

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

BRUNO DE PAULA ROSA

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E TÉRMICA DE UM POLÍMERO
TERMORRÍGIDO MODIFICADO COM FIBRA DE BURITI**

Ilha Solteira
2017

BRUNO DE PAULA ROSA

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E TÉRMICA DE UM POLÍMERO
TERMORRÍGIDO MODIFICADO COM FIBRA DE BURITI**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Prof. Dr. Newton Dias Filho
Orientador

Prof. Dr. Fernando Barbosa Montanare
Co-orientador

Ilha Solteira
2017

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

R788c Rosa, Bruno de Paula.
Caracterização mecânica e térmica de um polímero termorrígido modificado com fibra de buriti / Bruno de Paula Rosa. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2017
75 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Materiais e Processos de Fabricação, 2017

Orientador: Newton Dias Filho
Co-orientador: Fernando Barbosa Montanare
Inclui bibliografia

1. Materiais compósitos. 2. Fibras naturais. 3. Propriedades mecânicas. 4. Propriedades térmicas. 5. Sustentabilidade.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

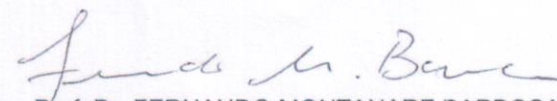
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: **Caracterização mecânica e térmica de um polímero termorrígido modificado com fibras de buriti**

AUTOR: BRUNO DE PAULA ROSA

ORIENTADOR: NEWTON LUIZ D'AS FILHO

COORIENTADOR: FERNANDO MONTANARE BARBOSA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA MECÂNICA, área: MATERIAIS E PROCESSOS DE FABRICAÇÃO pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. FERNANDO MONTANARE BARBOSA

Conselho Universitário / Universidade Católica Dom Bosco


Prof. Dr. VICENTE AFONSO VENTRELLA

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. VINICIUS SOUZA MORAIS

FAODO / Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

Ilha Solteira, 20 de fevereiro de 2017

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Newton Luiz Dias Filho, pelo incentivo, amizade e pela orientação deste trabalho.

Ao Coordenador. Dr. Fernando Montanare, pela amizade, apoio, incentivo para realização e conclusão do mestrado.

Aos professores do Departamento de Engenharia Mecânica da Unesp de Ilha Solteira, pelo conhecimento, atenção e amizade.

A minha esposa Márcia Angélica pelo amor, força, constante ajuda e presença durante todo Mestrado.

A Luciane Melli pela atenção e ajuda.

Aos funcionários do Departamento de Física da UFMS, biblioteca e secretaria de pós-graduação que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desse trabalho.

A Universidade Católica Dom Bosco de Campo Grande MS pelo fornecimento da estrutura necessária para realização dos ensaios de tração.

A Universidade Anhanguera – unidade 2 – Campo Grande MS por disponibilizar o Projeto de Perfil.

A Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – Campus de Campo Grande – pelo fornecimento da estrutura para ensaios térmicos e microscopia eletrônica de varredura.

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis.”
José de Alencar

RESUMO

Pensando na sustentabilidade, a introdução de fibras naturais em substituição às sintéticas no reforço de matrizes poliméricas, faz-se necessária entre outras coisas devido à preservação do meio ambiente, redução de custos, sem que comprometa a qualidade final do material. Esse projeto tem o objetivo de obter as características mecânicas e térmicas de materiais compósitos a base de resina epoxídica curada DGEBA/TETA com a adição de porcentagens específicas de fibras de buriti. A fibra escolhida foi o buriti, pela abundância no Mato Grosso do Sul, buscando um desenvolvimento sócio econômico para a região e a matriz escolhida foi a epóxi DGEBA/TETA por ser a resina mais utilizada no mundo. Foram utilizadas fibras com diâmetro de 0,17mm e comprimento de 30mm em porcentagens em massa de 1%,5%,10%,15% e 17,6% do total do compósito. A caracterização mecânica foi realizada através de ensaios de tração. Após a ruptura dos corpos de prova foi verificado com uso da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), a formação de microvazios através dos ensaios de Termogravimetria (TGA) e Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) foram verificadas a degradação e temperatura de transição vítrea (T_g) dos compósitos. O compósito com a adição de 5% em massa de fibras apresentou um aumento de 11,98% (60,12 para 67,32 MPa) no limite de resistência a tração (LRT) e de 8,21% no módulo de elasticidade (E) (901,06 para 977,82 Mpa) em relação a resina pura, acima de 5% as propriedades permaneceram constantes. Já o Limite de Resistência à propagação de trincas (K_{1c}) não apresentou alterações significativas ao se adicionar fibras a resina (permanecendo em torno de 1,19 MPa). Não houve alteração na transição vítrea, ficando em torno de 70°C. Já o TGA verificou que a temperatura de degradação dos compósitos apresentou um valor intermediário entre a resina pura e a fibra pura.

Palavras-chave: Compósitos. Fibras de buriti. Resinas epoxídicas. Propriedades mecânicas e térmicas.

ABSTRACT

Thinking about sustainability, the introduction of natural fibers instead of synthetic fibers in the reinforcement of polymer matrices, is necessary among other things due to the preservation of the environment, cost reduction without compromising the final quality of the material. This project aims to obtain the mechanical and thermal characteristics of composite materials based on cured DGEBA / TETA epoxy resin with the addition of specific percentages of buriti fibers. The fiber was buriti, due to the abundance in Mato Grosso do Sul, seeking a socioeconomic development for the region and the chosen matrix was the epoxy DGEBA / TETA as the most used resin in the world. Fibers with a diameter of 0.17mm and a length of 30mm were used in mass percentages of 1%, 5%, 10%, 15% and 17,6% of the total composite. The mechanical characterization was performed through tensile tests. After the rupture of the specimens was verified with the use of Scanning Electron Microscopy (SEM), the microgravity formation through the Thermogravimetry (TGA) and Differential Scanning Calorimetry (DSC) tests showed the degradation and glass transition temperature (T_g) of the composites. The composite with the addition of 5% by mass of fibers presented an increase of 11.98% (60.12 to 67.32 MPa) at the tensile strength limit (LRT) and 8.21% in the modulus of elasticity (E) (901.06 to 977.82 MPa) relative to pure resin, above 5% the properties remained constant. However, the Limit of Resistance to crack propagation (K1C) did not show significant changes when adding fibers to the resin (remaining around 1,19 MPa). There was no change in the glass transition, being around 70°C. The TGA verified that the degradation temperature of the composites showed an intermediate value between the pure resin and the pure fiber.

Keywords: Composites. Buriti fibers. Epoxy resins. Mechanical and thermal properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Grupo epoxídico: óxido de etileno.....	19
Figura 2	- Diglicidil éter de bisfenol A.....	19
Figura 3	- Título da figura 3 – caso o título ultrapasse uma linha, o alinhamento deve ser feito pela primeira letra do título, conforme apresentado neste modelo.....	24
Figura 4	- O aumento do uso de materiais compósitos no período de 1990 a 2000.....	24
Figura 5	- Fibra de vidro.....	27
Figura 6	- Palmeira de Buriti.....	31
Figura 7	- Diagrama Tensão-Deformação Mostrando Deformação Elástica Linear.....	34
Figura 8	- Comportamento tensão-deformação de um típico metal.....	35
Figura 9	- Curva tensão-deformação típica de metais.....	36
Figura 10	- Representação esquemática do comportamento tensão-deformação de materiais dúcteis e frágeis.....	37
Figura 11	- Representação esquemática de como o Módulo de Resiliência é obtido.....	38
Figura 12	- Modelo de corpo de prova utilizado nos ensaios de K_{1c}	39
Figura 13	- Corpo de Prova Tipo 1 para Ensaio de Tração.....	40
Figura 14a	- Tipos de Corpos de Prova para ensaios de Polímeros em Tração.....	40
Figura 14b	- Tipos de Corpos de Prova para ensaios de Polímeros em Tração.....	41
Figura 15	- Curvas Tensão-Deformação Típicas para Diferentes Polímeros.....	42
Figura 16	- Processo de montagem do molde em silicone.....	44
Figura 17	- Fibra de Buriti.....	45
Figura 18	- Projetor DIGIMESS MODEL 400, utilizado para medir os diâmetros das fibras de Buriti.....	46
Figura 19	- Corpo de prova de tração.....	47
Figura 20	- Corpo de prova de DSC / TGA.....	48
Figura 21	- Máquina de ensaio de tração PANTEC VERSAT.....	49
Figura 22	- Formato dos corpos de prova utilizados para o ensaio de K_{1c}	49
Figura 23	- Ensaio de tração para determinação do K_{1c}	50
Figura 24	- Equipamento da marca SHIMADZU modelo TGA-50.....	51
Figura 25	- Equipamento da marca SHIMADZU modelo DSC 50.....	52
Figura 26	- Equipamento da marca JEOL modelo JSM-638OLV.....	53
Figura 27	- Porta amostra / Figura 27b: Equipamento Denton Vacuum modelo DESK III.....	53
Figura 28	- Gráfico obtido no ensaio de tração para LRT.....	56
Figura 29	- Gráfico obtido no ensaio de tração para E.....	57
Figura 30	- Gráfico obtido no ensaio de tração para K_{1c}	58
Figura 31	- Força x Deslocamento.....	59
Figura 32	- Estágios que um polímero termoplástico passa quando submetido a ação de uma tensão axial.....	63
Figura 33	- Gráfico obtido através do ensaio de Termogravimetria.....	65

Figura 34	- Gráfico de DSC para os compósitos estudados.....	66
Figura 35	- Fotomicrografias das superfícies de fratura dos compósitos fibra de buriti/DGBA TETA – (a) 0%, (b) 1%, (c) 5%, (d) 10%, (e) 15%, (f) 17,6 %.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Resinas epoxídicas vendidas comercialmente.....	20
Tabela 2	- Aminas utilizadas como agentes de cura comercial.....	21
Tabela 3	- Vantagens, desvantagens e algumas aplicações para as resinas epóxi curadas com aminas.....	22
Tabela 4	- Custo de produção e peso estrutural de lanchas de patrulha do alumínio e fibra de vidro com kevlar.....	25
Tabela 5	- Comparação entre fibras naturais e fibras de vidro.....	27
Tabela 6	- Densidade e propriedades mecânicas de fibras naturais...	28
Tabela 7	- Propriedades de fibras naturais e sintéticas.....	29
Tabela 8	- Módulo de Young à Temperatura Ambiente para metais...	33
Tabela 9	- Dimensões para Corpo de prova de Polímeros por Espessura.....	41
Tabela 10	- Resultados obtidos nos ensaios tração.....	55
Tabela 11	- Materiais de grande utilização em estruturas de engenharia e epóxi/fibra de buriti.....	61
Tabela 12	- Deformações obtidas através do ensaio de tração.....	62
Tabela 13	- Valores da Resiliência e Tenacidade para os materiais estudados.....	64
Tabela 14	- Valores de Tenacidade para diferentes materiais.....	64
Tabela 15	- Temperatura de Transição vítrea obtido através de DSC..	66

LISTA SIGLAS E ABREVIATURAS

ASTM	Sociedade americana para materiais e testes
DGEBA	Diglicidil éter de bisfenol A
DSC	Colorimetria diferencial de varredura
E	Módulo de Young ou módulo de elasticidade
K_{1C}	Resistência à propagação de trincas
LRT	Limite de resistência à tração
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
TETA	Trietilenotetramina
TGA	Termogravimetria
T_g	Temperatura de transição vítrea
TGDDM	Tetraglicidil diamino difenil metano
U_R	Resiliência
σ	Tensão
σ_p	Tensão no limite de proporcionalidade
ΔL	Diferença de comprimentos
L_0	Comprimento inicial
ε	Deformação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	OBJETIVOS.....	15
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
3	JUSTIFICATIVA.....	16
4	REVISÃO DE LITERATURA.....	17
4.1	POLÍMEROS.....	17
4.1.1	Polímeros termopásticos.....	17
4.2	ELASTÔMEROS.....	18
4.3	POLÍMEROS TERMORRÍGIDOS.....	18
4.4	RESINAS EPÓXI.....	18
4.5	AGENTES DE CURA DE RESINAS EPÓXI.....	21
4.6	MATERIAIS COMPÓSITOS.....	23
4.7	FIBRAS.....	26
4.7.1	Fibras sintéticas.....	26
4.7.2	Fibra de buriti.....	26
4.7.3	Fibras naturais.....	28
4.7.4	Fibra de buriti.....	30
4.8	ENSAIO DE TRAÇÃO.....	31
4.9	PROPRIEDADES TENSÃO-DEFORMAÇÃO.....	32
4.10	DEFORMAÇÃO ELÁSTICA.....	34
4.11	DEFORMAÇÃO PLÁSTICA.....	34
4.12	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO.....	35
4.13	DUCTILIDADE.....	36
4.14	TENACIDADE.....	37
4.15	RESILIÊNCIA.....	38
4.16	RESISTÊNCIA À PROPAGAÇÃO DE TRINCAS (K_{1c}).....	39
4.17	CORPO DE PROVA PARA ENSAIO DE TRAÇÃO.....	39
4.18	COMPORTAMENTO TENSÃO-DEFORMAÇÃO DOS POLÍMEROS..	41
4.19	TERMOGRAVIMETRIA (TGA).....	42
4.20	CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA (DSC).....	43
4.21	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	43
5	MATERIAIS E MÉTODOS.....	44
5.1	MOLDE DO CORPO DE PROVA.....	44
5.2	RESINA EPOXÍDICA E AGENTE DE CURA UTILIZADOS.....	45
5.3	FIBRAS DE BURITI.....	45
5.4	COMPOSIÇÃO DOS COMPÓSITOS.....	46
5.5	PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	47
5.6	DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	48
5.6.1	Ensaio de tração.....	48
5.7	TERMOGRAVIMETRIA (TGA).....	50
5.8	CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA (DSC).....	51
5.9	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	52
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	55

6.1	OS ENSAIOS.....	55
6.1.1	Ensaio de tração em matriz epóxi com e sem adição de fibras de buriti.....	55
6.1.2	Limite de Resistência à Tração (LRT).....	55
6.2	MÓDULO DE ELASTICIDADE (E).....	57
6.3	RESISTÊNCIA À PROPAGAÇÃO DE TRINCAS (K_{1C}).....	58
6.4	GRÁFICOS DE FORÇA X DESLOCAMENTO.....	59
6.5	DEFORMAÇÃO (ϵ).....	62
6.6	RESILIÊNCIA E TENACIDADE.....	64
6.7	TERMOGRAVIMETRIA (TGA).....	65
6.8	CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA (DSC).....	66
6.9	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.....	67
7	CONCLUSÕES.....	69
8	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	70
	REFERÊNCIAS.....	71

1 INTRODUÇÃO

Com a evolução permanente da tecnologia e da humanidade a preocupação com os impactos ao meio ambiente se torna extremamente relevante, devido à exploração em larga escala dos recursos naturais (MANO, 1985).

Sendo assim, existe uma preocupação cada dia maior com a deterioração da natureza e a procura por materiais novos que auxiliem ou até anulem os impactos causados e que simultaneamente podem trazer benefícios iguais ou até superiores aos dos materiais chamados não-biodegradáveis (MANO, 1985).

Nos últimos anos diferentes setores da indústria tem elevado de maneira considerável o uso de polímeros, devido às diferentes vantagens proporcionadas pelos mesmos, como os baixos custos produtivos, a baixa densidade e suas eficientes propriedades mecânicas. Esses polímeros são geralmente modificados com o uso do reforço de fibras sintéticas, como as fibras de vidro, kevlar e carbono transformando-se em compósitos poliméricos. Entretanto, as fibras sintéticas são materiais não-biodegradáveis e de difícil reciclagem, sendo assim há preocupação constante em substituí-las por outros tipos de materiais que sejam menos agressivos à natureza (OLIVEIRA, 2015). Devido essa urgência de inserir materiais biodegradáveis no ramo industrial, o estudo e pesquisa das fibras naturais, vêm se destacando no reforço de matrizes epoxídicas.

As Resinas epoxídicas são polímeros termorrígidos que enrijecem quando associados a um endurecedor realizando dessa forma uma reação de cura. Tais resinas são usadas como matriz de compósitos em abundância por diferentes setores da indústria, como as indústrias aeronáutica, química e de construção, devido as suas extraordinárias características de fácil processo de cura e adesão, estabilidade térmica e resistência a solventes. Dessas resinas, a mais usada é a DGEBA- Diglicidil éter de bisferrol – A, por sua versatilidade e baixo custo (GUIMARÃES et al., 2002).

A combinação de ao menos dois materiais de características distintas que somados adquirem propriedades únicas é chamado de compósito (MAZUMDAR, 2002).

Ao passar pelo processo de cura, a resina epoxídica acaba perdendo parte de propriedades importantes, contudo, se usada conjuntamente com as fibras, tais

componentes transformam-se em um compósito, o que possibilita o resgate ou significativa melhora dessas propriedades (GUIMARÃES et al., 2002).

Esse trabalho avaliou as propriedades mecânicas e térmicas de compósitos, usando a resina epoxídica DGEBA e fibras de buriti. Foram analisados - o efeito de reforço desta fibra através de propriedades obtidas pelo ensaio de tração, tais como módulo de elasticidade, limite de resistência à tração, resistência a propagação de trincas - tais resultados serão contrapostos com os da resina epóxi sem reforço. Testes de Termogravimetria (TGA), Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) foram utilizados na análise das propriedades térmicas do material, já que o objetivo dos mesmos é o de analisar a degradação em função da temperatura e a determinação da temperatura de transição vítrea do compósito, respectivamente. A avaliação da interface entre fibra/matriz assim como as cavidades provocadas por microvazios ao se realizar a cura do compósito e a mistura da fibra com a matriz foi feito com o uso da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

2 OBJETIVOS

Esta dissertação de mestrado tem como objetivo geral analisar as propriedades mecânicas e térmicas e a degradação de utilização dos compósitos poliméricos confeccionados de forma simples e econômica produzidos à base do sistema DGBA/TETA curada adicionando fibras cortadas e aleatórias de buriti.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Fabricação dos moldes dos corpos de prova;

Confeccionar corpos de prova com diferentes percentuais em massa em matriz polimérica;(1 %, 5%, 10%, 15%, 17,6%)

Analisar o limite de resistência à tração (LRT)

Analisar o módulo de elasticidade (E)

Analisar resistência a propagação de trincas (K_{1C})

Analisar a deformação (ϵ)

Analisar a resiliência (U_R) e tenacidade

Avaliar as propriedades térmicas por termogravimetria(TGA) e calorimetria diferencial de varredura (DSC)

Analisar a formação de microvazios através da microscopia eletrônica de varredura (MEV)

3 JUSTIFICATIVA

O território brasileiro é carregado com quantidades imensas de formas de vida vegetal. A biodiversidade e quantidade de fibras naturais que podem ser encontradas dentro do país são colossais, trazendo a necessidade e relevância em buscar materiais de origem natural que possam substituir os sintéticos e dessa maneira, auxiliar no desenvolvimento sustentável. As vantagens econômicas e sociais da exploração desses recursos naturais abrangem desde a geração de empregos - devido à necessidade de extração de tais recursos (MANO, 1985) - até os aspectos ambientais ligados as descobertas.

As fibras naturais apresentam diversos ganhos quando comparadas às fibras sintéticas, como por exemplo: menor densidade e baixos custos produtivos. Sendo assim, a proposta da presente dissertação é a de pesquisar as principais características mecânicas e verificar temperatura de utilização de compósitos reforçados por fibras cortadas e aleatórias, de uma das mais promissoras fibras: o buriti, como matriz de resina polimérica epóxica. O buriti (*Mauritia flexuosa*) é uma palmeira encontrada em abundância em diversas regiões do país como o centro-oeste, Norte e Nordeste do Brasil. Praticamente todas as partes da palmeira podem ser aproveitadas o que aumenta as possibilidades de estudo da planta. Sua importância abrange desde a manutenção da riqueza de água nos solos como o seu uso na alimentação de diversos tipos de animais (SALES et al., 2005).

Dessa forma, o objetivo é analisar se as características estruturais da fibra buriti tem a possibilidade de substituição em materiais convencionais como a fibra de vidro, empregados na construção civil e na indústria automobilística. A escolha da fibra do buriti, deve-se a sua alta resistência mecânica, seu baixo custo produtivo.

4 REVISÃO DE LITERATURA

A revisão de literatura será apresentada com o objetivo de demonstrar as peculiaridades de cada material e métodos utilizados nessa dissertação. Primeiramente, contextualizou-se os principais polímeros e as fibras utilizadas em materiais compósitos. Por fim, estão descritas as propriedades mecânicas e térmicas tal como: o método de microscopia utilizado.

4.1 POLÍMEROS

Originada do grego poli (muitos) e mero (unidade de repetição), o polímero é uma macromolécula composta por muitas (dezenas de milhares) de unidades de repetição denominadas meros, ligados por ligação covalente. Sua matéria-prima é o monômero, isto é, uma molécula com uma (mono) unidade de repetição. No entanto, para melhor compreensão da relação entre suas características e o efeito sobre o desempenho dos materiais compostos por polímeros, quando empregados na obtenção de materiais poliméricos.

No geral, os Polímeros possuem baixas densidades dando-lhes características como resistência e rigidez que podem ser comparadas a outros tipos de materiais como metais e cerâmicos. Contém baixa condutividade elétrica, não são magnéticos e são muito versáteis e úteis. Dividem-se em termoplásticos, termorrígidos ou Elastômetros de acordo com sua elasticidade e capacidade de se fundir e dissolver (SANTOS et al., 2008).

4.1.1 Polímeros termoplásticos

Os Polímeros Termoplásticos classificam-se como aqueles que podem amolecer quando aquecidos, conseguindo em alguns casos até transformar-se em um líquido ou atingir estado sólido quando resfriados. Devido à sua capacidade de se fundir ou solidificar várias vezes, são muitas vezes recicláveis. Alguns exemplos bastante conhecidos desse tipo de polímero (Santos *et al.*, 2008) são: poliéster saturado (PET), Policloreto de Vinila (PVC) e Polietileno (PE).

4.2 ELASTÔMEROS

Elastômero é o tipo de polímero conhecido como borracha. Esse polímero situa-se no meio termo entre polímeros termoplásticos e termorrígidos (nem muito moles nem muito duros). Exibem grande flexibilidade às temperaturas ambientes, contudo não tem alta capacidade de fusão, o que gera dificuldade na reciclagem desse tipo de material. Alguns exemplos de elastômeros (OLIVEIRA, 2015) são: o Polisopreno (borracha) e o Silicone.

4.3 POLÍMEROS TERMORRÍGIDOS

Os Polímeros Termorrígidos caracterizam-se pela baixa capacidade de fusão após serem polimerizados, já que o aquecimento do mesmo leva geralmente à sua decomposição, tornando-o pouco reciclável. Eles são resistentes, duros, frágeis e estáveis em alterações de temperatura (PARDINI, 1990).

A polimerização dos termorrígidos acontece em duas etapas. Na primeira etapa, é produzido um composto com cadeias ramificadas ou lineares. Tal composto é um pré-polímero, que na fase final necessita de um agente de cura (endurecedor) ou de uma elevação de temperatura, o que irá gerar a concretização da segunda etapa (cura), produzindo um polímero final com ligações transversais que estabilizam as moléculas (LEAL et al., 2010).

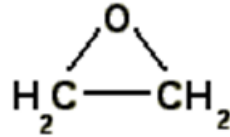
4.4 RESINAS EPÓXI

Originada do alfabeto grego a palavra epóxi é constituída pelos termos “EP” (no meio) e “OXI”(oxigênio) , o que significa um oxigênio no meio de outros átomos. Quimicamente falando, epóxi é um composto formado por um átomo de oxigênio no meio de outras moléculas contendo carbono (ou apenas do próprio átomo de carbono) (DORSEY et al., 1977).

O epóxi é um polímero termorrígido capaz de realizar um processo de cura a partir de um estado líquido, com o uso de um endurecedor, transformando-o em um composto duro. Caracteriza-se pela presença de dois ou mais grupos epóxi, que é um composto de três átomos interligados (um oxigênio e dois carbonos)

denominados epóxido, epóxi, oxirano ou grupo etoxilano que adquirem a forma de um anel triangular como demonstra a Figura 1.

Figura 1 – Grupo epoxídico: óxido de etileno.



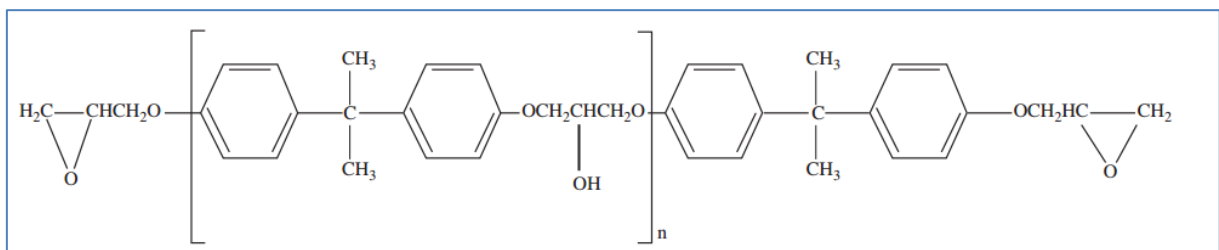
Fonte: Encyclopedia (1986).

No geral contém qualidades ótimas como: estabilidade térmica, baixa densidade, baixa condutividade, resistência a solventes, resistência a abrasão excelente adesividade e baixa contração depois da realização do processo de cura tornando uma ótima candidata a ser incorporada junto à fibras na formação de compósitos poliméricos. Utilizam-se as resinas epoxicas na formulação de tintas protetivas de manutenção industrial, revestimentos químicos altamente aderentes, isolamentos elétricos, diferentes tipos de adesivos, brindes, pisos, laminados, etc.

A resina epóxi mais utilizada no mercado é a DGEBA-Diglicidil éter de bisfenol – A, devido à sua versatilidade e baixo custo (LEAL et al., 2010).

Grande parte das resinas epoxídicas encontradas no mercado resultam de uma reação entre o bisfenol-A (4,4'-dihidroxi-2,2-difenilpropano BPA, 4,4'-(propano-2-ilideno)difenol) e epicloridrina(1-cloro-2,3-epoxipropano) (MAZUMDAR, 2002). O produto de tal reação é a resina epoxídica DGEBA, que será utilizada nesse trabalho que tem sua representação química ilustrada na Figura 2 (MAZUMDAR, 2002).

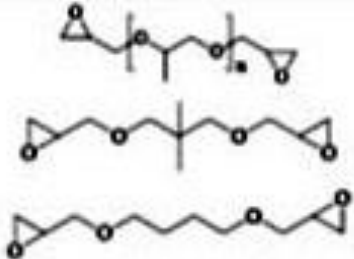
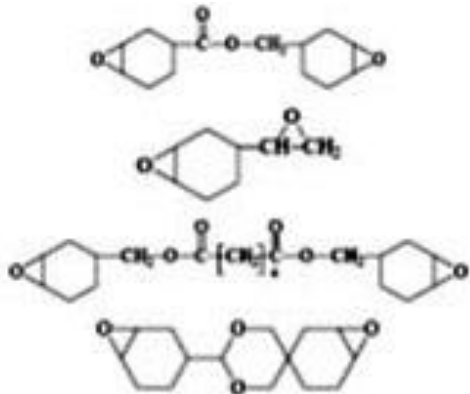
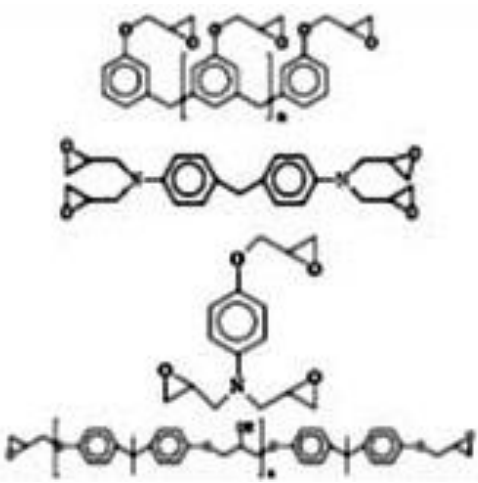
Figura 2 – Diglicidil éter de bisfenol A.



Fonte: Sales e Brunelli (2005).

A classificação das resinas epoxídicas vendidas no mercado são encontradas na Tabela 1:

Tabela 1 – Resinas epoxídicas vendidas comercialmente.

Fórmula	Nome
<i>alifáticas</i>	
	<p>Diglicidil Éter de propileno glicol</p> <p>Diglicidil Éter de neopentil glicol</p> <p>Diglicidil Éter de butadienal</p>
<i>cicloalifáticas</i>	
	<p>3,4 epóxiciclohexanocarboxilato de 3,4 – epóxiciclohexilmetila</p> <p>3,4 epóxiciclohexiloxirano</p> <p>adipato de di - 3,4 epóxiciclohexilmetila</p> <p>2 (3,4– epóxiciclohexil) - 6,3 ciclohexil - 5,1 dioxano</p>
<i>aromáticas</i>	
	<p>Poliglicidil éter de fenol formaldeido</p> <p>Tetraglicidil diameno difenil metano (TGDDM)</p> <p>N,N,0 Triglicidil p-aminofenol</p> <p>Diglicidil éter de bisfenol – A (DGEBA)</p>

Fonte: Pereira (2006).

4.5 AGENTES DE CURA DE RESINAS EPÓXI

Os agentes de cura são catalisadores que promovem a abertura do anel epoxídico o que geram uma ligação com um grupo amina do endurecedor, realizando uma reação de cura, que no caso do proposto trabalho, utiliza um endurecedor que transforma o líquido de estrutura molecular linear DGEBA em um polímero sólido curado DGEBA/TETA, de estrutura tridimensional insolúvel e infusível com ligações cruzadas (MONTEIRO et al., 2011). O agente TETA é um agente com muita facilidade no processo de cura e que realiza esse processo a frio, ou seja, não necessita que se eleve a temperatura para realizar o endurecimento da resina DGEBA podendo realizar o processo à temperatura ambiente e, além disso, é um endurecedor de baixo custo, um bom diluente, ótimas propriedades físicas e químicas além de ser muito encontrada no mercado, justificando a sua escolha (GLÓRIA et al., 2016). A estrutura desse endurecedor é demonstrada na Tabela 2, além de outras aminas que também são encontradas no mercado.

Tabela 2 - Aminas utilizadas como agentes de cura comercial (continua)



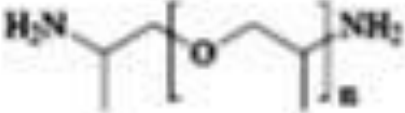
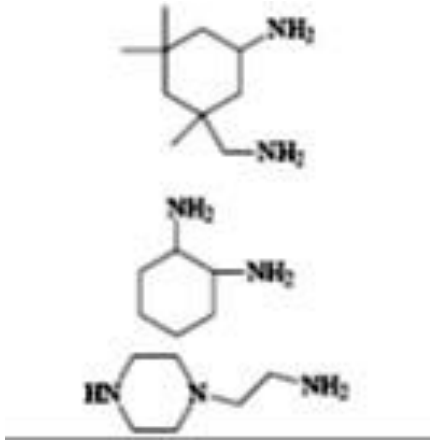
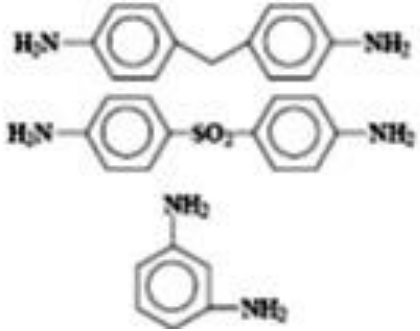
Fórmula	Nome
<i>alifáticas</i>	
	dielileno triamina (DETA)
	trielileno tetramina (TETA)
	poli (oxipropileno diamina)

Tabela 2 - Aminas utilizadas como agentes de cura comercial (conclusão)

Fórmula	Nome
<i>cicloalifáticas</i>	
	<p>isoforona diamina (IPDA)</p> <p>1,2 diamino ciclohexano(DAC)</p> <p>N, aminoetil piperazina (AEP)</p>
<i>aromáticas</i>	
	<p>4,4´ diamino difenil metano (DDM)</p> <p>4,4´ diamino difenil sulfona (DDS)</p> <p>m- fenileno diamina</p>

Fonte: Moraless (1989).

Sobre as vantagens e desvantagens de cada tipo de amina, a Tabela 3 compara alguma dessas propriedades de diferentes tipos de Aminas.

Tabela 3 - Vantagens, desvantagens e algumas aplicações para as resinas epóxi curadas com aminas (continua)

Tipo	Vantagens	Desvantagens	Aplicações
Aminas alifáticas	Baixa viscosidade, Cura a temperatura Ambiente, incolor	Vida útil pequena, moderadamente tóxica, absorção de umidade alta de	Adesivos, pequenos vazamentos, encapsulante elétrico, uso na engenharia civil.

Tabela 3 - Vantagens, desvantagens e algumas aplicações para as resinas epóxi curadas com aminas (conclusão)

Tipo	Vantagens	Desvantagens	Aplicações
Aminas aromáticas	Bom desempenho a temperaturas elevadas, boa resistência térmica, baixa absorção de umidade	Incompatibilidade com resinas epóxi, longos ciclos de cura a altas temperaturas, tóxicas.	Compósitos de alto desempenho, revestimentos, adesivos, filamentos espiralados, encapsulante elétrico
Agente catalítico	Resistência a altas temperaturas, vida útil muito longa	Longos ciclos de cura a altas temperaturas, quebradiços	Adesivos, encapsulante elétrico

Fonte: Pereira (2006).

4.6 MATERIAIS COMPÓSITOS

Materiais compósitos são classificados como: particulados, fibrosos ou laminados. Os particulados contêm partículas grandes articuladas na matriz de outro material. Os fibrosos são basicamente fibras articuladas a uma matriz (JONES, 1999) e os laminados são aqueles que são formados por uma matriz que aglomera um reforço.

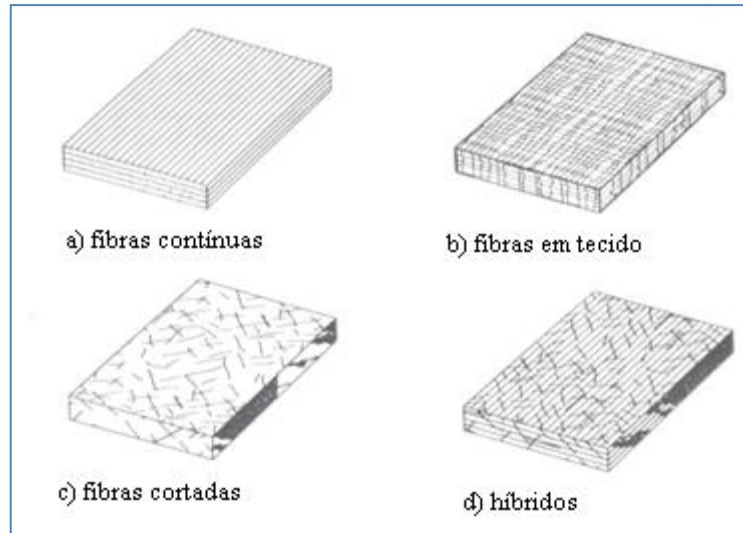
Os compósitos fibrosos possuem diferentes tipos de distribuição de fibras que podem ser classificadas como fibras cortadas, contínuas e de tecidos e híbridos. Esses diferentes tipos de compósitos fibrosos são ilustrados na Figura 3.

A utilização desses materiais vem desde as primeiras aeronaves, as quais tinham em sua estrutura partes de madeira que é um compósito natural. Contudo a produção de materiais compósitos começou no período da segunda guerra mundial, com a fabricação de estruturas secundárias, como portas e carenagens em aviões de guerra. Estes compósitos eram feitos de resina poliéster e fibra de vidro.

Para ter utilizada em materiais compósitos as fibras devem ser unidas por um material ligante, chamado de matriz, o que forma um elemento estrutural. Sua resistência é igual ou superior a um similar, com o benefício de possuir uma baixa densidade, o que o torna de excelente utilização nas estruturas que precisam de baixa densidade, como é o caso de aviões, embarcações, veículos em geral. Atualmente houve um aumento considerável no uso desses materiais. Pode-se

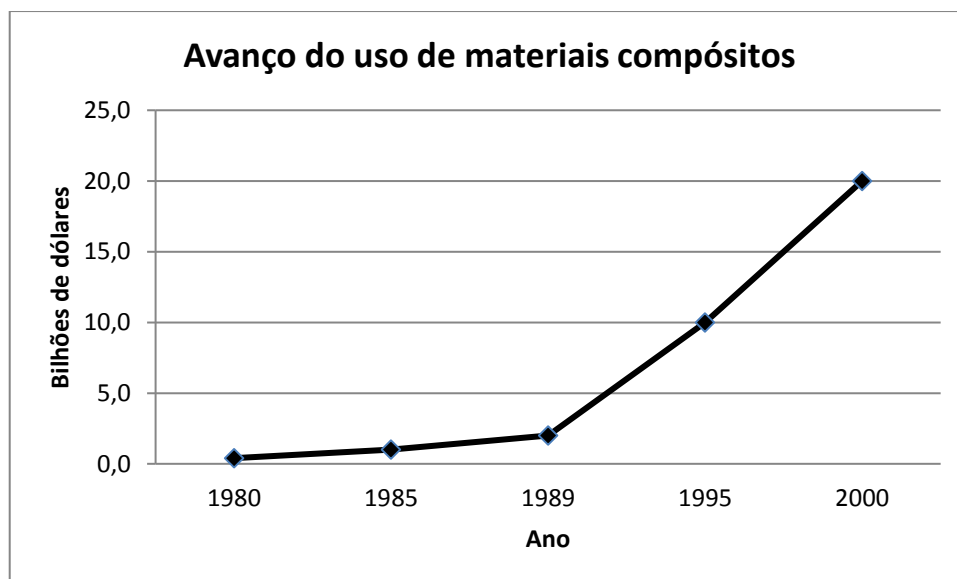
observar na Figura 4 o avanço na aplicação de materiais compósitos nos Estados Unidos no período de 1990 a 2000.

Figura 3 - Diferentes tipos de compósitos: (a) Fibras contínuas; (b) Tecido; (c) Fibras cortadas; (d) Híbridos.



Fonte: Mazumdar (2002).

Figura 4 - O aumento do uso de materiais compósitos no período de 1990 a 2000.



Fonte: Barbosa (2011).

As fibras de vidro, desenvolvidas pela Força Aérea Americana nos Estados Unidos, competem assiduamente com outros materiais metálicos usados na indústria aeroespacial. Assim, o alumínio, um dos principais materiais utilizados nessas estruturas foi substituído gradualmente pelos compósitos feitos com fibras de

vidro e Kevlar. Com o crescente avanço tecnológico, processos para a produção desses compósitos ficaram cada vez mais viáveis quando comparados com outros materiais. As Tabelas 4 indicam claramente as vantagens dessas fibras usadas como compósitos quando comparados com o alumínio.

Tabela 4 - Custo de produção e peso estrutural de lanchas de patrulha do alumínio e fibra de vidro com kevlar.

	Alumínio	Fibra de vidro com kevlar
custo de material (US\$)	14988,93	12688,89
custo de mão de obra (US\$)	4996,3	3411,4
Custo de pintura (US\$)	969,0	0
custo final total (US\$)	20954,2	16279,79
Peso total aproximado (Kg)	2498,16	1705,7

Fonte: Jones (1999).

Foi a partir da década de 60, que os materiais compósitos de alto desempenho foram introduzidos de maneira definitiva na indústria aeroespacial. Devido aos avanços nos compósitos criaram-se novas oportunidades para estruturas de alto desempenho e com baixo peso, o que favoreceu o progresso nos sistemas estratégicos, como a área de mísseis, foguetes e aeronaves de geometrias complexas. O aumento no uso desses compósitos é em torno de 5% ao ano distribui-se seu uso em 60% para o setor aeronáutico comercial, 20% para o de defesa e espaço, 10% para o recreativo, e 10% para a indústria em geral.

A aplicação desses compósitos estruturais tem crescido no Brasil, eles são usados em componentes externos e internos de aviões, automóveis e helicópteros e, em menor escala, em foguetes. No setor de transportes há uma tendência mundial da indústria automotiva ser tornar a maior usuária de compósitos poliméricos.

Tais compostos são utilizados na área de construção civil em edificações de áreas com tendência a abalos sísmicos. Devido a sua ótima resistência à corrosão, vem sendo muito usado em eletrodos de células de combustíveis. Os materiais compósitos são empregados também na área médica: na confecção de próteses ortopédicas; na área esportiva em tacos de basebol, varas de pescar, estruturas de

bicicletas. Os compósitos estruturais também são usados na construção de plataformas de petróleo e de equipamentos para extração de petróleo em alto mar.

Atualmente acontece uma grande evolução devido à descoberta das fibras naturais. As fibras naturais contêm propriedades comparáveis às fibras sintéticas, principalmente à fibra de vidro. São materiais ecologicamente corretos, com baixo custo de ampla facilidade para a preparação de compósitos, o que faz com que inúmeros centros de pesquisa invistam altas quantias na produção de compósitos à base dessas fibras.

4.7 FIBRAS

Fibras podem ser definidas como: termoplásticos orientados com a direção principal das cadeias poliméricas posicionadas paralelas ao sentido longitudinal (Kantoviscki). Elas são divididas em orgânicas ou inorgânicas. As orgânicas são subdivididas em: naturais - que englobam as vegetais, animais e minerais -; ou artificiais, que são produzidas a partir de tratamentos químicos utilizando as fibras naturais. Já as inorgânicas englobam as fibras sintéticas, que tem produção industrial com utilização de compostos químicos apropriados (BLEDZKI et al., 1999).

4.7.1 Fibras sintéticas:

Utilizadas em reforços de materiais compósitos, devido à suas ótimas características como: boa resistência e baixa densidade, atualmente, as fibras sintéticas substituem materiais pesados como o alumínio, principalmente nas áreas automobilística e aeroespacial. São usadas comercialmente especialmente as fibras de vidro, carbono e kevlar. Revolucionárias na indústria, as fibras sintéticas diminuíram o custo e o peso de diferentes estruturas e equipamentos. No entanto, tais fibras como materiais não-biodegradáveis e de difícil reciclagem resultam em prejuízos ambientais. Fatores que aumentam intensivamente a preocupação na procura de materiais biodegradáveis que possam substituir as mesmas (Oliveira, 2015).

4.7.2. Fibra de vidro:

A fibra de vidro é a sintética mais conhecida no mercado. Possui excelentes propriedades como: baixa densidade e custo produtivo conjuntamente com boa resistência à flexão, tração e impacto. Utiliza-se principalmente em reforço de estruturas. Contudo, a fibra de vidro possui problemas como sua não-renovabilidade, não-reciclabilidade, prejudicialidade à saúde e outros fatores.

No entanto, devido às suas fortes qualidades em sua utilização conjunta com outros materiais, as fibras de vidro são usadas constantemente como reforço de compósitos poliméricos (OLIVEIRA, 2015). A Figura 5 ilustra uma fibra de vidro.

Figura 5 - Fibra de vidro.



Fonte: Elaboração do autor.

Como já discutido anteriormente, devido aos problemas gerados ao meio ambiente, associados ao uso das fibras sintéticas, o uso de novos materiais está cada vez mais sendo inserido na disputa mercadológica. Nesse aspecto podemos ressaltar o uso das fibras naturais. A Tabela 5 compara algumas características das fibras naturais e das fibras de vidro.

Tabela 5 – Comparação entre fibras naturais e fibras de vidro (continua)

Comparação entre fibras naturais e fibras de vidro		
	Fibras Naturais	Fibras de Vidro
Densidade	Baixo	Dobro das fibras naturais

Tabela 5 – Comparação entre fibras naturais e fibras de vidro (conclusão)

Comparação entre fibras naturais e fibras de vidro		
Custo	Baixo	Baixo, mas superior a fibras naturais
Renovável	Sim	Não
Reciclável	Sim	Não
Consumo de energia	Baixo	Alta
CO2 neutro	Sim	Não
Abrasão para máquinas	Não	Sim
Risco à saúde quando inalado	Não	Sim
Eliminação	Biodegradável	Não-biodegradável

Fonte: Wambua et al. (2003).

4.7.3 Fibras naturais

As Fibras naturais podem ser definidas como aquelas encontradas diretamente na natureza, classificam-se como animais, vegetais ou minerais. Devido as suas características biodegradáveis e recicláveis, as fibras naturais tem ganhado destaque em estudos e pesquisas de nível mundial. O objetivo é utilizar esse material para substituir àqueles que são nocivos a natureza.

No Brasil, exemplos de fibras naturais encontradas no território nacional são as de sisal, coco, juta, rami, carauá, bagaço de cana-de-açúcar e soja. A Tabela 6 demonstra a densidade e algumas propriedades mecânicas de diversas fibras naturais (MARINELLI, 2008).

Tabela 6 – Densidade e propriedades mecânicas de fibras naturais (continua)

Fibra	Densidade (g/cm³)	Alongamento	Tensão na ruptura (MPa)	Módulo de Young (GPa)
Algodão	1,5-1,6	7,0 – 8,0	287-597	5,5-12,6
Juta	1,3	1,5-1,8	393-773	26,5
Rami	-	3,6-3,8	400-938	61,4-128
Linho	1,5	2,7-3,2	345-1035	27,5
Sisal	1,5	2,0-2,5	5511-635	9,4-22
Fibra de côco	1,2	3,0	175	4,0-6,0

Tabela 6 – Densidade e propriedades mecânicas de fibras naturais (conclusão)

Vidro-E	2,5	2,5	2000-3500	70,0
Vidro-S	2,5	2,8	4750	86
Aramida(normal)	1,4	3,3-3,7	3000-3150	63,0-67,0
Carbono (padrão)	1,4	1,4-1,8	4000	230-240
Curauá	1,4	4,2	890-4200	50,4

Fonte: Marinelli (2008).

Já foi discutido que o território brasileiro é rico em uma vasta variedade de plantas, o que traz uma necessidade de exploração do mesmo com o objetivo de explorar novos tipos de fibras que possam substituir os materiais de reforço convencionais.

Por exemplo, a Amazônia tem uma área florestal aproximada de 3,6 milhões de quilômetros quadrados, a qual possui uma diversidade incalculável de vegetais. Algumas vantagens de exploração e utilização das fibras naturais são: aumento de empregos, reciclabilidade e bio-degradabilidade. O uso dessas fibras gera compósitos de custos menores e mais leves comparados às fibras sintéticas (MONTEIRO et al., 2011).

A Tabela 7 compara algumas propriedades de fibras naturais e fibras sintéticas.

Tabela 7 – Propriedades de fibras naturais e sintéticas (continua)

Fibras	Densidade (g/cm³)	Tensão Máxima (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Máximo (MPa.cm³ /g)
Bambu (<i>Bambusa vulgaris</i>)	1,03 - 0,49	106	-	-
Banana (<i>Musa sapientum</i>)	0,67 – 1,50	700-800	27-32	1194
Buriti (<i>Mauritia flexuosa</i>)	0,63 – 1,12	129 -254	-	403
Coco (Cocos nucifera)	1,15-1,52	95-220	4-6	191
Algodão (<i>Gossypium M.</i>)	1,51-1,60	287-800	6-13	530
Curauá (<i>Ananas erectifolium</i>)	0,57-0,92	117-3000	27-80	2193
Linho (<i>Linum esitatissimum</i>)	1,30-1,50	3,44-1035	26-28	496

Tabela 7 – Propriedades de fibras naturais e sintéticas (conclusão)

Fibras	Densidade (g/cm³)	Tensão Máxima (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Máximo (MPa.cm³ /g)
Juta (Corchorus capsularis)	1,30-1,45	193-800	13-27	615
Piassava (attalea funifera)	1,10-1,45	109-1750	5-6	1591
Abacaxi (ananás comuscos)	1,44-1,56	362-1627	35-83	1130
Rami (Boehmeria nivea)	1,5	400-1620	61-128	1080
Sisal (agave sisalana)	1,26-1,50	287-913	9-28	725
Madeira macia	0,46-1,50	112-1000	11-40	2174
Vidro	2,50-2,58	2000-3450	70-73	1380
Carbono	1,78- 1,81	2,500-6,350	230-400	3567
Aramida	1,44	3000-4100	63-131	2847

Fonte: Monteiro et al. (2011).

4.7.4 Fibra de buriti

O buriti (*Mauritia flexuosa*) é encontrado em abundância em diversas regiões do território brasileiro como a floresta Amazônica, cerrado e planícies alagadas do centro-oeste, norte e nordeste do país. Identificado como a planta da água, devido a sua característica de manutenção da umidade do solo o que impede que rios sejam assoreados. Quando caem nos riachos, seus frutos são carregados pela água, o que auxilia a dispersar a espécie por toda a região. Seus frutos são fonte de alimento para as antas, capivaras, araras e cutias, que auxiliam a espalhar as sementes pelo solo. Essa cooperação mútua entre planta e animais auxilia a manter a flora do buriti e embelezar a paisagem do Cerrado. A planta pode ser quase 100% aproveitada (BARBOSA, 2011).

O buriti tem muitas utilidades: rico em vitaminas A, B e C, fornece cálcio, ferro e proteínas. Seu fruto é consumido geralmente ao natural, mas também em forma de sucos, doces, licores e sobremesas. O óleo extraído da fruta é utilizado pelos habitantes da região do Cerrado como vermífugo, energético e no processo de cicatrização da pele. Sua folhagem gera fibras usadas em artesanatos como: bolsas, toalhas, brinquedos e tapetes. A Figura 6 ilustra uma palmeira de Buriti.

Figura 6 – Palmeira de Buriti.



Fonte: Lorenzi et al. (2004).

A variedade de usos dessa palmeira, auxiliou em sua escolha para este estudo. Devido ao seu baixo custo e extensa área de atuação mercadológica, o buriti se mostra um ótimo objeto para realização dos experimentos. Sua exploração auxilia no crescimento de empregos e geração de renda para diferentes comunidades carrarenses. Pensando em todas as características citadas anteriormente, que este trabalho realizou os ensaios de propriedades mecânicas descritos a seguir.

4.8 ENSAIO DE TRAÇÃO

No ensaio de tração, é analisado um protótipo submetido à uma carga axial, o qual gera longitudinalmente no material um esforço crescente, ao mesmo tempo são colhidos dados como tensão aplicada e deformação do material testado. Utiliza-se uma máquina neste tipo de ensaio que é projetada para alongar o corpo de prova a uma taxa constante, e também medir repetidamente e simultaneamente a carga aplicada e o alongamento do material em teste. Nos dias atuais, o resultado é registrado num computador conectado via software à máquina, o qual realiza o levantamento de gráficos da carga em função do alongamento (CALLISTER, 2002).

Os resultados dos ensaios de tração são usados objetivando a seleção de materiais aplicáveis em engenharia, portanto, esses ensaios são realizados por diferentes motivos. A execução desses ensaios geram propriedades mecânicas, as quais, são estudadas com o objetivo de desenvolver novos materiais e novos processos de fabricação, dessa forma, pode-se comparar diferentes processos e características desses materiais. (CALLISTER, 2002).

A resistência de um material é testada ao se obter a tensão necessária para deformá-lo de forma permanente e também qual a tensão máxima suportada pelo mesmo antes de ocorrer a fratura. Outra característica importante do material analisada é a ductilidade.

Define-se ductilidade como a capacidade de deformação de um material antes de sua fratura. Sendo assim, se a ductilidade é baixa em um ensaio de tração, ela geralmente é acompanhada de baixa resistência à fratura ao se submeter o material a outro tipo de carga. Nesse tipo de ensaio também podemos encontrar propriedades elásticas, no entanto, para a obtenção de resultados mais precisos torna-se necessária a aplicação de equipamentos e técnicas específicas, como por exemplo, o ultrassom. (CALLISTER, 2002).

4.9 PROPRIEDADES TENSÃO-DEFORMAÇÃO

O tamanho do corpo de prova irá afetar as propriedades de tensão-deformação dos materiais. Torna-se necessário, por exemplo, dobrar a carga para produzir o mesmo alongamento se a área da seção transversal do corpo de prova for dobrada. Com o objetivo de minimizar esses fatores geométricos, a carga e o alongamento foram normalizados para os respectivos parâmetros tensão de engenharia e deformação de engenharia. Tensão de engenharia σ é definida pela relação mostrada:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

Onde F é a carga instantânea aplicada perpendicularmente à área da seção transversal, sua unidade é (N) ou (lbf), e A_0 é a área da seção transversal inicial do corpo de prova, em (m²) ou (pol²). As unidades resultantes para tensão de

engenharia são (MPa) pelo sistema internacional e (psi) pelo sistema americano. No caso da deformação de engenharia temos a seguinte relação.

$$\varepsilon = \frac{li - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2)$$

Na qual l_0 é o comprimento inicial antes da carga ser aplicada e li o comprimento instantâneo. A diferença entre eles é expressa como Δl , e é a deformação sofrida até o momento medido. A deformação não possui unidade, e comumente é expressa em %, sendo necessária assim a multiplicação da mesma por 100⁴.

O grau de deformação de uma estrutura depende da tensão aplicada. Para a maioria dos metais que são tensionados com cargas baixas, a tensão e deformação elástica são proporcionais pela relação:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (3)$$

Nessa relação, também conhecida como lei de Hooke, a constante de proporcionalidade E (GPa ou psi)⁶ é o módulo de elasticidade do material, ou módulo de Young. A Tabela 8 mostra exemplos desse valor em alguns metais (Callister, 2002).

Tabela 8 - Módulo de Young à Temperatura Ambiente para metais.

Ligas metálicas	Modulo de Elasticidade	
	Gpa	10 ³ psi
Alumínio	69	10
Bronze	97	14
Cobre	110	16
Magnésio	45	6.5
Níquel	207	30
Aço	207	30
Titânio	107	15.5
Tungstênio	407	59

Fonte: Callister (2002).

4.10 DEFORMAÇÃO ELÁSTICA

A deformação elástica acontece no período em que a tensão é proporcional à deformação, obedecendo assim a lei de Hooke (equação 3). O coeficiente angular ilustrado como “Slope” na Figura 07, é o módulo de elasticidade E , que também representa a resistência do material em se deformar permanentemente (CALLISTER, 2002).

Figura 7 - Diagrama Tensão-Deformação Mostrando Deformação Elástica Linear.

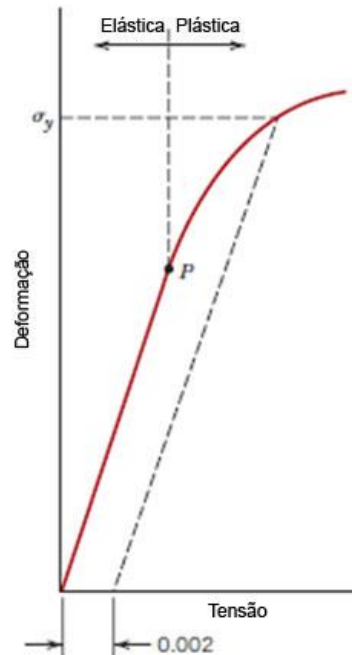


Fonte: Callister (2002).

4.11 DEFORMAÇÃO PLÁSTICA

Após a região elástica existe um período de transição para a região plástica, chamado de escoamento e ilustrado pela letra y (*yield*) na Figura 08. Na região plástica ocorre uma parcial deformação plástica, não mais obedecendo a lei de Hooke. Analisa-se também o limite de proporcionalidade P e a tensão de escoamento σ_y .

Figura 8 - Comportamento tensão-deformação de um típico metal.



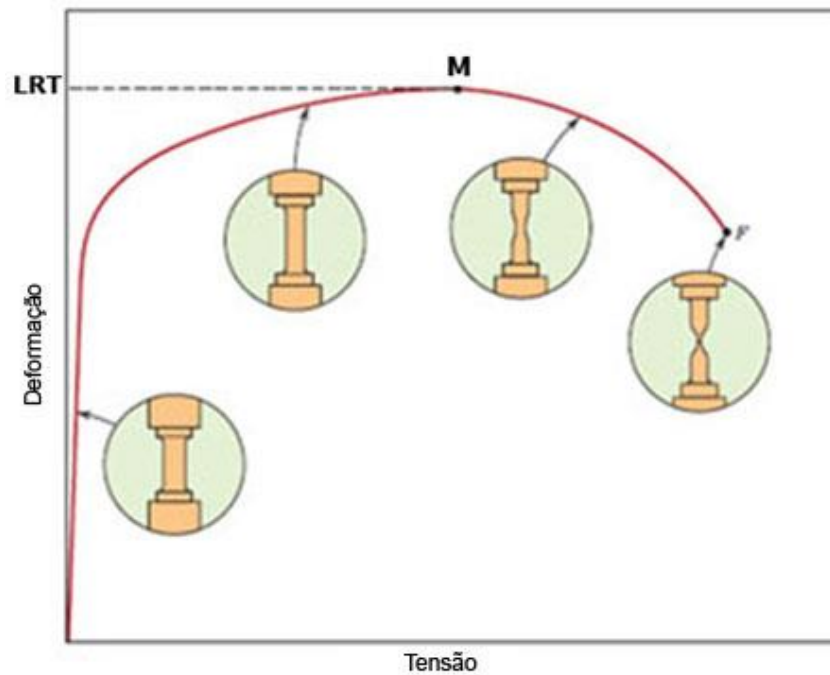
Fonte: Callister (2002).

Pode-se considerar σ_y como a tensão onde se produz uma deformação residual de 0,2% ($\epsilon = 0,002$)⁴.

4.12 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Depois do escoamento a tensão necessária para conservar a deformação cresce, chegando ao seu máximo em M da Figura 09. Nesse ponto da curva, a tensão é denominada de tensão máxima ou limite de resistência a tração (LRT). O ponto F representa o ponto de fratura ou rompimento do material.

Figura 9 - Curva tensão-deformação típica de metais.

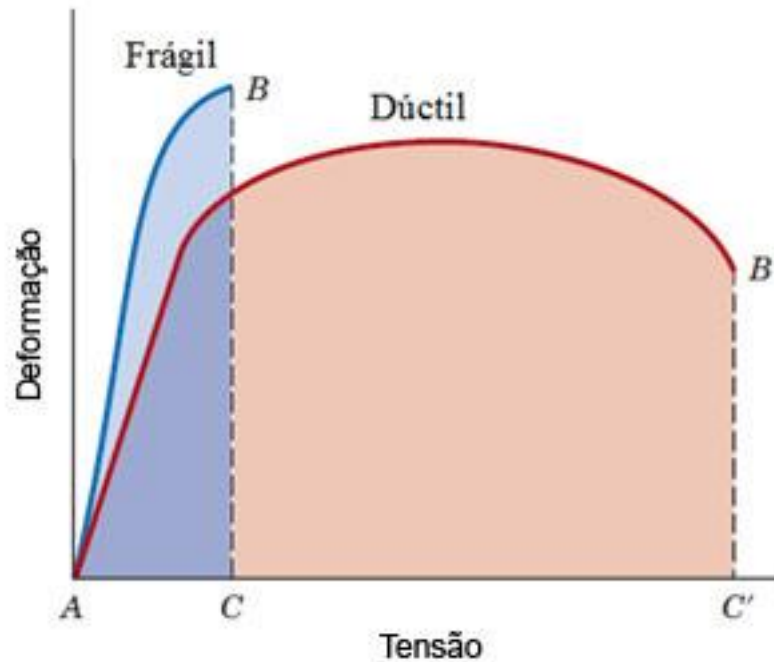


Fonte: Callister (2002).

4.13 DUCTILIDADE

Uma propriedade mecânica muito importante no estudo de materiais é a ductilidade. A ductilidade é uma propriedade mecânica muito relevante no estudo de materiais. A ductilidade é o grau de deformação plástica que se sustenta até a fratura, como ilustra a Figura 10. Analisaram-se dois tipos de materiais, que são representados na curva tensão-deformação até a fratura de um material frágil em comparação à um material dúctil.

Figura 10 - Representação esquemática do comportamento tensão-deformação de materiais dúcteis e frágeis.



Fonte: Callister (2002).

Indica-se a ductilidade por porcentagem de alongamento e porcentagem de redução de área. A porcentagem de alongamento %EL é o percentual de deformação plástica até a fratura como é definido:

$$\%EL = \left(\frac{l_f - l_0}{l_0} \right) \times 100 \quad (3.4)$$

Onde l_f é a medida do corpo de prova no momento da fratura e l_0 é a medida original da peça.

4.14 TENACIDADE

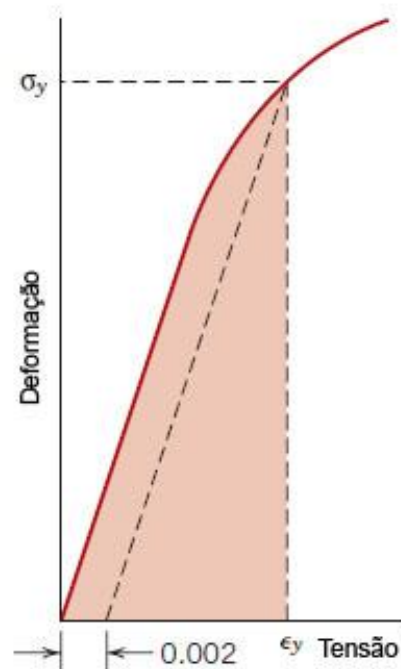
Na mecânica define-se tenacidade como a habilidade de absorção energética do material até o ponto de fratura. Pode-se calcular a tenacidade através dos resultados do ensaio de tração para situações estáticas (pequena taxa de deformação), sendo da área sob curva até a fratura, e possui as mesmas unidades do módulo de resiliência. A tenacidade de materiais dúcteis e frágeis pode ser comparada na Figura 10 analisando as áreas ABC e $A'B'C'$.

4.15 RESILIÊNCIA

Define-se resiliência como a capacidade de absorção de energia de um quando o mesmo é deformado elasticamente e depois, retirando a carga, ter essa energia recuperada. A propriedade relacionada é o módulo de resiliência U_r , sendo energia de deformação por unidade de volume exigida para tencionar um material a partir de um estado com ausência de carga até a sua tensão limite de escoamento. Em termo computacional, o módulo de resiliência é a área sob a curva tensão-deformação até o escoamento Figura 11, ou seguindo a equação:

$$U_r = \int_0^{\epsilon_y} \sigma d\epsilon$$

Figura 11 - Representação esquemática de como o Módulo de Resiliência é obtido.



Fonte: Callister (2002).

4.16 RESISTÊNCIA À PROPAGAÇÃO DE TRINCAS (K_{1C})

Grande concentração de tensões ocorrem nos materiais que tem defeitos ou apresentam bolhas e entalhes, o que pode causar o rompimento dos mesmos

quando são submetidos a um esforço. Esse rompimento decorre de acordo com a tensão aplicada, da natureza do material e do tamanho da deformidade.

Encontra-se uma propriedade importante na habilidade de um material à resistência de fratura quando uma trinca está presente, tal propriedade é chamada de resistência a propagação de trincas (K_{1c}).

Nos ensaios de resistência à propagação de trincas são usados frequentemente materiais frágeis. Uma trinca é feita no material a ser testado, induzindo a concentração de tensões. São usados corpos de provas padrão com intenção de tracionar o material até o ponto de ruptura. A determinação da resistência à propagação de trincas é feita de acordo com a norma ASTM E399 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS– ASTM, 1990) no modo tensão, usando a seguinte equação:

$$K_{1c} = Y\sigma_0 a^{1/2} \quad (5)$$

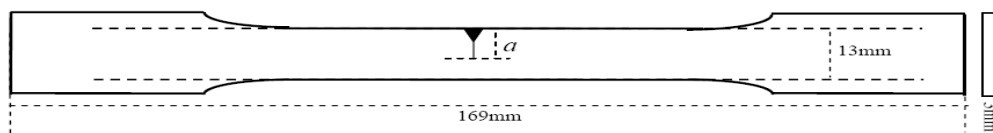
na qual:

$$Y = \left[1,99 - 0,41 \left(\frac{a}{w} \right) + 18,7 \left(\frac{a}{w} \right)^2 - 38,48 \left(\frac{a}{w} \right)^3 + 53,85 \left(\frac{a}{w} \right)^4 \right] \quad (6)$$

$$e \sigma_0 = \frac{P_b}{Bw} \quad (7)$$

onde P_b é a tensão no momento da fratura, B e w são a espessura e a largura da amostra e a é o comprimento da trinca induzida no corpo de prova, conforme representado na Figura 12.

Figura 12 - Modelo de corpo de prova utilizado nos ensaios de K_{1c} .

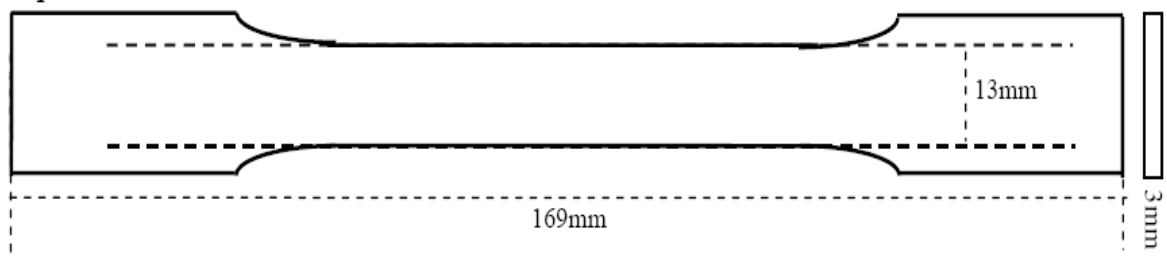


Fonte: American Society for Testing and Materials- ASTM (1990).

4.17 CORPO DE PROVA PARA ENSAIO DE TRAÇÃO

Visualiza-se na Figura 13: o típico corpo-de-prova usado na realização do Ensaio de Tração. Suas extremidades são mais largas quando comparadas ao centro da peça, com o objetivo de facilitar sua fixação na máquina de ensaio. A parte mais importante é o centro da peça, pois é a região onde o material sofrerá a deformação e a fratura. Com o objetivo de assegurar resultados mais consistentes, foram atribuídas normas técnicas padrão. Não existe norma própria da ABNT ao se realizar ensaios em polímeros. Dessa maneira, para os futuros estudos é necessária a adequação das medidas do corpo-de-prova de acordo com a norma internacional ASTM – American Society for Testing and Materials.

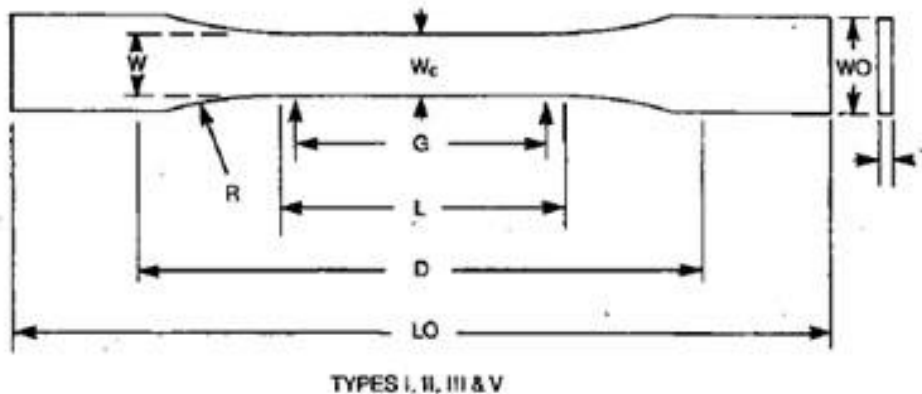
Figura 13 - Corpo de Prova Tipo 1 para Ensaio de Tração.



Fonte: American Society for Testing and Materials- ASTM (1990).

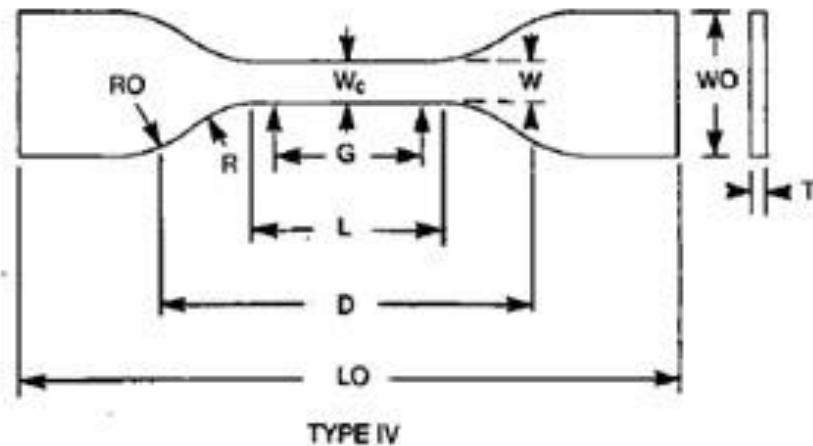
Com a interpretação da norma ASTM D638, e análise das Figuras 14a e 14b pode-se observar que os corpos de prova para ensaios de tração em polímeros.

Figura 14a - Tipos de Corpos de Prova para ensaios de Polímeros em Tração.



Fonte: American Society for Testing and Materials- ASTM (200-).

Figura 14b - Tipos de Corpos de Prova para ensaios de Polímeros em Tração.



Fonte: American Society for Testing and Materials - ASTM (200-).

O corpo de prova é fabricado ao se escolher o tipo do mesmo, e assim, são definidas as dimensões, como demonstra a Tabela 9.

Tabela 9 - Dimensões para Corpo de prova de Polímeros por Espessura.

Dimensões (ver desenhos)	Dimensão do Espécime para Espessura T , mm (in.) ^A					Tolerâncias
	7 (0.28) ou sob		Mais de 7 a 14 (0.28 to 0.55), incl		4 (0.16) ou sob	
	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV ^B	Tipo V ^{C,D}	
W - Largura da Seção Estreita ^{E,F}	13 (0.50)	6 (0.25)	19 (0.75)	6 (0.25)	3.18 (0.125)	± 0.5 (± 0.02) ^{B,C}
L - Comprimento da Seção Estreita	57 (2.25)	57 (2.25)	57 (2.25)	33 (1.30)	9.53 (0.375)	± 0.5 (± 0.02) ^C
WO - Largura Total, min ^G	19 (0.75)	19 (0.75)	29 (1.13)	19 (0.75)	...	+ 6.4 (+ 0.25)
WO - Largura Total, min ^G	...	...	...	...	9.53 (0.375)	+ 3.18 (+ 0.125)
LO - Comprimento TOTAL, min ^H	165 (6.5)	183 (7.2)	246 (9.7)	115 (4.5)	63.5 (2.5)	no max (no max)
G - Longitude Do Aparelho ^I	50 (2.00)	50 (2.00)	50 (2.00)	...	7.62 (0.300)	± 0.25 (± 0.010) ^C
G - Longitude Do Aparelho ^I	...	...	...	25 (1.00)	...	± 0.13 (± 0.005)
D - Distância entre Apertos	115 (4.5)	135 (5.3)	115 (4.5)	65 (2.5) ^J	25.4 (1.0)	± 5 (± 0.2)
R - Raio de Filete	76 (3.00)	76 (3.00)	76 (3.00)	14 (0.56)	12.7 (0.5)	± 1 (± 0.04) ^C
RO - Raio Externo (Tipo IV)	...	...	...	25 (1.00)	...	± 1 (± 0.04)

Fonte: American Society for Testing and Materials- ASTM (200).

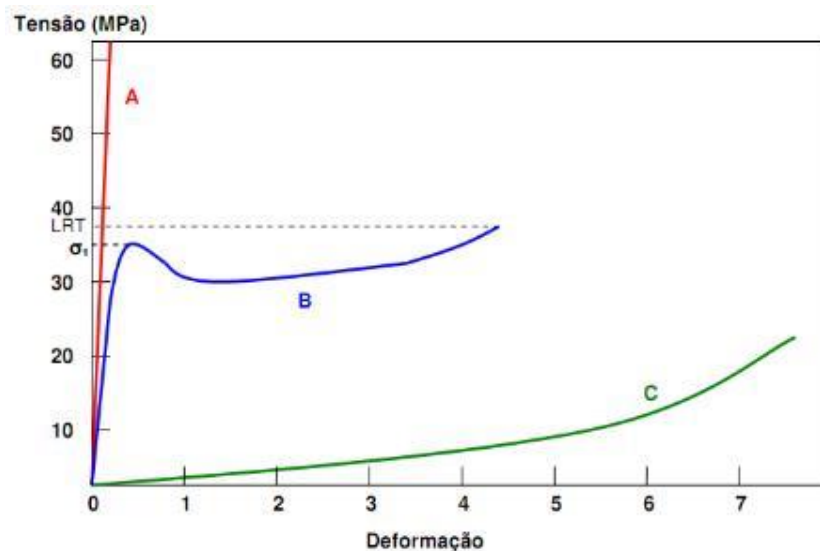
4.18 COMPORTAMENTO TENSÃO-DEFORMAÇÃO DOS POLÍMEROS

Os polímeros tem características mecânicas que possuem sensibilidade à taxa de deformação, ao ambiente e à temperatura. Dessa maneira, mudanças nos

corpos de prova são necessárias como também nas técnicas de ensaio usadas com metais, por exemplo.

Encontram-se três tipos de comportamento diferentes de tensão-deformação nos polímeros, como apresentado na Figura 15. Na curva A pode-se visualizar o comportamento de um polímero frágil, onde sua fratura ocorre enquanto se deforma elasticamente. A curva B representa o comportamento de um material plástico, que possui certa semelhança quando comparado com a curva tensão-deformação de materiais metálicos; inicialmente a deformação é elástica, seguida por escoamento e por uma região de deformação plástica. Finalmente, a curva C representa materiais com características totalmente elásticas, também conhecidos como elastômeros.

Figura 15 - Curvas Tensão-Deformação Típicas para Diferentes Polímeros.



Fonte: Callister (2002).

4.19 TERMOGRAVIMETRIA (TGA)

A termogravimetria é um ensaio térmico que pode ser realizado em diferentes - atmosferas gasosas, taxas de aquecimento e massa das amostras - utilizado para verificação da perda ou ganho da variação de massa em função da temperatura. A técnica utilizada tem a função de identificar a temperatura de degradação do material.

4.20 CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA (DSC)

Com o objetivo de realizar uma análise térmica que mede a temperatura e fluxo de calor em função do tempo e da temperatura, é usada uma técnica denominada de calorimetria diferencial de varredura (DSC). A Calorimetria diferencial de varredura gera medidas que fornecem dados a respeito das mudanças químicas e físicas dos processos endotérmicos e exotérmicos, ou variações de capacidade de calor.

Dois tipos de equipamentos DSC são utilizados: o calorímetro controlado por fluxo de calor, na qual as amostras e a referência são colocadas em porta amostras que se situam na plataforma de um disco de constantan. Este tipo de DSC irá fazer o registro da diferença de potência fornecida para a amostra e para a referência que é obtida através da transferência deste fluxo para as porta amostras da amostra e referência.

Existe outro tipo de DSC que é o controlado por compensação de potência, nele a amostra e a referência funcionam como um calorímetro, tendo suas temperaturas igualadas. Registra-se a quantidade de calor requerida para manter estas temperaturas iguais em função do tempo ou da temperatura de aquecimento.

Aplica-se o DSC na medição da temperatura de transição vítrea, fusão, cristalização; reações de cura; capacidade calorífica de materiais.

4.21 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura para o estudo de estruturas superficiais em imagens tridimensionais é muito útil já que gera imagens de fácil interpretação. Uma das técnicas de microscopia eletrônica no estudo da estrutura e morfologia de materiais é a MEV, pois essa técnica se mostra muito valiosa no estudo de possíveis falhas em materiais compósitos, falhas como cavidades provocadas por bolhas, trincas e de ligação interfacial entre fibra e matriz.

Ao contrário do microscópio ótico, que usa a luz para a formação da imagem, a MEV utiliza elétrons, o que gera a obtenção de uma alta resolução na imagem.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 MOLDE DO CORPO DE PROVA

Na primeira fase se produziu o molde para a confecção dos corpos de prova. Foi criado um molde de silicone (BS adesivo azul), em laboratório, com o objetivo de facilitar a retirada dos corpos de prova. O silicone é um material maleável que não possibilita ao corpo de prova grudar, dessa forma, ele é dobrado e retirado sem dificuldades do mesmo.

Foi usada na criação do molde uma base reta de alumínio, a qual foi preenchida com cola quente, vários pedaços de madeira, criando um retângulo. No interior desse retângulo, foram inseridos corpos de prova padrões feitos de PVC, para que ocupem o espaço necessário para confecção dos novos corpos.

Despejou-se o silicone líquido até completar o retângulo e então, após o endurecimento do silicone, o molde se formou. A Figura 16 demonstra partes do processo citado anteriormente:

Figura 16 – Processo de montagem do molde em silicone.



Fonte: Elaboração do autor.

5.2 RESINA EPOXÍDICA E AGENTE DE CURA UTILIZADOS

Foi utilizada resina epoxídica do tipo éter diglicídico do bisfenol A (DGEBA) (SQ 2001 BB), devidamente misturada ao endurecedor trietileno tetramina (TETA) (SQ 3154 BB) na proporção estequiométrica correspondente ao $\text{phr} = 50$ (50 partes de endurecedor por 100 partes de resina).

5.3 FIBRAS DE BURITI

As fibras naturais foram conseguidas de empresa especializada na comercialização de materiais fibrosos. Elas vêm juntas e trançadas, como se pode observar na Figura 17. Seu tamanho varia de 80 cm a 1m de comprimento.

As fibras são separadas por um processo manual, na busca de encontrar aquelas com diâmetros aproximados de 0,17 milímetros e comprimento de 30 milímetros.

Figura 17 – Fibra de Buriti.



Fonte: Elaboração do autor.

Para a caracterização dimensional da fibra de buriti foram retiradas aleatoriamente 100 fibras seus diâmetros foram medidos em um projetor de perfil modelo DIGIMESS MODEL 400, disponível no Laboratório de Metrologia Universidade Anhanguera Campo Grande MS- Unidade 2, mostrado na Figura 18.

As medidas de diâmetro foram realizadas em cinco posições ao longo da fibra. Em cada posição foi obtida uma segunda medida girando a fibra em 90 graus e considerando-se a média das duas medidas nesta posição.

Este procedimento foi adotado devido ao fato da seção reta da fibra não ser perfeitamente circular. Ou seja, em toda fibra existe uma excentricidade no diâmetro. Com base nestas medidas de diâmetro e comprimento das 100 fibras, foi realizada uma análise estatística com elaboração de histograma de distribuição dimensional e cálculo dos diâmetros.

Figura 18 – Projetor DIGIMESS MODEL 400, utilizado para medir os diâmetros das fibras de Buriti.



Fonte: Laboratório de Metrologia Universidade Anhanguera Campo Grande MS- Unidade 2.

5.4 COMPOSIÇÃO DOS COMPÓSITOS

Ao adicionar fibras à resina, observou-se que, manualmente a saturação máxima permitida foi de 17,6 % em massa de fibra. Com isso, misturou-se à resina

epoxídica (DGEBA/TETA) fibras com porcentagens em massa de 1%, 5%, 10%, 15% e 17,6%.

Com o objetivo de confrontar realizou-se corpos de prova com a resina epoxídica (DGEBA/TETA) pura, ou seja, sem a adição de fibras (0 %).

Foi usado como agente de cura uma amina alifática (SQ 3154 BB), já que esta possui alguns benefícios que são adequados ao trabalho, tais como baixa viscosidade e cura à temperatura ambiente.

5.5 PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

A mistura fibra/DGEBA/TETA foi realizada num recipiente plástico. Utilizou-se uma vareta para realizar a mistura, durante 1 minuto. Adicionou-se à mistura ao molde, momento em que se aguardou o processo de cura, o que levou cerca de 6 a 8 horas. Ao final foram retirados os corpos de prova e armazenados em ambiente próprio até o momento dos ensaios de tração. Podemos observar a variação dos corpos de prova na Figura 19:

Figura 19 - Corpo de prova de tração.



Fonte: Elaboração do autor

Usando um pincel revestiu-se todo o molde de silicone com o fluido desmoldante (CHL) da Redelease, com o objetivo de facilitar a retirada sem danos do corpo de prova.

Para a realização dos ensaios térmicos DSC e TGA os corpos de prova foram confeccionados, utilizando a superfície do corpo de prova fraturado do ensaio de

tração. A superfície fraturada foi transformada em pó e armazenada em recipientes plásticos conforme pode-se visualizar na Figura 20:

Figura 20 - Corpo de prova de DSC / TGA.



Fonte: Elaboração do autor.

5.6 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

5.6.1 Ensaio de tração

Com objetivo de caracterizar as propriedades mecânicas investigou-se o módulo de elasticidade (E) e o limite de resistência à tração (LRT). Para isso, usou-se uma velocidade de 2,5 mm/min em um máquina de ensaio universal PANTEC VERSAT Figura 21 com célula de carga de 20 kN.

Figura 21 – Máquina de ensaio de tração PANTEC VERSAT.



Fonte: Elaboração do autor.

A máquina de ensaio fornece um gráfico força (*Newton*) x deformação (*mm*) e os dados são automaticamente gerados pelo software Panambra da máquina PANTEC VERSAT.

Para determinar o Limite de Resistência à propagação de trincas (K_{1c}) realizou-se um entalhe usando uma lima agulha triangular, como ilustrado na Figura 22.

Figura 22 - Formato dos corpos de prova utilizados para o ensaio de K_{1c} .



Fonte: Elaboração do autor

A máquina utilizada para o ensaio de K_{1c} foi a mesma que a do ensaio de tração, PANTEC VERSAT com célula de carga de 20 kN.

Figura 23 - Ensaio de tração para determinação do K_{1c} .



Fonte: Elaboração do autor

No cálculo dos resultados, foram usadas no mínimo 4 medidas de cada propriedade mecânica. Ambos os ensaios foram realizados na Universidade Católica Dom Bosco em Campo Grande MS.

5.7 TERMOGRAVIMETRIA (TGA)

As análises TGA foram realizadas em um equipamento da marca SHIMADZU, modelo TGA-50, como demonstrado na Figura 24:

Figura 24 - Equipamento da marca SHIMADZU modelo TGA-50.



Fonte: Elaboração do autor

Os seguintes parâmetros foram usadas na análise termogravimétrica:

- Atmosfera: ar sintético
- Fluxo: 50 mL/min
- Taxa de aquecimento: 10°C/min
- Massa da amostra: 3,8 a 6,78 mg
- Temperatura: 20 a 800°C

Tais análises foram feitas no Instituto de Física da Universidade Federal do Mato Grosso do Sul (UFMS).

5.8 CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA (DSC)

Já as análises de DSC utilizaram um equipamento da marca SHIMADZU modelo DSC 50 em sua realização, conforme a Figura 25:

Figura 25 - Equipamento da marca SHIMADZU modelo DSC 50.



Fonte: Elaboração do Autor.

Os seguintes parâmetros foram usadas na análise de DSC:

- Atmosfera: ar sintético
- Fluxo: 50 mL/min
- Taxa de aquecimento: 10°C/min
- Massa da amostra: 2,6 a 6,3 mg
- Temperatura: 20 a 500°C
- Célula: Alumínio

As análises de DSC também foram realizadas no Instituto de Física da Universidade Federal do Mato Grosso do Sul (UFMS).

5.9 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A MEV foi feita com a intenção de constatar a existência dos microvazios na interação entre a fibra de buriti e a matriz polimérica. Utilizou-se um equipamento MEV JEOL modelo JSM-638OLV, conforme demonstrado na Figura 26:

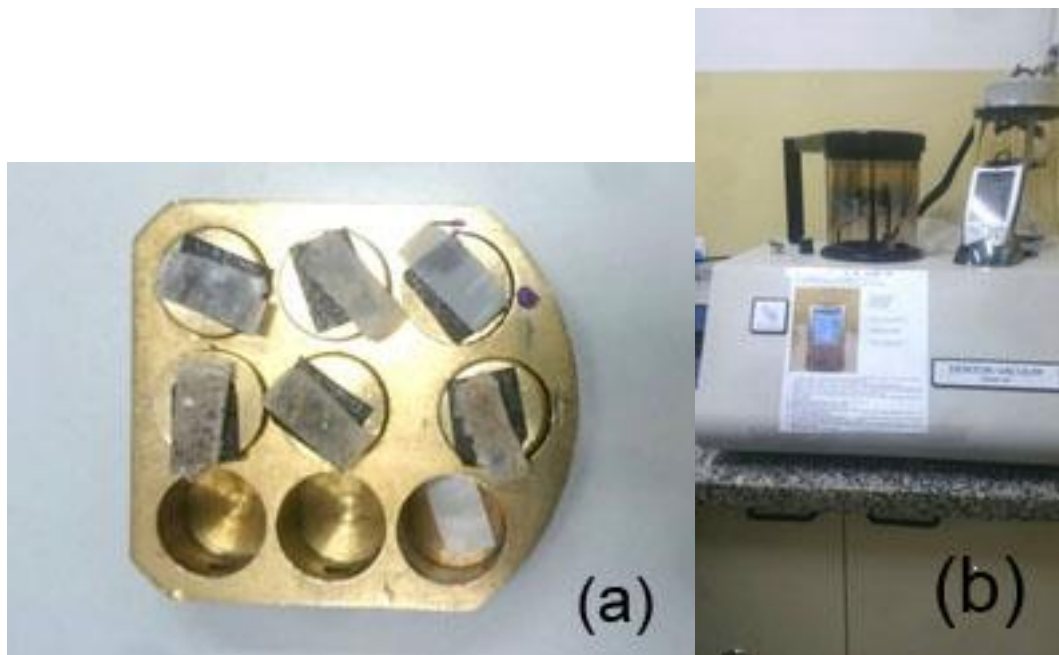
Figura 26 - Equipamento da marca JEOL modelo JSM-638OLV.



Fonte: Elaboração do Autor.

Para a obtenção da superfície condutora prepararam-se os corpos de prova com material coberto em ouro por sputter de baixo vácuo na amostra conforme pode ser visualizado nas Figuras 27a e 27b:

Figura 27 - Porta amostra / Figura 27b: Equipamento Denton Vacuum modelo DESK III.



Fonte: Elaboração do Autor.

Com o uso do equipamento MEV JEOL modelo JSM-638OLV, uma fonte geradora de elétrons de filamento tungstênio, com voltagem máxima de 10 KV, com resolução de 500 μ . A corrente utilizada foi de 69 μ A. Usaram-se ampliações de 50 vezes. As microscopias também foram realizadas no Instituto de Física da Universidade Federal do Mato Grosso do Sul (UFMS).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 OS ENSAIOS

O presente capítulo aborda os resultados obtidos através do estudo da fibra de buriti, bem como o processamento e caracterização das propriedades mecânicas e térmicas de polímeros termorrígidos ao serem modificados com as fibras.

6.1.1 Ensaio de tração em matriz epóxi com e sem adição de fibras de buriti

A Tabela 10 apresenta os Limites de Resistência à Tração (LRT), módulo de elasticidade (E) e K_{1C} , devido aos resultados obtidos no ensaio de tração pela máquina PANTEC VERSAT.

Tabela 10 - Resultados obtidos nos ensaios tração.

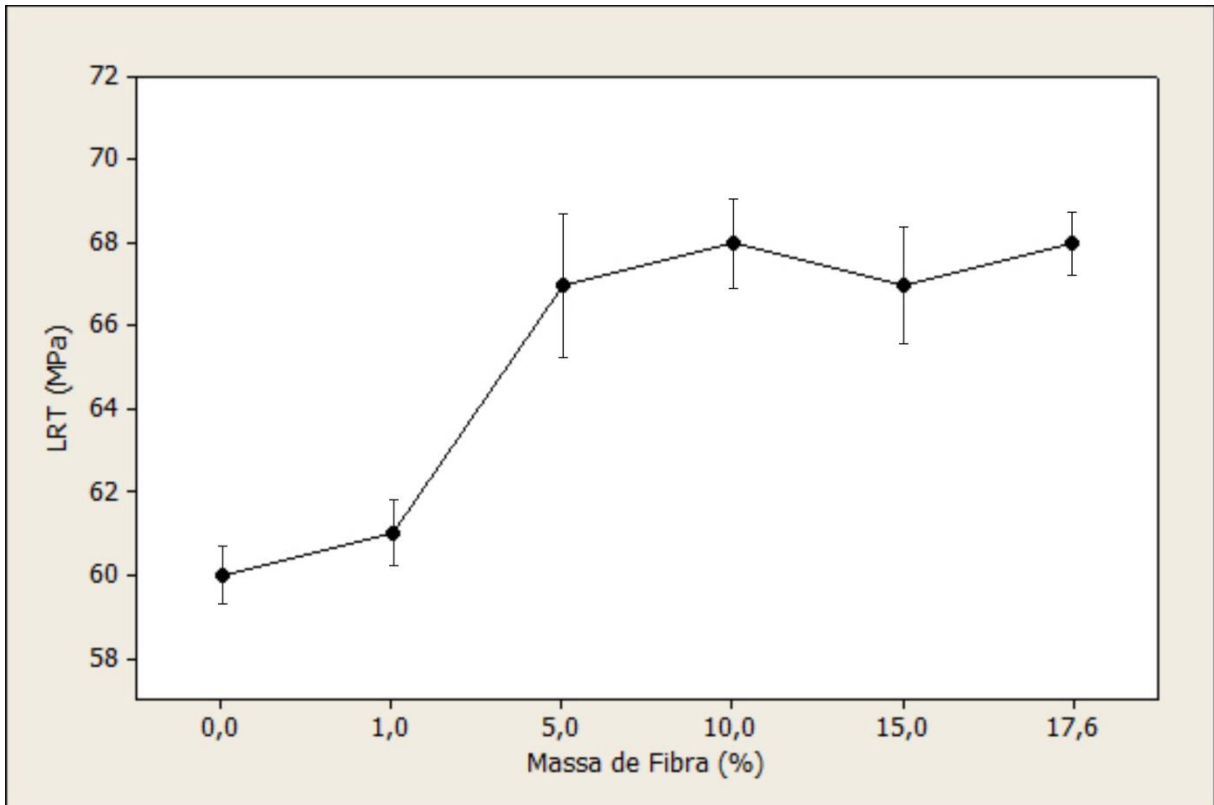
% Fibra	LRT (MPa)	E (MPa)	K_{1C} (MPa.m ^{1/2})
0	60,12 ± 0,66	901,06 ± 7,95	1,26 ± 0,08
1	61,21 ± 0,93	954,66 ± 9,85	1,21 ± 0,26
5	67,32 ± 1,73	977,82 ± 6,27	1,18 ± 0,08
10	68,32 ± 1,08	984,67 ± 7,46	1,18 ± 0,20
15	67,43 ± 1,44	979,91 ± 8,89	1,17 ± 0,06
17,6	68,25 ± 0,75	981,42 ± 9,57	1,18 ± 0,07

Fonte: Elaboração do autor.

6.1.2 Limite de Resistência à Tração (LRT)

Utilizando os dados descritos na Tabela 10, elaborou-se um gráfico de LRT x porcentagem de fibras, que é demonstrado na Figura 28.

Figura 28 - Gráfico obtido no ensaio de tração para LRT.



Fonte: Elaboração do autor.

Devido à homogeneidade dos tamanhos das fibras e sua distribuição uniforme a média de desvio padrão foi baixa atingindo 3,33%.

Podemos visualizar na Figura 28, que o LRT aumenta 1,81% ao comparar o epóxi sem fibra com o compósito com 1% de fibra. Já para um compósito com teor de fibra de 5%, o aumento do LRT mostra-se 11,98% quando comparado com o epóxi sem fibra, e 9,98% quando comparado com o compósito com 1% de fibra. E, verificou-se que para maiores porcentagens de fibras presentes no compósito, o LRT permanece constante.

Observa-se que ao adicionarmos 1% de fibra, o LRT praticamente não sofreu alterações, devido à baixa concentração de fibras presentes no compósito. Ao se acrescentar no compósito 5% de fibra, identifica-se um aumento significativo no LRT e, sendo o LRT da fibra de buriti compreendido em **129 a 254 MPa**, atribui-se esse aumento a uma concentração superior das fibras, resultando em uma maior transferência da tensão aplicada na matriz (epóxi) para as fibras

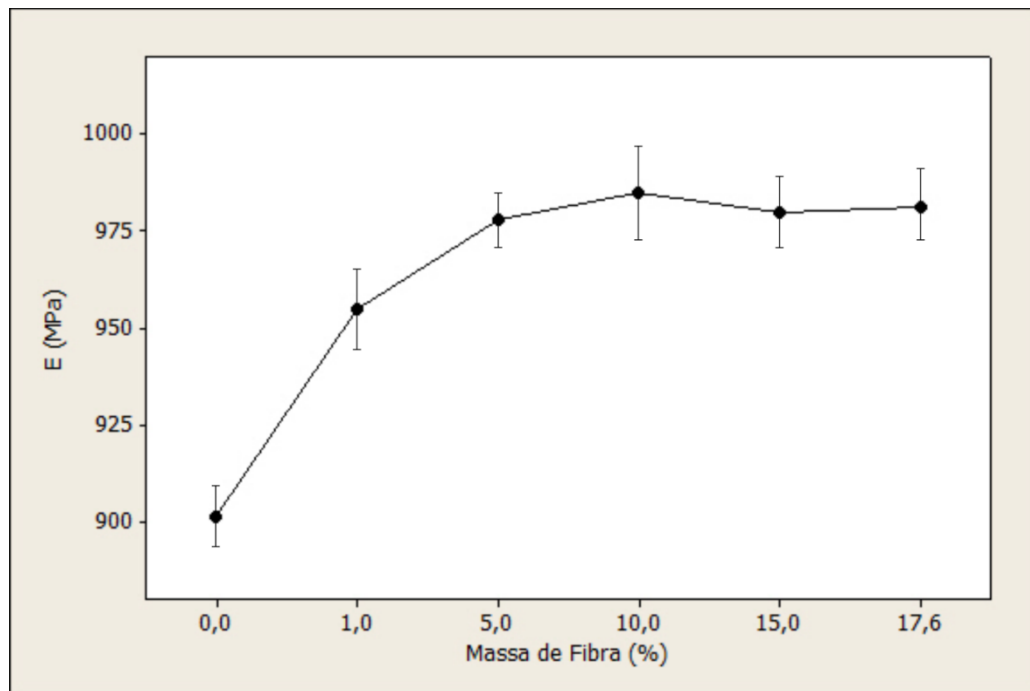
Pelo fato da fibra aderir-se fortemente a matriz, esperava-se que houvesse aumento no LRT, conforme aumentasse a porcentagem de fibras no compósito.

Contudo, nota-se que nos compósitos com 10%, 15% e 17,6% de fibra, houve uma constância nos resultados. Isso ocorre pelo fato que ao adicionar maior quantidade de fibras (reforços) ao compósito, também aumenta o número de pontos (bolhas) de concentração de tensão, com isso, o material se torna mais frágil.

6.2 MÓDULO DE ELASTICIDADE (E)

Utilizando os dados descritos na Tabela 10, elaborou-se um gráfico de E x porcentagem de fibras, que é demonstrado na Figura 29.

Figura 29 - Gráfico obtido no ensaio de tração para E.



Fonte: Elaboração do autor

A média do desvio padrão para o E foi de 1,01% sendo este baixo devido a homogeneidade e uniformidade discutidas no item anterior (LRT x porcentagem de fibras).

Através da Figura 29, o E para o compósito com 5% e 10%, aumentou 8,21% em relação a resina pura. Acima de 5% de fibra, ou seja, com 10, 15 e 17,6% de fibras o E continuou constante.

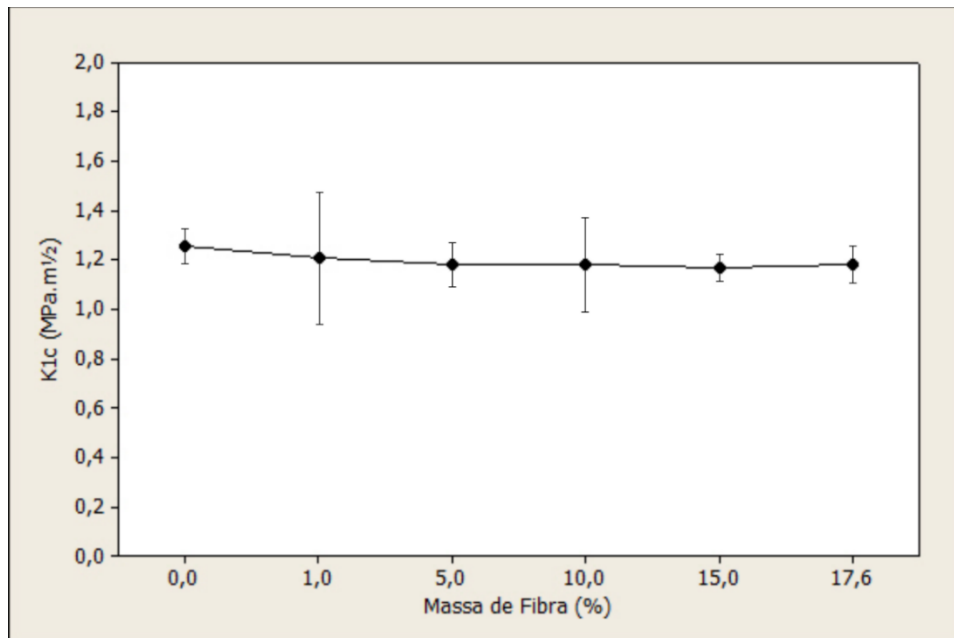
Pelo fato da fibra aderir-se fortemente a matriz, esperava-se que houvesse aumento no E, conforme aumentasse a porcentagem de fibras no compósito.

Contudo, nota-se que nos compósitos com 10%, 15% e 17,6% de fibra, houve uma constância nos resultados. Isso se deve ao aumento de pontos de concentração de tensão, deixando o material mais frágil.

6.3 RESISTÊNCIA À PROPAGAÇÃO DE TRINCAS (K_{1C})

Usando os dados descritos na Tabela 10, elaborou-se um gráfico de K_{1C} x porcentagem de fibras, que é demonstrado na Figura 30.

Figura 30 - Gráfico obtido no ensaio de tração para K_{1C} .



Fonte: Elaboração do autor

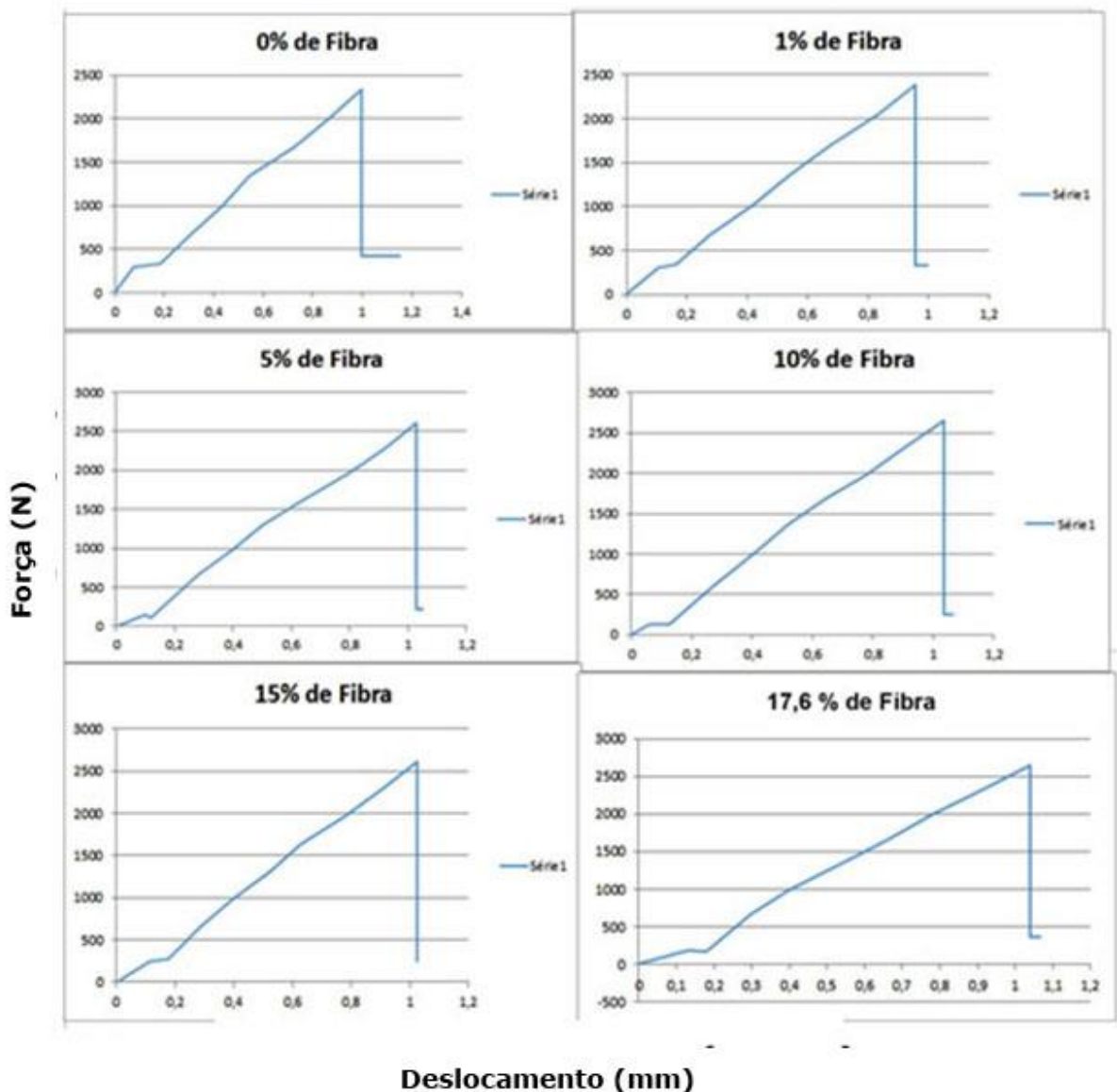
A média de desvio padrão para o K_{1C} foi de 45,33%. O erro nas medidas de K_{1C} apresentou-se um tanto acima dos demais, atribui-se esse erro provocado a se fazer os entalhes nos corpos de provas. O valor de K_{1C} apresentou um pequeno decréscimo quando foi adicionado 1% de fibras (4,13%), conservando-se constante com a adição de mais fibras.

Era de se esperar que a resistência à propagação de trincas diminuísse drasticamente para porcentagens de fibras superiores a 5%, devido os pontos de concentração de tensão. Com o aumento da porcentagem de fibras, nota-se que as mesmas atuaram como uma barreira protetora contra a propagação de trincas, mesmo aumentando a quantidade de pontos de concentração de tensão.

6.4 GRÁFICOS DE FORÇA X DESLOCAMENTO

A Figura 31 mostra os gráficos para os ensaios de força versus deslocamento para os compósitos de epóxi reforçadas com fibra de buriti em porcentagem de massa de 0%, 1%, 5%, 10%, 15% e 17,6%:

Figura 31 - Força x Deslocamento.



Fonte: Elaboração do autor.

Através da análise dos gráficos da Figura 31, é possível perceber que a força para a ruptura do epóxi puro e do compósito contendo 1% de fibra foi inferior às

demais porcentagens, logo a tensão de ruptura se comporta da mesma maneira, já que a força é um parâmetro utilizado para determiná-la.

A inclinação da curva para as diferentes composições dos compósitos, como ilustrado na Figura 31, ficou praticamente linear, o que explica os valores de E serem parecidos.

Para se aumentar o Limite de Resistência à Tração e o Módulo de Elasticidade, teríamos que ou aumentar a porcentagem em massa de fibras na matriz. O que resulta em um compósito com propriedades mecânicas superiores se fosse usado um método de maior eficácia para eliminar os pontos de concentração de tensão durante a cura do epóxi.

É de conhecimento que um material termorrígido, como o epóxi, apresenta uma curva de tensão versus deformação como ilustrada na Figura 31, ou seja, apresentando somente o regime elástico, sendo que a curva do epóxi puro para composições de 1%, 5%, 10%, 15% e 17,6% é bem próxima de uma reta, satisfazendo a Lei de Hooke (equação 3).

O que implica que com a adição de um agente de reforço (fibras) a característica de material frágil do epóxi não sofre alterações, permanecendo este somente no regime elástico.

Para a construção de grandes estruturas de engenharia a característica frágil do material não é recomendada, pois este quando solicitado em uma tensão próxima a tensão de ruptura, não demonstrará qualquer sinal antes de se romper, pois apresentará uma baixa deformação, o que não acontece com um material com características dúctil.

Para que haja vantagem na utilização desses compósitos em substituição aos materiais usualmente utilizados, estes têm que apresentar um maior LRT, pois se comparados com aços e ligas de alumínio, apresentam uma maior fragilidade e um menor K_{1c} . Para efeito de comparação, a Tabela 11 ilustra algumas das propriedades mais importantes de materiais que são utilizados em estruturas que requerem baixa densidade e alta resistência, comparando-os com o compósito obtido com a matriz epóxi e fibras de buriti.

Tabela 11 - Materiais de grande utilização em estruturas de engenharia e epóxi/fibra de buriti.

Material	LRT (MPa)	ϵ (%)	E(GPa)	Densidade (g/cm ³)	K _{1c} (MPa.m ^{1/2})
Epóxi curado (sem fibras)	60,12	0,066	0,901	1,11 a 1,4	1,26
Epóxi (5% fibras de buriti)	67,32	0,068	0,978	–	1,18
Compósito Epóxi/fibra de vidro E	1020	2,3	45	2,1	–
Aço 1020	400	20	207	7,85	54
Liga Al 6061	300	25	69	2,70	30
Poliuretano (20% fibra de curuauá)	24,2	28,1	0,098	–	–
Poliéster/fibra sisal aleatórias (30% de fibras)	43,36	6,12	2,13	–	–
Poliéster/fibra sisal alinhadas (30% de fibras)	115,82	6,28	2,07	–	–

Fonte: Elaboração do autor.

A grande vantagem de materiais compósitos em relação aos aços e ligas de alumínio é o seu alto LRT e baixa densidade, que fica evidente na Tabela 11. Porém existe uma desvantagem desse material, que é seu baixo alongamento percentual. Já para as fibras naturais, tais como fibras de buriti, inviabilizam sua utilização em tais estruturas, porque apesar de apresentar uma baixa densidade, mostram valores de LRT e alongamento percentual muito abaixo dos materiais citados.

Um grande problema encontrado nos materiais termorrígidos, tais como o epóxi é sua baixa Resistência à propagação de trincas (K_{1c}), que fica demonstrado na Tabela 11 quando se compara o K_{1c} do epóxi (1,25 MPa.m^{1/2}) com o do aço 1020 (54 MPa.m^{1/2}) e o da liga de alumínio 6061 (30 MPa.m^{1/2}). Atualmente, utilizam-se diversas alternativas com o intuito de aperfeiçoar esta propriedade dos materiais epoxídicos, como por exemplo, a introdução de elastômeros em sua matriz e materiais termoplásticos.

6.5 DEFORMAÇÃO (E)

O deslocamento e a deformação dos materiais estudados, podem ser visualizados na Tabela 12:

Tabela 12 - Deformações obtidas através do ensaio de tração.

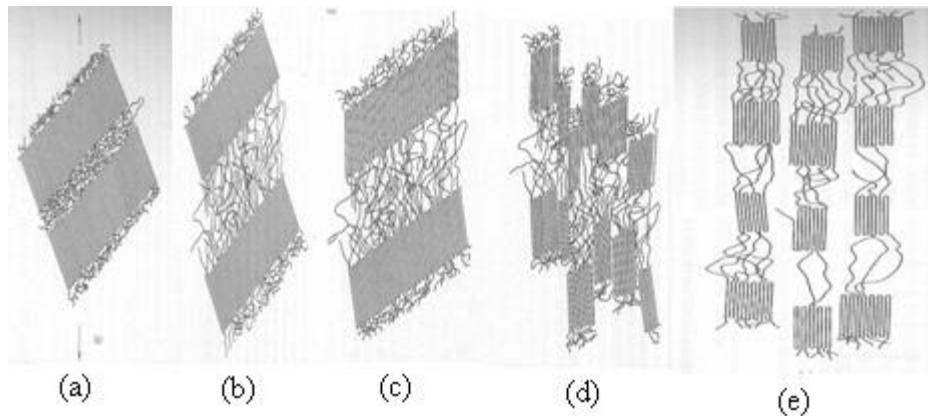
Material	ΔL (mm)	Deformação
Epóxi Puro	0,9988	0,06658
1	0,9584	0,06389
5	1,0277	0,06852
10	1,0358	0,06905
15	1,0256	0,06837
17,6%	1,0393	0,06928

Fonte: Elaboração do autor.

A análise da Tabela 12 demonstra que para o epóxi puro, e para o compósito contendo 1% de fibras, a deformação foi praticamente a mesma, sendo esta muito baixa quando comparados com outros materiais, tais como o aço, o que era de se esperar, pois o epóxi é um polímero termorrígido, cuja característica é alta fragilidade, onde praticamente não há deformação até sua ruptura, diferente de polímeros termoplásticos, cuja deformação percentual é bem maior.

Esta baixa deformação de polímeros termorrígidos pode ser explicada através de suas ligações, pois estes apresentam ligações cruzadas, dificultando sua deformação, ao contrário de polímeros termoplásticos que apresentam ligações lineares que são facilmente deformáveis na presença de uma força axial. A Figura 32 ilustra a deformação de um polímero termoplástico quando submetido a um esforço axial.

Figura 32 - Estágios que um polímero termoplástico passa quando submetido a ação de uma tensão axial.



Fonte: Callister (2002).

A Figura 32 (a) ilustra a deformação inicial em polímero, onde a região amorfa começa a se movimentar. Para polímeros termorrígidos, as fases 32 (b), 32 (c), 32 (d) e 32 (e) não acontece, pois as ligações cruzadas impedem tal deformação, ocorrendo a ruptura logo após o estágio 32 (a). Para polímeros termoplásticos a fase 32 (b) representa uma grande deformação na região amorfa, a 32 (c) o “esticamento” da região amorfa e sua orientação, a 32 (d) é onde começa a haver o cisalhamento da região cristalina, e por fim a 32 (e) que é onde a região cristalina começa a se romper, o que ocasionará a ruptura do material.

Quando aumenta-se a porcentagem de fibras, há um pequeno aumento na deformação (3,75% do epóxi puro para o compósito com 5% de fibras em massa) o que para porcentagens superiores, permanece praticamente constante.

Com o aumento considerável no Limite de Resistência à Tração (11,98%) comparando o epóxi puro com o compósito contendo 5% de fibras, era de se esperar um aumento proporcional na deformação, pois temos que a curva tensão versus deformação obedece a Lei de Hooke, sendo esta uma reta. Porém comparando-se o epóxi puro com o compósito com 5% de fibras, observa-se que o Módulo de Elasticidade aumenta em 8,52%, ou seja, há um aumento na inclinação da reta, o que resultou em uma menor elevação na deformação final do compósito, deixando-o com uma deformação menor do que a esperada.

6.6 RESILIÊNCIA E TENACIDADE

Para a medida de resiliência e tenacidade utilizou-se a Equação 5, obtendo os valores ilustrados na Tabela 13.

Tabela 13 - Valores da Resiliência e Tenacidade para os materiais estudados.

% fibras (massa)	0%	1%	5%	10%	15%	17,60%
Resiliência/tenacidade (MJ/m ³)	0,275	0,279	0,348	0,343	0,349	0,360

Fonte: Elaboração do autor.

O valor da resiliência será igual ao valor da tenacidade, pois tanto o epóxi puro quanto o epóxi com fibras apresentam apenas comportamento de um material frágil.

A capacidade de o material absorver energia quando deformado aumenta quando se aumenta a porcentagem em massa de fibras, ficando praticamente constante em porcentagens superiores à 5% de fibras em massa. Através dela observa-se que quanto maior a porcentagem de fibras, maior o Limite de Resistência à Tração e maior o alongamento do material, o que resultará em uma maior área abaixo da curva tensão versus deformação, que é o fator usado para o cálculo da Resiliência e Tenacidade. A Tabela 14 ilustra alguns valores de Tenacidade para diferentes materiais.

Tabela 14 - Valores de Tenacidade para diferentes materiais.

Material	Aço 0,13%C	Aço 0,25%C	Aço 1,2%C	Duralumínio
Tenacidade (MJ/m ³)	1,23	1,51	0,76	0,71

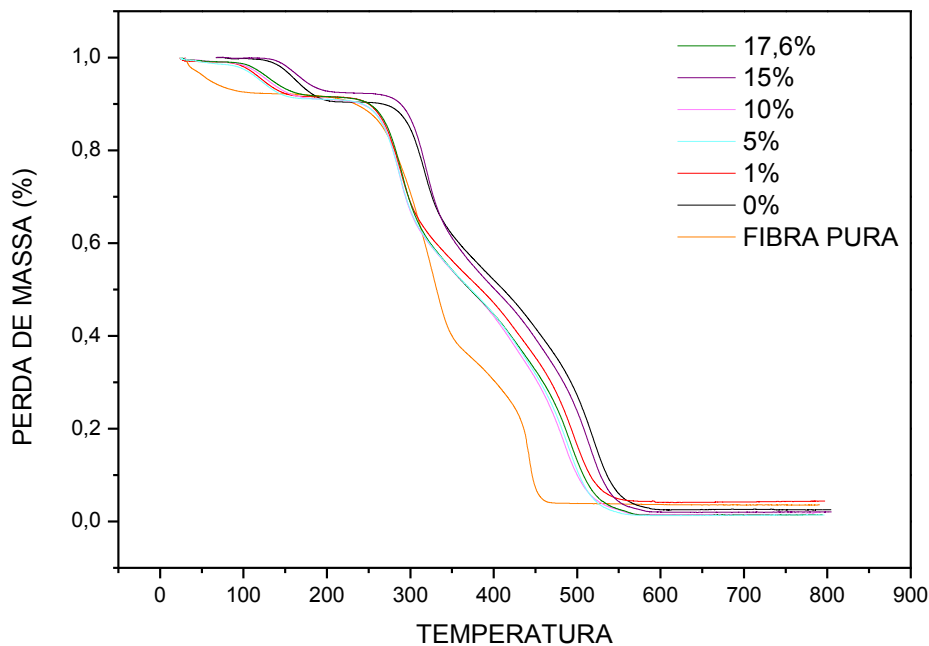
Fonte: Elaboração do autor

Materiais tais como aço e duralumínio são tipicamente dúcteis, ou seja, se deformam plasticamente antes de se romperem, o que confere à eles uma maior capacidade de absorver energia quando deformados (Tenacidade) quando comparados com os materiais plásticos termorrígidos, como é o caso do epóxi.

6.7 TERMOGRAVIMETRIA (TGA)

O gráfico para as curvas termogravimétricas estão ilustrados na Figura 33.

Figura 33 - Gráfico obtido através do ensaio de Termogravimetria.



Fonte: Elaboração do autor

Através da Figura 33 observa-se que a fibra pura perdeu massa em torno de 5% até chegar a temperatura de 100°C, sendo que após essa temperatura não houve perda de massa até 220°C. Após 220°C houve uma perda de massa acentuada até 450°C.

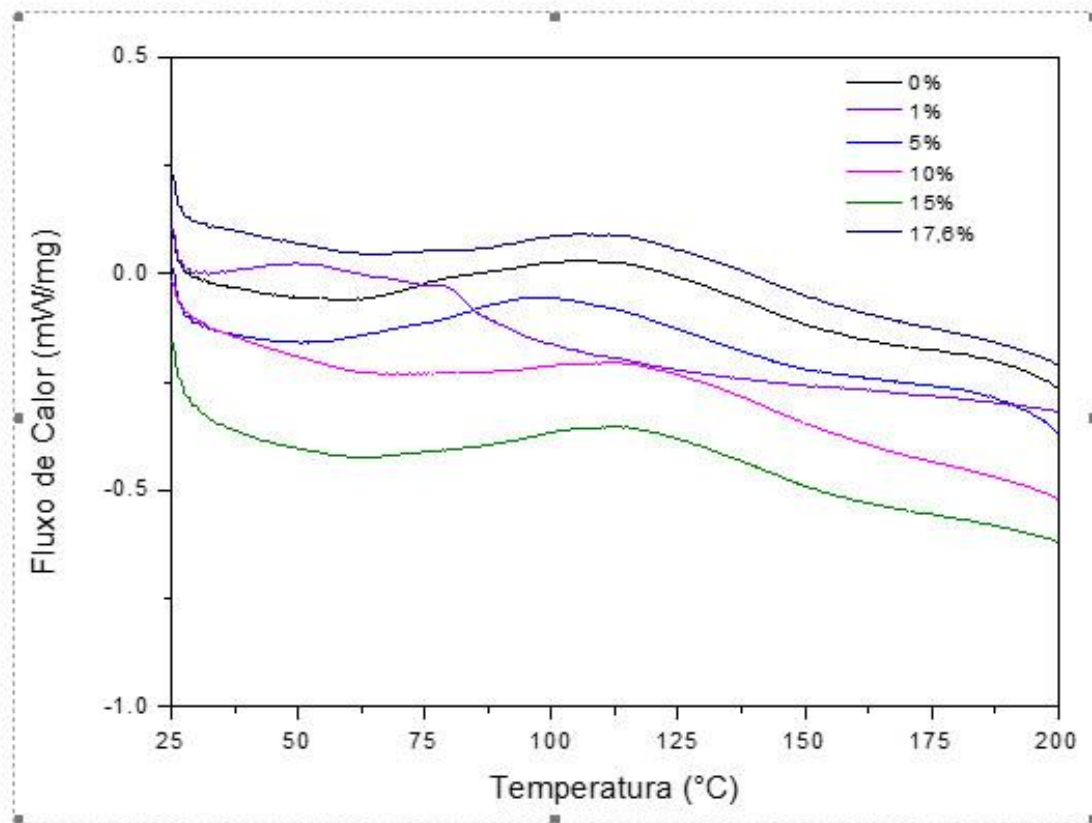
Na resina pura, até 125°C não houve perda significativa de massa. De 125°C à 260°C, a perda de massa foi de aproximadamente 6%. Após 260°C houve uma degradação acentuada até 550°C.

Observa-se que conforme foi se adicionando fibra à resina, os materiais compósitos tiveram um comportamento intermediário entre a fibra pura e a resina pura. Um exemplo disso é que o compósito de 5% em massa de buriti teve sua primeira perda de massa a 100°C e a perda acentuada foi em torno de 240°C.

6.8 CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA (DSC)

O gráfico obtido através do DSC está na Figura 34.

Figura 34 - Gráfico de DSC para os compósitos estudados.



Fonte: Elaboração do autor

Através do gráfico da Figura 34 foram calculados as Temperaturas de transição vítrea (T_g) dos materiais compósitos, que podem ser ilustrados na Tabela 15.

Tabela 15 - Temperatura de Transição vítrea obtido através de DSC

% fibra	0	1	5	10	15	17,6
T_g (°C)	72	68	69	70	70	71

Fonte: Elaboração do autor

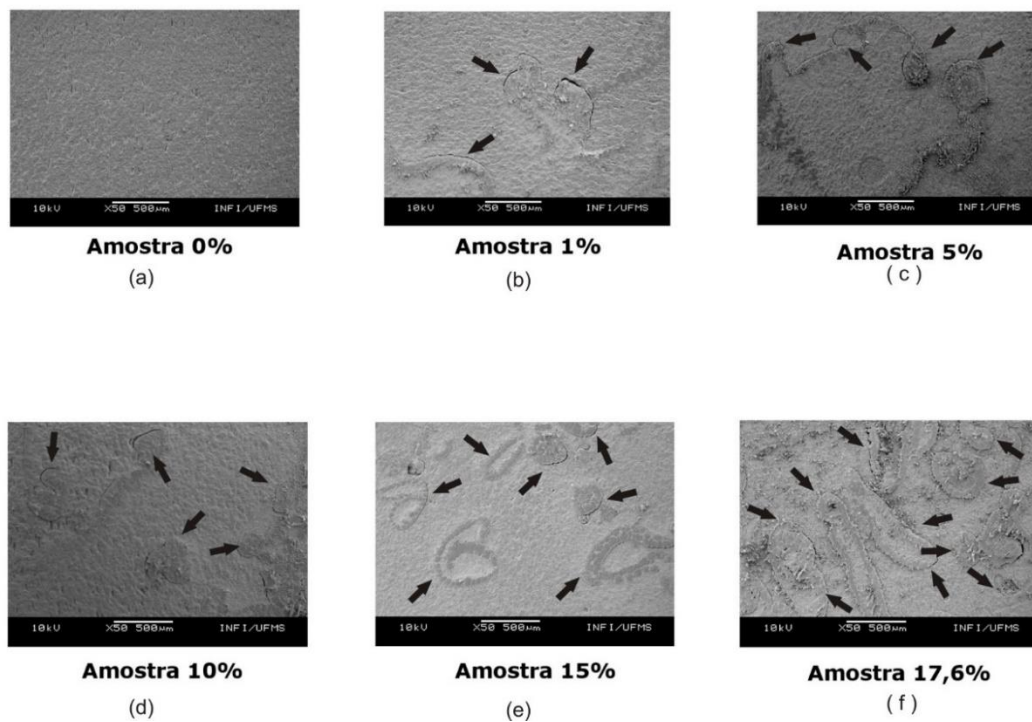
Como ilustrado na Tabela 15, a adição de fibras de buriti no sistema DGEBA/TETA não obteve alteração da transição vítrea do material, que ficou em

torno de 70°C. Isso evidencia uma uniformidade na fabricação dos corpos de prova em relação ao endurecedor (TETA) e a resina epoxídica (DGEBA).

6.9 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

A Figura 35 ilustra o ensaio de MEV realizado na resina pura e nos compósitos que o material sem a adição de fibras, não há formação de microvazios.

Figura 35 - Fotomicrografias das superfícies de fratura dos compósitos fibra de buriti/DGBA TETA – (a) 0%, (b) 1%, (c) 5%, (d) 10%, (e) 15%, (f) 17,6 %.



Fonte: Elaboração do autor.

Durante o processo de cura da matriz polimérica, nota-se que ocorre um aumento na quantidade de microvazios conforme se adiciona as fibras à matriz. Isso deve-se a uma reação exotérmica onde ocorre a formação de microbolhas que se aderem à superfície das fibras. Era de se esperar que ao aumentar a porcentagem de fibras à matriz, o LRT aumentasse proporcionalmente a esta adição. Porém, observou-se através do gráfico da Figura 28 que este aumento ocorreu até a adição de 5% de fibras. Após esta porcentagem, o LRT permaneceu constante. Isso pode ser justificado através do ensaio de MEV, no qual, observou-se que para 5%, houve

grandes quantidades de microvazios - (Figura 35(c)) e, estes vazios causam pontos de concentração de tensão. Logo, esses pontos de concentração de tensão não permitiram que o LRT aumentasse, permanecendo constante acima de 5% em massa de fibras.

7 CONCLUSÕES

O melhor resultado LRT foi obtido no compósito com 5% de fibras, com o aumento de cerca de 11,98 % em relação a resina pura. O que pode ser considerado um grande avanço para aplicações de engenharia que não necessitem de grandes esforços, tais como revestimentos internos de veículos, móveis, etc, pois o custo para a produção desse compósito pode ser considerado baixo se compararmos com o custo do epóxi que seria utilizado no lugar das fibras (pois estas são encontradas a baixos custos em nossa região devido a expansão do cerrado), e ainda sim, não se teria um aumento no reforço do material.

Não houve resultados significativos com porcentagens de massa acima de 5% de fibra, o acréscimo de fibras no compósito gera o aumento dos microvazios, como evidenciado no ensaio de MEV. Para obter melhores resultados de LRT seria necessário encontrar uma solução para eliminar os microvazios.

Uma solução seria encontrar um método eficaz que consiga adicionar maior porcentagem massa de fibras sem a formação dos microvazios. Para se obter um maior reforço do material estudado, se poderia usar fibras contínuas e alinhadas, processo à vácuo para produção do compósito e lavagem química, no entanto a inserção de tais processos requerem maiores custos de produção.

Nos ensaios térmicos verificou-se que a temperatura de degradação do compósito apresentou comportamento intermediário entre a fibra pura e a resina pura, sendo que para a fibra pura a degradação acentuada ocorreu em 220°C e da resina pura à 260°C. Nota-se também no ensaio de DSC, que os compósitos das diferentes massas estudadas apresentaram a temperatura de transição vítrea na faixa de 70°C. O ensaio de DSC mostrou que ao adicionar fibras de buriti em uma matriz termofixa DGEBA/TETA a T_g não se alterou.

Portanto, o melhor resultado foi o compósito com 5% de fibras pois seu LRT apresentou o melhor resultado, tendo a temperatura de uso até 69°C com perda insignificante de massa até essa temperatura (cerca de 2%).

8 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Avaliar as propriedades mecânicas e térmicas em compósitos intermediários aos estudados, com porcentagem em massa de 6%, 7%, 8% e 9%, como também, analisar tais propriedades dos corpos de prova dos materiais compósitos envelhecidos.

REFERÊNCIAS

- AMARAL, T. P. et. al. Estudo das propriedades de compósitos de poliamina e resina epoxídica. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, Rio de Janeiro, v. 11, n. 3, p. 149-157, 2001.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS– ASTM. **ASTM E399**: standard test method for plane-strain fracture toughness of metallic materials, West Conshohocken, 1997.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS– ASTM. **ASTM D638**: standard test method for tensile properties of plastics, West Conshohocken, 2014.
- BARBOSA, A. P. **Características estruturais e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de Buriti**. 2011. Tese (Doutorado)- Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Rio de Janeiro, 2011.
- BLEDZKI, A. K.; GASSAN, J. Composites reinforced with cellulose-based fibers. **Progress in Polymer Science**, Londres, v. 24, p. 221-274, 1999.
- CALLISTER JUNIOR, W. D. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. p. 310-320.
- CÂNDIDO, G. M.; ALMEIDA, S. F. M. Processamento de laminados de compósitos poliméricos avançados com bordas moldadas. **Polímeros: ciência e tecnologia**, São José dos Campos, v. 10, n. 1, p. 31-41, 2000.
- DORSEY, J. G.; DORSEY G. F.; RUTENBERG, A. C.; GREEN, L. A. Determination of the Epoxide Equivalent Weight of Glycidyl Ethers by Proton Magnetic Resonance Spectrometry. **Analytical Chemistry**, Tennessee, v. 49, n. 8., p. 1144-1145, 1977.
- ENCYCLOPEDIA of polymer science and engineering: emulsion polymerization to fibers, manufacture. [S. l.: s. n.], 1986. v. 6, p. 3443-3449.
- FACCA, A. G.; KORTSCHOT, M. T.; YAN, N. Predicting the tensile strength of natural fiber reinforced thermoplastics. **Composites Science Technology**, Toronto, v. 67, n. 11-12, p. 2454-2466, 2007
- FELIPETTO, E. **Polímeros**. Porto Alegre: Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2003. Aula 1. Disponível em: <http://www.tecomplasticos.com.br/PDF_Injetoras/Proc_polimeros.pdf>. Acesso em: 24 mar. 2017.
- GARLOTTA, D. A literature review of poly(lactic acid). **Journal of Polymers and the Environment**, New York, v. 9, n. 2, p. 63-84, 2001.

GIACOMINI, N. P. **Compósitos reforçados com fibras naturais para a indústria automobilística**. 2003. 168 f. Dissertação (Mestrado)- Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

GLORIA, G. O. et al. Charpy impact tests of epoxy composites reinforced with giant bamboo fibers. **Materials Research**, São Carlos, v. 18, n. 2, p. 178-184, Dec. 2015. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392015000800178&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 24 mar. 2017.

GUIMARÃES, M. J. O. C.; ROCHA, M. C. G.; COUTINHO, F. M. B. Polietileno de alta densidade tenacificado com elastômero metalocênico: 1. propriedades mecânicas e características morfológicas. **Polímeros: Ciência e Tecnologia** Campina Grande, v. 12, n. 2, p. 76-84, 2002.

INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY- IUPAC. Definitions of terms related to polymer blends, composites and multiphase polymeric materials, Pure Applied. **Chemical**, Cambridge, v. 76, n. 11, p.1985-2007, 2004. Disponível em <<http://www.crcnetbase.com/doi/abs/10.1201/b10501-107>>. Acesso em: 27 mar. 2017.

JONES, R. M. **Mechanics of composite materials**. 2. ed. [S.l.]: Taylor & Francis, 1999. p. 2-52.

JOSEPH, K.; MEDEIROS, E. S.; CARVALHO, L. H. Compósitos de matriz poliéster reforçados por fibras curtas de sisal. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, Campina Grande, v. 9, n. 4, p. 136-141, 1999

LEAL, A. S. C.; ARAÚJO, C. J.; SILVA, S. M. L. Efeito do tipo de agente de cura, do tratamento de cura e de argila organofílica nas propriedades térmicas de resina epóxi. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, Campina Grande, v. 5, n. 3, p. 34-41, 2010.

LEE, H.; NEVILLE, K. **Handbook of epoxy resins**. [S.l.]: MacGraw-Hil, 1967. 478 p.

LORENZI, H. **Palmeiras brasileiras e exóticas cultivadas**. [S.l.], Instituto Plantarum de Estudios da Flora, 2004.

MAGALHÃES L. C. A. **Influência dos parâmetros construtivos no comportamento mecânico de peças fabricadas pela técnica de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM)**. 2010. 71f. Dissertação (Mestrado em Engenharia)- Programa de pós-graduação em engenharia mecânica e de materiais. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

MANO, E. B. **Introdução a polímeros**. 3. ed São Paulo: Edgard Blucher, 1985. p.10-12, 65-78.

MARINELLI, A. L. Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras vegetais naturais da biodiversidade: uma contribuição para a sustentabilidade amazônica. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v. 18, n. 2, p. 92-99, 2008.

MARIN, J. **Mechanical behavior of engineering materials**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1962. p. 205-237.

MA, X.; YU J.; KENNED, J. F. Studies on the properties of natural fibers-reinforced thermoplastic starch composites. **Carbohydrate Polymers**, Barking, v. 62, n. 1, p. 19-24, 2005.

MAZUMDAR, S. K. **Composites manufacturing, materials, product and process engineering**. Florida: CRC Press LLC, 2002. p. 23-50.

McDERMOTT, J. **The structure of the advanced composites industry: advanced composites bluebook**. New York: [s.n.], 1990. 576 p.

MICHAELIS: moderno dicionário da língua portuguesa. São Paulo: Companhia Melhoramentos, 1998. 2259 p. Dicionários Michaelis.

MONTEIRO, S. N.; PERISSÉ, F. D. L.; COSTA, L. L.; BEVITORI, A. B.; SILVA, I. A. S.; BARBOSA, A. P. Natural Lignocellulosic Fibers as engineering materials – an overview. **Metallurgical and Materials Transactions A**, New York, v. 42, n. 10, p. 2963, 2011.

MORALES, A. R. **Morfologia e propriedades dinâmicas e mecânicas de resina epoxi/elastômero reativo**. 1989. 204 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais)-Faculdade de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1989.

MOROZOV, E. V.; VASILIEV, V. V. **Mechanics and analysis of composites materials**. Netherlands: Elsevier, 2001, p. 16-24.

NOVAES, E. **Projeto de graduação do curso de tecnologia em processos de polimerização**. Santo André: UniABC, 2010. Disponível em: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAA_wAL/polimeros-abs-antichama-uniabc-pronto>. Acesso em: 20 mar. 2015.

OLIVEIRA, P. **Análise dos parâmetros dos processos de modelagem por fusão e deposição (FDM)**, Garça: Faculdade de Tecnologia de Garça– Fatec, 2013. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAgI9cAK/modelagem-por-fusao-deposicao-fdm-ipressoras-3d#>>. Acesso em 10 de abr 2015.

PANTEC. São Bernado do Campo: PANTEC, [200-]. Disponível em: <<http://www.pantecbrasil.com.br/produtos/ensaio-de-tracao-e-compressao/maquina-universal-de-ensaio-versat-20kn>> acesso em: 16 maio 2015.

PARDINI, L. C. **Comportamento dinâmico-mecânico e à fratura de materiais compostos epoxi/elastômero/fibra de carbono**. 1990. 117 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais)-Faculdade de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1990.

PEARSON, R. A. **Sources of toughness in modified epoxies**. 1990. 249 f. Thesis (Doutorado) - Horace H. Rackham School of Graduate Studies, University of Michigan, Ann Arbor, 1990.

PEREIRA, D. S. **Propriedades de materiais nanoestruturados do sistema epoxídico DGEBA/TETA modificado com um éster de silsesquioxino**. 2006. 126 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais)-Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2006.

PEREIRA, P. H. F.; MORSYLEIDE; R., CIOFFI, M. O. H., BENINI, K.; MILANESE, H.; A.; VOORWALD, MULINARI, M. D. **Fibras vegetais em compósitos poliméricos: uma revisão**. São Carlos: Polímeros, 2015. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14282015000100002>. Acesso em 10 jun. 2016.

RANGEL, S. A. **Nanocompósitos baseados no sistema epoxídico DGEBA/TETA modificado com uma resina epoxídica de silsesquioxano**. 2006. 135 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais)-Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2006.

REIS, J. M. L. Fracture and flexural characterization of natural fiber-reinforced polymer concrete. **Construction and Building Materials**, Niterói, v. 20, n. 20, p. 673–678, 2006

REZENDE M. C. O uso de compósitos estruturais na indústria aeroespacial. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São José dos Campos, v. 10, n. 2, p. 04-09, 2000.

SALES, R. C. M.; BRUNELLI, D. D. Luminescence Spectroscopy Applied to a Study of the Curing Process of Diglycidyl-Ether of Bisphenol-A (DGEBA). **Materials Research**, São José dos Campos, v.8, n. 3, p. 299-304., 2005.

SANTOS, N. S.; DIAS, C. G. B. T.; SANCHES, E. M. S.; ZAVAGLIA, C. A.; ALBUQUERQUE, E. L. Influência do tratamento químico nas propriedades de impacto do compósito de fibras de Miriti/resina de poliéster insaturado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 18., Porto de Galinhas, 2008. **Anais...** Porto de Galinhas: [s.n.]: 2008. p. 4799-4810

SARAIVA, Nicholas Allain. **Manejo sustentável e potencial econômico da extração do buriti nos lençóis maranhenses**. 2009. 129 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Sustentável)- Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos Materiais**. 6. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hal, 2008

SOUZA, S. A. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos**. 5. ed., São Paulo: Edgard Blucher, 1982.

VENTURA, O. S. P. et al. Caracterização mecânica em flexão de compósito de argamassa de cimento reforçada por fibras naturais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 17., 2006, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: [s.n.], 2006. p. 8221-8229

WAMBUA, P.; IVENS, I.; VERPOEST, I. Natural Fibers: can they replace glass and fibre reinforced plastics? **Composites Science and Technology** Doetinchem, v. 63, n. 9, p. 1259-1264, 2003.

XIAO, L.; WANG, B.; YANG, G.; GAUTHIER, M. **Poly(lactic acid)-based Biomaterials:** synthesis, modification and applications. [S.l.: s.n.], 2012. 247-282 p.