

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

**THUANE TEIXEIRA DA SILVA**

**CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES DE COMPÓSITOS  
REFORÇADOS COM FIBRAS DE KENAF PARA FINS DE PROTEÇÃO  
BALÍSTICA**

**RIO DE JANEIRO  
2021**

THUANE TEIXEIRA DA SILVA

CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES DE COMPÓSITOS  
REFORÇADOS COM FIBRAS DE KENAF PARA FINS DE PROTEÇÃO  
BALÍSTICA

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

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

Rio de Janeiro

2021

©2021

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).

SILVA, THUANE TEIXEIRA DA.

Caracterização e avaliação de propriedades de compósitos reforçados com fibras de kenaf para fins de proteção balística / THUANE TEIXEIRA DA SILVA.

– Rio de Janeiro, 2021.

99 f.

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

Dissertação (mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Ciência dos Materiais, 2021.

1. compósitos. 2. fibras naturais. 3. kenaf. 4. epóxi. 5. mecânico. 6. térmico. 7. balístico. i. Nascimento, Lucio Fabio Cassiano (orient.) ii. Monteiro, Sergio Neves (orient.) iii. Título

**THUANE TEIXEIRA DA SILVA**

**Caracterização e avaliação de propriedades de compósitos  
reforçados com fibras de kenaf para fins de proteção  
balística**

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

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

Aprovado em Rio de Janeiro, 21 de Maio de 2021, pela seguinte banca examinadora:



---

Prof. **Lucio Fabio Cassiano Nascimento** - D.C. do IME - Presidente

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

  
\_\_\_\_\_  
Prof. **André Ben-Hur da Silva Figueiredo** - D.C. do IME

  
\_\_\_\_\_  
Prof. **Fernanda Santos da Luz** - D.C. do IME

  
\_\_\_\_\_  
Prof. **Patrícia Soares da Costa Pereira** - D.C. do UEZO

Rio de Janeiro  
2021



*Este trabalho é dedicado à Deus e à minha família*

# AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer à Deus, pois sem Ele nada seria possível.

À minha família, especialmente aos meus pais pelo bom exemplo, apoio e dedicação em todos esses anos, que sempre com suas palavras de amor me incentivaram a nunca desistir dos meus sonhos e sempre fazer o meu melhor. Amo vocês!

À minha avó Nilcéia, por seu amor e torcida todos esses anos. Obrigada por cada momento, palavra, abraço e oração. Eu te amo!

Aos meus orientadores Prof. Lucio Fabio Cassiano Nascimento e Prof. Sergio Neves Monteiro, por sua dedicação e orientação, por cada conversa e conselho que fizeram este trabalho possível.

Aos meus amigos: Dryelle Rodrigues, Elaine Rodrigues, Pedro Poubel, Matheus Pereira, Naiara Le Sénéchal, Bruno Figueira, Roberto Hirsch, Clara Luz, Carla Fernanda, Anthony Garotinho e a todo o grupo de materiais compósitos, que tornaram a caminhada mais leve com seu apoio.

À Tapetes São Carlos, especialmente ao Marcos Macera, pela doação das fibras de kenaf.

Ao professor André Ben-Hur pela realização e ajuda com o tratamento de dados do ensaio de velocidade residual.

Ao IPqM (Instituto de Pesquisas da Marinha), especialmente ao Maurício e a Ana Paula, pela ajuda nos ensaios de DSC, TGA, TMA, FTIR e picnometria gasosa.

Ao CEFET (Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca), especialmente ao Noah, pela ajuda com os ensaios de impacto izod e tração dos compósitos.

Ao LNDC (Laboratório de Ensaios Não Destrutivos, Corrosão e Soldagem), especialmente ao Brendon, pela ajuda com o ensaio de tração das fibras.

Ao IEN (Instituto de Engenharia Nuclear), em especial ao senhor Mantovano, pela ajuda com os ensaios de DRX.

Ao IMA (Instituto de Macromoléculas), em especial ao Carlos Henrique Mendes, pela ajuda com o ensaio de DMA.

Ao Instituto Militar de Engenharia, aos professores da PPGCM e seus servidores pelo profissionalismo e por proporcionar um curso de qualidade.

À CAPES, pelo suporte financeiro para o desenvolvimento deste trabalho.

*“e eis que eu estou convosco todos os dias, até à consumação dos séculos. Amém!*  
*(Bíblia Sagrada, Mateus 28, 20)*

## RESUMO

Os ataques com armas de fogo que acontecem diariamente pelo mundo tem levantado questões de segurança pública. Aumentando a busca por soluções que ofereçam proteção, leveza, um baixo custo e que respeite o meio ambiente. O uso de fibras naturais ligno-celulósicas tem sido avaliadas a fim substituir as fibras sintéticas comumente utilizadas para a confecção de coletes a prova de balas. As fibras naturais são objeto de estudo para esta substituição devido as propriedades mecânicas específicas equiparáveis as das fibras sintéticas. Deste modo, o presente trabalho faz uma avaliação das propriedades mecânicas, térmicas, morfológicas e balísticas das fibras de kenaf (*Hibiscus Cannabinus* L.). Além da avaliação individual das fibras, foram confeccionadas placas compósitas com 10, 20 e 30% de volume de fibras em matriz epoxídica. Sendo assim, as fibras foram avaliadas com ensaios para determinar a sua densidade, além da realização de medições para a determinação de seu diâmetro médio. Foram realizados ensaios de tração para determinar as propriedades específicas de resistência à tração e o módulo elástico das fibras, onde foi possível observar uma maior resistência para fibras de menor diâmetro. O ensaio para obtenção do teor de umidade foi realizado através de medições feitas dentro de um período em forno à 105 °C, com umidade calculada de 7,18%. Foram realizados ensaios de DRX para determinação de cristalinidade e ângulo microfibrilar, as fibras apresentaram uma cristalinidade de 44,3%, e AMF de 7,1°. O ensaio de FTIR mostrou os grupos funcionais presentes nas fibras. O ensaio de tração dos compósitos apresentou melhores resultados para 20 e 30%, alcançando uma tensão média máxima de 61,13 MPa e um módulo elástico 11 vezes maior que o obtido para a resina pura. O ensaio de impacto Izod apresentou uma energia absorvida de 238,69 J com 20% de volume de fibras, os compósitos com 30% absorveram 387,61 J de energia mas nenhum corpo de prova se rompeu por completo. O ensaio de TGA mostrou os estágios de perda de massa da resina, da fibra e dos seus compósitos. Foram identificados três estágios de degradação, todas as amostras sofreram uma maior perda de massa entre 200 e 600 °C. Os ensaios de DSC apresentaram temperaturas de degradação até cerca de 370 °C. Através do ensaio de TMA foram obtidas as temperaturas de transição vítrea (Tg) e o coeficiente de expansão térmica linear, a resina epóxi apresentou uma maior Tg (134,7 °C) e menor coeficiente de expansão térmica ( $112,38 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ). Para o ensaio de DMA também foram encontradas temperaturas de transição vítrea menores para os compósitos, possivelmente associados ao efeito da umidade das fibras nas cadeias poliméricas do epóxi. No ensaio balístico, não houve diferença significativa entre os resultados apesar da maior integridade apresentada pelo compósito com 30% em volume de fibras que recebeu 8 (oito) disparos.

**Palavras-chave:** compósitos. fibras naturais. kenaf. epóxi. mecânico. térmico. balístico.

## ABSTRACT

The daily firearm attacks around the world have raised questions of public security. Increasing the search for solutions that offer protection, lightness, a low cost and that respects the environment. The use of natural lignocellulosic fibers has been evaluated in order to replace the synthetic fibers commonly used for making bulletproof vests. Natural fibers are the object of study for this replacement due to the specific mechanical properties comparable to those of synthetic fibers. In this way, the present work makes an evaluation of the mechanical, thermal, morphological and ballistic properties of the kenaf fibers (*Hibiscus Cannabinus* L.). In addition to the individual evaluation of the fibers, composite plates with 10, 20 and 30% volume of fibers in an epoxy matrix were made. Therefore, the fibers were evaluated with tests to determine their density, in addition to measurements to determine their average diameter. Tensile tests were performed to determine the specific properties of tensile strength and the elastic modulus of the fibers, where it was possible to observe a greater resistance for fibers of smaller diameter. The test to obtain the moisture content was carried out through measurements made within a period in an oven at 105 °C, with calculated humidity of 7.18%. XRD tests were carried out to determine crystallinity and microfibrillary angle, the fibers showed a crystallinity of 44.3%, and MFA of 7.1°. The FTIR assay showed the functional groups present in the fibers. The tensile test of the composites showed better results for 20 and 30%, reaching a maximum average stress of 61.13 MPa and an elastic modulus 11 times greater than that obtained for pure resin. The Izod impact test showed an absorbed energy of 238.69 J with 20% volume of fibers, the composites with 30% absorbed 387.61 J of energy but no specimen was completely broken. The TGA test showed the stages of mass loss of resin, fiber and their composites. Three stages of degradation were identified, all samples suffered a greater loss of mass between 200 and 600 °C. The DSC tests showed degradation temperatures up to about 370 °C. Through the TMA test, the glass transition temperatures (T<sub>g</sub>) and the linear thermal expansion coefficient were obtained, the epoxy resin showed a higher T<sub>g</sub> (134.7 °C) and lower expansion coefficient thermal (112.38x10<sup>-6</sup>/°C). For the DMA test, lower glass transition temperatures were also found for the composites, possibly associates with the effect of the moisture of the fibers on the polymeric chains of the epoxy. In the ballistic test, there was no significant difference between the results despite the greater integrity presented by the composite with 30% in volume of fibers that received 8 (eight) shots.

**Keywords:** composites. natural fibers. kenaf. epoxy. mechanical. thermal. ballistic.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Trabalhos publicados sobre as fibras de kenaf. . . . .	18
Figura 2.1 – Classificação dos compósitos. . . . .	20
Figura 2.2 – Lâminas de reforço tipo: a) contínuas alinhadas; b) tecido bidirecional; c) descontínuas e orientadas aleatoriamente; d) manta contínua, submetidas a esforços de tração uniaxial longitudinais. . . . .	22
Figura 2.3 – Grupo Glicidil. . . . .	26
Figura 2.4 – Estrutura química de uma resina epóxi diglicidil éter do bisfenol-A. . .	26
Figura 2.5 – Classificação das Fibras Naturais e Sintéticas. . . . .	28
Figura 2.6 – Microestrutura das FNLs. . . . .	30
Figura 2.7 – Plantação de kenaf. . . . .	32
Figura 2.8 – Ilustração da haste do kenaf. . . . .	33
Figura 3.1 – Fibras de kenaf: a) como recebida; b) preparadas. . . . .	37
Figura 3.2 – Matriz metálica. . . . .	38
Figura 3.3 – Moldura de papel utilizada como suporte. . . . .	44
Figura 3.4 – Esquema do corpo de prova de tração. . . . .	44
Figura 3.5 – Esquema do corpo de prova de impacto Izod. . . . .	45
Figura 3.6 – a) projétil utilizado no ensaio; b) sistema de detecção utilizado. . . .	47
Figura 4.1 – Micrografias: a) e b) vista longitudinal das fibras de kenaf . . . . .	51
Figura 4.2 – Micrografias da seção transversal das fibras de kenaf . . . . .	51
Figura 4.3 – Distribuição de frequências das dimensões médias da seção transversal das fibras de kenaf. . . . .	54
Figura 4.4 – Micrografias de MEV do diâmetro da fibra: a) na região superior, b) na região inferior. . . . .	55
Figura 4.5 – Difratoograma de raios-X da fibra de kenaf. Inserção: deconvolução para o cálculo do ângulo microfibrilar (AMF). . . . .	56
Figura 4.6 – Espectro de FTIR da fibra de kenaf. . . . .	58
Figura 4.7 – Gráfico dos valores médios obtidos de resistência das fibras individuais para cada diâmetro. . . . .	59
Figura 4.8 – Curvas de tensão x deformação para as diferentes classes estudadas. . .	61
Figura 4.9 – Análise macroscópica de tração: a) resina epóxi; b) EK10; c) EK20 e d) EK30. . . . .	61
Figura 4.10–Análise macroscópica de tração: a) resina epóxi; b) EK10; c) EK20 e d) EK30. . . . .	62
Figura 4.11–Curvas características de tração para: a) resina epóxi; b) EK10; c) EK20 e d) EK30. . . . .	63

Figura 4.12–Gráfico dos valores médios obtidos: a) resistência a tração; b) módulo de elasticidade. . . . .	64
Figura 4.13–Aspecto macroscópico das fraturas dos corpos de prova: a) 10% de fibras; b) 20% de fibras e c) 30% de fibras. . . . .	67
Figura 4.14–Média da energia de impacto Izod absorvida pelos corpos de prova. . .	69
Figura 4.15–Micrografias: a) e b) compósito epóxi com 10% em volume de fibras de kenaf. . . . .	69
Figura 4.16–Micrografias: a) compósito epóxi com 20% em volume de fibras de kenaf e b) compósito epóxi com 30% em volume de fibras de kenaf. . . . .	70
Figura 4.17–Curvas de TGA e DTG: a) resina epóxi ; b) fibra de kenaf. . . . .	71
Figura 4.18–Curvas de: a) TGA e b) DTG dos compósitos. . . . .	73
Figura 4.19–Curvas de DSC obtidas para: a) resina epóxi; b) fibra de kenaf. . . . .	74
Figura 4.20–Curvas de DSC obtidas para os compósitos de kenaf. . . . .	75
Figura 4.21–Curvas de TMA obtidas para a resina epóxi, e compósitos com 10%, 20% e 30% em volume de fibras de kenaf. . . . .	76
Figura 4.22–Gráficos de DMA para o módulo de armazenamento ( $E'$ ), módulo de perda ( $E''$ ) e $\tan \delta$ para amostra de resina epóxi. . . . .	77
Figura 4.23–Gráficos de DMA para o módulo de armazenamento ( $E'$ ), módulo de perda ( $E''$ ) e $\tan \delta$ para amostra de compósito com 10% em volume de fibras. . . . .	78
Figura 4.24–Gráficos de DMA para o módulo de armazenamento ( $E'$ ), módulo de perda ( $E''$ ) e $\tan \delta$ para amostra de compósito com 20% em volume de fibras. . . . .	79
Figura 4.25–Gráficos de DMA para o módulo de armazenamento ( $E'$ ), módulo de perda ( $E''$ ) e $\tan \delta$ para amostra de compósito com 30% em volume de fibras. . . . .	80
Figura 4.26–Placa 30%: a) antes do ensaio; b) depois do ensaio. . . . .	81
Figura 4.27–Mecanismos de fratura após ensaio de velocidade residual. . . . .	82
Figura 4.28–Gráfico de Weibull para energia absorvida EK30. . . . .	83

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Características e limitações das resinas termorrígidas. . . . .	25
Tabela 2.2 – Propriedades mecânicas da resina epóxi. . . . .	27
Tabela 2.3 – Composição de celulose, lignina e hemicelulose de algumas fibras naturais. . . . .	28
Tabela 2.4 – Propriedades físicas e mecânicas de algumas fibras naturais e sintéticas. . . . .	31
Tabela 2.5 – Taxonomia do kenaf. . . . .	32
Tabela 2.6 – Nível de proteção do sistema de blindagem quanto ao impacto balístico. . . . .	35
Tabela 3.1 – Densidade do kenaf. . . . .	39
Tabela 3.2 – Bandas de absorção características das fibras naturais lignocelulósicas. . . . .	43
Tabela 3.3 – Parâmetros utilizados na análise de variância. . . . .	49
Tabela 4.1 – Densidade pelo método de Arquimedes. . . . .	52
Tabela 4.2 – Densidade pelo método de picnometria gasosa. . . . .	53
Tabela 4.3 – Densidade pelo método da regra das misturas . . . . .	53
Tabela 4.4 – Diferentes intervalos de dimensões da fibra de kenaf. . . . .	54
Tabela 4.5 – Percentual de umidade da fibra de kenaf. . . . .	56
Tabela 4.6 – Resultados obtidos por DRX. . . . .	57
Tabela 4.7 – Tensão média e parâmetros de Weibull para os diferentes diâmetros das fibras de kenaf. . . . .	59
Tabela 4.8 – Aplicação do método estatístico ANOVA nos resultados de resistência à tração das fibras. . . . .	60
Tabela 4.9 – Teste de Tukey para os resultados de resistência à tração das fibras. . . . .	60
Tabela 4.10–Valores para resistência à tração, módulo de elasticidade e deformação média dos compósitos. . . . .	63
Tabela 4.11–Aplicação do método estatístico ANOVA nos resultados de resistência à tração. . . . .	64
Tabela 4.12–Teste de Tukey para os resultados de resistência a tração. . . . .	65
Tabela 4.13–Aplicação do método estatístico Weibull nos resultados de resistência a tração. . . . .	65
Tabela 4.14–Aplicação do método estatístico ANOVA nos resultados de módulo de elásticidade. . . . .	66
Tabela 4.15–Teste de Tukey para os resultados de módulo de elasticidade. . . . .	66
Tabela 4.16–Aplicação do método estatístico Weibull nos resultados de módulo elasticidade. . . . .	66
Tabela 4.17–Energia absorvida para as amostras do ensaio de impacto Izod. . . . .	68
Tabela 4.18–Aplicação do método estatístico ANOVA nos resultados de impacto. . . . .	70
Tabela 4.19–Teste de Tukey para os compósitos. . . . .	71
Tabela 4.20–Perda de massa percentual das fibras de kenaf. . . . .	72



Tabela 4.21–Resumo de temperaturas de degradação e perda de massa para a resina, a fibra e seus compósitos. . . . .	73
Tabela 4.22–Valores médios utilizados para o cálculo de $E_{abs}$ . . . . .	81
Tabela 4.23–Valores calculados de $E_{abs}$ . . . . .	82
Tabela 4.24–Aplicação do método estatístico ANOVA nos resultados balísticos. . . .	83
Tabela 4.25–Aplicação do método estatístico Weibull nos resultados balísticos. . . .	83
Tabela 4.26–Valores das velocidades médias de impacto e residual, energia absorvida para compósitos com diferentes FNLs. . . . .	84

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMF	Ângulo microfibrilar
ANOVA	Análise de variância
ASTM	American Society for Testing of Materials
CAEx	Centro de Avaliações do Exército
CFNL	Compósito de fibra natural lignocelulósica
DGEBA	Diglicidil éter do bisfenol A
DMA	Análise dinâmico-mecânica
DMS	Diferença mínima significativa
DSC	Calorimetria diferencial de varredura
DRX	Difração de raios X
FNL	Fibra natural lignocelulósica
FTIR	Infravermelho por Transformada de Fourier
GL	Grau de liberdade
IME	Instituto Militar de Engenharia
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NIJ	National Institute of Justice
QMR	Quadrado médio do resíduo
QMT	Quadrado médio dos tratamentos
SQR	Soma dos quadrados do resíduo
SQT	Soma dos quadrados dos tratamentos
SQT <sub>o</sub>	Soma dos quadrados total
TETA	Trietileno tetramina
TGA	Análise termogravimétrica

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\beta$	Módulo de Weibull
$\rho$	Densidade
$\theta$	Unidade característica de Weibull
$\delta$	Delta
$E$	Módulo de elasticidade
$E_{\text{abs}}$	Energia absorvida
$I$	Intensidade
$I_C$	Índice de cristalinidade
$m$	Massa
$R^2$	Ajuste da curva de Weibull
$V$	Volume
$V_i$	Velocidade de impacto
$V_R$	Velocidade residual
$V_L$	Velocidade limite

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
1.1	JUSTIFICATIVA	18
1.2	OBJETIVOS	19
1.2.1	OBJETIVOS GERAIS	19
1.2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>20</b>
2.1	COMPÓSITOS	20
2.1.1	COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS	21
2.2	MATERIAIS POLIMÉRICOS	23
2.2.1	CONCEITOS GERAIS	23
2.2.2	RESINA EPÓXI	26
2.3	FIBRAS NATURAIS LIGNOCELULÓSICAS	27
2.3.1	FIBRAS DE KENAF	31
2.4	BLINDAGEM BALÍSTICA	34
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>37</b>
3.1	MATERIAIS	37
3.1.1	FIBRAS DE KENAF	37
3.1.2	RESINA EPÓXI	37
3.2	FABRICAÇÃO DOS COMPÓSITOS	38
3.3	CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS E COMPÓSITOS DE KENAF	38
3.3.1	DENSIDADE	38
3.3.1.1	ARQUIMEDES	39
3.3.1.2	PICNOMETRIA GASOSA	40
3.3.1.3	REGRA DAS MISTURAS	40
3.3.2	DIÂMETRO	41
3.3.3	TEOR DE UMIDADE	41
3.3.4	DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)	41
3.3.4.1	CRISTALINIDADE	42
3.3.4.2	ÂNGULO MICROFIBRILAR	42
3.3.5	ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)	43
3.3.6	ENSAIO DE TRAÇÃO DAS FIBRAS	43
3.3.7	ENSAIO DE TRAÇÃO DOS COMPÓSITOS	44
3.3.8	ENSAIO DE IMPACTO IZOD	44

3.3.9	ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA) . . . . .	45
3.3.10	CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA (DSC) . . . . .	45
3.3.11	ANÁLISE TERMOMECAÂNICA (TMA) . . . . .	46
3.3.12	ANÁLISE DINÂMICO-MECAÂNICA (DMA) . . . . .	46
3.3.13	ENSAIO BALÍSTICO . . . . .	47
3.3.14	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA . . . . .	48
3.3.15	ANÁLISE ESTATÍSTICA . . . . .	48
3.3.15.1	ANÁLISE DE DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL . . . . .	48
3.3.15.2	ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) . . . . .	49
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES . . . . .</b>	<b>51</b>
4.1	ANÁLISE ESTRUTURAL DA FIBRA KENAF . . . . .	51
4.2	DENSIDADE . . . . .	52
4.2.1	ARQUIMEDES . . . . .	52
4.2.2	PICNOMETRIA GASOSA . . . . .	52
4.2.3	REGRAS DAS MISTURAS . . . . .	53
4.3	DIÂMETRO . . . . .	54
4.4	TEOR DE UMIDADE . . . . .	55
4.5	DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX) . . . . .	56
4.6	ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR) . . . . .	57
4.7	ENSAIO DE TRAÇÃO DAS FIBRAS . . . . .	58
4.8	ENSAIO DE TRAÇÃO DOS COMPÓSITOS . . . . .	61
4.9	ENSAIO DE IMPACTO IZOD . . . . .	67
4.10	ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA) . . . . .	71
4.11	CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA (DSC) . . . . .	73
4.12	ANÁLISE TERMOMECAÂNICA (TMA) . . . . .	75
4.13	ANÁLISE DINÂMICO-MECAÂNICA (DMA) . . . . .	77
4.14	ENSAIO BALÍSTICO . . . . .	81
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES . . . . .</b>	<b>85</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS . . . . .</b>	<b>87</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>88</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Tem surgido uma grande demanda mundial pelo desenvolvimento de novas tecnologias, a fim de possibilitar a utilização de produtos que causem um menor impacto ambiental (MARINELLI et al., 2008). Com isso, a substituição de fibras sintéticas por fibras naturais vem sendo observada em diversos setores da indústria, isso porque são provenientes de fontes renováveis e por serem biodegradáveis (MONTEIRO et al., 2011).

Os materiais compósitos vêm sendo utilizados, com sucesso, em componentes estruturais de alto desempenho usados em aviões, automóveis, navios, plantas petroquímicas, implantes ortopédicos, na construção civil, energia eólica, entre outras (NETO; PARDINI, 2016). As fibras naturais lignocelulósicas (FNLs) têm conquistado espaço na indústria como uma opção sustentável para a substituição de fibras sintéticas para reforço em compósitos de matriz polimérica. Deve-se destacar a utilização de fibras naturais de origem vegetal, em razão da enorme variedade de espécies disponíveis na biodiversidade, que podem ser pesquisadas, por sua abundância e por se tratar de um recurso renovável (MARINELLI et al., 2008).

Compósitos poliméricos produzidos a partir de polímeros recicláveis têm sido utilizados de forma ativa devido às ameaças no fornecimento de petróleo futuramente e as preocupações com o meio ambiente. Compósitos reforçados com fibra natural são utilizados para substituir compósitos de fibra sintética, Principalmente os compósitos reforçados com kenaf, já que apresentam vantagens, como biodegradabilidade, renovabilidade, reciclabilidade, abundância, permeabilidade, resistência à corrosão, alto grau de flexibilidade, não são tóxicas, não liberação de substâncias prejudiciais a saúde, não possuir efeito alérgico, propriedades mecânicas competitivas, menor consumo de energia, menor abrasividade aos equipamentos de processamento e problemas mínimos de eliminação de resíduos (NISHINO et al., 2003; NETRAVALI; CHABBA, 2003; SGRICCIA; HAWLEY; MISRA, 2008; BHOOPATHI; RAMESH; DEEPA, 2014; RAMESH, 2016). A Figura 1.1, mostra o crescente número de publicações de trabalhos com fibras de kenaf nos últimos anos segundo a base de dados da SCOPUS.

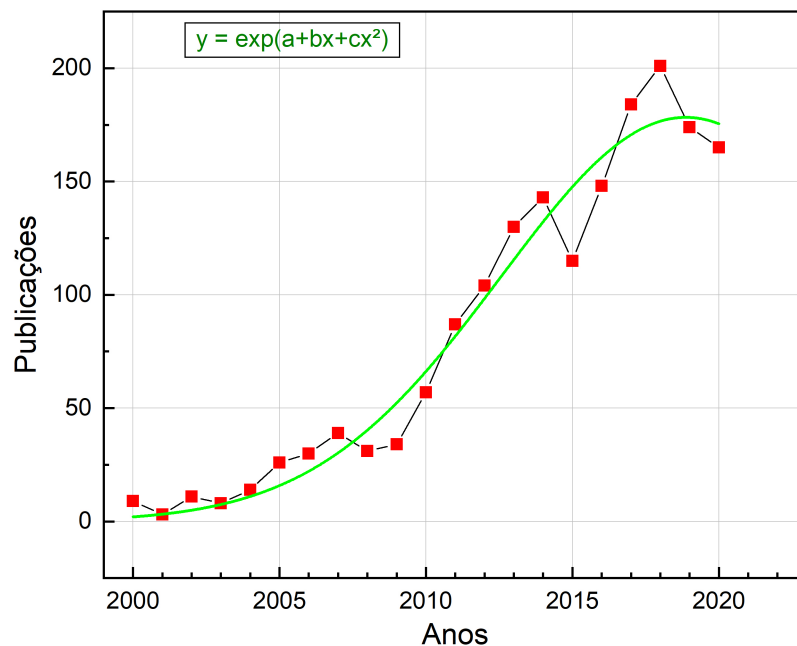


Figura 1.1 – Trabalhos publicados sobre as fibras de kenaf.

Fonte – Próprio autor

O presente trabalho visa estudar uma nova alternativa de fibra natural lignocelulósica para aplicações de engenharia, utilizando a fibra de kenaf incorporada a uma matriz epoxídica. Para a análise, serão preparadas placas compósitas com 10, 20 e 30% em volume de fibras que serão submetidas a testes físicos, mecânicos, térmicos, balísticos e morfológicos.

## 1.1 Justificativa

No atual cenário mundial, a preocupação com o meio ambiente tem gerado discussões nos mais diversos setores da economia. O uso de FNLs na produção de compósitos poliméricos atribuem ao material leveza, menor custo em sua produção, além das vantagens que envolvem a utilização de um material com menor densidade, elevado fator de aspecto e propriedades mecânicas competitivas.

O trabalho propõe a investigação das fibras de kenaf como uma opção para reforço em compósitos poliméricos, motivando a substituição das fibras sintéticas que são convencionalmente utilizadas, as quais possuem alto custo de produção e vida útil limitada por fibras naturais lignocelulósicas. As fibras Kenaf têm sido consideradas por suas elevadas propriedades mecânicas e o seu módulo específico comparável ao da fibra de vidro. Pode-se

destacar outras características atrativas, como por exemplo, a rapidez de crescimento, adaptabilidade ecológica, e um menor desperdício. Podem crescer muito rápido e a parte lenhosa produz cerca de 40% de fibra utilizável (TAMRAKAR et al., 2021).

A produção de compósitos a base de kenaf apresentam vantagens como a redução de energia não renovável e uma menor emissão de gases de efeito estufa. Além de possuir um baixo custo de produção e elevado rendimento, competem com as fibras de linho, cânhamo e juta em qualidade e preço (MONTI, 2013).

E se justifica pela caracterização de um novo material para aplicação em blindagem balística, que possa ser integrado ao banco de dados gerados para fibras naturais com aplicação em defesa militar. Além do entendimento das propriedades mecânica, dinâmica e térmica dos materiais compósitos produzidos.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivos Gerais

O objetivo principal deste trabalho é investigar as propriedades morfológicas, físicas, mecânicas, térmicas e balísticas dos compósitos epoxídicos reforçados com fibras de kenaf, a fim de fornecer uma alternativa ecologicamente correta para a substituição de materiais sintéticos.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

1. Realizar caracterização morfológica da fibra de kenaf e dos compósitos utilizados neste trabalho;
2. Investigar as propriedades mecânicas das fibras de kenaf como reforço em compósitos com fração volumétrica de 10, 20 e 30% através dos ensaios de tração e impacto;
3. Efetuar caracterização química na fibra de kenaf e seus compósitos com o intuito de verificar a cristalinidade, ângulo microfibrilar, além de visualizar as bandas das ligações químicas das fibras;
4. Avaliar as propriedades térmicas das fibras de kenaf e dos compósitos com variações de 10, 20 e 30% através dos ensaios de DSC, TGA, DMA e TMA;
5. Analisar o desempenho balístico do compósito epóxi-kenaf com 30% em volume de fibras.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Compósitos

Pode ser considerado um compósito qualquer material composto por duas ou mais fases que apresente uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases integrantes, de modo que se obtenha a melhor combinação de propriedades, comparativamente aquelas obtidas individualmente por cada fase constituinte. Os materiais compósitos podem ser constituídos de apenas duas fases sendo uma contínua denominada matriz e uma e dispersa designada reforço (NETO; PARDINI, 2016; CALLISTER; RETHWISCH, 2018).

O componente contínuo envolve toda a fase dispersa e é responsável por transferir os esforços que o compósito é submetido para o reforço, que é o principal responsável pela resistência do material. Todas as propriedades de um compósito serão em função das propriedades das fases que constituem o material e podem ser projetados de forma a obter a melhor combinação de resistência, tenacidade, densidade, dureza, condução, resistência à altas temperaturas (JR et al., 2007; DATOO, 2012).

Na Figura 2.1 é apresentado um esquema para a classificação de compósitos mostrando suas principais divisões: compósitos reforçados com partículas, compósitos reforçados com fibras, compósitos estruturais e nanocompósitos.

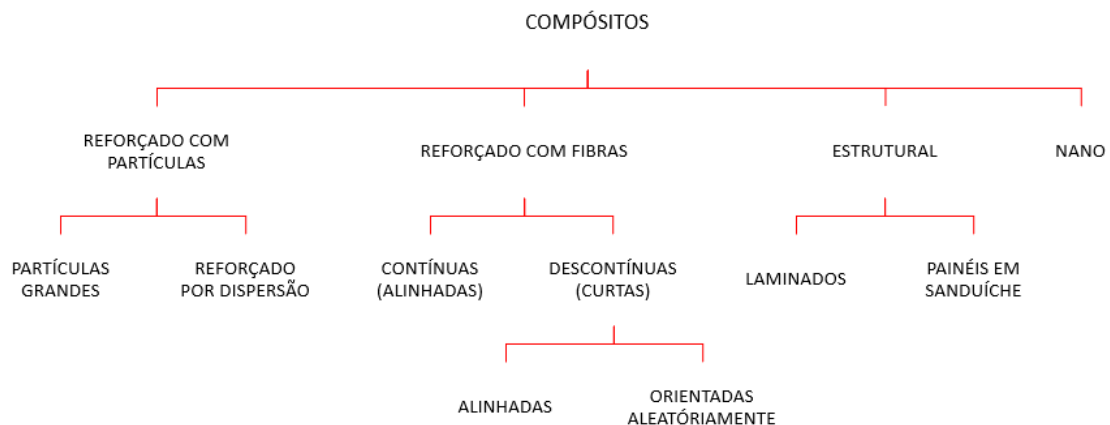


Figura 2.1 – Classificação dos compósitos.

Fonte – Callister e Rethwisch (2018)

### 2.1.1 Compósitos Reforçados com Fibras

Segundo Callister e Rethwisch (2018), os compósitos reforçados com fibras são os mais comuns e de maior importância tecnológica. Estes apresentam alta resistência e/ou rigidez em relação ao peso, essas características são expressas como parâmetros de resistência específica (razão entre o limite de resistência à tração e a massa específica) e módulo específico (razão entre o módulo de elasticidade e a massa específica). Fibras e matrizes com baixa densidade geram compósitos com elevada resistência e módulos específicos excepcionalmente elevados.

Materiais que são utilizados como fibra de reforço demonstram elevado limite de resistência a tração e são classificados segundo a sua natureza e diâmetro em 3 grupos distintos, whiskers, fibras e arames. Os whiskers são monocristais com pequenas dimensões e virtualmente sem defeitos, sendo um dos materiais mais resistentes conhecidos. Os classificados como fibras podem ser policristalinos ou amorfos, possuem pequenos diâmetros e geralmente são polímeros ou cerâmicas. Já os arames finos possuem diâmetros relativamente grandes geralmente de aço, tungstênio e molibdênio, são usados como reforço radial de aço em pneus, carcaças de foguetes e mangueiras de alta pressão (CHAWLA, 2012; CALLISTER; RETHWISCH, 2018).

As propriedades dos compósitos serão influenciadas pela quantidade relativa das fases, geometria da fase dispersa e pelas propriedades de cada fase constituinte. Suas propriedades também dependerão da ligação interfacial entre a fibra e a matriz. Como não existe transmissão de carga da matriz para as extremidades das fibras é necessário atender a um comprimento mínimo, chamado comprimento crítico para que haja um aumento na resistência e na rigidez dos compósitos (CALLISTER; RETHWISCH, 2018). O comprimento crítico de uma fibra pode ser obtido através da Equação 2.1:

$$l_c = \frac{\sigma_f^* d}{2\tau_c} \quad (2.1)$$

Sendo:

$l_c$  - Comprimento crítico da fibra;

$\sigma_f^*$  - Limite de resistência à tração da fibra;

$d$  - Diâmetro da fibra;

$\tau_c$  - Tensão de escoamento ao cisalhamento da matriz.

Quanto maior o comprimento das fibras mais efetivo é o reforço proporcionado por ela. Fibras com o comprimento maior que o comprimento crítico ( $l > l_c$ ) são contínuas, e promovem um significativo aumento na resistência do compósito (CALLISTER; RETHWISCH, 2018).

A orientação das fibras, distribuição, aglomeração e molhabilidade apresentam grande influência sobre sua resistência e demais propriedades de seus compósitos. As fibras contínuas são normalmente alinhadas, enquanto as fibras descontínuas podem estar alinhadas, orientadas aleatoriamente, ou ainda parcialmente orientadas. Quando a distribuição das fibras é uniforme, os compósitos apresentam melhor desempenho (NETO; PARDINI, 2016; CALLISTER; RETHWISCH, 2018). A figura 2.2 representa esquematicamente compósitos reforçados por fibras.

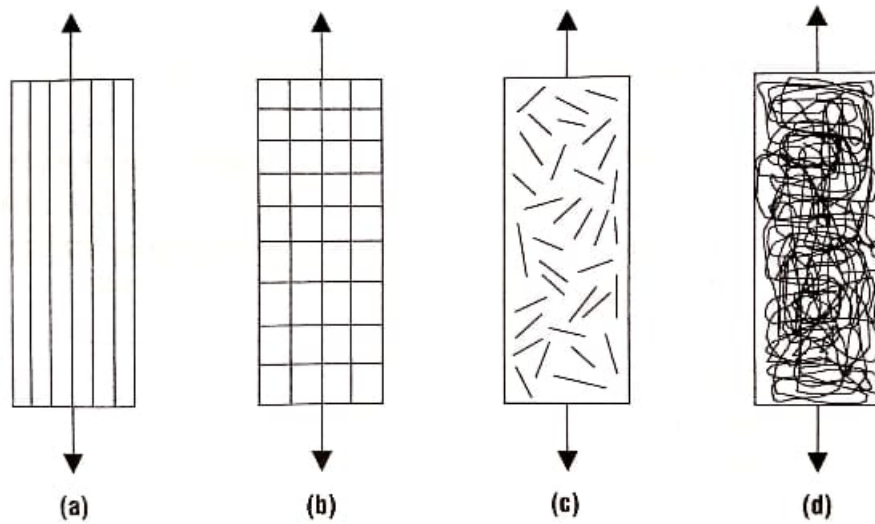


Figura 2.2 – Lâminas de reforço tipo: a) contínuas alinhadas; b) tecido bidirecional; c) descontínuas e orientadas aleatoriamente; d) manta contínua, submetidas a esforços de tração uniaxial longitudinais.

Fonte – Neto e Pardini (2016)

Cada fase constituinte do compósito contribui para suas propriedades finais, essa contribuição dependerá apenas da fração volumétrica de suas fases. As propriedades mecânicas mais estudadas são o módulo de elasticidade e o limite de resistência a tração. O caso mais simples é o de um sistema constituído por duas fases, considerando-se fibras contínuas submetidas a um carregamento longitudinal. A Equação 2.2 apresenta a regra das misturas que é utilizada para estimar o módulo de elasticidade do composto (FREIRE; MONTEIRO; CYRINO, 2013; CALLISTER; RETHWISCH, 2018).

$$E_{cl} = E_m V_m + E_f V_f \quad (2.2)$$

Sendo:

$E_{cl}$  - Módulo elástico do compósito;

$E_m$  - Módulo elástico da matriz;

$V_m$  - Fração volumétrica da matriz;

$E_f$  - Módulo elástico da fibra;

$V_f$  - Fração volumétrica da fibra.

A fase matriz dos compósitos pode ser constituída por materiais metálicos, cerâmicos e poliméricos. A matriz tem por funções: unir as fibras, transmitir a carga aplicada as fibras, proteger as fibras contra qualquer dano superficial e serve como uma barreira de propagação de trincas (CALLISTER; RETHWISCH, 2018).

As matrizes poliméricas consistem em resinas que podem ser termoplásticas ou termofixas. Essas matrizes têm sido usadas para diversas aplicações em compósitos, por seu custo competitivo, facilidade de produção e por apresentar propriedades mecânicas satisfatórias (CHAWLA, 2012; NETO; PARDINI, 2016).

## 2.2 Materiais Poliméricos

### 2.2.1 Conceitos Gerais

Polímeros são materiais que podem ser de natureza orgânica ou inorgânica; de diversas fontes, podendo ser natural ou sintético. A palavra polímero é um termo de origem grega, que significa: poli (muitos) e mero (parte), logo pode-se dizer que polímeros são compostos químicos formados por muitas partes. O mero é a unidade repetida da cadeia polimérica, um polímero é uma macromolécula composta por muitas unidades de repetição, ligadas através de ligações covalentes, com uma boa estabilidade físico-química, formando longas cadeias resultando em compostos de alta massa molecular (MANO, 1999; REIS et al., 2015; CANEVAROLO, 2019).

No universo dos plásticos, existem dois grandes grupos que se podem considerar: os termoplásticos e os termofixos, cuja divisão baseia-se na distinção do seu comportamento térmico durante o processamento (CALLISTER; RETHWISCH, 2018).

Polímeros termoplásticos são aqueles que fundem ao serem aquecidos e solidificam quando resfriados, indiferente de como o processo é repetido. Embora haja limitações, podem ser reprocessados várias vezes e esse alternamento de fusão/solidificação os torna recicláveis, porém um número excessivo de ciclos pode afetar as propriedades mecânicas e físicas do material. Nos termoplásticos, os átomos ou moléculas são ligados ponta a ponta em uma série de longas cadeias, que existem independente da outra (CHAWLA, 2012; GLÓRIA et al., 2017).

Os polímeros termofixos, após submetidos à aquecimento, tornam-se sólidos irreversivelmente. O processo de solidificação é conhecido como cura. Durante a cura, todas as pequenas moléculas são quimicamente unidas para formar uma grande cadeia molecular. A cura consiste na formação do cruzamento de moléculas adjacentes resultando de uma cadeia complexa interligada. Estes cruzamentos ligados evitam o deslocamento de cadeias

individuais prevenindo o fluxo plástico com o aquecimento. A mudança do estado líquido para o estado sólido é irreversível e, não há fusão, o aquecimento resulta apenas em um desarranjo químico (CHAWLA, 2012; GLÓRIA et al., 2017).

Materiais poliméricos, se comparados a metais e cerâmicas possuem baixa resistência a fratura. A fratura em polímeros termofixos se dá de maneira frágil, as trincas se formam onde há concentração de tensões fazendo com que as ligações covalentes da rede ou nas ligações cruzadas sejam rompidas. Já nos termoplásticos é possível ocorrer tanto fraturas frágeis quanto dúcteis, muitos ainda podendo apresentar transição dúctil-frágil. Esse comportamento pode ser influenciado por modificações na estruturas do polímero que aumente sua temperatura de transição vítrea, redução na temperatura, aumento na taxa de deformação, e outros (CALLISTER; RETHWISCH, 2018).

As resinas termorrígidas são as mais utilizadas no processamento de compósitos poliméricos. Isto por serem de fácil processamento, promoverem excelente molhabilidade do reforço, e por apresentarem boas propriedades, além da disponibilidade a um custo relativamente baixo (JÚNIOR et al., 2012; CANEVAROLO, 2019).

A obtenção das resinas termorrígidas se dão a partir de oligômeros de baixo peso molecular que se apresentam normalmente como um líquido de baixa a média viscosidade. A reação de reticulação se dá através da adição de um agente de cura, seja ele um iniciador ou endurecedor, ou através do aumento da temperatura. Após a cura, obtém-se um material de rede macromolecular altamente reticulada, infusível e insolúvel, que exibe alta resistência/rigidez mecânica com um mínimo de tenacidade e elevada estabilidade térmica (PILATO; MICHNO, 1994; ROSATO; ROSATO, 2004).

A Tabela 2.1 apresenta as características e limitações apresentadas por diversas resinas termorrígidas.

Tabela 2.1 – Características e limitações das resinas termorrígidas.

Resina	Características	Limitações
Epóxi	<ul style="list-style-type: none"> <li>- excelente propriedade em compósitos</li> <li>- muito boa resistência química e propriedades elétricas</li> <li>- boas propriedades térmicas</li> <li>- baixa contração na cura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- longos ciclos de cura</li> <li>- melhores propriedades obtidas em altas temperaturas de cura</li> </ul>
Fenólica	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ótimas propriedades térmicas</li> <li>- boa resistência ao fogo</li> <li>- boas propriedades elétricas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- cor</li> </ul>
Poliéster	<ul style="list-style-type: none"> <li>- amplamente utilizada</li> <li>- fácil uso</li> <li>- cura a temperatura ambiente</li> <li>- ótimas propriedades em compósitos</li> <li>- boa resistência química</li> <li>- boas propriedades elétricas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- emissão de estireno</li> <li>- contração durante a cura</li> <li>- inflamável</li> </ul>
Poliamida	<ul style="list-style-type: none"> <li>- excelentes propriedades térmicas</li> <li>- boas propriedades em compósitos</li> <li>- boa resistência ao fogo</li> <li>- boas propriedades elétricas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- cor</li> </ul>
Poliuretano	<ul style="list-style-type: none"> <li>- boas propriedades em compósitos</li> <li>- muito boa resistência química</li> <li>- alta dureza (resistência ao impacto)</li> <li>- boa resistência a abrasão</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- cor</li> <li>- isocianetos como agentes de cura</li> </ul>
Silicone	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ótimas propriedades térmicas</li> <li>- excelente resistência química</li> <li>- ótimas propriedades elétricas</li> <li>- resistente a hidrólise e oxidação</li> <li>- boa resistência ao fogo</li> <li>- não tóxico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- adesão</li> <li>- longos ciclos de cura</li> <li>- cura somente a altas temperaturas</li> </ul>
Vinil Ester	<ul style="list-style-type: none"> <li>- boa resistência à fadiga</li> <li>- excelente propriedades em compósitos</li> <li>- muito boa resistência química</li> <li>- boa dureza</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- emissão de estireno</li> <li>- contração durante a cura</li> <li>- inflamável</li> </ul>

Fonte – Adaptado de Rosato e Rosato (2004)

## 2.2.2 Resina Epóxi

As resinas epóxi, também conhecidas como epoxídicas são termorrígidos de alto desempenho que apresentam um conjunto desejável de propriedades que favorecem sua aplicação em diversos setores industriais (NETO; PARDINI, 2016). A maioria das resinas epoxídicas são preparadas pela reação da epicloridrina com o bisfenol A. Dependendo do peso molecular pode se apresentar no estado líquido ou sólido, podendo ser curada por meio de ligações permanentes, a temperatura ambiente ou a quente (120 à 200 °C) (JUNIOR, 2017).

O grupo glicidil (Figura 2.3), é usado como referência do grupo epóxi terminal, estes grupos são conhecidos por oxirano, etoxilina ou simplesmente anel epóxi. Sendo o nome completado por éster, éter, amina, etc., de acordo com a natureza do grupo ligado ao terceiro carbono. A primeira resina comercial foi o produto da reação de epicloridrina e bisfenol A dando assim a resina mais comum conhecida como diglicidil éter de bisfenol A (DGEBA) (MONTEIRO et al., 2014b; LIMA; ASSUMPÇÃO, 2019).

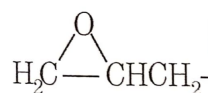


Figura 2.3 – Grupo Glicidil.

Fonte – Adaptado de Neto e Pardini (2016)

Segundo Lima e Assumpção (2019), a obtenção do epóxi se dá a partir da reação entre a epicloridrina e o bisfenol A, onde suas relações estequiométricas podem variar de de 10:1 até 1,2:1, podendo assim obter desde resinas líquidas até resinas sólidas, com dois anéis epóxi entremeados por uma unidade que se repete  $n$  vezes, e com isso possibilita a variação das propriedades da resina obtida. Na Figura 2.4 pode-se observar a estrutura química da resina DGEBA.

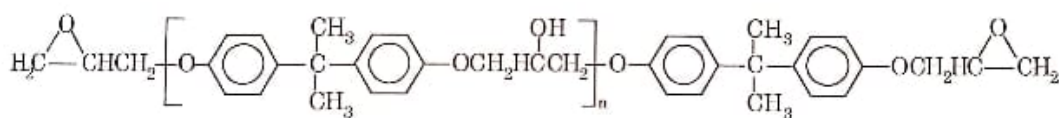


Figura 2.4 – Estrutura química de uma resina epóxi diglicidil éter do bisfenol-A.

Fonte – Neto e Pardini (2016)

De acordo com Neto e Pardini (2016) a estequiometria da mistura de epóxi/endurecedor é crucial na definição das propriedades do material após a cura. Essa relação pode afetar as propriedades químicas, físicas e mecânicas do material. Na Tabela 2.2 são apresentadas as propriedades mecânicas da resina epóxi.

Tabela 2.2 – Propriedades mecânicas da resina epóxi.

Resina	Resistência à Tração (MPa)	Módulo Elástico (GPa)	Deformação (%)
Epóxi	40 - 90	2,5 - 6,0	1 - 6

Fonte – Adaptado de Neto e Pardini (2016)

As características de resistência, deformação e padrões de ruptura de compósitos reforçados com fibras dependem fundamentalmente da aderência fibra/matriz. Compósitos reforçados com fibras devem apresentar uma adesão moderada entre a matriz e a fibra: alta adesão entre as duas fases confere boa resistência mecânica pela transferência eficiente de carga da matriz para as fibras, porém o material se torna frágil, já uma baixa adesão resulta em baixa resistência mecânica, mas a energia absorvida na fratura aumenta por dissipação de energia durante o processo de descolamento da fibra (puxamento da fibra – fiber pullout) (TAYLOR; BASSETT, 1994)

## 2.3 Fibras Naturais Lignocelulósicas

A utilização de materiais de fonte renovável e biodegradável tem desempenhado um papel importante na economia, auxiliando na prevenção ambiental e gerando empregos nas áreas agrícolas. As fibras naturais lignocelulósicas se inserem neste contexto pelo crescente interesse na substituição de fibras sintéticas em materiais compósitos (SATYANARAYANA; GUIMARÃES; WYPYCH, 2007; MARGEM et al., 2010).

A formação estrutural das fibras vegetais é constituída predominantemente por três tipos de macromoléculas, sendo a composição principal, rígida e linear (celulose), um anexo secundário, semirrígido e interligante (hemicelulose) e uma substância fixa e moldável (lignina) (JUNIOR, 2017). Outros componentes, como pectina, proteínas, lipídios e cinzas também podem ser encontrados nesses materiais, mas em menor quantidade (BALLESTEROS et al., 2018). A Tabela 2.3 mostra os teores de celulose, hemicelulose e lignina de algumas fibras naturais.



Tabela 2.3 – Composição de celulose, lignina e hemicelulose de algumas fibras naturais.

Fibra	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)
Cânhamo	68 - 74,4	15 - 22,4	3,7 - 10
Curauá	70,7 - 73,6	9,9	7,5 - 11,1
Juta	59 - 71,5	13,6 - 20,4	11,8 - 13
Kenaf	31 - 72	20,3 - 21,5	8 - 19
PALF	70 - 83	-	5 - 12,7
Piassava	28,6	25,8	45
Rami	70 - 83	-	5 - 12,7
Sisal	60 - 78	10 - 14,2	8 - 14

Fonte – Adaptado de Ramesh (2016)

As fibras naturais podem ser classificadas de acordo com a sua origem, podendo ser: animal, mineral e vegetal (KUMAR et al., 2019). As fibras naturais podem ainda ser classificadas segundo o local de extração. As fibras lignocelulósicas são as obtidas através de vegetais, sendo este o termo utilizado para caracterizar fibras que têm predominância de lignina e celulose em sua estrutura (BLEDZKI; GASSAN, 1999; JOHN; THOMAS, 2008).

A Figura 2.5 apresenta a classificação das fibras naturais conforme sua origem e local de extração e sintéticas.

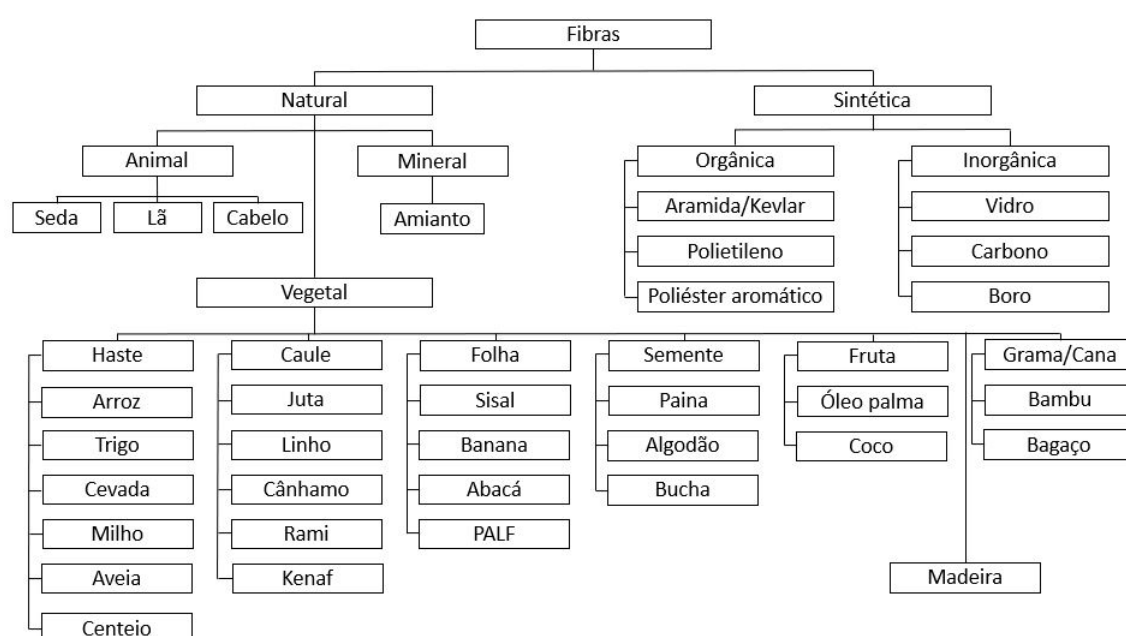


Figura 2.5 – Classificação das Fibras Naturais e Sintéticas.

Fonte – Adaptado de Jawaid e Khalil (2011)

As fibras naturais podem ser consideradas compósitos naturais que consistem principalmente de fibrilas de celulose cristalina incorporadas a uma matriz amorfa de lignina. As fibrilas de celulose são alinhadas ao longo do comprimento da fibra, e a eficiência

da fibra natural como reforço está relacionada à natureza da celulose e de sua cristalinidade (JOHN; THOMAS, 2008).

Sendo um dos principais componentes das fibras vegetais, a celulose é determinante para as propriedades mecânicas. Porque, durante sua síntese, as ligações poliméricas formam longas cadeias de forma que as moléculas ficam muito próximas através de longos segmentos, dando origem a fortes ligações secundárias intermoleculares que são responsáveis pela elevada resistência de materiais celulósicos. Nos locais onde as moléculas se encaixam muito próximas umas das outras, em longos segmentos, são desenvolvidas regiões cristalinas que representam pontos onde, por exemplo, um solvente encontrará dificuldade para penetração na fibra (TOMCZAK; SYDENSTRICKER; SATYANARAYANA, 2007).

A celulose é o polímero que possui cadeias de maior peso molecular e confere uma estrutura física mais rígida e resistente a planta, sendo a maior responsável pela forma estrutural alongada que os vegetais apresentam. É o principal componente polissacarídeo da parede celular das plantas que são formadas por fibrilas de celulose, e o mais abundante composto orgânico conhecido, seguido pela hemicelulose. Definido quimicamente pela conexão de monômeros de glicose que se unem através das ligações 1,4-glicosídicas (JUNIOR, 2017).

O grupo polimérico com peso molecular inferior ao da celulose é a hemicelulose, que possui moléculas de tamanho intermediário e servem para conectar as cadeias celulósicas, formando prolongamentos laterais de celulose que as conectam como um único conjunto arquitetônico (JUNIOR, 2017). A hemicelulose é responsável por promover flexibilidade a planta e é hifrofílica, ou seja, tem afinidade pela água (LUZ, 2014).

Mesmo possuindo um menor peso molecular dos três elementos principais, a lignina possui uma estrutura que é interligada entre si, unindo-se e formando uma grande rede molecular. O que permite o preenchimento dos vazios deixados pela celulose e hemicelulose selando assim toda a formação estrutural, unindo e empacotando o conjunto fibroso (JUNIOR, 2017). A lignina é um ligante amorfo, responsável por conferir rigidez a planta, de caráter hidrofóbico que não tende a absorver água (LUZ, 2014).

A Figura 2.6, apresenta a microestrutura das fibras naturais lignocelulósicas:

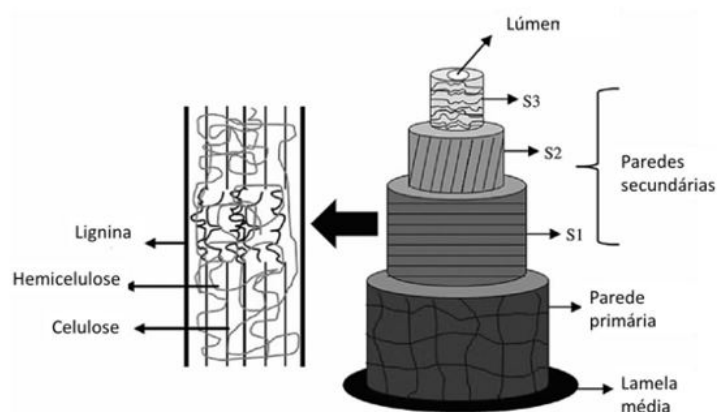


Figura 2.6 – Microestrutura das FNLs.

Fonte – Adaptado de Zhang et al. (2020)

Conforme apresentado na Figura 2.6, as fibras vegetais são compostas por um canal responsável pelo transporte de água e nutrientes (lúmen) e por uma parede celular que envolve todo o lúmen e é composta por diversas camadas, denominada parede celular secundária, parede celular primária e lamela média. A parede secundária pode ser dividida em uma parede secundária externa (S1), parede secundária média (S2) e parede secundária interna (S3) que consistem em microfibrilas de celulose cristalina paralelas umas as outras formando um ângulo microfibrilar (NADZRI et al., 2020).

Todavia, as propriedades mecânicas das fibras naturais apresentam grande dispersão, o que está diretamente relacionada com alguns fatores, como: o ângulo formado entre o eixo da fibra e as microfibrilas que é chamado ângulo microfibrilar, os percentuais de celulose, lignina e hemicelulose, grau de cristalinidade e polimerização, assim como, tratamento superficial, tipo de cultivo, das condições climáticas e variabilidade da seção transversal da fibra, parte da planta em que é extraída, idade da planta e outros (CAMERINI; TERRONES; MONTEIRO, 2008).

Neto e Pardini (2016), enumeram de forma sucinta as principais vantagens das FNLs:

- baixa massa específica;
- maciez e abrasividade reduzida;
- recicláveis, não tóxicas e biodegradáveis;
- baixo custo;
- estimulam a produção de empregos em zonas rurais e
- baixo consumo de energia em sua produção.

Assim como, suas principais desvantagens e limitações:

- baixas temperaturas de processamento;
- acentuada variabilidade nas propriedades mecânicas e baixa estabilidade dimensional;
- alta sensibilidade a efeitos ambientais, tais como variações de temperatura e de umidade;
- as de origem vegetal sofrem significativas influências referentes ao solo, a época da colheita, ao processamento pós colheita e à localização relativa no corpo da planta;
- apresentam seção transversal de geometria complexa e não uniforme e
- propriedades mecânicas modestas em relação aos materiais estruturais tradicionais.

Na Tabela 2.4 são apresentadas as densidades e propriedades mecânicas específicas de algumas fibras naturais e sintéticas.

Tabela 2.4 – Propriedades físicas e mecânicas de algumas fibras naturais e sintéticas.

<b>Fibra</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Resistência a Tração (MPa)</b>	<b>Módulo Elástico (GPa)</b>	<b>Alongamento (%)</b>
Cânhamo	1,4 - 1,5	270 - 900	23,5 - 90	1 - 3,5
Curauá	1,4	87 - 1150	11,8 - 96	1,3 - 4,9
Juta	1,3 - 1,49	320 - 800	8 - 78	1 - 1,8
Kenaf	1,2 - 1,5	223 - 930	14,5 - 53	1,5 - 2,7
PALF	0,8 - 1,6	180 - 1627	1,44 - 82,5	1,6 - 14,5
Piassava	1,4	134 - 143	1,07 - 4,59	7,8 - 21,9
Sisal	1,33 - 1,5	363 - 700	9 - 38	2 - 7
Carbono	1,4 - 1,8	3000 - 4000	250 - 500	-
Vidro-E	2,5	2000 - 3000	70	-

Fonte – Adaptado de Ramesh (2016), Nadzri et al. (2020)

### 2.3.1 Fibras de Kenaf

O kenaf (*Hibiscus Cannabinus* L.) é uma planta dicotiledônea do gênero *Hibiscus* nativa da África Central/Ocidental, da família Malvaceae. Esta planta cresce em climas tropicais e temperados, o que facilita a sua introdução e cultivo em várias partes do mundo. Podendo atingir alturas de até 5 metros em curtos períodos (entre 6 a 8 meses). Também é conhecido como Mesta (Índia), Ambari (Taiwan), Til (Norte da África) e Gambo (África Ocidental) (AJI et al., 2009; LIU; LABUSCHAGNE, 2009; AYADI et al., 2017). A Tabela 2.5 apresenta a taxonomia do kenaf.

Tabela 2.5 – Taxonomia do kenaf.

Kenaf	
Reino	Plantae
Classe	Magnoliopsida
Ordem	Malvales
Família	Malvaceae
Gênero	Hibiscus
Espécie	<i>Hibiscus Cannabinus</i> L.

Fonte – Nadzri et al. (2020)

O kenaf é uma fonte celulósica que possui vantagens econômicas e ecológicas, sendo uma planta resistente a danos de insetos. A planta de kenaf possui um caule fibroso que é capaz de crescer em uma vasta gama de condições climáticas. Sua semente tem uma composição de proteína e óleo semelhante a de algodão, as folhas e ramos podem ser utilizados para alimentação de gado ou forragem, o núcleo lenhoso pode ser usado para materiais estruturais e substitutos de produtos de madeira (PANG; SHANKS; DAVER, 2015; RAMESH, 2016). A Figura 2.7 mostra uma plantação de kenaf.



Figura 2.7 – Plantação de kenaf.

Fonte – Ramesh (2016)

A planta possui três tipos de fibras: líber, núcleo e medula (Figura 2.8). O líber se refere à parte externa da fibra, que representa cerca de 30% de seu peso seco. Posto isso, o núcleo é a parte interna mais branca da fibra, que contribui com cerca de 70% do peso seco do caule. A medula consiste exclusivamente em células parenquimatosas, que são poligonais (AYADI et al., 2017). Segundo Khalil et al. (2010) a fibra do núcleo produz celulose de qualidade inferior a produzida pela fibra do líber, que produz celulose de alta qualidade.

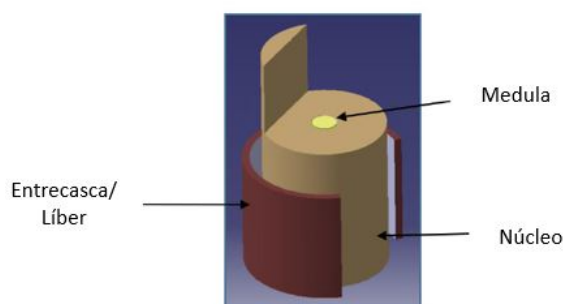


Figura 2.8 – Ilustração da haste do kenaf.

Fonte – Adaptado de Nadzri et al. (2020)

Sendo uma abundante fonte renovável de fibras vegetais e com o baixo investimento de capital, se torna vantajosa a exploração do potencial de desempenho econômico do cultivo de kenaf. As principais características mais importantes das fibras vegetais são descritas em termos de suas características microscópicas, composição química e propriedades físicas. Estando, as propriedades específicas das fibras vegetais relacionadas as propriedades dos produtos finais (KHALIL et al., 2010).

O Kenaf é muito conhecido pela capacidade de absorver elevada quantidade de gás carbônico ( $CO_2$ ), absorvendo até três vezes mais gases que uma árvore convencional (CHANDGUDE; SALUNKHE, 2020). Segundo Ramesh (2016) a ausência de teor de sílica nas fibras de kenaf é uma grande vantagem, pois reduz a abrasividade do equipamento utilizado em seu processamento.

Além de ser uma cultura importante para a produção de fibra, o kenaf tem recebido grande atenção como uma cultura polivalente para energia (ALEXOPOULOU et al., 2004), placas de isolamento térmico (ARDENTE et al., 2008), como fonte de farinha e óleo para alimentação, lubrificação, fabricação de sabão, tintas e vernizes (COETZEE; LABUSCHAGNE; HUGO, 2008), como material absorvente para a produção de camas para animais (LIPS et al., 2009), aplicação automotiva (CHEN et al., 2005; WU et al., 2020), compósitos poliméricos.

Os compósitos reforçados com kenaf têm utilizado um número diversificado de matrizes poliméricas incluindo PP (SHIBATA; CAO; FUKUMOTO, 2006; ZAMPALONI et al., 2007; JOHN; BELLMANN; ANANDJIWALA, 2010; ISLAM; CHURCH; MIAO, 2011; BERNARD et al., 2011; MEON et al., 2012; ASUMANI; REID; PASKARAMOORTHY, 2012; HAO et al., 2012; HAO; ZHAO; CHEN, 2013), poliéster (AZIZ; ANSELL, 2004; THIRUCHITRAMBALAM et al., 2009; MAZUKI et al., 2011; RASSMANN; PASKARAMOORTHY; REID, 2011; GHANI et al., 2012; SAPUAN et al., 2013; OSMAN et al., 2014), poliuretano (EL-SHEKEIL et al., 2012; BATOULI et al., 2014), polietileno de alta densidade (MEON et al., 2012; AJI et al., 2011; AJI et al., 2012; SALLEH et

al., 2014), poliestireno (ZHENG et al., 2013), ácido polilático (NISHINO et al., 2003; NISHINO; HIRAO; KOTERA, 2006; HUDA et al., 2008; OCHI, 2008; HASFALINA et al., 2012; SUKYAI et al., 2012; HAN et al., 2012; KWON et al., 2014; SHUKOR et al., 2014), borracha natural (AIZAN et al., 2013), PVC (EL-SHEKEIL et al., 2014) e epoxi (PARK et al., 2006), entre outros.

Em particular a matriz epóxi reforçada com fibra de Kenaf foi investigada para diferentes fins. Park et al. (2006) avaliaram as propriedades micromecânicas dos compósitos epóxi/kenaf e a molhabilidade das fibras de kenaf utilizando emissão acústica não destrutiva. Keshk, Suwinarti e Sameshima (2006) realizaram a caracterização físico-química das fibras de Kenaf para identificar a sua composição química (celulose, hemicelulose e lignina) e as suas propriedades físicas (viscosidade, grau de polimerização e cristalinidade).

Sgriccia e Hawley (2007) relataram a caracterização de compósitos epoxídicos com 15% em peso de fibra de Kenaf, para verificar a eficácia da cura do compósito pelo método de microondas. Chin e Yousif (2009) investigaram o potencial dos compósitos epóxi/kenaf processados a vácuo em aplicação tribológica. Xue et al. (2009) relataram a melhoria das propriedades mecânicas (módulo de elasticidade, resistência à tração) dos compósitos epoxídicos reforçados com fibras kenaf liberianas. Bakar, Ahmad e Kuntjoro (2010) investigaram as propriedades mecânicas e morfológicas dos compósitos epoxídicos reforçados com fibras de Kenaf tratadas através de mercerização com NaOH. Mutasher et al. (2011) mostraram o efeito do tratamento de mercerização alcalina sobre as fibras de Kenaf na resistência à tração e resistência à flexão dos compósitos epóxi/kenaf. Abdullah et al. (2012) relataram o comportamento de fadiga dos compósitos epóxi/kenaf unidirecionais preparados por Hand lay-up. Suriani et al. (2012) investigaram os defeitos no compósito epóxi/kenaf utilizando imagem térmica infravermelha.

Davoodi et al. (2010) estudaram as propriedades mecânicas do compósito híbrido de epóxi reforçado com fibras de kenaf e vidro para aplicação em para-choques de automóveis. Ali Kandemir et al. (2020) investigaram as propriedades de aderência, físicas e mecânicas dos compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras descontínuas de kenaf, onde o seu desempenho foi comparado com o de outras fibras.

## 2.4 Blindagem Balística

A ABNT NBR 15000 (2005), define a blindagem balística como um "anteparo de proteção projetado para oferecer resistência a penetração de projéteis provenientes de armas de fogo". Sendo classificada em níveis distintos de acordo com o nível de calibre pela ABNT NBR 15000 (2005) e pela NIJ 0101.04 (2000). A Tabela 2.6 mostra os diferentes níveis de proteção do sistema de blindagem quanto ao impacto balístico, tanto para uso permitido quanto para uso restrito.

Tabela 2.6 – Nível de proteção do sistema de blindagem quanto ao impacto balístico.

Nível	Munição de ensaio	Massa do projétil (g)	Velocidade do projétil (m/s)	Número de impactos
I	.22 LRHV chumbo	$2,6 \pm 0,1$	$320 \pm 10$	5
	.38 Especial RN chumbo	$10,2 \pm 0,1$	$254 \pm 15$	5
II-A	9 mm FMJ	$8,0 \pm 0,1$	$332 \pm 12$	5
	.357 Magnum JSP	$10,2 \pm 0,1$	$381 \pm 12$	5
II	9 mm FMJ	$8,0 \pm 0,1$	$358 \pm 15$	5
	.357 Magnum JSP	$10,2 \pm 0,1$	$425 \pm 15$	5
III-A	9 mm FMJ	$8,0 \pm 0,1$	$426 \pm 15$	5
	.44 Magnum SWC GC	$15,6 \pm 0,1$	$426 \pm 15$	5
III	7.62 x 51 FMJ (308 – Winchester)	$9,7 \pm 0,1$	$838 \pm 15$	5
IV	.30 - 06 AP	$10,8 \pm 0,1$	$868 \pm 15$	1

Fonte – (ABNT, 2005)

Vários tipos de configurações estão disponíveis para testar os diversos tipos de blindagens utilizadas para proteção pessoal, como arma de gás e cano de arma de pólvora. A configuração normalmente consiste em um dispositivo de propulsão de projétil (arma), câmeras de alta velocidade e dispositivos de medição de velocidade. Eles ajudam a avaliar a aplicabilidade de vários materiais em diferentes tipos de condições balísticas (NAYAK et al., 2020).

O método mais importante utilizado para a avaliação do desempenho de sistemas de blindagem balística é baseado em métodos probabilidade e estatística que se baseiam na possível ocorrência ou não do alvo ser perfurado pelo projétil. Este método busca determinar a velocidade limite ( $V_L$ ), a qual representa a velocidade mínima para que o projétil possa perfurar a blindagem. O critério mais utilizado é o do limite balístico  $V_{50}$ , que é a velocidade tem uma probabilidade de 50% de que o projétil consiga perfurar a blindagem (ZUKAS et al., 1983).

Existem casos em que não é possível calcular o parâmetro ( $V_{50}$ ). Em casos onde não se consegue garantir se houve ou não a perfuração do alvo, faz-se necessária a aplicação de princípios físicos para que se possa obter o limite balístico. Por este motivo, Morye et al. (2000) baseia-se nos conceitos de conservação de energia, a energia cinética dissipada pelo projétil durante a penetração na blindagem é igual à energia total absorvida pelo alvo, tornando o cálculo da velocidade limite do projétil ( $V_L$ ) possível.

A Equação 2.3 mostra a energia absorvida ( $E_{abs}$ ) em função da diferença entre a velocidade de impacto do projétil ( $V_i$ ), a velocidade residual ( $V_R$ ) e a massa ( $m$ ) do projétil.



$$E_{abs} = \frac{1}{2} \cdot m(V_i^2 - V_r^2) \quad (2.3)$$

Quando a velocidade residual for igual a zero, ou seja, o alvo absorver toda a energia cinética do projétil o limite balístico pode ser calculado através da Equação 2.4.

$$V_L = \sqrt{\frac{2 \cdot E_{abs}}{m}} \quad (2.4)$$

## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho consiste da produção de compósitos de matriz epóxi utilizando fibras de kenaf como reforço, produzidos no laboratório de compósitos do IME para realização de ensaios a fim de caracterizar de forma física, química, térmica e mecânica os corpos de prova produzidos.

### 3.1 Materiais

#### 3.1.1 Fibras de Kenaf

As fibras de kenaf utilizadas no presente trabalho foram doadas pela Tapetes São Carlos Ltda, localizada em São Carlos no Estado de São Paulo. A Figura 3.1 mostra as fibras como recebidas e depois de limpas, penteadas e cortadas.



Figura 3.1 – Fibras de kenaf: a) como recebida; b) preparadas.

Fonte – Próprio autor

As fibras de kenaf conforme recebidas, Figura 3.1 (a), foram primeiramente limpas por imersão em água por 24 horas para remover as impurezas. Após a imersão, as fibras foram secas em estufa a 70 °C por 24 horas e então penteadas e cortadas, Figura 3.1 (b).

#### 3.1.2 Resina Epóxi

Para a matriz dos compósitos, adotou-se a resina epoxídica comercial do tipo éter diglicidil do bisfenol A (DGEBA), numa proporção estequiométrica de 100 partes para 13

de endurecedor trietileno tetramina (TETA). O material é fabricado pela Dow Chemical Brasil e fornecido pela Epoxyfiber Ltda.

## 3.2 Fabricação dos Compósitos

Foram produzidos compósitos reforçados com fibras de kenaf em proporção volumétrica de 10, 20 e 30% de fibras. Para fabricação dos compósitos foi utilizada uma matriz metálica (Figura 3.2) com um volume interno de  $214,2 \text{ cm}^3$  (dimensões  $15 \times 12 \times 1,19 \text{ cm}$ ), a altura das placas pode ser ajustada, sendo 1 cm e 2 mm as alturas aplicáveis a este trabalho. As fibras foram colocadas em estufa a uma temperatura de  $70^\circ\text{C}$  por 24 horas, a fim de remover a umidade das fibras e melhorar a adesão interfacial do compósito. A fabricação ocorreu por compressão deste molde utilizando uma prensa hidráulica SKAY de 15 toneladas, sendo adotada, a carga 5 toneladas (equivalente à 3 MPa) durante 8 horas para a produção dos corpos de prova.

Para os cálculos, foi utilizada a massa específica de  $1,5 \text{ g/cm}^3$  para as fibras contínuas de kenaf (RASSMANN; PASKARAMOORTHY; REID, 2011; AYADI et al., 2017), e  $1,11 \text{ g/cm}^3$  para a resina epóxi (SILVA et al., 2014)



Figura 3.2 – Matriz metálica.

Fonte – Próprio autor

## 3.3 Caracterização das Fibras e Compósitos de Kenaf

### 3.3.1 Densidade

Foram usados 3 (três) métodos para o cálculo da densidade das fibras de kenaf, sendo: arquimedes, picnometria gasosa e através da regra das misturas. A Tabela 3.1 apresenta os valores para densidade da fibra de kenaf encontrados na literatura.

Tabela 3.1 – Densidade do kenaf.

Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Referência
1,2	Jawaid e Khalil (2011)
1,4	Parikh et al. (2002)
1,5	Rassmann, Paskaramoorthy e Reid (2011)
1,5	Ayadi et al. (2017)

### 3.3.1.1 Arquimedes

A partir do princípio de Arquimedes, todo corpo que esteja submerso de forma parcial ou completa em um líquido que tenha densidade menor que a densidade da amostra a ser analisada, está sujeito a uma força de empuxo do líquido, com intensidade igual ao peso do líquido deslocado. A força de empuxo pode ser convertida em volume de amostra dividindo a densidade do líquido, e a densidade calculada dividindo a massa pelo volume (RUDE; JR; RUHALA, 2000).

De acordo com a ASTM D3800 (2016), é necessária a adaptação de uma balança analítica com precisão de 0,0001 gramas, para que possam ser realizadas as medições necessárias ao cálculo. A densidade da amostra é calculada utilizando a Equação 3.1:

$$\rho_f = \frac{(M_3 - M_1) \cdot \rho_l}{(M_3 - M_1) - (M_4 - M_2)} \quad (3.1)$$

Sendo:

$\rho_f$  - densidade da fibra;

$\rho_l$  - densidade do líquido;

$M_1$  - peso do fio de suspensão no ar;

$M_2$  - peso do fio de suspensão em líquido;

$M_3$  - peso do fio de suspensão mais a amostra cujo peso foi determinada no ar;

$M_4$  - peso do fio de suspensão mais a amostra cuja densidade seria determinada em líquido.

Foram utilizadas 7 (sete) amostras para o cálculo da densidade por este método. A pesagem foi realizada em balança analítica com precisão de 0,0001 gramas que foi adaptada para pesagem em suspensão por meio de aparato. Cada amostra foi submersa em 250 ml de água destilada, que foi fervida e resfriada até retornar a temperatura ambiente (20 °C). O ensaio de Arquimedes foi realizado de acordo com a ASTM D3800, no laboratório de materiais cerâmicos do Instituto Militar de Engenharia.

### 3.3.1.2 Picnometria Gasosa

A picnometria gasosa é um método de ensaio semelhante ao ensaio de Arquimedes, entretanto é realizado em meio gasoso. É utilizada para determinar a densidade e o volume real dos materiais, a determinação é possível ainda que o material seja poroso, por conta da variação da pressão do gás em uma câmara com volume conhecido (RUDE; JR; RUHALA, 2000; TRUONG et al., 2009). O gás Hélio é utilizado neste método pois, além de inerte consegue penetrar facilmente nos poros da amostra, permitindo determinar o volume da amostra com maior precisão (MOURA; FIGUEIREDO, 2002).

O picnômetro é constituído por duas câmaras de volumes conhecidos: a câmara onde a amostra é inserida e a câmara de expansão, ligadas por uma válvula. É necessário fazer a remoção de impurezas e umidade que a amostra possa conter. Durante a execução do ensaio, o gás é liberado lentamente da câmara de expansão para a câmara da amostra. A pressão do gás que permanece na câmara é usada para determinar o volume da amostra e a densidade da amostra é determinada dividindo a massa pelo volume (RUDE; JR; RUHALA, 2000; MOURA; FIGUEIREDO, 2002).

A picnometria gasosa foi realizada no Instituto de Pesquisas da Marinha (IPqM), no picnômetro AccuPyc 1330 da micromeritics. Um feixe de fibras foi utilizado para a realização do ensaio que se deu em 20 (vinte) corridas.

### 3.3.1.3 Regra das Misturas

O cálculo da densidade através da regra das misturas foi adotado com a intenção de estimar o valor da densidade das fibras adotadas na fabricação dos compósitos. Desta forma, pesou-se as placas compósitas de 10, 20 e 30% de volume de fibras de kenaf em uma balança analítica da marca Mettler PM460 de precisão 0,001 g. As placas foram fabricadas com dimensões de 150x120x2 mm, conforme procedimento descrito anteriormente. A densidade pode ser calculado através da Equação 3.2.

$$\rho_f = \frac{V_c \cdot \rho_c - V_m \cdot \rho_m}{V_f} \quad (3.2)$$

Onde:

$\rho_f$  - densidade da fibra;

$\rho_c$  - densidade do compósito;

$\rho_m$  - densidade da matriz;

$V_c$  - volume do compósito;

$V_m$  - volume da matriz;

$V_f$  - volume de fibras.

### 3.3.2 Diâmetro

Foi utilizado o método de projeção de luz para medir o diâmetro das fibras. Um total de 100 (cem) fibras foram escolhidas aleatoriamente, cada uma delas foi medida 10 (dez) vezes ao longo do seu comprimento a 0° e 90°. A partir dos resultados obtidos, foi possível calcular o diâmetro médio de cada fibra. Através das distribuição de frequência foi possível separar as fibras em 6 (seis) classes e plotar um histograma. Os diâmetros das amostras foram obtidos em micrômetros ( $\mu\text{m}$ ).

O ensaio foi realizado no laboratório de metalografia do IME, o equipamento utilizado para medição foi um microcópio óptico, modelo BX53M da marca OLYMPUS, em modo de campo escuro com amplitude de 10x.

### 3.3.3 Teor de Umidade

O teor de umidade das fibras foi determinado através de um método que se baseia no registro da perda de umidade a partir de uma estufa na temperatura de 105 °C. Foram preparadas 4 (quatro) amostras aleatórias de fibras que foram pesadas em balança analítica, modelo FA2104N da marca Bioprecisa, e levadas à estufa por 2h. Após esse tempo as amostras foram pesadas novamente e as etapas foram repetidas à cada 30 minutos até que a perda de massa em ponderações sucessivas fosse menor do que 0,005g.

Para o cálculo do teor de umidade foi utilizada a Equação 3.3:

$$MCBD = \frac{OS - OBD}{OBD} \cdot 100 \quad (3.3)$$

Onde:

*MCBD* - teor de umidade da amostra;

*OBD* - massa seca;

*OS* - massa úmida.

### 3.3.4 Difração de Raios X (DRX)

A técnica de difração de raios X é utilizada para identificar as fases e estruturas cristalinas presentes nos materiais. O princípio desta técnica é baseado no espalhamento do feixe de raios X no material, quando os átomos interagem uns com os outros, dispostos em arranjo cristalino ou não. Dessa forma, é medida a intensidade dos feixes refletidos e as distâncias interplanares seguindo os princípios da Lei de Bragg (KLUG; ALEXANDER, 1974; JENKINS et al., 1986).

Na caracterização de fibras naturais, é utilizada com o objetivo de analisar a cristalinidade e o ângulo microfibrilar das fibras naturais. A análise de DRX foi realizada no Instituto de Engenharia Nuclear (IEN), no equipamento da fabricante Shimadzu, modelo DRX-6000, com radiação  $\text{CuK}\alpha$ , potência de 1200 Watts - 40 KV X 30 mA. Foram realizadas as análises de fibras in natura com faixa de varredura de  $5^\circ$  à  $80^\circ$  e velocidade de varredura de  $2\theta/5\text{s}$ .

### 3.3.4.1 Cristalinidade

Segal et al. (1959), descreveu um método empírico para estimar o grau de cristalinidade de materiais celulósicos que relaciona os picos de intensidade das partes amorfa e cristalina.

Este método para medida do grau de cristalinidade tem sido amplamente utilizado para análise de materiais lignocelulósicos. Utilizando técnicas de ajuste, e medindo a intensidade de interferência no plano cristalino 002 e o espalhamento amorfo em  $2\theta=18^\circ$  (SEGAL et al., 1959; MARTIN et al., 2009). Assim, o índice de cristalinidade pode ser calculado através da Equação 3.4:

$$I_C = \frac{I_{\text{cristalina}} - I_{\text{amorfa}}}{I_{\text{cristalina}}} \quad (3.4)$$

O índice de cristalinidade indica a quantidade de celulose que se encontra em estado cristalino, e é um dos fatores importantes para determinar as propriedades mecânicas dos materiais lignocelulósicos. A partir desse valor pode-se concluir se o material é mais ou menos denso, já que quanto mais cristalino menos vazios ele terá (MARTIN et al., 2009).

### 3.3.4.2 Ângulo Microfibrilar

O ângulo formado entre o eixo da fibra e as microfibrilas é chamado o ângulo microfibrilar (AMF) e varia de uma fibra para outra, assim como, a razão entre celulose e lignina/hemicelulose (SATYANARAYANA et al., 1990; JOHN; THOMAS, 2008).

O cálculo do ângulo microfibrilar se baseia no método de Cave (1997), que sugere que a estimativa deste parâmetro ocorre a partir da relação das três curvas obtidas pelo pico associado a maior intensidade, sendo elas a curva de sua gaussiana e de suas derivadas de primeira e segunda ordem. Através da análise dessas curvas, obteve-se um valor que é descrito como parâmetro T, que é aplicado no polinômio proposto por Yamamoto (1993), descrita abaixo pela Equação 3.5.

$$AMF = -12,198 \cdot T^3 + 113,67 \cdot T^2 - 348,4 \cdot T + 358,09 \quad (3.5)$$

### 3.3.5 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

A análise de Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier, foi conduzida usando um espectrômetro Nicolet iS10 do Instituto de pesquisas da Marinha (IPqM). Analisou-se a amostra de fibra de kenaf cominuída com amostras de KBr para a fabricação de pastilhas sob uma pressão de 10 kgf/cm e vácuo por 5 min. O teste de FTIR foi realizado na faixa do número de onda de 500 a 4000  $\text{cm}^{-1}$ .

Os resultados obtidos foram tratados computacionalmente com auxílio do programa Origin Pro, gerando um gráfico da porcentagem de transmitância (%) pelo número de banda ( $\text{cm}^{-1}$ ). Foram analisadas as bandas que se destacaram através da correlação entre as ligações químicas da fibra e os números de banda apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Bandas de absorção características das fibras naturais lignocelulósicas.

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

Fonte – Adaptado de Monteiro et al. (2014a), Reis et al. (2019)

### 3.3.6 Ensaio de Tração das Fibras

O ensaio de tração das fibras foi realizado seguindo a norma ASTM D3822 (2020), utilizando uma moldura de papel (Figura 3.3) como suporte. Para o ensaio foi utilizada uma máquina universal de tração Instron, modelo 3365, com célula de carga 10 kN, pertencente ao Laboratório de Ensaios Não Destrutivos, Corrosão e Soldagem (LNDC) a uma velocidade de ensaio de 0,4 mm/min.

Foram utilizadas 5 (cinco) amostras de fibras para cada uma das 6 (seis) classes de diâmetro encontradas, usando um comprimento útil de 40 mm de fibra. A fita adesiva foi utilizada para evitar o escorregamento das garras, e o papel foi cortado antes do início do ensaio para não influenciar os resultados obtidos.



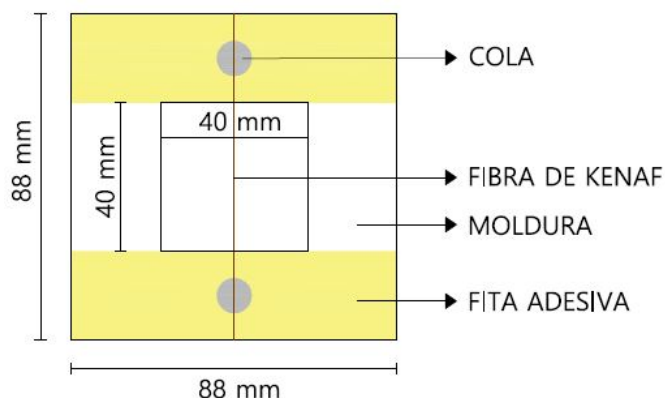


Figura 3.3 – Moldura de papel utilizada como suporte.

Fonte – Próprio autor

### 3.3.7 Ensaio de Tração dos Compósitos

O ensaio foi conduzido conforme a norma ASTM D3039 (2017). Os corpos de prova foram obtidos das placas compósitas, que foram fabricadas com dimensões de 150 mm x 120 mm x 2 mm e com fração volumétrica de fibras de 0, 10, 20 e 30%. Os CPs foram preparados conforme esquema da Figura 3.4. As extremidades dos corpos de prova foram revestidas com fita crepe a fim de evitar o escorregamento das garras.

Foram considerados 7 (sete) corpos de provas para cada grupo estudado. O ensaio foi realizado em uma máquina universal Instron 5582 do Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV) da Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF), adotando uma velocidade de ensaio de 2 mm/min. O ensaio teve como objetivo conhecer a resistência à tração dos compósitos (MPa), bem como o módulo de elasticidade (GPa).

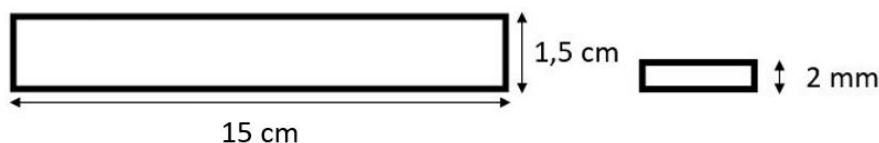


Figura 3.4 – Esquema do corpo de prova de tração.

Fonte – Próprio autor

### 3.3.8 Ensaio de Impacto Izod

O ensaio foi conduzido conforme especificações da ASTM D256 (2018). Os corpos de prova foram obtidos das placas compósitas, que foram fabricadas com dimensões de 15 cm x 12 cm x 1 cm e com fração volumétrica de fibras de 0, 10, 20 e 30%. Após a cura, as placas foram cortadas nas dimensões de 63,5 mm x 12,7 mm x 10 mm conforme mostra o esquema da Figura 3.5. Para fazer o entalhe com 2,54 mm de profundidade e

ângulo de  $45^\circ$ , foi utilizada uma brochadeira manual disponível no Laboratório de Ensaios Mecânicos (LME) do IME, o entalhe produz um campo de concentração de tensões que aumenta a probabilidade de se obter uma fratura frágil, em vez de dúctil.

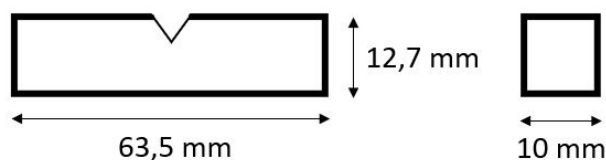


Figura 3.5 – Esquema do corpo de prova de impacto Izod.

Fonte – Próprio autor

Foram confeccionados 10 (dez) corpos de provas para cada grupo. O ensaio foi realizado com o objetivo de obter a energia de fratura (J/m). Foi utilizado um pêndulo da marca PANTEC XC-50 com martelo de 22 J que pertence ao Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV) da Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF).

### 3.3.9 Análise Termogravimétrica (TGA)

Para a análise termogravimétrica as fibras de kenaf e seus compósitos epoxídicos foram cominuídos e colocados em cadinho de platina (aberto), o ensaio foi realizado como especificado na ASTM E1131 (2020). Para o ensaio foi utilizada 1 (uma) amostra para cada grupo. Foi utilizado o equipamento de modelo DTG-60H da Shimadzu que pertence ao Instituto de Pesquisas da Marinha (IPqM) operando em uma atmosfera de nitrogênio. As amostras foram submetidas a uma taxa de aquecimento de  $10^\circ\text{C}/\text{min}$ , com um intervalo de temperatura de 20 à  $700^\circ\text{C}$ .

Este equipamento conta com uma termobalança, que permite a pesagem contínua da amostra em função da temperatura (DENARI; CAVALHEIRO, 2012). Durante a análise foi possível identificar as temperaturas associadas a perda de umidade e a degradação dos componentes estruturais das fibras naturais lignocelulósicas.

### 3.3.10 Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)

A análise por calorimetria diferencial de varredura foi realizada para a fibra de kenaf e seus compósitos, utilizando 1 (uma) amostra de cada. O ensaio foi realizado no Instituto de Pesquisas da Marinha (IPqM), as amostras foram cominuídas e colocadas em cadinho de alumínio (fechado) no equipamento DSC-60 da Shimadzu. A operação foi realizada em uma atmosfera de nitrogênio com uma taxa de aquecimento de  $10^\circ\text{C}/\text{min}$ , com intervalo

de temperatura de 20 à 400 °C utilizado para a resina, as fibras e os compósitos com 10, 20 e 30% em volume de fibras de kenaf.

### 3.3.11 Análise Termomecânica (TMA)

O TMA é uma técnica que permite o estudar as propriedades dos materiais a partir da variação da temperatura. O processo consiste em medir as variações dimensionais que a amostra sofre em função da temperatura, ao mesmo tempo em que é solicitada mecanicamente (REIS et al., 2016).

Para este ensaio foram preparadas 1 (uma) amostra de resina e para cada porcentagem do compósito epóxi-kenaf. O ensaio foi realizado no analisador termo-mecânico da marca Shimadzu, modelo TMA-60, que pertence ao Instituto de Pesquisas da Marinha (IPqM). As amostras foram preparadas conforme a ASTM E831 (2019) e colocadas em suporte de quartzo. O ensaio foi realizado em uma atmosfera de nitrogênio, com um intervalo de temperatura de 20 à 200 °C, taxa de aquecimento de 1 °C/min com uma carga de compressão constante de 10gf..

### 3.3.12 Análise Dinâmico-Mecânica (DMA)

O ensaio de análise dinâmico-mecânica foi realizado como previsto pela ASTM D4065 (2020) com o objetivo de identificar os parâmetros de módulo de armazenamento ( $E'$ ), módulo de perda ( $E''$ ) e a tangente delta ( $\tan \delta$ ) que estão relacionados ao comportamento viscoelástico do material, assim como os parâmetros de temperatura de transição vítrea dos compósitos. Serão utilizadas amostras de compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras de kenaf contínuas e alinhadas com fração de 0, 10, 20 e 30% em volume de fibras.

O modo de ensaio utilizado foi a flexão, as amostras foram produzidas com dimensões de 64 x 13 x 3 mm. Foram preparadas 1 (uma) amostra para cada grupo analisado. O equipamento a ser utilizado será o DMA Q800, da TA Instruments, pertencente ao Instituto de Macromoléculas da UFRJ (IMA/UFRJ).

Os parâmetros utilizados para esta análise estão descritos abaixo:

- a) Amplitude = 20  $\mu\text{m}$ ;
- b) Frequência = 1Hz;
- c) Força estática / dinâmica = 2N;
- d) Faixa de aquecimento de 30 à 200 °C;
- e) Taxa de aquecimento = 3 °C/min;
- f) Atmosfera = Nitrogênio.

### 3.3.13 Ensaio Balístico

O ensaio balístico avalia a capacidade de absorção de energia cinética do objeto em estudo. No presente trabalho, foram ensaiadas 8 (oito) placas de resina epóxi medindo 7,5 cm x 12 cm x 1 cm para controle, recebendo um disparo cada e uma placa com 30% em volume de fibras medindo 15 cm x 12 cm x 1 cm, que recebeu 8 disparos.

Para o ensaio balístico, foi utilizado um rifle de pressão Gunpower SSS que foi adaptado para calibre 7,62mm (Figura 3.6 b). Um projétil de chumbo de calibre 7,62 mm tipo SLUG da marca FG, com uma massa estimada de 3,08 gramas, como apresentado na Figura 3.6 (a).



Figura 3.6 – a) projétil utilizado no ensaio; b) sistema de detecção utilizado.

Para determinar a energia de absorção, medir a velocidade de impacto e a velocidade residual foram usados dois cronógrafos balísticos ProChrono modelo Pal, com precisão de 0,31 m/s.

O rifle de ar foi posicionado a 5 metros de distância do alvo, e consiste de uma placa presa a bancada por um torno que foi alinhado perpendicularmente ao rifle. Dois cronógrafos balísticos foram colocados, um 10 cm antes do alvo e o outro 10 cm após o alvo.

Para que os resultados obtidos neste trabalho (provete de ar comprimido) possam ser comparados aos de trabalhos com ensaios realizados no CAEx (arma de fogo), será necessário fazer um cálculo para converter a energia absorvida obtida no presente trabalho. O cálculo será realizado através da Equação 3.6:

$$E_{abs}(CAEx) = \frac{mp_{CAEx}}{mp_{IME}} \cdot E_{abs}(IME) \quad (3.6)$$

Sendo:

$E_{abs}$  (CAEx) - a energia que se deseja obter;

$mp_{CAEx}$  - massa do projétil utilizado no CAEx;

$mp_{IME}$  - massa do projétil utilizado no IME;

$E_{abs}$  (IME) - a energia absorvida obtida no IME.

A massa da munição calibre 7,62 mm utilizada no CAEx é igual a 9,70 gramas.

### 3.3.14 Microscopia Eletrônica de Varredura

Tanto as amostras de fibras de kenaf quanto seus compósitos tiveram suas superfícies de fratura analisadas através da microscopia eletrônica de varredura, a fim de associar o comportamento mecânico à microestrutura. Sendo assim, foi possível analisar a morfologia da superfície das fibras e verificar a influência dos diferentes percentuais de reforço de fibras de kenaf nos mecanismos de fratura atuantes.

Como as fibras naturais e seus compósitos são não condutores, foi necessário fazer o recobrimento das superfícies para possibilitar a sua visualização, utilizando um recobrimento condutor de ouro ou platina.

### 3.3.15 Análise Estatística

#### 3.3.15.1 Análise de Distribuição de Weibull

A análise de distribuição de Weibull é o método mais aplicado em sistemas em que se destaca uma ou mais variáveis aleatórias. Sendo este, um método largamente utilizado na engenharia devido a capacidade de adaptá-lo a diversos casos pelo ajuste de parâmetros (O'CONNOR; KLEYNER, 2012; TAVARES et al., 2014). A função de distribuição cumulativa de Weibull é dada pela Equação 3.7:

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\theta}\right)^\beta\right] \quad (3.7)$$

Onde:

$\theta$  - unidade característica ou parâmetro de escala;

$\beta$  - módulo de Weibull ou parâmetro de forma.

A Equação 3.7 pode ser linearizada através de manipulações matemáticas, obtendo a Equação 3.8:

$$\ln[\ln(\frac{1}{1-F(x)})] = \beta \cdot \ln(x) - [\beta \cdot \ln(\theta)] \quad (3.8)$$

Onde:

$\beta$  - coeficiente angular;

$\beta \cdot \ln(\theta)$  - coeficiente linear.

Assim, os parâmetros de Weibull podem ser obtidos de forma relativamente fácil, através de um método gráfico, ordenando os parâmetros de forma crescente (O'CONNOR; KLEYNER, 2012). O modelo de Weibull foi utilizado neste trabalho para quantificar a confiabilidade estatística de alguns parâmetros medidos.

### 3.3.15.2 Análise de Variância (ANOVA)

A análise de variância é uma técnica utilizada para avaliar as afirmações sobre médias populacionais. A fim de verificar a ocorrência de diferenças significativas entre as médias das propriedades estudadas, os resultados obtidos nos ensaios mecânicos e balísticos foram submetidos à Anova. O nível de de confiança utilizado para os testes foi de 95%.

Na tabela 3.3, são mostrados os parâmetros estatísticos utilizados para realizar a análise de variância. Quando o valor de  $F_{calculado}$  é menor que  $F_{crítico}$  ( $F_{calculado} < F_{crítico}$ ) pode-se concluir que as médias dos resultados obtidos são iguais, ou seja, a hipótese é nula.

Tabela 3.3 – Parâmetros utilizados na análise de variância.

Causas de variação	GL	Soma dos quadrados	Quadrado médio	$F_{calculado}$	$F_{crítico}$
Tratamento	k-1	SQT	QMT	QMT/QMR	Tabela F (5% de significância)
Resíduo	k(r-1)	SQR	QMR		
Total	kr-1	SQTo			

Fonte – Próprio autor

Sendo:

$GL$  - número de graus de liberdade;

$k$  - número de tratamentos;

$r$  - número de repetições do tratamento;

$k(r - 1)$  - número de graus de liberdade do resíduo;

$kr - 1$  - número total de graus de liberdade;

$SQT$  - soma dos quadrados do tratamentos;

$SQT_o$  - soma dos quadrados total;  
 $QMT$  - quadrado médio dos tratamentos;  
 $QMR$  - quadrado médio do resíduo;  
 $vot$  - valor obtido para cada tratamento;  
 $vop$  - valor obtido da propriedade.

Abaixo, são expressas as Equações de (3.9 à 3.13) que são utilizadas no método de análise de variância.

$$SQT = \frac{\sum(vot)^2}{r} - \frac{\sum(vop)^2}{n} \quad (3.9)$$

$$SQT_o = \sum(vot)^2 - \frac{\sum(vop)^2}{n} \quad (3.10)$$

$$SQR = SQT_o - SQT \quad (3.11)$$

$$QMT = \frac{SQT}{(k-1)} \quad (3.12)$$

$$QMR = \frac{SQR}{k(n-1)} \quad (3.13)$$

Nesse caso:  $\sum(vot) = \sum(vop)$

O teste de Tukey foi utilizado para os resultados que apresentaram diferença através da análise de variância, com o objetivo de testar quantitativamente dois a dois qual ou quais tratamentos foram diferentes com base na diferença mínima significativa (DMS), que é dada pela Equação 3.14:

$$DMS = q \cdot \sqrt{\frac{QMR}{r}} \quad (3.14)$$

Sendo:

$q$  - amplitude total estudentizada (valor tabelado).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Análise Estrutural da Fibra Kenaf

Uma vista longitudinal das fibras de kenaf não tratada é apresentada na Figura 4.1. A partir da imagem é possível observar que a superfície da fibra não é lisa e que tem sulcos longitudinais que, segundo Ramesh (2016) podem influenciar no aumento do intertravamento mecânico com a matriz. Sendo ainda, possível observar a presença de impurezas superficiais e defeitos ao longo da fibra.

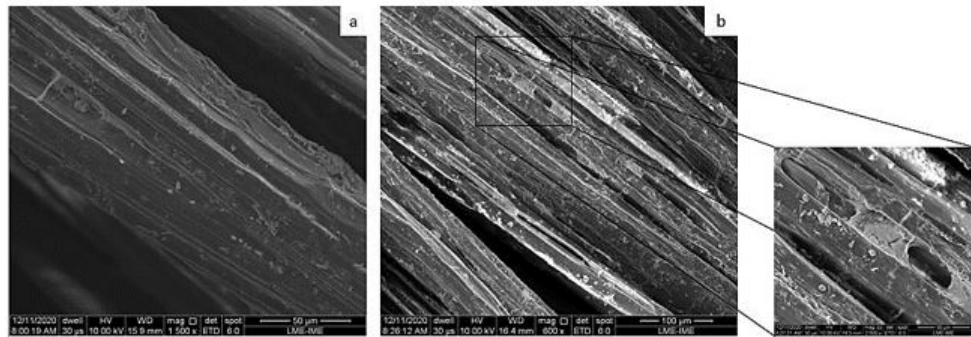


Figura 4.1 – Micrografias: a) e b) vista longitudinal das fibras de kenaf .

A partir da Figura 4.2, é possível visualizar a seção transversal da fibra de kenaf. A microestrutura da fibra é formada por várias microfibrilas que se unem umas às outras por meio de lamelas intermediárias, que são constituídas de hemicelulose e lignina.

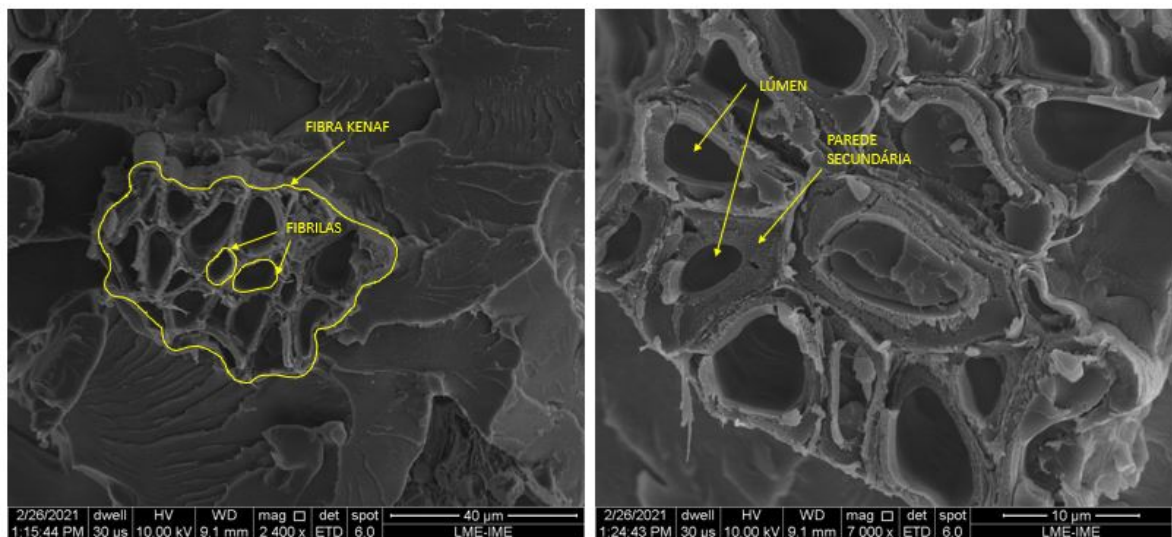


Figura 4.2 – Micrografias da seção transversal das fibras de kenaf .



## 4.2 Densidade

Os valores obtidos através dos ensaios de arquimedes, picnometria gasosa e pela regra das misturas são apresentados e discutidos a seguir.

### 4.2.1 Arquimedes

Os resultados obtidos a partir do cálculo de densidade realizado através da Equação 3.1, estão descritos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Densidade pelo método de Arquimedes.

Amostra	$M_1$ (g)	$M_2$ (g)	$M_3$ (g)	$M_4$ (g)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
1	6,9540	6,2500	7,5350	6,4220	1,4179
2	6,9540	6,2500	7,5130	6,3210	1,1434
3	6,9540	6,2500	7,5720	6,5350	1,8525
4	6,9540	6,2500	7,6395	6,3920	1,2589
5	6,9540	6,2500	7,6667	6,4210	1,3133
6	6,9540	6,2500	7,5278	6,5130	1,8428
7	6,9540	6,2500	7,4910	6,3710	1,2885

Fonte – Próprio autor

O valor médio de densidade obtido pelo ensaio de Arquimedes foi de  $1,4453 \pm 0,29$  g/cm<sup>3</sup>. Diferentes fatores podem influenciar os resultados obtidos como por exemplo, o aprisionamento de ar nos poros das fibras que podem fazer com que a amostra mesmo submersa, ainda não esteja com seus vazios completamente preenchidos pelo líquido.

### 4.2.2 Picnometria Gasosa

Abaixo, na Tabela 4.2 estão contidos os valores obtidos para a densidade da fibra de kenaf em cada corrida analisada.

Tabela 4.2 – Densidade pelo método de picnometria gasosa.

Corrida	Volume (cm <sup>3</sup> )	Desvio (cm <sup>3</sup> )	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Desvio (cm <sup>3</sup> )
1	0,2583	0,0017	1,5244	-0,0099
2	0,2566	-0,0001	1,5348	0,0005
3	0,2559	-0,0008	1,5390	0,0046
4	0,2576	0,0009	1,5289	-0,0055
5	0,2554	-0,0013	1,5419	0,0075
6	0,2554	-0,0012	1,5418	0,0075
7	0,2571	0,0004	1,5318	-0,0026
8	0,2567	0,0001	1,5339	-0,0005
9	0,2576	0,0010	1,5285	-0,0058
10	0,2557	-0,0009	1,5400	0,0056
11	0,2544	-0,0023	1,5480	0,0137
12	0,2568	0,0002	1,5333	-0,0010
13	0,2555	-0,0011	1,5412	0,0068
14	0,2575	0,0008	1,5294	-0,0050
15	0,2575	0,0009	1,5292	-0,0052
16	0,2570	0,0004	1,5321	-0,0022
17	0,2566	-0,0000	1,5346	0,0002
18	0,2574	0,0008	1,5297	-0,0046
19	0,2573	0,0006	1,5307	-0,0037
20	0,2567	0,0001	1,5340	-0,0004

Fonte – Próprio autor

O resultado obtido através da média das corridas de picnometria gasosa é de  $1,5344 \pm 0,0059$  g/cm<sup>3</sup>. A densidade obtida por picnometria possui maior precisão nos resultados, pois mede apenas o volume da substância lenhosa, sendo descontado do volume final os poros abertos da amostra, que pode ser observado pelo valor do desvio padrão.

A fibra de kenaf possui uma densidade que varia de 1,2 à 1,5 g/cm<sup>3</sup> (Tabela 3.1). A partir do resultado encontrado é possível comparar a densidade das fibras de kenaf a de outras fibras naturais, como por exemplo, cânhamo, juta, PALF e sisal (Tabela 2.4).

### 4.2.3 Regra das Misturas

Na Tabela 4.3 estão contidos os resultados de densidade dos compósitos com 10, 20 e 30% em volume de fibras.

Tabela 4.3 – Densidade pelo método da regra das misturas

Volume (%)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
10	1,2111
20	1,5455
30	1,3970

Fonte – Próprio autor

A variação apresentada nos resultados obtidos através da regra das misturas pode ser consequência de defeitos no compósito. Esses defeitos podem ocorrer devido a diversos fatores envolvidos em sua produção, que podem gerar o aprisionamento de ar na matriz, ocasionado bolhas e consequentemente um aumento no volume de vazios.

### 4.3 Diâmetro

A frequência média das dimensões das seções transversais das fibras de kenaf, estão apresentadas na Figura 4.3.

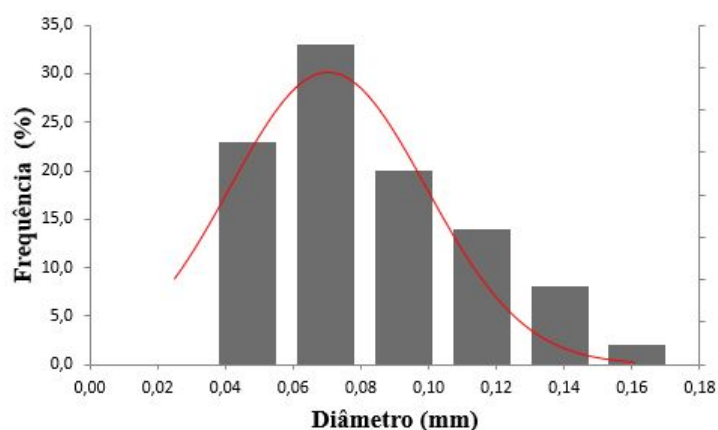


Figura 4.3 – Distribuição de frequências das dimensões médias da seção transversal das fibras de kenaf.

Fonte – Próprio autor

As 6 (seis) classes de diâmetros obtidas para a fibra de kenaf estão apresentadas na Tabela 4.4 assim como sua frequência. Observa-se que as classes 1, 2, 3 e 4 possuem uma maior frequência relativa enquanto que as classes 5 e 6 possuem menor quantidade em relação as demais. Vale ressaltar que as fibras de kenaf são visualmente muito finas e que provavelmente, as frequências 5 e 6 se tratam de fibras que poderiam ter sido mais desfibradas.

Tabela 4.4 – Diferentes intervalos de dimensões da fibra de kenaf.

Classe	Intervalo x $10^{-3}$ (mm)	Frequência (%)
1	23,57 - 46,57	23
2	46,57 - 69,57	33
3	69,57 - 92,57	20
4	92,57 - 115,57	14
5	115,57 - 138,57	8
6	138,57 - 161,57	2

Fonte – Próprio autor

O estudo mostrou que o diâmetro da fibra de kenaf variou de  $23,57 \mu\text{m}$  à  $161,57 \mu\text{m}$ . Assim, através da média obtida para as 100 (cem) amostras analisadas pode-se propor um diâmetro médio para as fibras de kenaf de  $71,2 \mu\text{m}$ . Sendo este um valor próximo ao proposto no estudo de Ramesh (2016), que apresentou um diâmetro médio de  $67,6 \mu\text{m}$ . Como comentado anteriormente as fibras de kenaf são visualmente muito finas e, possuem um diâmetro médio 239% menor que o diâmetro médio das fibras de curauá ( $170 \mu\text{m}$ ), por exemplo (MONTEIRO et al., 2006).

As fibras naturais possuem uma estrutura heterogênea, e tem limitação dimensional causada pela variação considerável do diâmetro ao longo do comprimento de seus filamentos individuais como pode ser observado na Figura 4.4 (a) e (b).

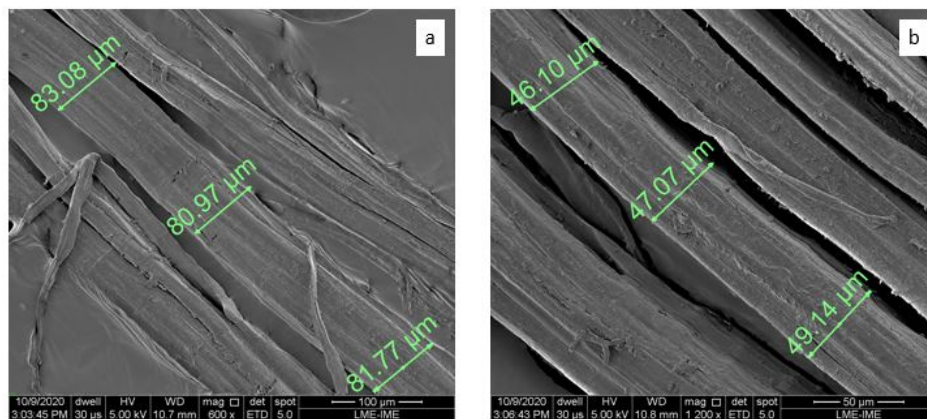


Figura 4.4 – Micrografias de MEV do diâmetro da fibra: a) na região superior, b) na região inferior.

Fonte – Próprio autor

Quanto menor o diâmetro das fibras, menor será a quantidade de falhas, resultando no aumento das propriedades de tração das fibras.

## 4.4 Teor de Umidade

Sabe-se que as fibras naturais são de caráter hidrofílico e a resina epóxi hidrofóbica, por isso é importante conhecer o teor de umidade das FNLs para entender os fatores que podem influenciar o comportamento do material compósito. A Tabela 4.5 apresenta os resultados obtidos para a fibra de kenaf.

Tabela 4.5 – Percentual de umidade da fibra de kenaf.

Amostras	Peso Inicial(g)	2h	2h30min	3h	umidade(%)
1	0,6814	0,6353	0,6338	0,6298	8,1931
2	0,7054	0,6615	0,6572	0,6563	7,4813
3	0,6985	0,6639	0,6618	0,6581	6,1389
4	0,7093	0,6759	0,6665	0,6634	6,9189

Fonte – Próprio autor

A partir dos dados obtidos foi possível calcular o teor de umidade da fibra de kenaf, a umidade média obtida é de  $7,1831\% \pm 0,8697$ . O trabalho de Ramesh (2016) indica uma massa de água de 8,5%.

## 4.5 Difração de Raios X (DRX)

Após a realização do ensaio, obteve-se o perfil de difração através de tratamento computacional dos dados pelo programa Origin Pro, o difratograma obtido para a fibra de kenaf é mostrado na Figura 4.5.

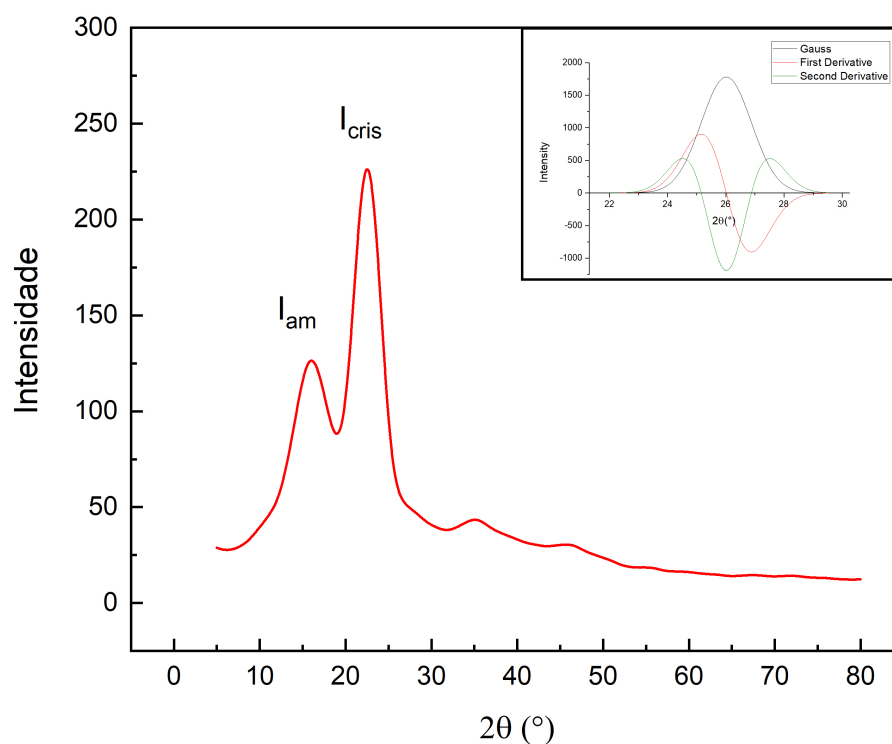


Figura 4.5 – Difratograma de raios-X da fibra de kenaf. Inserção: deconvolução para o cálculo do ângulo microfibrilar (AMF).

Fonte – Próprio autor

Para a determinação do  $I_c$ , foram observados os valores das intensidades dos picos associados às fases amorfa e cristalina aplicando-as à Equação 3.4. A seguir, através da utilização do software Origin Pro, foi feita a normalização e derivação do pico de maior intensidade para o cálculo do AMF. Para isso, foi necessário obter o parâmetro T e aplicá-lo a Equação 3.5. A Tabela 4.6 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 4.6 – Resultados obtidos por DRX.

Propriedade	Resultado
AMF (°)	7,1
Cristalinidade (%)	44,3
Fonte – Próprio autor	

O ângulo microfibrilar das fibras de kenaf varia de 9-15°. Neste trabalho, o valor encontrado é de 7,1°, sendo este menor que o encontrado na literatura. Estando este valor próximo ao encontrado na literatura para as fibras de rami, cânhamo e juta (ANDRÉ, 2006; YUSOFF; TAKAGI; NAKAGAITO, 2016; ZHAN et al., 2020).

Satyanarayana et al. (1990), observaram que as fibras que possuem baixo teor de celulose e alto ângulo microfibrilar apresentaram uma fratura intracelular (pullout de microfibrilas), no entanto fibras com alto teor de celulose e baixo ângulo microfibrilar, apresentaram fratura do tipo intercelular e o pullout de microfibrilas não é observado.

O índice de cristalinidade obtido para fibra de kenaf não tratada neste trabalho é de apenas 44,3%, o que implica na presença de substâncias amorfas na fibra. Tratamentos superficiais para remoção de lignina tendem a aumentar de forma considerável o índice de cristalinidade das FNLs (KARIMI et al., 2014; MANRAL; BAJPAI, 2020).

## 4.6 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

A seguir, na Figura 4.6, é mostrado o espectro vibracional obtido da amostra cominuída da fibra de kenaf.

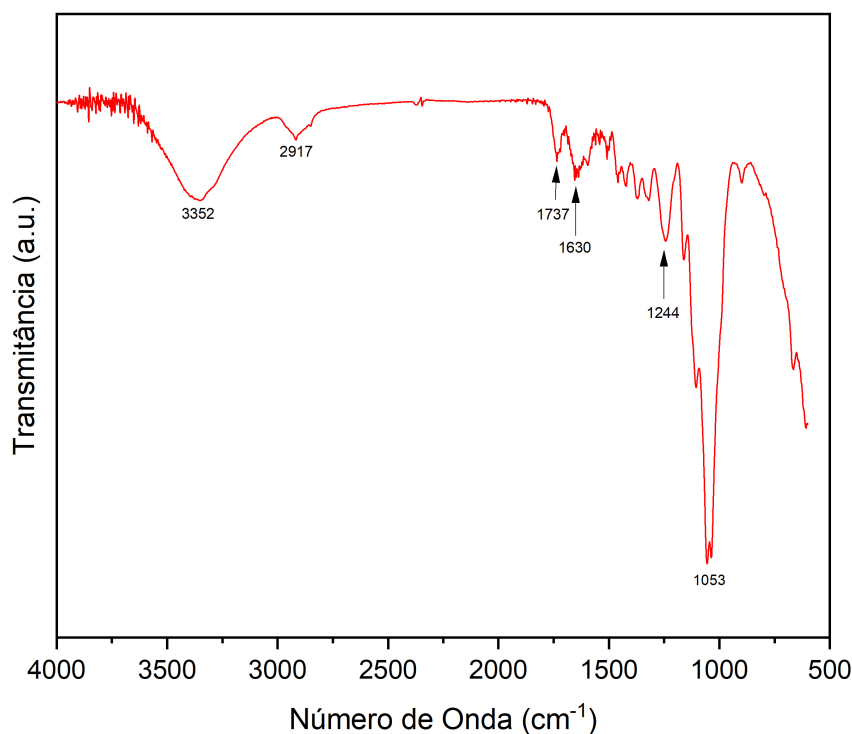


Figura 4.6 – Espectro de FTIR da fibra de kenaf.

Fonte – Próprio autor

As fibras naturais possuem como principais elementos em sua composição a celulose e lignina, componentes que possuem grupo funcional hidroxila na sua estrutura. O gráfico apresenta uma banda em  $3352\text{ cm}^{-1}$  referente ao alongamento da ligação O-H, já a banda de  $2917\text{ cm}^{-1}$  representa ao alongamento da ligação C-H simétrico e assimétrico. Isso é relacionado aos grupos alifáticos ricos em celulose e hemicelulose. Outro pico em  $1737\text{ cm}^{-1}$  corresponde ao éster vibrações de carbonil dos grupos acetil, feruloyl e p-cumaril na lignina. Um pico de alongamento detectado em  $1650\text{ cm}^{-1}$  é atribuído ao grupo carbonila do éster acetílico na hemicelulose e o carbonil aldeído em lignina. O pico largo em  $1244\text{ cm}^{-1}$  corresponde à vibração assimétrica C-O. A banda de absorção em torno de  $1053\text{ cm}^{-1}$  está relacionada às frequências de alongamento C-O e C-C das xilanas e alongamento da ligação glicosídica C-O-C na hemicelulose. Essa banda também é atribuída ao alongamento C-O, proveniente dos grupos C-O-CH<sub>3</sub>, que reforça a existência de hemicelulose e lignina nas fibras de kenaf. (KHALIL et al., 2010; RAZAK et al., 2014; AHMAD; CHOI; PARK, 2015; RAMESH, 2016; OMRANI; MENEZES; ROHATGI, 2016; SALEM et al., 2017).

## 4.7 Ensaio de Tração das Fibras

A Figura 4.7, mostra os resultados médios obtidos para resistência a tração das fibras de kenaf para os diferentes classes de diâmetros estudadas (Tabela 4.4).

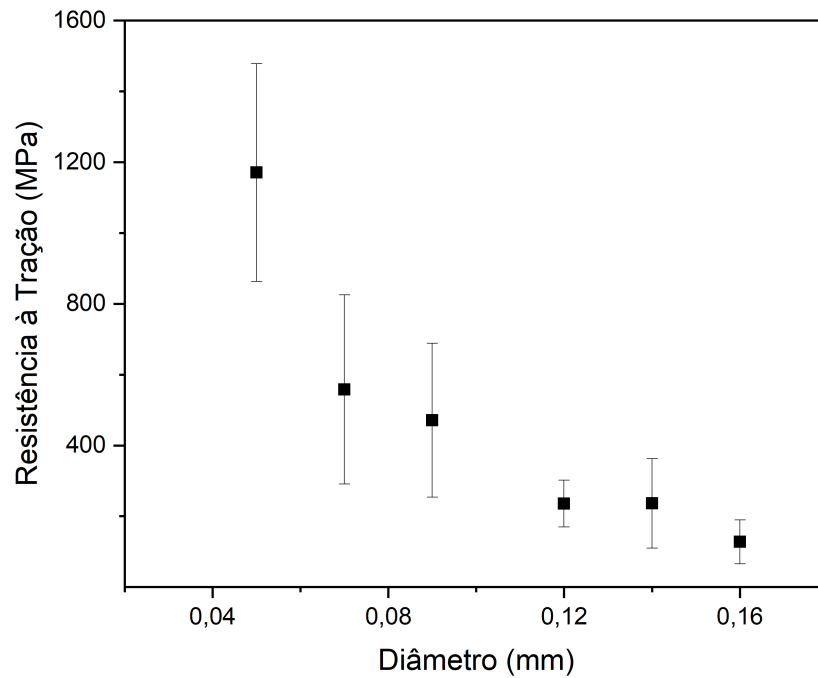


Figura 4.7 – Gráfico dos valores médios obtidos de resistência das fibras individuais para cada diâmetro.

Fonte – Próprio autor

É possível observar que a média de resistência à tração das fibras dentro da primeira classe de diâmetros ( $23,57 - 46,57 \times 10^3 \text{ mm}$ ) é bem maior que as demais. Como já visto, quanto menor o diâmetro de uma fibra natural menor será densidade de defeitos presentes resultando em melhores propriedades mecânicas, como já visto no trabalho de (DEMOSTHENES et al., 2020).

A Tabela 4.7, apresenta os valores médios de resistência das fibras para cada diâmetro médio e os parâmetros da análise estatística de Weibull.

Tabela 4.7 – Tensão média e parâmetros de Weibull para os diferentes diâmetros das fibras de kenaf.

Classe	Diâmetro Médio ( $\mu\text{m}$ )	$\sigma$ (MPa)	Desvio Padrão	$\beta$	$\theta$	$R^2$
1	38,39	1170,00	332,10	3,950	1292,00	0,9257
2	57,59	568,90	281,90	2,123	642,40	0,9591
3	77,46	488,10	268,10	1,893	550,00	0,9644
4	99,20	236,00	75,08	3,480	262,40	0,9851
5	124,11	249,40	159,20	1,605	278,30	0,9537
6	154,64	130,90	69,46	1,966	147,60	0,9984

Fonte – Próprio autor



Pode-se verificar através da Tabela 4.7, que os valores de  $\theta$  encontrados são próximos aos valores de tensão média para cada classe. Com os valores de  $R^2$  tão próximos de 1, pode-se afirmar que os resultados obtidos são estatisticamente confiáveis.

Foi realizada a análise estatística ANOVA a fim de verificar se os valores obtidos para resistência das fibras são diferentes, tendo em vista o elevado desvio padrão encontrado para cada classe. Os resultados estão apresentados na Tabela 4.8:

Tabela 4.8 – Aplicação do método estatístico ANOVA nos resultados de resistência à tração das fibras.

Causas de Variação	GL	SQ	QM	$F_{calculado}$	$F_{crítico}$
Tratamento	5	7949788,60	158995,72	40,22	2,62
Resíduo	24	948720,59	39530,02	-	-
Total	29	8898509,19	-	-	-

Fonte – Próprio autor

Através da análise de variância pode-se afirmar que os resultados obtidos para os grupos estudados são diferentes, tendo em vista que  $F_{calculado} > F_{crítico}$ . A fim de saber quais valores são diferentes, foi realizado o teste de Tukey. Sendo o valor de diferença mínima significativa igual a 370,78. Os resultados obtidos através do teste são apresentados na Tabela 4.9:

Tabela 4.9 – Teste de Tukey para os resultados de resistência à tração das fibras.

Classe	1	2	3	4	5	6
1	0	612,37	700,12	935,18	934,48	1043,31
2	612,37	0	87,75	322,81	322,10	430,94
3	700,12	87,75	0	235,06	234,35	343,19
4	935,18	322,81	235,06	0	0,71	108,84
5	934,48	322,10	234,35	0,71	0	108,84
6	1043,31	430,94	343,19	108,13	108,84	0

Fonte – Próprio autor

A média de resistência da classe 01 é significativamente diferente das demais, sendo a classe de fibras com os menores diâmetros encontrados. A classe 06 também apresenta resultado distinto da classe 02 mesmo apresentando uma resistência muito baixa se comparada a primeira.

A Figura 4.8, apresenta as curvas de tensão x deformação para as classes analisadas nesse estudo. As curvas apresentam um comportamento elástico linear seguido de uma abrupta ruptura, caracterizando uma fratura frágil ao não apresentar deformação plástica aparente.

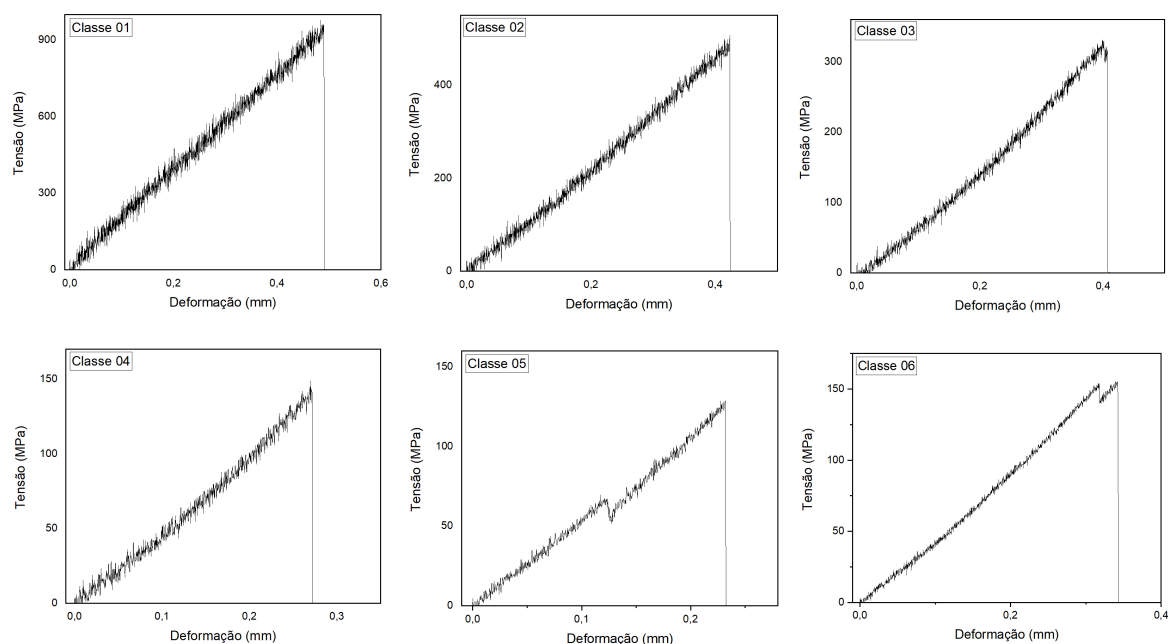


Figura 4.8 – Curvas de tensão x deformação para as diferentes classes estudadas.

Fonte – Próprio autor

## 4.8 Ensaio de Tração dos Compósitos

As Figuras 4.9 e 4.10, mostram o aspecto da fratura dos CPs ensaiados sob tração para a resina epóxi e os compósitos epóxi-kenaf (EK), sendo eles: compósito com 10% em volume de fibras de kenaf (EK10), com 20% (EK20) e com 30% (EK30). Sendo possível observar que todas as amostras foram rompidas ao longo de sua altura útil, vale ressaltar que, devido à ausência de deformações visíveis, as amostras de resina e os compósitos EK10 e EK20 sofreram fraturas frágeis. Já o compósito EK30, apresenta uma pequena deformação, indicando uma possível mudança de comportamento.

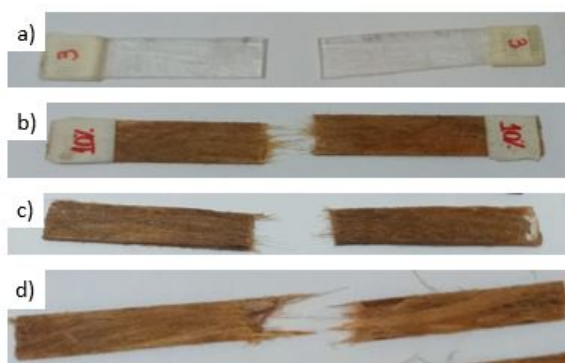


Figura 4.9 – Análise macroscópica de tração: a) resina epóxi; b) EK10; c) EK20 e d) EK30.

Fonte – Próprio autor

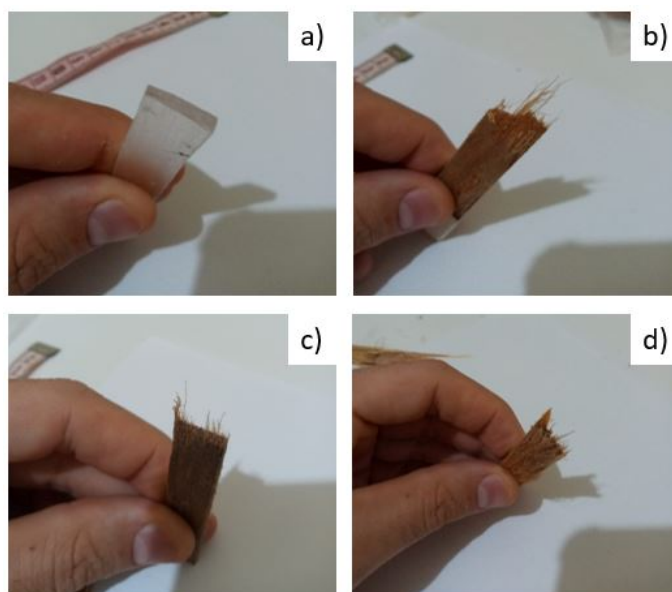


Figura 4.10 – Análise macroscópica de tração: a) resina epóxi; b) EK10; c) EK20 e d) EK30.

Fonte – Próprio autor

A partir dos gráficos de tensão x deformação é possível observar o comportamento da resina epóxi e dos compósitos de kenaf. A Figura 4.11, mostra que as amostras de resina e o compósito EK10 sofreram fratura frágil. Já para os compósitos EK20 e E30, é possível observar uma transição dúctil-frágil seguida por uma ruptura abrupta, mostrando uma efetiva ativação das fibras de kenaf.

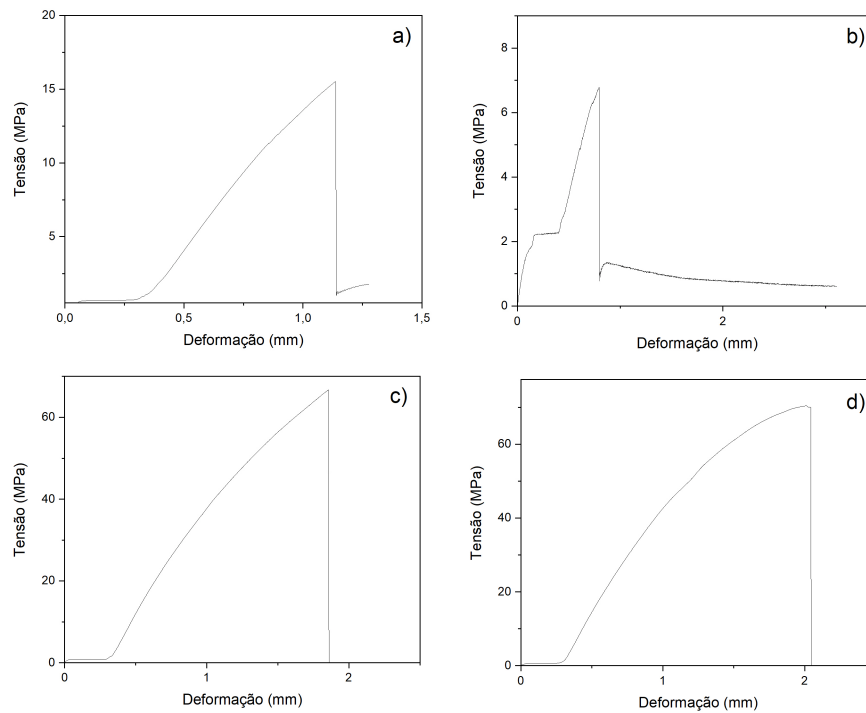


Figura 4.11 – Curvas características de tração para: a) resina epóxi; b) EK10; c) EK20 e d) EK30.

Fonte – Próprio autor

Os valores médios de resistência, módulo elástico e deformação obtidos a partir do ensaio de tração realizado no grupo de controle e nos compósitos de epóxi-kenaf são apresentados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Valores para resistência à tração, módulo de elasticidade e deformação média dos compósitos.

Amostra	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Deformação (%)
Epóxi	$7,92 \pm 2,50$	$0,28 \pm 0,32$	$0,32 \pm 0,07$
EK10	$11,86 \pm 9,42$	$0,33 \pm 0,21$	$0,36 \pm 0,16$
EK20	$61,13 \pm 7,96$	$3,21 \pm 0,53$	$2,00 \pm 0,22$
EK30	$60,23 \pm 7,73$	$3,17 \pm 0,95$	$1,77 \pm 0,32$

Fonte – Próprio autor

A Figura 4.12 apresenta graficamente os valores médios obtidos para resistência à tração e módulo elástico das amostras analisadas. A partir deles, pode-se observar que os compósitos EK10 apresentam um aumento na resistência à tração das amostras, porém para acréscimo de até 10% em volume de fibras o comportamento do compósito ainda é muito frágil de forma que não há transferência efetiva dos esforços da matriz para as fibras.

Porém, o acréscimo de reforço a matriz polimérica resulta em uma maior integridade dos CPs que apresentam também uma melhora em seu módulo elástico.

Já para os compósitos EK20 e EK30 a resistência à tração e o módulo de elasticidade aumentaram significativamente com o acréscimo de reforço, sendo a resistência à tração quase 10 vezes maior que para a resina epóxi. Apesar de apresentar um aumento significativo quando comparado ao grupo de controle, os compósitos EK30 sofreram uma pequena redução nos valores de resistência à tração e módulo elástico quando comparados aos compósitos EK20. Acredita-se que o aumento do teor de fibra foi responsável pelo enfraquecimento da mecânica na interface fibra/matriz além de causar uma má adesão devido a baixa molhabilidade das fibras (ARDEKANI et al., 2014; MARZUKI et al., 2020).

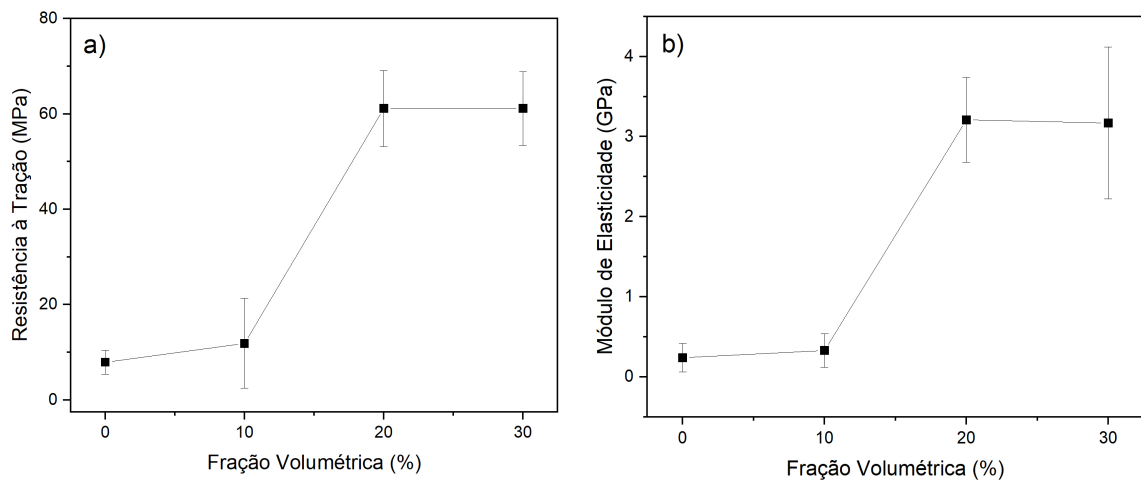


Figura 4.12 – Gráfico dos valores médios obtidos: a) resistência a tração; b) módulo de elasticidade.

Fonte – Próprio autor

Para melhor analisar os resultados das propriedades observadas, foi realizada a análise de variância para verificar se houve diferença significativa entre os resultados obtidos principalmente, para os compósitos EK20 e EK30 que apresentaram valor de resistência aproximado. A Tabela 4.11 mostra a análise para as propriedades de resistência à tração.

Tabela 4.11 – Aplicação do método estatístico ANOVA nos resultados de resistência à tração.

Causas de Variação	GL	SQ	QM	$F_{calculado}$	$F_{crítico}$
Tratamento	3	21915,67	7305,22	133,91	3,01
Resíduo	24	1309,26	54,55	-	-
Total	27	23224,93	-	-	-

Fonte – Próprio autor

Pode-se afirmar com 95% de confiabilidade que os resultados para os grupos estudados são diferentes, visto que como  $F_{calculado} > F_{crítico}$ . Para analisar de forma precisa as diferenças entre as médias obtidas para cada parâmetro, foi realizado o teste de Tukey através do qual foi obtido o valor de DMS (9,85). A Tabela 4.12 apresenta os resultados para o teste de Tukey, que mostram que os valores obtidos para EK20 e EK30 são estatisticamente iguais. Assim como, os valores obtidos para a resina epóxi e o compósito EK10 não apresentam diferença mínima significativa.

Tabela 4.12 – Teste de Tukey para os resultados de resistência a tração.

Amostra	0%	10%	20%	30%
0%	0,00	3,94	53,20	52,31
10%	3,94	0,00	49,26	48,37
20%	53,20	49,26	0,00	0,89
30%	52,31	48,37	0,89	0,00

Fonte – Próprio autor

A fim de conhecer a confiabilidade dos resultados de resistência à tração das amostras estudadas, aplicou-se a distribuição de Weibull. A Tabela 4.13 mostra os parâmetros estatístico obtidos para esta análise.

Tabela 4.13 – Aplicação do método estatístico Weibull nos resultados de resistência a tração.

Amostra	Resistência à Tração (MPa)	$\theta$	$\beta$	$R^2$
Epóxi	7,92±2,50	8,848	3,298	0,9705
EK10	11,86±9,42	13,480	1,007	0,9405
EK20	61,13±7,96	64,800	7,721	0,8897
EK30	60,23±7,73	63,690	8,046	0,9788

Fonte – Próprio autor

O teste de Tukey, mostrou não haver diferença mínima significativa para os resultados obtidos entre a resina epóxi e o compósito EK10, assim como, entre os compósitos EK20 e EK30. Já a distribuição Weibull apresenta um valor do parâmetro  $R^2$  mais significativo para a amostra de resina, e para o compósito EK30, indicando uma maior homogeneidade entre as propriedades desses corpos de prova. Ou seja, apesar de os compósitos EK10 e EK20 apresentarem resultados superiores, estes não indicam maior representatividade estatística.

O mesmo foi feito para o módulo elástico, a fim de verificar se este parâmetro é igual para a resina e o compósito EK10 e para os compósitos EK20 e EK30. A Tabela 4.14, apresenta os resultados obtidos através do método estatístico de análise de variância.

Tabela 4.14 – Aplicação do método estatístico ANOVA nos resultados de módulo de elasticidade.

Causas de Variação	GL	SQ	QM	$F_{calculado}$	$F_{crítico}$
Tratamento	3	64,86	21,62	64,94	3,01
Resíduo	24	7,99	0,33	-	-
Total	27	72,85	-	-	-

Fonte – Próprio autor

A partir da confiabilidade apresentada, pode-se afirmar que os resultados alcançados pelos grupos estudados são diferentes, visto que como  $F_{calculado} > F_{crítico}$ . A Tabela 4.15, apresenta os resultados do teste de Tukey com valor de DMS igual à 0,77. Através do qual, é possível afirmar que os valores obtidos para a resina e o compósito EK10 são iguais, assim como para os valores dos módulos dos compósitos EK20 e EK30.

Tabela 4.15 – Teste de Tukey para os resultados de módulo de elasticidade.

Amostra	0%	10%	20%	30%
0%	0,00	0,05	2,93	2,89
10%	0,05	0,00	2,88	2,83
20%	2,93	2,88	0,00	0,05
30%	2,89	2,83	0,05	0,00

Fonte – Próprio autor

A Tabela 4.16 mostra os parâmetros estatístico obtidos para a análise do módulo de elasticidade.

Tabela 4.16 – Aplicação do método estatístico Weibull nos resultados de módulo elasticidade.

Amostra	Módulo de Elasticidade (GPa)	$\theta$	$\beta$	$R^2$
Epóxi	0,28±0,32	0,772	0,2678	0,9570
EK10	0,33±0,21	1,290	0,3923	0,8804
EK20	3,21±0,53	6,302	3,444	0,8433
EK30	3,17±0,95	3,534	3,349	0,9717

Fonte – Próprio autor

Através dos resultados apresentados na Tabela 4.16, pode-se verificar novamente a maior confiabilidade nos resultados do grupo de controle e para os compósitos EK30. Sendo assim, é possível comprovar que apesar de os compósitos EK20 e EK30 apresentarem resultados estatisticamente iguais para as propriedades de resistência a tração e módulo de elasticidade, o compósito EK30 apresenta resultados mais homogêneos para as propriedades

estudadas. Mesmo não apresentando um aumento significativo na propriedade de resistência à tração, o compósito EK10 apresentou uma melhor integridade em relação ao grupo de controle. Esse comportamento também foi observado para a adição de pequenos percentuais de fibras no trabalho de (OLIVEIRA et al., 2017), que estudou compósitos de matriz PEBD reforçados com fibras de coco verde.

Apesar de os compósitos EK10 não apresentarem resultados mais elevados de resistência à tração, é possível observar que houve aumento na propriedade. Isso não ocorre para os compósitos reforçados com fibras de caranã, que apresentaram significativa redução da propriedade, indicando que a introdução de pequenas frações de reforço fizeram com que as fibras agissem como defeitos, gerando pontos de concentração de tensão. Sendo a resistência obtida para a resina epóxi igual a  $50 \pm 6,4$  MPa e para o compósito com 10% em volume fibras igual à  $38,3 \pm 3,6$  MPa (SOUZA et al., 2020).

## 4.9 Ensaio de Impacto Izod

Amostras com fração volumétrica de fibras iguais a 0%, 10%, 20% e 30% foram submetidas a ensaio de impacto Izod. A Figura 4.13 apresenta os corpos de prova após a realização do ensaio de impacto, sendo possível observar que os CPs com 30% em volume de fibras não foram totalmente rompidos.



Figura 4.13 – Aspecto macroscópico das fraturas dos corpos de prova: a) 10% de fibras; b) 20% de fibras e c) 30% de fibras.

Fonte – Próprio autor

De acordo com o item 5.8 da ASTM D256 (2018), os resultados obtidos para os corpos de prova com 30% em volume de fibras não podem ser considerados como padrão e não devem ser utilizados estatisticamente. Dessa forma, pode-se dizer que pelo rompimento parcial dos corpos de prova há indícios de que a energia necessária para rompê-los seria ainda maior que a apresentada. Sendo assim, as energias obtidas para os compósitos com 30% de fibras não serão analisados estatisticamente.

A tabela 4.17 apresenta os valores de energia absorvida pelas amostras durante o ensaio de impacto Izod.



Tabela 4.17 – Energia absorvida para as amostras do ensaio de impacto Izod.

Amostra	Energia Absorvida (J/m)			
	0%	10%	20%	30%
1	16,99	59,10	236,41	401,53
2	16,72	50,22	236,41	348,84
3	20,06	66,96	236,41	446,43
4	16,72	55,80	242,32	345,98
5	19,12	44,64	234,38	390,63
6	15,06	47,28	246,70	379,46
7	17,45	55,80	295,51	369,98
8	13,69	59,10	223,21	369,98
9	16,05	61,38	236,41	456,83
10	15,86	55,80	189,13	366,43
Média	16,77±1,85	55,61±6,71	238,69±26,46	387,61±37,75

Fonte – Próprio autor

Através dos resultados observados na Tabela 4.17 pode-se observar o crescente aumento na energia absorvida pelos corpos de prova com grade salto de 10% para 20% e de 20% para 30%. Isso ocorre pela mudança no comportamento das amostras, que passam de completamente frágeis (resina) a dúctil-frágil (compósitos) devido a maior energia demandada a medida que há incremento no reforço natural dos compósitos.

Para melhor visualização dos resultados a Figura 4.14, apresenta as médias obtidas através da Tabela 4.17.

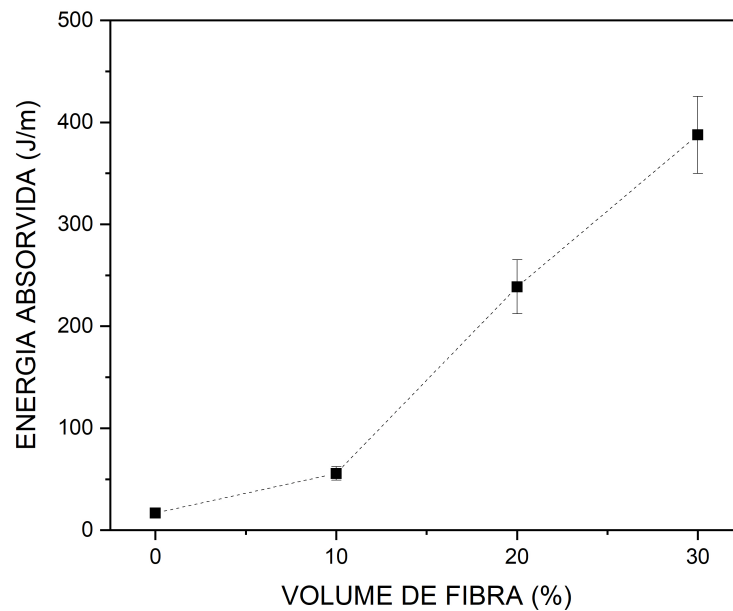


Figura 4.14 – Média da energia de impacto Izod absorvida pelos corpos de prova.

Fonte – Próprio autor

Através da Figura 4.15 (a) é possível observar o mecanismo de fratura frágil do compósito, pela presença das "marcas de rio". O que mostra que apesar do salto de mais de 300% na energia absorvida de 0% para 10%, não houve reforço efetivo. Através da Figura 4.15 (b) também é observado o arrancamento de fibras da matriz.

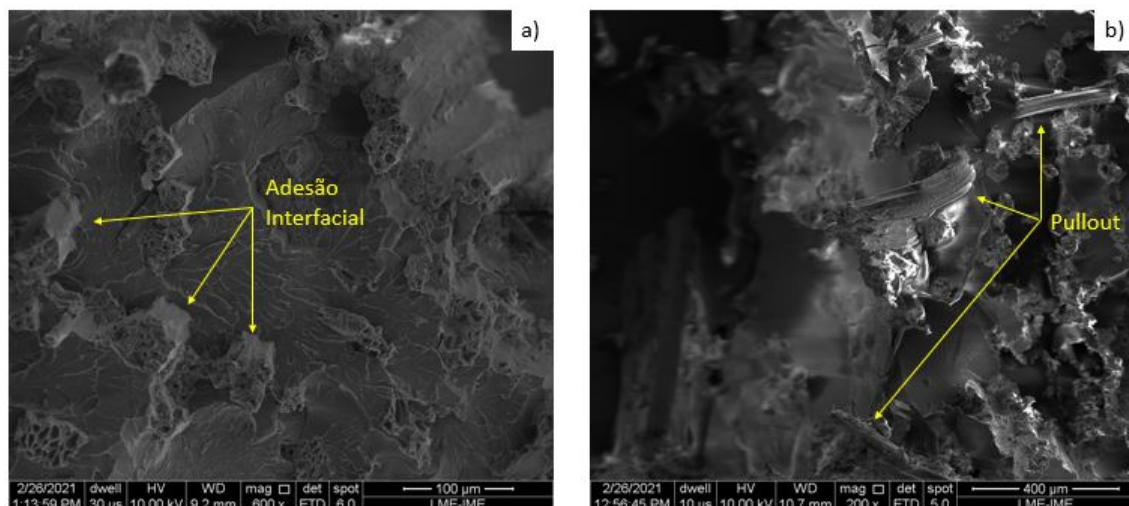


Figura 4.15 – Micrografias: a) e b) compósito epóxi com 10% em volume de fibras de kenaf.

Fonte – Próprio autor

Na Figura 4.16 (a) e (b), são apresentadas as micrografias dos compósitos com

20% e 30% de volume de fibras. Nota-se uma maior atuação das fibras no mecanismo de fratura, que apresenta fibras rompidas, arrancadas e descoladas da matriz. Além de um maior preenchimento de fibras no compósito de 30%, que deu maior estabilidade a matriz impedindo o rompimento total dos CPs.

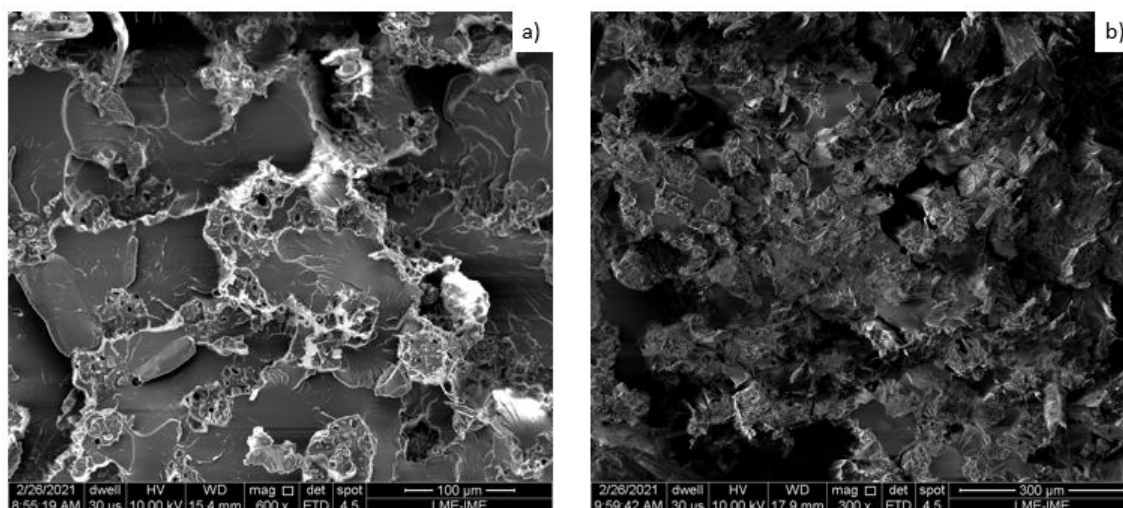


Figura 4.16 – Micrografias: a) compósito epóxi com 20% em volume de fibras de kenaf e b) compósito epóxi com 30% em volume de fibras de kenaf.

Fonte – Próprio autor

Foi feita a análise de variância para verificar se a diferença entre os resultados era significativa. No estudo foram considerados somente os corpos de prova do grupo de amostras reforçados com 10 e 20% de fibra de kenaf, já que os reforçados com 30% não podem ser considerados. A Tabela 4.18 apresenta os resultados pelo método estatístico.

Tabela 4.18 – Aplicação do método estatístico ANOVA nos resultados de impacto.

Causas de Variação	GL	SQ	QM	$F_{calculado}$	$F_{crítico}$
Tratamento	2	314747,49	157373,75	630,67	2,96
Resíduo	27	6737,43	249,53	-	-
Total	29	321484,92	-	-	-

Fonte – Próprio autor

Os resultados apresentados na Tabela 4.18 descartam a possibilidade de igualdade dos resultados com confiabilidade de 95%, já que  $F_{calculado} > F_{crítico}$ . Sendo possível afirmar que a adição de fibras de kenaf na matriz, aumenta a resistência do material.

Deste modo, o teste de Tukey foi aplicado a fim de comparar as médias obtidas. Sendo a diferença média significativa encontrada igual a 14,46.

Tabela 4.19 – Teste de Tukey para os compósitos.

Amostra	0%	10%	20%
0%	0,00	38,84	221,91
10%	38,84	0,00	183,08
20%	221,91	183,08	0,00

Fonte – Próprio autor

Com base nos resultados obtidos, foi possível verificar que os compósitos reforçados com fibras de kenaf apresentaram um aumento significativo na energia de impacto absorvida. Resultados semelhantes foram encontrados no trabalho de (TELES et al., 2017), sendo estas significativas para todas as frações de fibras de fique analisadas.

## 4.10 Análise Termogravimétrica (TGA)

Através da análise termogravimétrica foi possível observar o processo de perda de massa da resina, da fibra de kenaf e seus compósitos. A Figura 4.17 apresenta as curvas obtidas no ensaio termogravimétrico da fibra de kenaf.

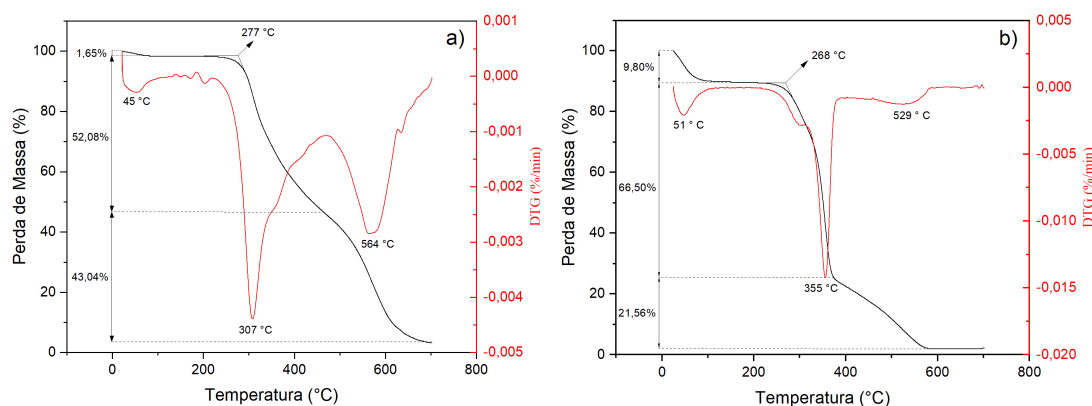


Figura 4.17 – Curvas de TGA e DTG: a) resina epóxi ; b) fibra de kenaf.

Fonte – Próprio autor

Na Figura 4.17 (a) é possível observar uma perda de massa 1,65% (quase desprezível) no primeiro estágio (até 150 °C). Essa perda está geralmente associada a baixa umidade presente nas resinas poliméricas sintéticas. Em 277,0 °C se dá o início da grande perda de massa dos estágios II e III com máximos em 307 °C e 564 °C, essas perdas estão associadas a degradação e ruptura das cadeias poliméricas.

Na Figura 4.17 (b) pode-se observar que a perda de massa da fibra do primeiro estágio que se inicia em torno de 30 °C até aproximadamente 150 °C com pico de

degradação em 51 °C, perdendo cerca de 9,80% em massa. Esta perda inicial pode ser atribuída a perda de umidade presente na fibra.

A maior degradação ocorre a partir de 200 °C até cerca de 570 °C, correspondendo a maior perda de massa da fibra. Em torno da temperatura de 268 °C, definida pela interseção das retas tangentes se inicia uma rampa de perda de massa que está associada a perda de componentes estruturais da fibra (lignina, hemicelulose e celulose) (MONTEIRO et al., 2012). A partir de 579 °C há um teor de cinzas de 2,14% resultante da elevada temperatura em atmosfera de nitrogênio.

Ainda que o início da degradação da lignina ocorra por volta de 200 °C, o pico em 529 °C está associado a finalização desse processo, proporcionando ao material uma perda de 21,53% de massa (ISHAK et al., 2012).

A Tabela 4.20 apresenta uma comparação dos resultados de perda de massa obtidas no presente trabalho e reportadas por Sgriccia e Hawley (2007) para as fibras de kenaf, sendo possível observar que as temperaturas de perda de massa são muito próximas.

Tabela 4.20 – Perda de massa percentual das fibras de kenaf.

Perda de peso	5% T (°C)	25% T (°C)	50% T (°C)	75% T (°C)	Referência
Kenaf	48,5	315,3	350,8	375,5	Presente trabalho
	64,3	313,4	340,5	370,8	Sgriccia e Hawley (2007)

Fonte – Próprio autor

A Figura 4.18, apresenta as curvas de TGA e DTG obtidas para os compósitos de kenaf. É possível observar para para a mesma faixa de temperatura das fibras (25 à 150 °C), a perda de massa é inferior. Sendo esta de 2,2%, 3,1%, 4,5% para os compósitos com 10%, 20% e 30% de fibras respectivamente. Essa menor perda de massa pode estar associada ao caráter hidrofóbico da matriz, que possui menor massa de água.

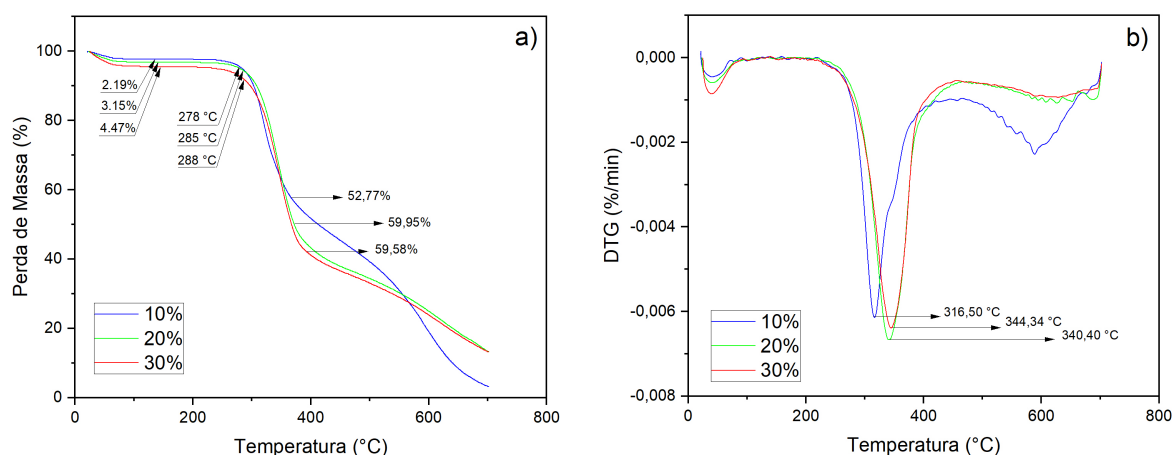


Figura 4.18 – Curvas de: a) TGA e b) DTG dos compósitos.

Fonte – Próprio autor

A temperatura em que se dá início a maior degradação do material é um pouco maior que a apresentada apenas pela fibra, o que pode estar ligado a estabilização do compósito em relação a fibra. Entretanto, o início da degradação se dá a aproximadamente 200 °C, sendo esta considerada a temperatura máxima de trabalho para o compósito (MONTEIRO et al., 2012). Para observar o patamar constante correspondente ao teor de cinzas, o ensaio deveria ser conduzido até temperaturas superiores.

Tabela 4.21 – Resumo de temperaturas de degradação e perda de massa para a resina, a fibra e seus compósitos.

Amostra	$T_{onset}$ (°C)	$T_{máx}$ (°C)	Perda de Massa (%)			Resíduo em 700 °C
			Estágio I	Estágio II	Estágio III	
Fibra	268	355	9,80	66,50	21,56	2,14
Epóxi	277	307	1,65	52,08	43,04	3,23
10%	278	316	2,19	52,77	41,86	3,18
20%	285	340	3,15	59,95	23,59	13,31
30%	288	344	4,47	59,58	22,74	13,21

Fonte – Próprio autor

## 4.11 Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)

As curvas obtidas através do ensaio de DSC para a resina epóxi e para a fibra de kenaf estão apresentadas na Figura 4.19.

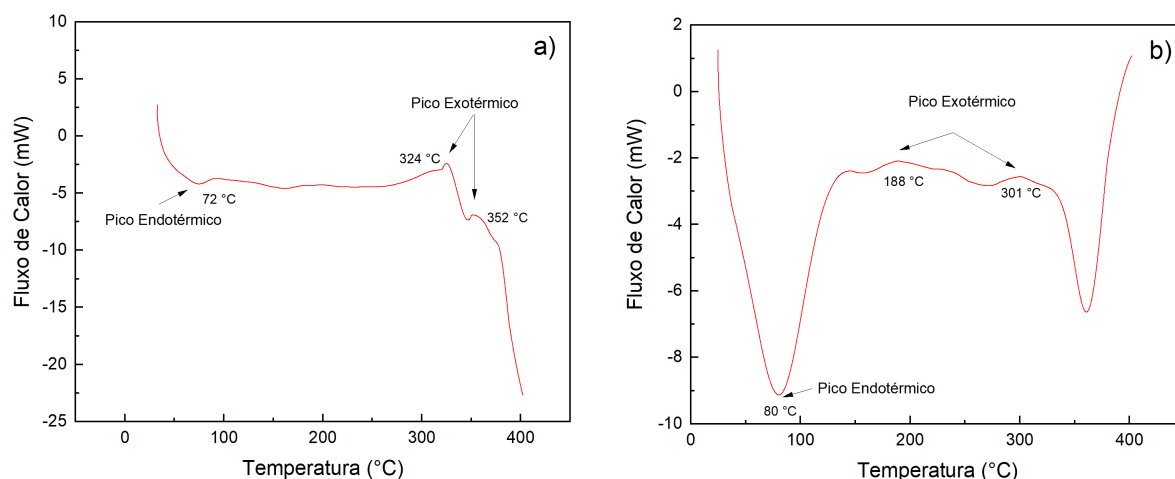


Figura 4.19 – Curvas de DSC obtidas para: a) resina epóxi; b) fibra de kenaf.

Fonte – Próprio autor

Pode-se observar na Figura 4.19 (a) um pico endotérmico com temperatura máxima em 72 °C que é geralmente associado a perda de umidade da resina, que para DSC ocorre a uma temperatura maior que a obtida por TGA. Com dois picos exotérmicos em 324 °C e 352 °C, que podem estar relacionados a degradação e ruptura das cadeias poliméricas corroborando com o ensaio de TGA/DTG.

As fibras de kenaf Figura 4.19 (b) apresentam um pico endotérmico com máxima à 80 °C, referente a perda de umidade da fibra como já visto no ensaio de TGA/DTG. Estando os picos endotérmicos possivelmente ligados ao início da decomposição da celulose e hemicelulose (188 °C) e da lignina (301 °C) que demora um pouco mais para terminar sua decomposição.

As curvas de DSC obtidas para os compósitos de matriz epóxi com 10%, 20% e 30% em volume de fibras de kenaf estão apresentadas na Figura 4.20. Estas curvas confirmam o que foi observado na análise de TGA/DTG, com o pico endotérmico iniciado em 25,6 °C com máxima, em 63 °C para os compósitos com 10% e 20% em volume de fibras e 70 °C para o compósito de 30%. Com ocorrência a temperatura inferior a de ocorrência na resina e na fibra, devido ao início da degradação do compósito.

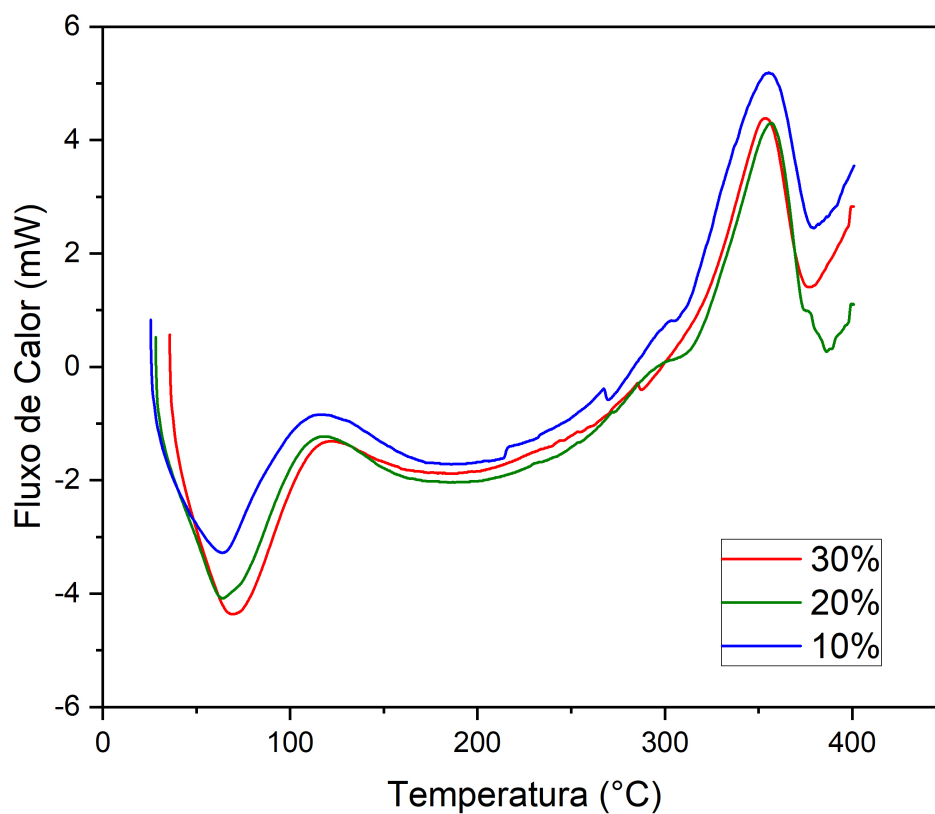


Figura 4.20 – Curvas de DSC obtidas para os compósitos de kenaf.

Fonte – Próprio autor

## 4.12 Análise Termomecânica (TMA)

A Figura 4.21, apresenta as curvas de TMA obtidas para a resina epóxi e os compósitos de kenaf, assim como, suas temperaturas de transição vítrea ( $T_g$ ).



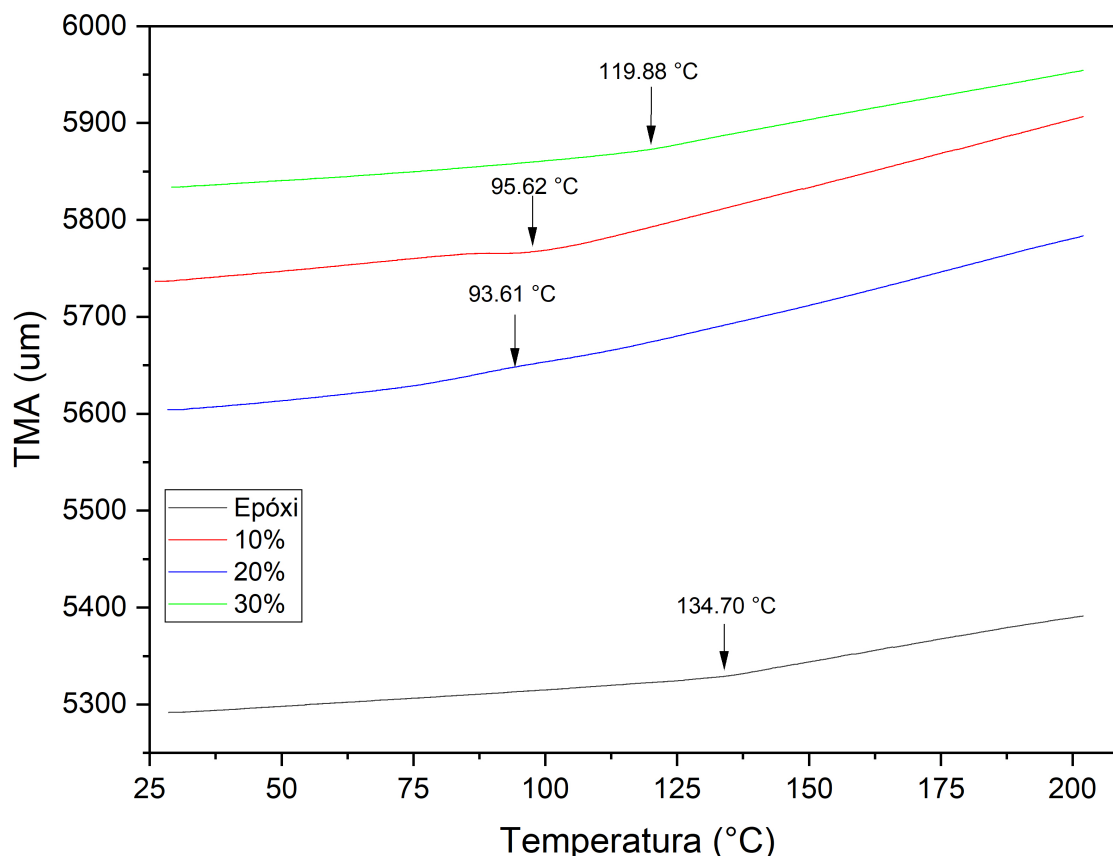


Figura 4.21 – Curvas de TMA obtidas para a resina epóxi, e compósitos com 10%, 20% e 30% em volume de fibras de kenaf.

Fonte – Próprio autor

As temperaturas de transição vítrea obtidas foram de aproximadamente 134,7 °C para a resina epóxi, 95,62 °C, 93,61 °C e 119,88 °C para os compósitos com 10, 20 e 30% em volume de fibras de kenaf respectivamente. Qualquer fator que possa afetar a mobilidade molecular do material, como por exemplo, sua composição química, a indução de cristalização por estiramento, oxidação, a adição de cargas ou de um material que possua menor massa molecular, e outros, tem efeito sobre a região de transição vítrea do material polimérico e por consequência, sobre seu comportamento térmico e mecânico (TRENTINI et al., 2003).

Pode-se observar que o material sofreu dilatação com o aumento da temperatura. O coeficiente de expansão térmica linear obtido neste estudo foi de  $112,37 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  para a resina epóxi, e de  $181,16 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ,  $187,02 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  e  $116,50 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  para os compósitos com 10, 20 e 30% em volume de fibras de kenaf respectivamente.

### 4.13 Análise Dinâmico-Mecânica (DMA)

Foram realizadas análises dinâmico-mecânicas na resina epóxi e nos compósitos com 10, 20 e 30% em volume de fibras. Para cada composição foram analisadas as curvas de módulo de armazenamento ( $E'$ ), módulo de perda ( $E''$ ) e  $\tan \delta$ . A Figura 4.22 mostra os resultados obtidos para a resina epóxi.

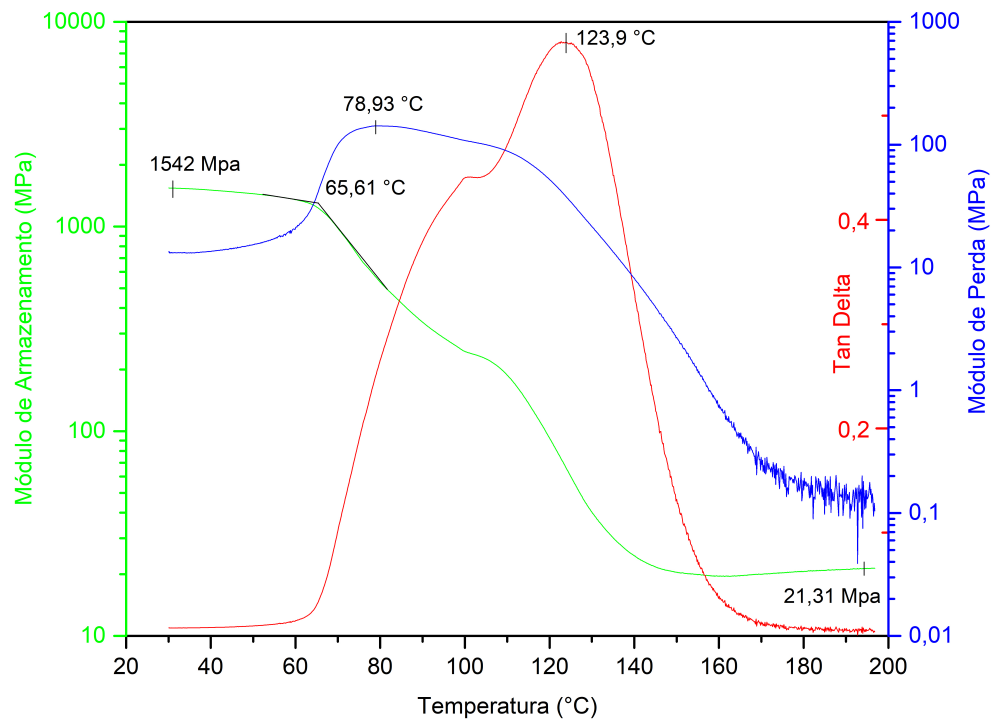


Figura 4.22 – Gráficos de DMA para o módulo de armazenamento ( $E'$ ), módulo de perda ( $E''$ ) e  $\tan \delta$  para amostra de resina epóxi.

A determinação da temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) para polímeros termorrígidos e termoplásticos, e compósitos poliméricos pode ser feita de diferentes formas (PAIVA et al., 2006; ASTM D7028, 2015; ASTM E1640, 2018). A  $\tan \delta$  apresenta um pico a temperaturas um pouco maiores, estando essa temperatura mais próxima ao valor de  $T_g$  determinada por outros métodos. Sendo assim, através da Figura 4.22 verifica-se que a  $T_g$  da resina epóxi é 123,9 °C. O módulo de armazenamento é definido pelo comportamento elástico, calculado para cada ciclo a partir da tensão necessária para resultar um deslocamento ou deformação do material, enquanto a região viscosa é determinada pelo módulo de perda, que é calculado a partir da diferença de fase entre a tensão e a deformação resultante (LORANDI; CIOFFI; JR, 2016). Para a resina à 30 °C essa tensão foi de 1542 MPa, já o máximo módulo de perda obtido foi de 142 MPa.

A Figura 4.23 mostra os resultados obtidos para a amostra de compósito com 10% em volume de fibras.

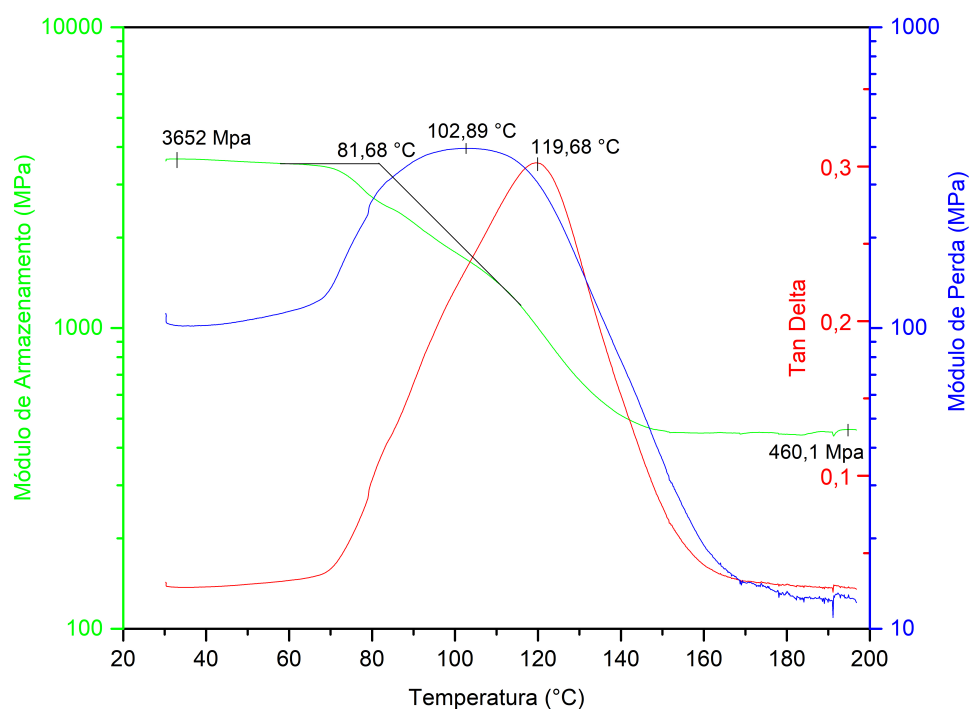


Figura 4.23 – Gráficos de DMA para o módulo de armazenamento ( $E'$ ), módulo de perda ( $E''$ ) e  $\tan \delta$  para amostra de compósito com 10% em volume de fibras.

Pode-se observar na Figura 4.23, que a  $T_g$  obtida para o compósito com 10% em volume de fibras foi de 119,68 °C. O módulo de armazenamento para esse compósito foi de 3652 MPa, e mostra a eficiência do reforço, mesmo para percentual relativamente baixo de fibras. Da mesma forma, o módulo de perda teve um aumento para 396 MPa.

A Figura 4.24 mostra os resultados obtidos para a amostra de compósito com 20% em volume de fibras.

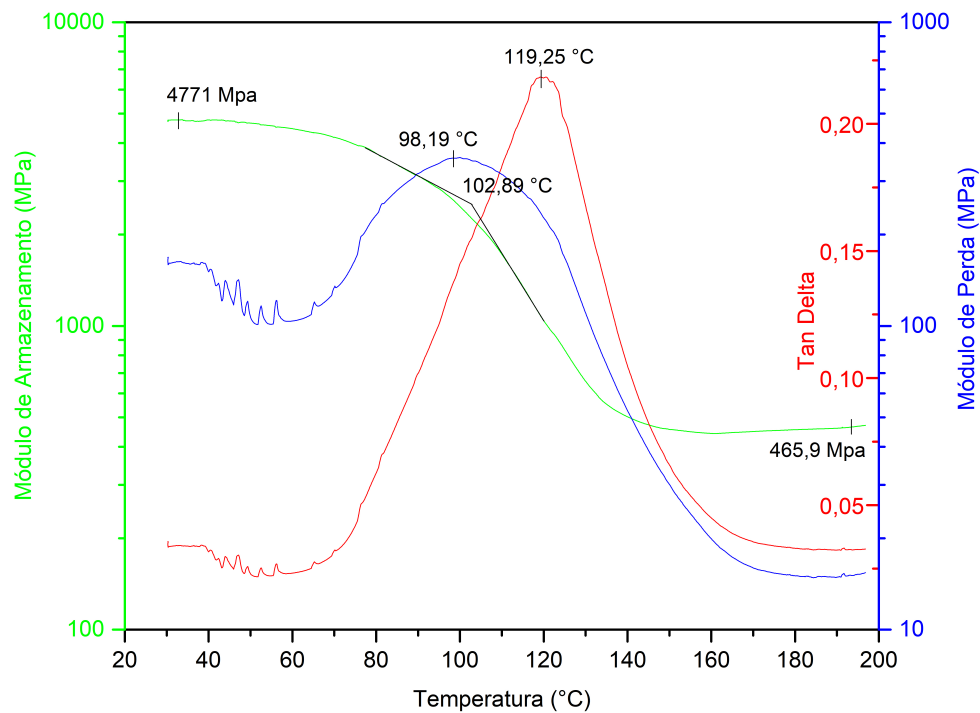


Figura 4.24 – Gráficos de DMA para o módulo de armazenamento ( $E'$ ), módulo de perda ( $E''$ ) e  $\tan \delta$  para amostra de compósito com 20% em volume de fibras.

Na Figura 4.24, pode-se observar novamente uma diminuição da  $T_g$  com a adição de uma maior percentual de fibras, com uma temperatura de transição vítrea de 119,25 °C. O módulo de armazenamento apresentou uma melhora em comparação as frações discutidas anteriormente, chegando a 4771 MPa. No entanto, houve uma pequena redução no módulo de perda, que alcançou uma tensão máxima de 357 MPa.

A Figura 4.25 mostra os resultados obtidos para a amostra de compósito com 30% em volume de fibras.

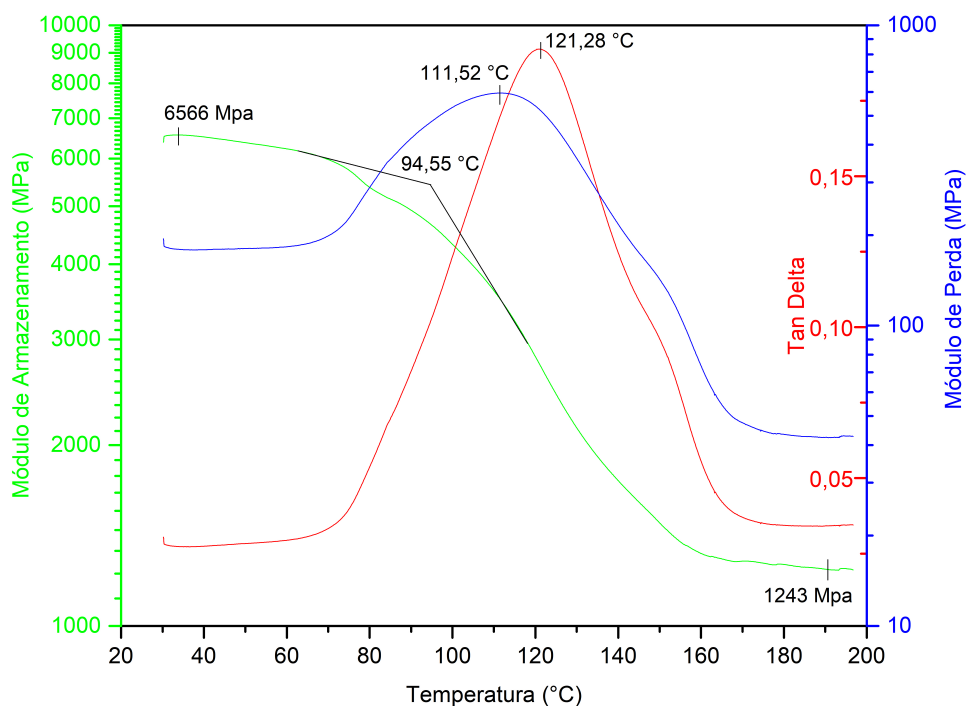


Figura 4.25 – Gráficos de DMA para o módulo de armazenamento ( $E'$ ), módulo de perda ( $E''$ ) e  $\tan \delta$  para amostra de compósito com 30% em volume de fibras.

O compósito com 30% em volume de fibras (Figura 4.25), apresentou uma  $T_g$  de 121,28 °C. O módulo de armazenamento apresentou um novo aumento e alcançou uma tensão de 6566 MPa em seu máximo, a temperatura de 33 °C, com um módulo de perda de 594,7 MPa. O módulo de armazenamento, tende a diminuir com o aumento da temperatura, a transição para uma queda mais acentuada no ( $E'$ ) pode estar relacionada a um processo de amolecimento viscoelástico, que pode ser atribuído a uma estrutura molecular interna menos rígida (OLIVEIRA et al., 2019).

A pequena redução sofrida na temperatura de transição vítrea dos compósitos pode estar associada ao efeito plastificante provocado pela água entre as cadeias da rede polimérica do epóxi (PAIVA et al., 2006).

Os compósitos de kenaf analisados no presente trabalho apresentam  $T_g$  maior (119,25 à 121,28 °C) que a apresentada no trabalho de Sathyaseelan, Sellamuthu e Palanimuthu (2021) para as fibras a areca, que para um percentual de aproximadamente 30% apresentou  $T_g$  com cerca de 86 °C. Este comportamento indica que possivelmente há uma maior estabilidade térmica a elevadas temperaturas para os compósitos reforçados com fibras de kenaf.

## 4.14 Ensaio Balístico

A Figura 4.26 apresenta a placa de material conjugado de matriz epóxi reforçada com 30% em volume de fibra de Kenaf antes do ensaio balístico. Foram marcados por números os pontos de disparos efetuados no ensaio para melhor visualização.

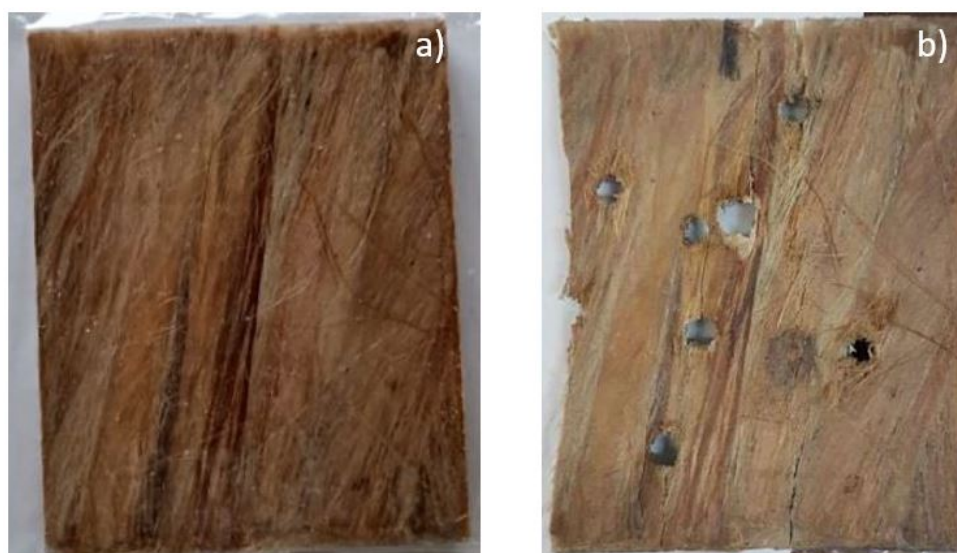


Figura 4.26 – Placa 30%: a) antes do ensaio; b) depois do ensaio.

A Tabela 4.22 apresenta os valores médios da massa do projétil ( $m$ ), velocidade média de impacto ( $V_i$ ), velocidade residual média ( $V_r$ ) e a energia de absorção ( $E_{abs}$ ) das amostras.

Tabela 4.22 – Valores médios utilizados para o cálculo de  $E_{abs}$ .

Amostra	$m$ (g)	$V_i(m/s)$	$V_r(m/s)$
Epóxi	$3,16 \pm 0,02$	$289,26 \pm 0,81$	$142,75 \pm 6,95$
30%	$3,17 \pm 0,01$	$288,30 \pm 2,49$	$151,11 \pm 21,50$

Fonte – Próprio autor

A partir disto, foi possível calcular a energia absorvida pela placa a cada disparo utilizando a Equação 2.3. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.23, que exibe os os valores obtidos no ensaio de velocidade residual e a conversão para os valores que seriam obtidos pelo ensaio realizado com arma de fogo. Para efeito de comparação foram ensaiadas 8 (oito) placas de resina epóxi pura, já que as placas de epóxi só podem levar 1 (um) disparo.

Tabela 4.23 – Valores calculados de  $E_{abs}$ .

Energia Absorvida (J)				
Disparo	Epóxi	EK30	Epóxi "CAEx"	EK30 "CAEx"
1	122,09	112,97	384,50	355,78
2	103,74	100,19	326,71	315,53
3	97,18	99,72	306,05	314,05
4	98,69	98,08	310,81	308,89
5	96,57	95,79	304,13	301,68
6	71,47	94,73	225,08	298,34
7	69,98	84,89	220,39	267,35
8	58,62	72,09	184,61	227,04
Média	89,79±21,10	94,81±12,01	282,79±66,46	298,58±37,81

Fonte – Próprio autor

Ademais, por meio destes dados e da Figura 4.26, é possível observar que o disparo número 1 absorveu a maior energia do conjunto (112,97 J). Ainda que ele tenha atravessado o compósito, é visível a estabilidade que o reforço deu a placa, que pode receber mais 7 (sete) disparos.

Através da Figura 4.27, é possível visualizar os mecanismos de fratura envolvidos no processo. Pode-se observar a ativação do reforço com a ruptura das fibras de kenaf na (Figura 4.27a), e os mecanismos de trincamento da matriz e descolamento fibra/matriz (Figura 4.27b). Além disso, é possível observar as "marcas de rio" características da fratura frágil matriz.

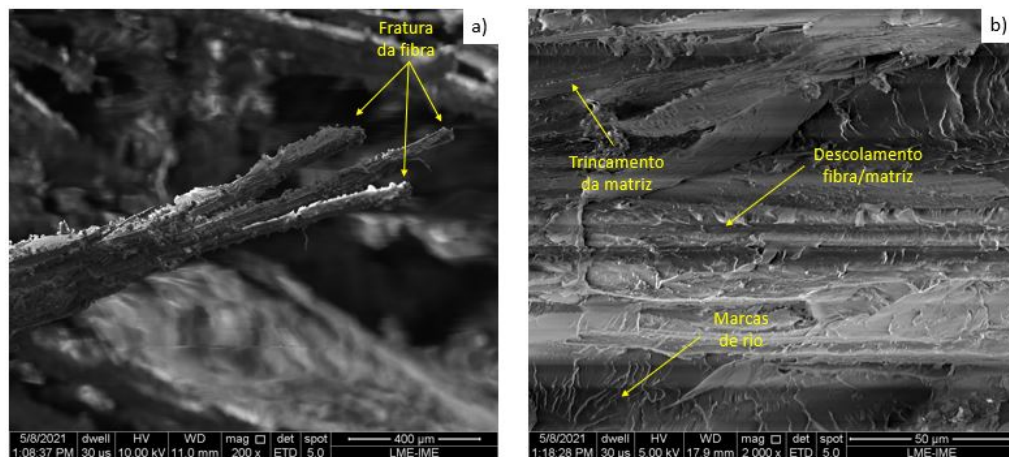


Figura 4.27 – Mecanismos de fratura após ensaio de velocidade residual.

Ao se levar em conta uma análise estatística por ANOVA dos resultados obtidos, observa-se que, numericamente, não houve diferença significativa de energia absorvida. Isto pode ser visualizado na Tabela 4.24, na qual apresenta  $F_{calculado} < F_{crítico}$ .

Tabela 4.24 – Aplicação do método estatístico ANOVA nos resultados balísticos.

Causas de Variação	GL	SQ	QM	$F_{calculado}$	$F_{crítico}$
Tratamento	1	100,60	100,60	0,34	4,6
Resíduo	14	4126,41	294,74	-	-
Total	15	4227,01	-	-	-

Fonte – Próprio autor

Mesmo que estatisticamente não haja diferença no desempenho do material, visualmente percebe-se que o reforço proporcionou maior integridade a placa. Por outro lado, as 8 (oito) placas fabricadas de resina epóxi foram totalmente estilhaçadas com um único disparo em cada, ainda que o ensaio tenha sido realizado com um provete de ar comprimido cuja energia de disparo é menor que a de uma arma de fogo.

Através da análise estatística de Weibull (Tabela 4.25), que foi realizada para determinar as características e tendências de confiabilidade das amostras ensaiadas, pode-se observar que o parâmetro de escala apresentou valores semelhantes as médias de energia absorvida, e que  $R^2$  com valores próximos de 1 (um) mostram a confiabilidade dos resultados.

Tabela 4.25 – Aplicação do método estatístico Weibull nos resultados balísticos.

Amostra	Média	$\theta$	$\beta$	$R^2$
Epóxi	89,79	98,67	4,282	0,9359
EK30	94,81	100,40	7,899	0,9290

Fonte – Próprio autor

A Figura 4.28, corrobora os resultados apresentados para  $R^2$  que mostra um pequeno distanciamento dos pontos da reta de ajuste.

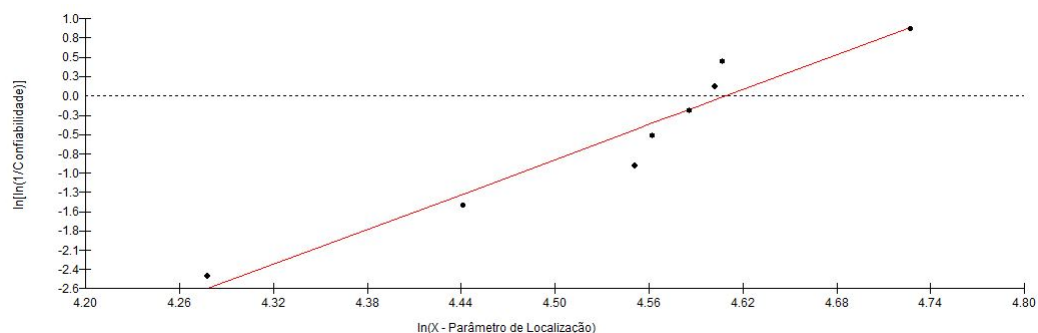


Figura 4.28 – Gráfico de Weibull para energia absorvida EK30.

Para fins de comparação, a Tabela 4.26 mostra o desempenho de compósitos reforçados com outras FNLs sob impacto balístico de munições de calibre 7,62 mm.



Tabela 4.26 – Valores das velocidades médias de impacto e residual, energia absorvida para compósitos com diferentes FNLs.

Compósito	$V_i(m/s)$	$V_r(m/s)$	$E_{abs}$ CAEx (J)	Referência
Epóxi/ 30% kenaf	288,30±2,49	151,11±21,50	298,58±37,81	Presente trabalho
Epóxi/ 30% curauá	848,30±6,36	835,29±6,17	106,16	Silva et al. (2014)
Epóxi/ 30% sisal	845,06±3,54	823,86±5,10	171,58	Araújo (2015)
Poiéster/ 30% curauá	858,00±23,00	833,00±210,00	210,00	Monteiro et al. (2017)
Epóxi/ 30% malva	840,00±211,19	807,96±211,52	256,02	Nascimento et al. (2017)

Fonte – Próprio autor

Através da conversão realizada para os resultados de velocidade residual, foi possível obter uma  $E_{abs}$  CAEx de 298,58 J. Em comparação aos resultados apresentados na Tabela 4.26, a utilização da fibra de kenaf como reforço em matriz epoxídica apresentou resultados superiores. Vale ressaltar que para comprovar a veracidade dessa adaptação seria necessário realizar um novo ensaio utilizando arma de fogo, que realizam disparos com uma maior velocidade resultando em uma maior energia absorvida, para comparar os resultados obtidos neste trabalho.

## 5 CONCLUSÕES

Ao longo deste trabalho, foram produzidos compósitos poliméricos de matriz epoxídica reforçados com fibras de kenaf com diferentes variações no reforço, onde foi verificado a influência desta fibra nas propriedades mecânicas, térmicas, químicas e balísticas do compósito. A partir dos resultados obtidos, é possível sintetizá-los a seguir:

- Os resultados de DRX da fibra de kenaf apresentaram cristalinidade de 44,3%. Este valor de cristalinidade se apresenta conforme o que é encontrado na literatura, que compreende a faixa entre 31 à 72%. O AMF encontrado para o kenaf foi de 7,1 ° sendo este um valor menor que os resultados encontrados na literatura. Além disto, os espectros de FTIR mostraram bandas semelhantes das relacionadas aos grupos funcionais presentes nos principais constituintes das FNLs (celulose, hemicelulose e lignina).
- Nos ensaios de tração dos compósitos, pode-se observar um aumento substancial na resistência à tração (61,13 MPa), no módulo de elasticidade (3,21 GPa) para os compósitos reforçados com 20% em volume de fibras de kenaf. Através da análise estatística de ANOVA, foi verificado que não há diferença significativa entre os resultados obtidos para a resina e o compósito EK10, e entre os compósitos EK20 e EK30. Para mais, na análise macroscópica, observou-se a fratura frágil nos quatro grupos de amostras estudados. Nos ensaios de impacto Izod, também foi observado uma melhora substancial na energia absorvida para as amostras com 20% em volume de fibras (238,69 J/m). Apesar do melhor resultado apresentado ser o para o grupo com 30% em volume de fibras, estes valores não puderam ser considerados estatisticamente devido o não rompimento total das amostras que indicam a necessidade do uso de um pêndulo de maior energia.
- Os ensaios de TGA/DTG mostraram para as fibras de kenaf apresentaram uma perda de massa inicial de 9,80% de massa no primeiro estágio (até 150 °C) referente a perda de umidade da fibra, a maior degradação ocorre em 268 °C com máxima 355 °C. A degradação inicial foi corroborada pelo ensaio de DSC, que apresentou uma faixa de temperatura menor para a perda de componentes estruturais (188 à 301 °C). Para os compósitos, o início se dá a cerca de 200 °C, com máximas entre 316 à 344 °C. Ocorrendo o início da perda dos principais constituintes à 200 °C, pode-se considerar esta a temperatura máxima de trabalho para o compósito. Através das análises de TMA foi possível verificar que as amostras com maior Tg possuem um menor coeficiente de expansão térmica. E para as análises de DMA foi possível averiguar a contribuição do reforço no aumentos dos módulos de armazenamento

( $E'$ ) e perda ( $E''$ ), já a  $T_g$  sofreu uma pequena redução para todas as frações de compósitos em relação a resina.

- Pela análise de variância foi possível verificar que os grupos de amostras estudados não são significativamente diferentes em relação a energia absorvida no ensaio de velocidade residual. Através da distribuição de Weibull, foi possível verificar a confiabilidade dos resultados. Sendo possível observar a estabilidade que o reforço deu a amostra que foi capaz de receber 8 (oito) disparos.
- Pelas análises por microscopia eletrônica de varredura das superfícies fraturadas dos compósitos, pode-se verificar que as fibras de kenaf, contribuíram para o aumento de resistência da matriz de epóxi através dos mecanismos de absorção de energia, pela boa adesão, descolamento e rompimento das fibras.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Investigar a influência causada pelo aumento de fração volumétrica de fibras de kenaf (40 e 50%) em matriz epóxi, para resistência a tração e módulo de elasticidade dos compósitos.

Investigar os compósitos com 30% em volume de fibras e novas frações (40 e 50%) com pêndulo de energia incidente maior que 22 J para verificar o aumento na energia de impacto absorvida pelos corpos de prova.

Realizar a investigação de compósitos utilizando camadas bidirecionais de fibras, e placas produzidas com tecidos de kenaf para volumes de 0 à 50% de reforço.

Realizar tratamentos físicos e químicos para as fibras de kenaf, que possibilitem maior compatibilidade com a matriz hidrofóbica, melhorem a cristalinidade do material e suas propriedades mecânicas.

Investigar a utilização de novos processos de fabricação de compósitos, como por exemplo, infusão a vácuo.

Estudar o comportamento balístico de uma blindagem multicamada utilizando como camada intermediária o compósito de matriz epóxi reforçada com fibras de kenaf com diferentes frações volumétricas.

## REFERÊNCIAS

- ABDULLAH, A. H.; ALIAS, S. K.; JENAL, N.; ABDAN, K.; ALI, A. Fatigue behavior of kenaf fibre reinforced epoxy composites. *Engineering Journal*, v. 16, n. 5, p. 105–114, 2012.
- AHMAD, F.; CHOI, H. S.; PARK, M. K. A review: natural fiber composites selection in view of mechanical, light weight, and economic properties. *Macromolecular materials and engineering*, Wiley Online Library, v. 300, n. 1, p. 10–24, 2015.
- AIZAN, M. Z. N.; AKHMAR, S. A. S. Z.; MUHIDDIN, A. M.; HAZWANI, Z. N.; SARAH, J. S. Study on cure characteristics and mechanical behaviours of kenaf fibre reinforced natural rubber composites. In: TRANS TECH PUBL. *Advanced Materials Research*. [S.l.], 2013. v. 812, p. 66–72.
- AJI, I.; SAPUAN, S.; ZAINUDIN, E.; ABDAN, K. Kenaf fibres as reinforcement for polymeric composites: a review. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, University of Malaya, v. 4, n. 3, p. 239–248, 2009.
- AJI, I.; ZAINUDIN, E.; SAPUAN, S.; KHALINA, A.; KHAIRUL, M. Study of hybridized kenaf/palp-reinforced hdpe composites by dynamic mechanical analysis. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, Taylor & Francis, v. 51, n. 2, p. 146–153, 2012.
- AJI, I. S.; ZAINUDIN, E.; KHALINA, A.; SAPUAN, S.; KHAIRUL, M. Studying the effect of fiber size and fiber loading on the mechanical properties of hybridized kenaf/palp-reinforced hdpe composite. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 30, n. 6, p. 546–553, 2011.
- ALEXOPOULOU, E.; CHRISTOU, M.; NICHOLAOU, A.; MARDIKIS, M. Biokenaf: a network for industrial products and biomass for energy from kenaf. In: *Biomass for energy, industry and climate protection. Proceedings of the 2nd World Biomass Conference*. [S.l.: s.n.], 2004. v. 10, n. 14, p. 2040–2043.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. *ASTM D7028*: Standard test method for glass transition temperature (dma tg) of polymer matrix composites by dynamic mechanical analysis (dma). West Conshohocken, PA, 2015.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. *ASTM D3800*: Standard test method for density of high-modulus fibers. West Conshohocken, PA, 2016.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. *ASTM D3039*: Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. West Conshohocken, PA, 2017.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. *ASTM D256*: Standard test methods for determining the izod pendulum impact resistance of plastics. West Conshohocken, PA, 2018.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. *ASTM E1640*: Standard test method for assignment of the glass transition temperature by dynamic mechanical analysis. West Conshohocken, PA, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. *ASTM E831*: Standard test method for linear thermal expansion of solid materials by thermomechanical analysis. West Conshohocken, PA, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. *ASTM D3822*: Standard test method for tensile properties of single textile fibers. West Conshohocken, PA, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. *ASTM D4065*: Standard practice for plastics: Dynamic mechanical properties: Determination and report of procedures. West Conshohocken, PA, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. *ASTM E1131*: Standard test method for compositional analysis by thermogravimetry. West Conshohocken, PA, 2020.

ANDRÉ, A. *Fibres for strengthening of timber structures*. [S.l.]: Luleå tekniska universitet, 2006.

ARAÚJO, B. *Avaliação do Comportamento Balístico de Blindagem Multicamada com Compósito de Epóxi Reforçado com Fibra de Sisal*. Dissertação (Mestrado) — Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais . . . , 2015.

ARDEKANI, S. M.; DEGHANI, A.; AL-MAADEED, M. A.; WAHIT, M. U.; HASSAN, A. Mechanical and thermal properties of recycled poly (ethylene terephthalate) reinforced newspaper fiber composites. *Fibers and Polymers*, Springer, v. 15, n. 7, p. 1531–1538, 2014.

ARDENTE, F.; BECCALI, M.; CELLURA, M.; MISTRETTA, M. Building energy performance: a lca case study of kenaf-fibres insulation board. *Energy and Buildings*, Elsevier, v. 40, n. 1, p. 1–10, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15000*: Blindagens para impactos balísticos-classificação e critérios de avaliação. Rio de Janeiro, 2005.

ASUMANI, O.; REID, R.; PASKARAMOORTHY, R. The effects of alkali-silane treatment on the tensile and flexural properties of short fibre non-woven kenaf reinforced polypropylene composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Elsevier, v. 43, n. 9, p. 1431–1440, 2012.

AYADI, R.; HANANA, M.; MZID, R.; HAMROUNI, L.; KHOUJA, M. I.; HANACHI, A. S. Hibiscus cannabinus l.-kenaf: a review paper. *Journal of Natural Fibers*, Taylor & Francis, v. 14, n. 4, p. 466–484, 2017.

AZIZ, S. H.; ANSELL, M. P. The effect of alkalization and fibre alignment on the mechanical and thermal properties of kenaf and hemp bast fibre composites: Part 1—polyester resin matrix. *Composites science and technology*, Elsevier, v. 64, n. 9, p. 1219–1230, 2004.

BAKAR, A.; AHMAD, S.; KUNTJORO, W. The mechanical properties of treated and untreated kenaf fibre reinforced epoxy composite. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, American Scientific Publishers, v. 4, n. 2, p. 159–163, 2010.

BALLESTEROS, L. F.; MICHELIN, M.; VICENTE, A. A.; TEIXEIRA, J. A.; CERQUEIRA, M. Â. *Lignocellulosic materials and their use in bio-based packaging*. [S.l.]: Springer, 2018.

- BATOULI, S. M.; ZHU, Y.; NAR, M.; D'SOUZA, N. A. Environmental performance of kenaf-fiber reinforced polyurethane: a life cycle assessment approach. *Journal of cleaner production*, Elsevier, v. 66, p. 164–173, 2014.
- BERNARD, M.; KHALINA, A.; ALI, A.; JANIUS, R.; FAIZAL, M.; HASNAH, K.; SANUDDIN, A. The effect of processing parameters on the mechanical properties of kenaf fibre plastic composite. *Materials & Design*, Elsevier, v. 32, n. 2, p. 1039–1043, 2011.
- BHOOPATHI, R.; RAMESH, M.; DEEPA, C. Fabrication and property evaluation of banana-hemp-glass fiber reinforced composites. *Procedia Engineering*, Elsevier, v. 97, p. 2032–2041, 2014.
- BLEDZKI, A.; GASSAN, J. Composites reinforced with cellulose based fibres. *Progress in polymer science*, Elsevier, v. 24, n. 2, p. 221–274, 1999.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. *Materials science and engineering: an introduction*. [S.l.]: Wiley New York, 2018. v. 9.
- CAMERINI, A.; TERRONES, L.; MONTEIRO, S. Tenacidade ao impacto de compósitos de tecido de juta reforçando matriz de polietileno reciclado. *Matéria (Rio de Janeiro)*, SciELO Brasil, v. 13, n. 1, p. 180–185, 2008.
- CANEVAROLO, S. V. *Polymer Science: A Textbook for Engineers and Technologists*. [S.l.]: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2019.
- CAVE, I. Theory of x-ray measurement of microfibril angle in wood. *Wood science and technology*, Springer, v. 31, n. 4, p. 225–234, 1997.
- CHANDGUDE, S.; SALUNKHE, S. Biofiber-reinforced polymeric hybrid composites: An overview on mechanical and tribological performance. *Polymer Composites*, Wiley Online Library, v. 41, n. 10, p. 3908–3939, 2020.
- CHAWLA, K. K. *Composite materials: science and engineering*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012.
- CHEN, Y.; SUN, L.; CHIPARUS, O.; NEGULESCU, I.; YACHMENEV, V.; WARNOCK, M. Kenaf/ramie composite for automotive headliner. *Journal of Polymers and the Environment*, Springer, v. 13, n. 2, p. 107–114, 2005.
- CHIN, C.; YOUSIF, B. Potential of kenaf fibres as reinforcement for tribological applications. *Wear*, Elsevier, v. 267, n. 9-10, p. 1550–1557, 2009.
- COETZEE, R.; LABUSCHAGNE, M.; HUGO, A. Fatty acid and oil variation in seed from kenaf (*hibiscus cannabinus* l.). *industrial crops and products*, Elsevier, v. 27, n. 1, p. 104–109, 2008.
- DATOO, M. H. *Mechanics of fibrous composites*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012.
- DAVOODI, M.; SAPUAN, S.; AHMAD, D.; ALI, A.; KHALINA, A.; JONOBI, M. Mechanical properties of hybrid kenaf/glass reinforced epoxy composite for passenger car bumper beam. *Materials & Design*, Elsevier, v. 31, n. 10, p. 4927–4932, 2010.

- 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.
- DENARI, G. B.; CAVALHEIRO, E. Princípios e aplicações de análise térmica. *São Carlos: IQSC*, p. 40, 2012.
- EL-SHEKEIL, Y.; SAPUAN, S.; ABDAN, K.; ZAINUDIN, E. Influence of fiber content on the mechanical and thermal properties of kenaf fiber reinforced thermoplastic polyurethane composites. *Materials & Design*, Elsevier, v. 40, p. 299–303, 2012.
- EL-SHEKEIL, Y.; SAPUAN, S.; JAWAID, M.; AL-SHUJA'A, O. Influence of fiber content on mechanical, morphological and thermal properties of kenaf fibers reinforced poly (vinyl chloride)/thermoplastic polyurethane poly-blend composites. *Materials & Design*, Elsevier, v. 58, p. 130–135, 2014.
- FREIRE, E.; MONTEIRO, E. E.; CYRINO, J. C. Propriedades mecânicas de compósitos de polipropileno com fibra de vidro. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, Associação Brasileira de Polímeros-ABPol, v. 4, n. 3, p. 25–32, 2013.
- GHANI, M.; SALLEH, Z.; HYIE, K. M.; BERHAN, M.; TAIB, Y.; BAKRI, M. Mechanical properties of kenaf/fiberglass polyester hybrid composite. *Procedia Engineering*, Elsevier, v. 41, p. 1654–1659, 2012.
- GLÓRIA, G. O.; TELES, M. C. A.; NEVES, A. C. C.; VIEIRA, C. M. F.; LOPES, F. P. D.; GOMES, M. de A.; MARGEM, F. M.; MONTEIRO, S. N. Bending test in epoxy composites reinforced with continuous and aligned palm fibers. *Journal of Materials Research and Technology*, Elsevier, v. 6, n. 4, p. 411–416, 2017.
- HAN, S. O.; KAREVAN, M.; BHUIYAN, M. A.; PARK, J. H.; KALAITZIDOU, K. Effect of exfoliated graphite nanoplatelets on the mechanical and viscoelastic properties of poly (lactic acid) biocomposites reinforced with kenaf fibers. *Journal of Materials Science*, Springer, v. 47, n. 8, p. 3535–3543, 2012.
- HAO, A.; ZHAO, H.; CHEN, J. Y. Kenaf/polypropylene nonwoven composites: The influence of manufacturing conditions on mechanical, thermal, and acoustical performance. *Composites Part B: Engineering*, Elsevier, v. 54, p. 44–51, 2013.
- HAO, A.; ZHAO, H.; JIANG, W.; YUAN, L.; CHEN, J. Y. Mechanical properties of kenaf/polypropylene nonwoven composites. *Journal of Polymers and the Environment*, Springer, v. 20, n. 4, p. 959–966, 2012.
- HASFALINA, C.; MARYAM, R.; LUQMAN, C.; RASHID, M. Adsorption of copper (ii) from aqueous medium in fixed-bed column by kenaf fibres. *APCBEE procedia*, Elsevier, v. 3, p. 255–263, 2012.
- HUDA, M. S.; DRZAL, L. T.; MOHANTY, A. K.; MISRA, M. Effect of fiber surface-treatments on the properties of laminated biocomposites from poly (lactic acid)(pla) and kenaf fibers. *Composites science and technology*, Elsevier, v. 68, n. 2, p. 424–432, 2008.



- ISHAK, M.; SAPUAN, S.; LEMAN, Z.; RAHMAN, M.; ANWAR, U. Characterization of sugar palm (*arenga pinnata*) fibres: tensile and thermal properties. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, Akadémiai Kiadó, co-published with Springer Science+ Business Media BV . . . , v. 109, n. 2, p. 981–989, 2012.
- ISLAM, M. S.; CHURCH, J. S.; MIAO, M. Effect of removing polypropylene fibre surface finishes on mechanical performance of kenaf/polypropylene composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Elsevier, v. 42, n. 11, p. 1687–1693, 2011.
- JAWAID, M.; KHALIL, H. A. Cellulosic/synthetic fibre reinforced polymer hybrid composites: A review. *Carbohydrate polymers*, Elsevier, v. 86, n. 1, p. 1–18, 2011.
- JENKINS, R.; FAWCETT, T.; SMITH, D.; VISSER, J.; MORRIS, M.; FREVEL, L. Jcpds—international centre for diffraction data sample preparation methods in x-ray powder diffraction. *Powder Diffraction*, Cambridge University Press, v. 1, n. 2, p. 51–63, 1986.
- JOHN, M. J.; BELLMANN, C.; ANANDJIWALA, R. D. Kenaf–polypropylene composites: Effect of amphiphilic coupling agent on surface properties of fibres and composites. *Carbohydrate Polymers*, Elsevier, v. 82, n. 3, p. 549–554, 2010.
- JOHN, M. J.; THOMAS, S. Biofibres and biocomposites. *Carbohydrate polymers*, Elsevier, v. 71, n. 3, p. 343–364, 2008.
- JR, J. D. M.; OLIVEIRA, F. B.; ROSA, D. S.; GARDRAT, C.; CASTELLAN, A.; FROL-LINI, E. Renewable resources as reinforcement of polymeric matrices: composites based on phenolic thermosets and chemically modified sisal fibers. *Macromolecular bioscience*, Wiley Online Library, v. 7, n. 9-10, p. 1121–1131, 2007.
- JUNIOR, C. C. F. *Fibras vegetais para compósitos poliméricos*. [S.l.]: Editus, Ilhéus, 2017.
- JÚNIOR, H. L. O.; SILVA, H. S. P. da; ZATTERA, A. J.; AMICO, S. C. Dynamic mechanical properties of curaua composites. *Journal of Applied Polymer Science*, Wiley Online Library, v. 125, n. S2, p. E110–E116, 2012.
- KANDEMIR, A.; POZEGIC, T. R.; HAMERTON, I.; EICHHORN, S. J.; LONGANA, M. L. Characterisation of natural fibres for sustainable discontinuous fibre composite materials. *Materials*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 13, n. 9, p. 2129, 2020.
- KARIMI, S.; TAHIR, P. M.; KARIMI, A.; DUFRESNE, A.; ABDULKHANI, A. Kenaf bast cellulosic fibers hierarchy: a comprehensive approach from micro to nano. *Carbohydrate polymers*, Elsevier, v. 101, p. 878–885, 2014.
- KESHK, S.; SUWINARTI, W.; SAMESHIMA, K. Physicochemical characterization of different treatment sequences on kenaf bast fiber. *Carbohydrate polymers*, Elsevier, v. 65, n. 2, p. 202–206, 2006.
- KHALIL, H. A.; YUSRA, A. I.; BHAT, A.; JAWAID, M. Cell wall ultrastructure, anatomy, lignin distribution, and chemical composition of malaysian cultivated kenaf fiber. *Industrial Crops and Products*, Elsevier, v. 31, n. 1, p. 113–121, 2010.
- KLUG, H. P.; ALEXANDER, L. E. *X-ray diffraction procedures: for polycrystalline and amorphous materials*. [S.l.: s.n.], 1974.

- KUMAR, R.; HAQ, M. I. U.; RAINA, A.; ANAND, A. Industrial applications of natural fibre-reinforced polymer composites—challenges and opportunities. *International Journal of Sustainable Engineering*, Taylor & Francis, v. 12, n. 3, p. 212–220, 2019.
- KWON, H.-J.; SUNTHORNVARABHAS, J.; PARK, J.-W.; LEE, J.-H.; KIM, H.-J.; PIYACHOMKWAN, K.; SRIROTH, K.; CHO, D. Tensile properties of kenaf fiber and corn husk flour reinforced poly (lactic acid) hybrid bio-composites: Role of aspect ratio of natural fibers. *Composites Part B: Engineering*, Elsevier, v. 56, p. 232–237, 2014.
- LIMA, J. E. S.; ASSUMPÇÃO, T. A. A. de. Estudos de flexibilização de resinas epóxi para utilização em compósitos. *Caleidoscópio*, v. 11, n. 1, p. 63–67, 2019.
- LIPS, S. J.; HEREDIA, G. M. I. de; KAMP, R. G. O. den; DAM, J. E. van. Water absorption characteristics of kenaf core to use as animal bedding material. *Industrial crops and Products*, Elsevier, v. 29, n. 1, p. 73–79, 2009.
- LIU, Y.; LABUSCHAGNE, M. The influence of environment and season on stalk yield in kenaf. *industrial crops and products*, Elsevier, v. 29, n. 2-3, p. 377–380, 2009.
- LORANDI, N. P.; CIOFFI, M. O. H.; JR, H. O. Análise dinâmico-mecânica de materiais compósitos poliméricos. *Scientia cum industria*, v. 4, n. 1, p. 48–60, 2016.
- LUZ, F. D. *Avaliação do Comportamento Balístico de Blindagem Multicamada dom Compósito de Epóxi Reforçado com Fibra de Juta*. Dissertação (Mestrado) — Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais . . . , 2014.
- MANO, E. B. *Introdução a polímeros*. [S.l.]: Edgar Blücher, 1999.
- MANRAL, A.; BAJPAI, P. K. Analysis of properties on chemical treatment of kenaf fibers. *Materials Today: Proceedings*, Elsevier, 2020.
- MARGEM, F. M.; MONTEIRO, S. N.; NETO, J. B.; RODRIGUEZ, R. J. S.; SOARES, B. G. The dynamic-mechanical behavior of epoxy matrix composites reinforced with ramie fibers. *Matéria (Rio de Janeiro)*, SciELO Brasil, v. 15, n. 2, p. 164–171, 2010.
- MARINELLI, A. L.; MONTEIRO, M. R.; AMBRÓSIO, J. D.; BRANCIFORTI, M. C.; KOBAYASHI, M.; NOBRE, A. D. Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras vegetais naturais da biodiversidade: uma contribuição para a sustentabilidade amazônica. *Polímeros*, SciELO Brasil, v. 18, n. 2, p. 92–99, 2008.
- MARTIN, A. R.; MARTINS, M. A.; MATTOSO, L. H.; SILVA, O. R. Caracterização química e estrutural de fibra de sisal da variedade agave sisalana. *Polímeros: ciência e tecnologia*, Associação Brasileira de Polímeros, v. 19, n. 1, p. 40–46, 2009.
- MARZUKI, N. H.; WAHIT, M. U.; ARSAD, A.; OTHMAN, N.; YUSOFF, N. I. S. M. The effect of kenaf loading on the mechanical properties of kenaf-reinforced recycled poly (ethylene terephthalate)/recycled poly (propylene)(rpet/rpp) composite. *Materials Today: Proceedings*, Elsevier, 2020.
- MAZUKI, A. A. M.; AKIL, H. M.; SAFIEE, S.; ISHAK, Z. A. M.; BAKAR, A. A. Degradation of dynamic mechanical properties of pultruded kenaf fiber reinforced composites after immersion in various solutions. *Composites Part B: Engineering*, Elsevier, v. 42, n. 1, p. 71–76, 2011.

- MEON, M. S.; OTHMAN, M. F.; HUSAIN, H.; REMELI, M. F.; SYAWAL, M. S. M. Improving tensile properties of kenaf fibers treated with sodium hydroxide. *Procedia Engineering*, Elsevier, v. 41, p. 1587–1592, 2012.
- MONTEIRO, S. N.; AQUINO, R. C. M.; LOPES, F. P.; CARVALHO, E. A. d.; D'ALMEIDA, J. R. M. Comportamento mecânico e características estruturais de compósitos poliméricos reforçados com fibras contínuas e alinhadas de curauá. *Matéria (Rio de Janeiro)*, SciELO Brasil, v. 11, n. 3, p. 197–203, 2006.
- MONTEIRO, S. N.; BRAGA, F. de O.; LIMA, E. P.; LOURO, L. H. L.; DRELICH, J. W. Promising curaua fiber-reinforced polyester composite for high-impact ballistic multilayered armor. *Polymer Engineering & Science*, Wiley Online Library, v. 57, n. 9, p. 947–954, 2017.
- MONTEIRO, S. N.; CALADO, V.; MARGEM, F. M.; RODRIGUEZ, R. J. Thermogravimetric stability behavior of less common lignocellulosic fibers—a review. *Journal of Materials Research and Technology*, Elsevier, v. 1, n. 3, p. 189–199, 2012.
- 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, n. 10, p. 2963–2974, 2011.
- MONTEIRO, S. N.; MARGEM, F. M.; LOIOLA, R. L.; ASSIS, F. S. de; OLIVEIRA, M. P. Characterization of banana fibers functional groups by infrared spectroscopy. In: TRANS TECH PUBL. *Materials Science Forum*. [S.l.], 2014. v. 775, p. 250–254.
- MONTEIRO, S. N.; MARGEM, F. M.; SILVA, I. L. A. da; BEVITORI, A.; OLIVEIRA, M. P. Bending mechanical behavior of epoxy matrix reinforced with jute fiber. In: TRANS TECH PUBL. *Materials Science Forum*. [S.l.], 2014. v. 775, p. 314–318.
- MONTI, A. *Kenaf: a multi-purpose crop for several industrial applications*. [S.l.]: Springer, 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.
- MOURA, M. J.; FIGUEIREDO, M. M. Aplicação das técnicas de picnometria de gás e de porosimetria de mercúrio à caracterização da madeira de e. globulus. *Silva Lusitana*, Unidade de Silvicultura e Produtos Florestais, v. 10, n. 2, p. 207–216, 2002.
- MUTASHER, S. A.; POH, A.; THAN, A. M.; LAW, J. The effect of alkali treatment mechanical properties of kenaf fiber epoxy composite. In: TRANS TECH PUBL. *Key Engineering Materials*. [S.l.], 2011. v. 471, p. 191–196.
- NADZRI, S. N. Z. A.; SULTAN, M. T. H.; SHAH, A. U. M.; SAFRI, S. N. A.; BASRI, A. A. A review on the kenaf/glass hybrid composites with limitations on mechanical and low velocity impact properties. *Polymers*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 12, n. 6, p. 1285, 2020.
- NASCIMENTO, L. F. C.; LOURO, L. H. L.; MONTEIRO, S. N.; LIMA, É. P.; LUZ, F. S. da. Mallow fiber-reinforced epoxy composites in multilayered armor for personal ballistic protection. *JOM*, Springer, v. 69, n. 10, p. 2052–2056, 2017.

- NAYAK, S. Y.; SULTAN, M. T. H.; SHENOY, S. B.; KINI, C. R.; SAMANT, R.; SHAH, A. U. M.; AMUTHAKANNAN, P. Potential of natural fibers in composites for ballistic applications—a review. *Journal of Natural Fibers*, Taylor & Francis, p. 1–11, 2020.
- NETO, F. L.; PARDINI, L. C. *Compósitos estruturais: ciência e tecnologia*. [S.l.]: Editora Blucher, 2016.
- NETRAVALI, A. N.; CHABBA, S. Composites get greener. *Materials today*, v. 4, n. 6, p. 22–29, 2003.
- NIJ STANDARDS. *NIJ 0101.04*: Ballistic resistance of law enforcement and corrections standards and testing program. [S.l.], 2000.
- NISHINO, T.; HIRAO, K.; KOTERA, M. X-ray diffraction studies on stress transfer of kenaf reinforced poly (l-lactic acid) composite. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Elsevier, v. 37, n. 12, p. 2269–2273, 2006.
- NISHINO, T.; HIRAO, K.; KOTERA, M.; NAKAMAE, K.; INAGAKI, H. Kenaf reinforced biodegradable composite. *Composites science and technology*, Elsevier, v. 63, n. 9, p. 1281–1286, 2003.
- OCHI, S. Mechanical properties of kenaf fibers and kenaf/pla composites. *Mechanics of materials*, Elsevier, v. 40, n. 4-5, p. 446–452, 2008.
- O’CONNOR, P.; KLEYNER, A. *Practical reliability engineering*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2012.
- OLIVEIRA, M. S.; FILHO, F. d. C. G.; LUZ, F. S. d.; DEMOSTHENES, L. C. d. C.; PEREIRA, A. C.; COLORADO, H. A.; NASCIMENTO, L. F. C.; MONTEIRO, S. N. Evaluation of dynamic mechanical properties of fique fabric/epoxy composites. *Materials Research*, SciELO Brasil, v. 22, 2019.
- OLIVEIRA, T. Á.; TEIXEIRA, A.; MULINARI, D. R.; GOULART, S. A. S. Avaliação do uso de agente compatibilizante no comportamento mecânico dos compósitos pebd reforçados com fibras de coco verde. *Cadernos UniFOA*, v. 5, n. 14, p. 11–17, 2017.
- OMRANI, E.; MENEZES, P. L.; ROHATGI, P. K. State of the art on tribological behavior of polymer matrix composites reinforced with natural fibers in the green materials world. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Elsevier, v. 19, n. 2, p. 717–736, 2016.
- OSMAN, M. R.; MAZUKI, A. A. M.; AKIL, H. M.; ISHAK, Z. A. M.; BAKAR, A. A. *Effect of chemical treatment on the mechanical properties of pultruded kenaf fibre reinforced polyester composites*. [S.l.]: Trans Tech Publ, 2014. v. 594.
- PAIVA, J. M. de; MAYER, S.; CÂNDIDO, G. M.; REZENDE, M. C. Avaliação da temperatura de transição vítrea de compósitos poliméricos reparados de uso aeronáutico. *Polímeros*, SciELO Brasil, v. 16, n. 1, p. 79–87, 2006.
- PANG, C.; SHANKS, R. A.; DAVER, F. Characterization of kenaf fiber composites prepared with tributyl citrate plasticized cellulose acetate. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Elsevier, v. 70, p. 52–58, 2015.

- PARIKH, D.; CALAMARI, T.; SAWHNEY, A.; BLANCHARD, E.; SCREEN, F.; WARNOCK, M.; MULLER, D.; STRYJEWSKI, D. Improved chemical retting of kenaf fibers. *Textile research journal*, Sage Publications Sage CA: Thousand Oaks, CA, v. 72, n. 7, p. 618–624, 2002.
- PARK, J.-M.; SON, T. Q.; JUNG, J.-G.; HWANG, B.-S. Interfacial evaluation of single ramie and kenaf fiber/epoxy resin composites using micromechanical test and nondestructive acoustic emission. *Composite Interfaces*, Taylor & Francis, v. 13, n. 2-3, p. 105–129, 2006.
- PILATO, L. A.; MICHNO, M. J. *Advanced composite materials*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 1994.
- RAMESH, M. Kenaf (*hibiscus cannabinus* l.) fibre based bio-materials: A review on processing and properties. *Progress in Materials Science*, Elsevier, v. 78, p. 1–92, 2016.
- RASSMANN, S.; PASKARAMOORTHY, R.; REID, R. Effect of resin system on the mechanical properties and water absorption of kenaf fibre reinforced laminates. *Materials & Design*, Elsevier, v. 32, n. 3, p. 1399–1406, 2011.
- RAZAK, N. I. A.; IBRAHIM, N. A.; ZAINUDDIN, N.; RAYUNG, M.; SAAD, W. Z. The influence of chemical surface modification of kenaf fiber using hydrogen peroxide on the mechanical properties of biodegradable kenaf fiber/poly (lactic acid) composites. *Molecules*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 19, n. 3, p. 2957–2968, 2014.
- REIS, J.; AMORIM, F.; SILVA, A. D.; MATTOS, H. da C. Influence of temperature on the behavior of dgeba (bisphenol a diglycidyl ether) epoxy adhesive. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Elsevier, v. 58, p. 88–92, 2015.
- REIS, J. F.; ABRAHAO, A. B. M.; COSTA, M. L.; BOTELHO, E. C. Avaliação da resistência interlaminar do compósito pei/fibras de carbono soldado pelo método de resistência elétrica. *Soldagem & Inspeção*, SciELO Brasil, v. 21, n. 3, p. 387–404, 2016.
- REIS, R. H. M.; CÂNDIDO, V. S.; NUNES, L. F.; MONTEIRO, S. N. Chemical and morphological characterization of guaruman fiber. In: *Green Materials Engineering*. [S.l.]: Springer, 2019. p. 107–113.
- ROSATO, D. V.; ROSATO, D. V. *Reinforced plastics handbook*. [S.l.]: Elsevier, 2004.
- RUDE, T.; JR, L. S.; RUHALA, L. Measurement of fiber density by helium pycnometry. *Journal of composite materials*, Sage Publications Sage CA: Thousand Oaks, CA, v. 34, n. 22, p. 1948–1958, 2000.
- SALEM, I.; ROZYANTY, A.; BETAR, B.; ADAM, T.; MOHAMMED, M.; MOHAMMED, A. Study of the effect of surface treatment of kenaf fiber on chemical structure and water absorption of kenaf filled unsaturated polyester composite. In: *Journal of Physics: Conference Series*. [S.l.: s.n.], 2017. v. 908, p. 012001.
- SALLEH, F. M.; HASSAN, A.; YAHYA, R.; AZZAHARI, A. D. Effects of extrusion temperature on the rheological, dynamic mechanical and tensile properties of kenaf fiber/hdpe composites. *Composites Part B: Engineering*, Elsevier, v. 58, p. 259–266, 2014.

- SAPUAN, S.; PUA, F.-I.; EL-SHEKEIL, Y.; AL-OQLA, F. M. Mechanical properties of soil buried kenaf fibre reinforced thermoplastic polyurethane composites. *Materials & Design*, Elsevier, v. 50, p. 467–470, 2013.
- SATHYASEELAN, P.; SELLAMUTHU, P.; PALANIMUTHU, L. Dynamic mechanical analysis of areca/kenaf fiber reinforced epoxy hybrid composites fabricated in different stacking sequences. *Materials Today: Proceedings*, Elsevier, v. 39, p. 1202–1205, 2021.
- SATYANARAYANA, K.; GUIMARÃES, J.; WYPYCH, F. Studies on lignocellulosic fibers of brazil. part i: Source, production, morphology, properties and applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Elsevier, v. 38, n. 7, p. 1694–1709, 2007.
- SATYANARAYANA, K.; SUKUMARAN, K.; MUKHERJEE, P.; PAVITHRAN, C.; PILLAI, S. Natural fibre-polymer composites. *Cement and Concrete composites*, Elsevier, v. 12, n. 2, p. 117–136, 1990.
- SEGAL, L.; CREELY, 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.
- SGRICCIA, N.; HAWLEY, M. Thermal, morphological, and electrical characterization of microwave processed natural fiber composites. *Composites Science and Technology*, Elsevier, v. 67, n. 9, p. 1986–1991, 2007.
- SGRICCIA, N.; HAWLEY, M.; MISRA, M. Characterization of natural fiber surfaces and natural fiber composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Elsevier, v. 39, n. 10, p. 1632–1637, 2008.
- SHIBATA, S.; CAO, Y.; FUKUMOTO, I. Lightweight laminate composites made from kenaf and polypropylene fibres. *Polymer Testing*, Elsevier, v. 25, n. 2, p. 142–148, 2006.
- SHUKOR, F.; HASSAN, A.; ISLAM, M. S.; MOKHTAR, M.; HASAN, M. Effect of ammonium polyphosphate on flame retardancy, thermal stability and mechanical properties of alkali treated kenaf fiber filled pla biocomposites. *Materials & Design (1980-2015)*, Elsevier, v. 54, p. 425–429, 2014.
- SILVA, M. D.; STAINER, D.; AL-QURESHI, H.; HOTZA, D. Blindagens cerâmicas para aplicações balísticas: uma revisão (ceramic armors for ballistic applications: a review). *Cerâmica*, v. 60, p. 323–331, 2014.
- SOUZA, A. T.; JUNIO, R. F. P.; NEUBA, L. d. M.; CANDIDO, V. S.; SILVA, A. C. R. da; AZEVEDO, A. R. G. de; MONTEIRO, S. N.; NASCIMENTO, L. F. C. Caranan fiber from mauritiella armata palm tree as novel reinforcement for epoxy composites. *Polymers*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 12, n. 9, p. 2037, 2020.
- SUKYAI, P.; SRIROTH, K. R.; LEE, B. H.; HYUN, J. K. The effect of bacterial cellulose on the mechanical and thermal expansion properties of kenaf/polylactic acid composites. In: TRANS TECH PUBL. *Applied Mechanics and Materials*. [S.l.], 2012. v. 117, p. 1343–1351.
- SURIANI, M.; ALI, A.; KHALINA, A.; SAPUAN, S.; ABDULLAH, S. Detection of defects in kenaf/epoxy using infrared thermal imaging technique. *Procedia Chemistry*, Elsevier, v. 4, p. 172–178, 2012.

- TAMRAKAR, S.; KIZILTAS, A.; MIELEWSKI, D.; ZANDER, R. Characterization of kenaf and glass fiber reinforced hybrid composites for underbody shield applications. *Composites Part B: Engineering*, Elsevier, v. 216, p. 108805, 2021.
- TAVARES, F. G.; MORAIS, W.; FONSECA, E.; SOUZA, T. Análise utilizando a distribuição de weibull com dois e com três parâmetros para determinar a resistência mecânica a flexão de materiais cerâmicos. *Unisanta Sci. Technol*, v. 3, n. 2, p. 76–81, 2014.
- TAYLOR, G. D.; BASSETT, C. *Materials of construction*. [S.l.]: Longman Scientific & Technical London, 1994.
- TELES, M. C. A.; FERREIRA, M. V. F.; LOPES, F. P. D.; MARGEM, F. M.; MONTEIRO, S. N.; SILVA, L. C. da. Resistência ao impacto charpy e izod em compostos de matriz de epóxi reforçados com fibras de fique. 2017.
- THIRUCHITRAMBALAM, M.; ALAVUDEEN, A.; ATHIJAYAMANI, A.; VENKATESHWARAN, N.; PERUMAL, A. E. Improving mechanical properties of banana/kenaf polyester hybrid composites using sodium lauryl sulfate treatment. *Materials physics and Mechanics*, Citeseer, v. 8, n. 2, p. 165–173, 2009.
- 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.
- TRENTINI, R. S.; ITA, P.; GOMES, P. M. E.; VIDAL, D. de M.; ITA, P. Influência da estrutura polimérica nos parâmetros de comportamento de campo dos geossintéticos. *Cep*, v. 12228, p. 901, 2003.
- 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.
- WU, Y.; CAI, L.; MEI, C.; LAM, S. S.; SONNE, C.; SHI, S. Q.; XIA, C. Development and evaluation of zinc oxide-blended kenaf fiber biocomposite for automotive applications. *Materials Today Communications*, Elsevier, v. 24, p. 101008, 2020.
- XUE, Y.; DU, Y.; ELDER, S.; WANG, K.; ZHANG, J. Temperature and loading rate effects on tensile properties of kenaf bast fiber bundles and composites. *Composites Part B: Engineering*, Elsevier, v. 40, n. 3, p. 189–196, 2009.
- YAMAMOTO, H. Method of determining the mean microfibril angle of wood over a wide range by the improved cave's method. *Mokuzai Gakkaishi*, v. 39, p. 375–381, 1993.
- YUSOFF, R. B.; TAKAGI, H.; NAKAGAITO, A. N. Tensile and flexural properties of polylactic acid-based hybrid green composites reinforced by kenaf, bamboo and coir fibers. *Industrial Crops and Products*, Elsevier, v. 94, p. 562–573, 2016.
- ZAMPALONI, M.; POURBOGHRAT, F.; YANKOVICH, S.; RODGERS, B.; MOORE, J.; DRZAL, L.; MOHANTY, A.; MISRA, M. Kenaf natural fiber reinforced polypropylene composites: A discussion on manufacturing problems and solutions. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Elsevier, v. 38, n. 6, p. 1569–1580, 2007.

- ZHAN, J.; LI, J.; WANG, G.; GUAN, Y.; ZHAO, G.; LIN, J.; NACEUR, H.; COUTELLIER, D. Review on the performances, foaming and injection molding simulation of natural fiber composites. *Polymer Composites*, Wiley Online Library, 2020.
- ZHANG, Z.; CAI, S.; LI, Y.; WANG, Z.; LONG, Y.; YU, T.; SHEN, Y. High performances of plant fiber reinforced composites—a new insight from hierarchical microstructures. *Composites Science and Technology*, Elsevier, p. 108151, 2020.
- ZHENG, C.; XU, Y. Y.; KAWAI, T.; KURODA, S.-i. Effect of polymeric coupling agent on mechanical properties of kenaf fiber/polystyrene composites. In: TRANS TECH PUBL. *Applied Mechanics and Materials*. [S.l.], 2013. v. 268, p. 127–133.
- ZUKAS, J. A.; NICHOLAS, T.; SWIFT, H. F.; GRESZCZUK, L. B.; CURRAN, D. R.; MALVERN, L. Impact dynamics. *JAM*, v. 50, n. 3, p. 702, 1983.