sage CA: Thousand Oaks, CA, v. 29, n. 10, p. 786–794, 1959.
- SEKI, Y.; SARIKANAT, M.; SEVER, K.; DURMUŞKAHYA, C. Extraction and properties of ferula communis (chakshir) fibers as novel reinforcement for composites materials. **Composites Part B: Engineering**, Elsevier, v. 44, n. 1, p. 517–523, 2013.
- SILVA, A. O. da; MONSORES, K. G. de C.; OLIVEIRA, S. d. S.; WEBER, R. P.; MONTEIRO, S. N. Ballistic behavior of a hybrid composite reinforced with curaua and aramid fabric subjected to ultraviolet radiation. **Journal of materials research and technology**, Elsevier, v. 7, n. 4, p. 584–591, 2018.
- SILVA, M.; STAINER, D.; AL-QURESHI, H.; MONTEDO, O.; HOTZA, D. Alumina-based ceramics for armor application: mechanical characterization and ballistic testing. **Journal of Ceramics**, Hindawi, v. 2014, 2014.
- SILVA, R.; HARAGUCHI, S. K.; MUNIZ, E. C.; RUBIRA, A. F. Aplicações de fibras lignocelulósicas na química de polímeros e em compósitos. **Química Nova**, SciELO Brasil, v. 32, p. 661–671, 2009.
- SILVA, T. T. d.; SILVEIRA, P. H. P. M. d.; RIBEIRO, M. P.; LEMOS, M. F.; SILVA, A. P. da; MONTEIRO, S. N.; NASCIMENTO, L. F. C. Thermal and chemical characterization of kenaf fiber (*hibiscus cannabinus*) reinforced epoxy matrix composites. **Polymers**, MDPI, v. 13, n. 12, p. 2016, 2021.
- SILVA, T. T. da; SILVEIRA, P. H. P. M. d.; FIGUEIREDO, A. B.-H. d. S.; MONTEIRO, S. N.; RIBEIRO, M. P.; NEUBA, L. d. M.; SIMONASSI, N. T.; FILHO, F. d. C. G.; NASCIMENTO, L. F. C. Dynamic mechanical analysis and ballistic performance of kenaf fiber-reinforced epoxy composites. **Polymers**, MDPI, v. 14, n. 17, p. 3629, 2022.
- SILVEIRA, P.; SILVA, T.; RIBEIRO, M.; JESUS, P. Rodrigues de; CREDMANN, P.; GOMES, A. A brief review of alumina, silicon carbide and boron carbide ceramic materials for ballistic applications. **Acad. Lett**, v. 3742, p. 1–11, 2021.
- SILVEIRA, P. H. P. da; RIBEIRO, M. P.; SILVA, T. T.; LIMA, A. M.; LEMOS, M. F.; OLIVEIRA, A. G.; NASCIMENTO, L. F. C.; GOMES, A. V.; MONTEIRO, S. N. Effect of alkaline treatment and graphene oxide coating on thermal and chemical properties of hemp (*cannabis sativa* l.) fibers. **Journal of Natural Fibers**, Taylor & Francis, v. 19, n. 15, p. 12168–12181, 2022.
- SILVEIRA, P. H. P. M. da; CARDOSO, B. F. d. A. F.; MARCHI, B. Z.; MONTEIRO, S. N. Amazon natural fibers for application in engineering composites and sustainable actions: A review. **Eng**, MDPI, v. 5, n. 1, p. 133–179, 2024.

- SILVEIRA, P. H. P. M. da; SANTOS, M. C. C. d.; CHAVES, Y. S.; RIBEIRO, M. P.; MARCHI, B. Z.; MONTEIRO, S. N.; GOMES, A. V.; TAPANES, N. d. L. C. O.; PEREIRA, P. S. d. C.; BASTOS, D. C. Characterization of thermo-mechanical and chemical properties of polypropylene/hemp fiber biocomposites: Impact of maleic anhydride compatibilizer and fiber content. **Polymers**, MDPI, v. 15, n. 15, p. 3271, 2023.
- SOUZA, A. T. **Caracterização e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de caranã**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2020.
- SOUZA, A. T.; NEUBA, L. d. M.; JUNIO, R. F. P.; CARVALHO, M. T.; CANDIDO, V. S.; FIGUEIREDO, A. B.-H. d. S.; MONTEIRO, S. N.; NASCIMENTO, L. F. C.; SILVA, A. C. R. da. Ballistic properties and izod impact resistance of novel epoxy composites reinforced with caranan fiber (*mauritiella armata*). **Polymers**, MDPI, v. 14, n. 16, p. 3348, 2022.
- SOUZA, M. L. d.; CORIO, P.; TEMPERINI, M. L.; TEMPERINI, J. A. Aplicação de espectroscopias raman e infravermelho na identificação e quantificação de plastificantes em filmes comerciais de pvc esticável. **Química Nova**, SciELO Brasil, v. 32, p. 1452–1456, 2009.
- SPINACÉ, M. A.; LAMBERT, C. S.; FERMOSELLI, K. K.; PAOLI, M.-A. D. Characterization of lignocellulosic curaua fibres. **Carbohydrate Polymers**, Elsevier, v. 77, n. 1, p. 47–53, 2009.
- SUMESH, K.; KANTHAHEL, K.; KAVIMANI, V. Peanut oil cake-derived cellulose fiber: Extraction, application of mechanical and thermal properties in pineapple/flax natural fiber composites. **International journal of biological macromolecules**, Elsevier, v. 150, p. 775–785, 2020.
- SUTRISNO, W.; RAHAYU, M.; ADHIKA, D. R. Thermal properties of sago fiber-epoxy composite. **Fibers**, MDPI, v. 8, n. 1, p. 4, 2019.
- SWEYGERS, N.; DEPUYDT, D. E.; EYLEY, S.; THIELEMANS, W.; MOSLEH, Y.; IVENS, J.; DEWIL, R.; APPELS, L.; VUURE, A. W. V. Prediction of the equilibrium moisture content based on the chemical composition and crystallinity of natural fibres. **Industrial Crops and Products**, Elsevier, v. 186, p. 115187, 2022.
- 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 açai (*euterpe oleracea*) fiber for composite reinforcement. **Polímeros**, SciELO Brasil, v. 30, p. e2020003, 2020.
- TOMCZAK, F.; SYDENSTRICKER, T. H. D.; SATYANARAYANA, K. G. Studies on lignocellulosic fibers of brazil. part ii: Morphology and properties of brazilian coconut fibers. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, Elsevier, v. 38, n. 7, p. 1710–1721, 2007.
- TRUONG, M.; ZHONG, W.; BOYKO, S.; ALCOCK, M. A comparative study on natural fibre density measurement. **The journal of the Textile Institute**, Taylor & Francis, v. 100, n. 6, p. 525–529, 2009.
- VIEIRA, A. P.; SANTANA, S. A.; BEZERRA, C. W.; SILVA, H. A.; CHAVES, J. A.; MELO, J. C. de; FILHO, E. C. d. S.; AIROLDI, C. Epicarp and mesocarp of babassu

(orbignya speciosa): characterization and application in copper phtalocyanine dye removal. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, SciELO Brasil, v. 22, p. 21–29, 2011.

VIEIRA, M. T. **Construção social do mercado de armas de fogo pequenas e leves no brasil: um mercado contestado**. Campinas: [s.n.], 2021.

VRINCEANU, N.; PETRE, A. B.; HRISTODOR, C. M.; POPOVICI, E.; PUI, A.; COMAN, D.; TANASA, D. Zinc oxide—linen fibrous composites: morphological, structural, chemical, humidity adsorptive and thermal barrier attributes. **Modern surface engineering treatments**, IntechOpen, p. 21–44, 2013.

WAMBUA, P.; VANGRIMDE, B.; LOMOV, S.; VERPOEST, I. The response of natural fibre composites to ballistic impact by fragment simulating projectiles. **Composite Structures**, Elsevier, v. 77, n. 2, p. 232–240, 2007.

WANG, L.; KANESALINGAM, S.; NAYAK, R.; PADHYE, R. Recent trends in ballistic protection. **Textiles and Light Industrial Science and Technology**, Science and Engineering Publishing, v. 3, p. 37–47, 2014.

YAMANE, V. K. T. **Estudo da funcionalidade e efetividade da blindagem do colete balístico usado no exército brasileiro**. Resende: [s.n.], 2020.

ZUKAS, J. **Impact dynamics: theory and experiment**. [S.l.], 1980.