



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ANANINDEUA
FACULDADE DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

MIRIANE ALEXANDRINO PINHEIRO

**DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE TRAÇÃO DE COMPÓSITOS DE
MATRIZ EPÓXI REFORÇADOS COM FIBRA DE GUARUMÃ**

Ananindeua - PA

2018

MIRIANE ALEXANDRINO PINHEIRO

**DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE TRAÇÃO DE COMPÓSITOS DE
MATRIZ EPÓXI REFORÇADOS COM FIBRA DE GUARUMÃ**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Ciência e Tecnologia com ênfase em Tecnologia Mecânica da Universidade Federal do Para, Campus Universitário de Ananindeua, orientado pela Profa. Dra. Verônica Scarpini Candido, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia com ênfase em Tecnologia Mecânica.

Ananindeua - PA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará

A374d Alexandrino, Miriane Pinheiro
Determinação das propriedades de tração de compósitos de matriz epóxi reforçados com fibra de Guarumã / Miriane Pinheiro Alexandrino. - 2018.
60 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Ciência e Tecnologia, Campus Universitário de Ananindeua, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 2018.

Orientação: Profa. Dra. Verônica Scarpini Cândido
Coorientação: Prof. Dr. Alisson Clay Rios da Silva.

1. Materiais compósitos. 2. Matriz epóxi. 3. Fibra de guarumã. 4. Caracterização mecânica. I. Cândido, Verônica Scarpini, *orient.* II. Silva, Alisson Clay Rios da, *coorient.* III. Título

MIRIANE ALEXANDRINO PINHEIRO

**DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE TRAÇÃO DE COMPÓSITOS DE
MATRIZ EPÓXI REFORÇADOS COM FIBRA DE GUARUMÃ**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Ciência e Tecnologia com ênfase em Tecnologia Mecânica da Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Ananindeua como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia com ênfase em Tecnologia Mecânica.

Data de aprovação: ____/____/____

Banca examinadora:

Profa. Dra. Verônica Scarpini Candido
Orientadora

Prof. Dr. Alisson Clay Rios da Silva
Coorientador

Profa. Dra. Luciana Pereira Gonzalez
Membro

Profa. Dra. Roseane de Lima Silva
Membro

Ananindeua - PA

2018

Este trabalho é dedicado a meu pai Nilson Pinheiro (in memoriam), meu amigo e companheiro, que sempre me incentivou e lutou para que eu não desistisse de meus objetivos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida, e por ter me ajudado a concluir mais essa etapa de minha vida.

A minha filha Milena Freire e ao meu esposo Aldo Freire, pela paciência nos momentos de ausência, pelo carinho, e por todo amor dedicado a mim.

Aos meus pais, Maria Pinheiro e Nilson Pinheiro por terem me ajudado incansavelmente, em especial meu pai, que me ajudou, apoiou e incentivou até seu último dia de vida. Aos meus irmãos, em especial a Mariza, por todo apoio e carinho.

A minha orientadora Profa. Dra. Verônica Scarpini, por ter acreditado em mim, pelo apoio, paciência, incentivo e conhecimento compartilhado. E ao Prof. Dr. Alisson Rios pelo apoio e incentivo.

Aos meus amigos de curso, em especial a Dayana Rossy e a Karla Lino pelo companheirismo e amizade, e a Atamy Tanoue, por me ouvir e me ajudar nos momentos em que mais precisei.

A todos os professores do curso, em especial Prof. Dr. Sílvio Bispo pelo incentivo, e a Profa. Dra. Luciana Gonzalez por me ajudar, incentivar, por ter me dado forças nos momentos em que mais precisei, por cada palavra de carinho e conforto. Muito obrigada.

Ao Prof. Dr. Paulo Melo, por gentilmente ter coletado o guarumã, para confecção do material deste trabalho.

A amiga Estéffany Marques, e a empresa de tintas VELOZ por ter cedido a resina para este trabalho.

Ao técnico Jhonny Ramos e ao laboratório de práticas tecnológicas, pelo tempo e espaço disponibilizados.

Aos laboratórios de microscopia do PRODERNA e de ensaios mecânicos LABEM da UFPA.

Aos meus amigos, que direta ou indiretamente contribuíram para que esse momento chegasse.

A todos meus sinceros agradecimentos.

“Mera mudança não é crescimento. Crescimento é a síntese de mudança e continuidade, e onde não há continuidade, não há crescimento.”

C. S. Lewis

RESUMO

A necessidade do desenvolvimento de materiais com propriedades diferenciadas, como bom desempenho mecânico, baixo custo e que sejam ambientalmente corretos, tem aumentado a cada dia. Neste contexto, destaca-se a busca pelo desenvolvimento de compósitos de matriz polimérica com reforço de fibras naturais. Estas fibras, possuem vantagens em relação às fibras sintéticas pois são encontradas em grandes quantidades e com facilidade, como é o caso do guarumã (*Ischinosiphon koern*) uma espécie abundante em regiões de várzeas. Neste trabalho, materiais compósitos de matriz epóxi reforçados por fibras de guarumã, foram analisados mecanicamente e microestruturalmente. O processo de fabricação dos materiais compósitos iniciou-se com a caracterização das fibras. Os corpos de prova foram produzidos em moldes de silicone e lixados para atender as especificações da norma ASTM D 638, para que fossem realizados os ensaios de resistência a tração, e posteriormente realizada a microscopia eletrônica de varredura para analisar a microestrutura do material fraturado. A partir dos valores obtidos após o ensaio de tração, observou-se que, apesar do baixo desempenho mecânico quando relacionado com a matriz, a adição de fibras de guarumã tende a um ligeiro reforço na matriz epoxídica. A caracterização microestrutural, revelou que os compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras de guarumã, possuem um grande potencial, quando comparados a compósitos que possuem outras fibras naturais como reforço.

Palavras-chave: Materiais compósitos. Matriz epóxi. Fibra de guarumã. Caracterização mecânica.

ABSTRACT

The need to develop materials with differentiated properties, such as good mechanical performance, low cost and environmentally correct, has increased every day. In this context, we highlight the search for the development of polymeric matrix composites with natural fiber reinforcement. These fibers have advantages over synthetic fibers because they are found in large quantities and with ease, as is the case of guarumã (*Ischinosiphon koern*), an abundant species in the region of floodplains. In this work, epoxy matrix composites reinforced with guarumã fibers were analyzed mechanically and microstructurally. The composite materials manufacturing process started with the characterization of the fibers. The test specimens were produced in silicon molds and sanded to meet the specifications of ASTM D 638, in order to carry out the tensile strength tests, and later the scanning electron microscopy, to analyze the microstructure of the fractured material. From the values obtained after the tensile test, it was observed that, despite the low mechanical performance when related to the matrix, the addition of guarumã fibers tends to a slight reinforcement in the epoxy matrix. The microstructural characterization revealed that the epoxy matrix composites reinforced with guarumã fibers have a great potential when compared to composites that have other natural fibers as reinforcement.

Keywords: Composite materials. Epoxy matrix. Guarumã fiber. Mechanical characterization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação estrutural da fibra natural.....	23
Figura 2 – Planta do guarumã.....	26
Figura 3 – Classificação dos materiais compósitos.....	27
Figura 4 – Resina e catalisador cedidos pela empresa de tintas Veloz	32
Figura 5 – Tala de guarumã.....	33
Figura 6 – Fibras desfiadas.....	33
Figura 7 – Medição da fibra.....	33
Figura 8 – Balança analítica.....	34
Figura 9 – Catalisador e resina.....	36
Figura 10 – Fabricação dos corpos de prova.....	36
Figura 11 – Corpos de prova após o desmolde.....	38
Figura 12 – Corpos de prova lixados.....	38
Figura 13 – Medição do corpo de prova.....	39
Figura 14 – Representação esquemática dos corpos de prova para ensaio de tração.....	39
Figura 15 – Corpos de prova preparados para o ensaio de tração.....	40
Figura 16 – Equipamento utilizado no ensaio de tração.....	40
Figura 17 – Microscópio eletrônico de varredura.....	42
Figura 18 – Padrão de distribuição diametral.....	43
Figura 19 – Micrografias obtidas por MEV da fibra fina de guarumã. (a) aumento 150x e (b) aumento 500x.....	45
Figura 20 – Micrografias obtidas por MEV da fibra média de guarumã. (a) aumento 150x e (b) aumento 500x.....	45

Figura 21 – Micrografias obtidas por MEV da fibra grossa de guarumã. (a) aumento 150x e (b) aumento 500x.....	46
Figura 22 – Aspecto macroscópico da fratura dos compósitos ensaiados em tração.....	47
Figura 23 – Curvas de tração da resina epóxi (a) e dos compósitos com 10 (d), 20 (c) e 30% (d) em volume de fibras de guarumã.....	47
Figura 24 – Resistência à tração.....	49
Figura 25 – Módulo de elasticidade.....	51
Figura 26 – Deformação.....	52
Figura 27 – Micrografias obtidas por MEV da resina epóxi (a) e dos compósitos reforçados com 10 (a), 20 (b) e 30% (d) em volume de fibras de guarumã. Com aumento de 200x.....	53

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1 – Composição química das fibras naturais em (%).....	21
Tabela 2 – Propriedades mecânicas de algumas fibras naturais e fibras sintéticas.....	23
Tabela 3 – Resultados de resistência a tração dos corpos de prova da matriz poliéster e dos compósitos.....	30
Tabela 4 – Relação de quantidade de resina e fibra.....	37
Tabela 5 – Massa específica em função do diâmetro médio.....	44
Tabela 6 – Resultados das propriedades mecânicas obtidas a partir do ensaio de tração.....	49
Quadro 1 – Principais Características e Limitações das Resinas Termorrígidas...	18
Quadro 2 – Fibras naturais que estão sendo estudadas com mais frequência.....	24

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Considerações iniciais	15
1.2	Objetivos	16
1.2.1	Objetivo geral	16
1.2.2	Objetivos específicos	16
1.3	Justificativa	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Polímeros	18
2.1.1	Resinas poliméricas	19
2.1.2	Resina epóxi	21
2.2	Fibras naturais	21
2.2.1	Fibras de Guarumã	25
2.3	Materiais compósitos	26
2.3.1	Materiais compósitos reforçados com fibras	28
2.3.2	Materiais Compósitos Reforçados Com Fibras de Guarumã	30
3	MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1	Materiais utilizados	32
3.2	Caracterização das fibras de guarumã	32
3.3	Medição do diâmetro fibrilar	34
3.4	Determinação da massa específica	34
3.5	Preparação dos compósitos	35
3.6	Caracterização mecânica	39
3.7	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
4.1	Caracterização das fibras	43
4.1.1	Caracterização dimensional e determinação da massa específica das fibras de Guarumã	43
4.1.2	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da fibra de Guarumã	44
4.2	Caracterização mecânica	46
4.2.1	Ensaio de tração	46

4.2.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) em compósitos de matriz epóxi reforçada com fibras de Guarumã.....	52
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	57
REFERÊNCIAS.....	58

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

Com o avanço da tecnologia se faz necessário cada vez mais o uso de materiais com propriedades específicas, para que sejam utilizados em diversas aplicações (CALLISTER, 2016). Neste contexto, encontram-se os materiais compósitos, que podem ser produzidos a partir da combinação de dois ou mais materiais, o resultado dessa junção é um material com propriedades melhores que a de seus materiais separados (ASKELAND, 2014).

Os materiais compósitos são constituídos por apenas duas fases: a primeira é a matriz que é a fase contínua e envolve uma segunda chamada fase dispersa. Essas combinações de fases podem relacionar características específicas de cada material, formando a partir destes, materiais com propriedades desejáveis para aplicações específicas (CALLISTER, 2016).

Segundo Callister (2016) os materiais compósitos podem ser classificados em três divisões principais, os compósitos reforçados por fibras, os compósitos reforçados por partículas e os compósitos estruturais. Os compósitos poliméricos reforçados com fibras, são constituídos por uma fase matriz que pode ser uma resina e a outra fase de fibra, as fibras podem ser sintéticas ou naturais (CANDIDO, 2014).

Devido as combinações das propriedades de cada uma das fases dos compósitos reforçados por fibras, o novo material apresenta maiores limites de resistência, módulo de Young e resistência específica ao incorporar fibras mecanicamente resistentes, em uma matriz com menor massa específica e mais dúctil. O material da matriz transmite as tensões para as fibras, que por sua vez resistem a força aplicada. A matriz também age como proteção para o reforço impedindo a ação de agentes externos, que possam causar a degradação de suas propriedades mecânicas (ASKELAND, 2014).

O uso de fibras naturais neste tipo de compósitos apresenta inúmeras vantagens, podendo se destacar a importância ambiental, pois são encontradas em grandes quantidades e com facilidade, além de serem fontes renováveis, biodegradáveis e de natureza não tóxicas, além de possuírem boas propriedades mecânicas (BARBOSA, 2011).

Estes compósitos possuem uma tendência mundial, pois são materiais ambientalmente corretos, e com baixo custo (NASCIMENTO, 2009). A condição de materiais ambientalmente corretos está relacionada a aspectos apresentados pelo material, tais como aspectos recicláveis, renováveis e biodegradáveis.

Neste contexto encontra-se a fibra de guarumã (*Ischinosiphon koern*) abundante em regiões de várzea do estado do Pará. Do caule desta planta é retirada a tala muito usada em artesanatos de cestaria, e também pode ser retirada a fibra de guarumã usada como reforço de compósitos de matriz polimérica (COSTA *et al*, 2014).

A utilização das fibras do guarumã para confecção de compósitos poliméricos apresenta vantagens comuns às outras fibras naturais e contribui para o desenvolvimento de novos materiais utilizando uma matéria-prima pouco explorada na área da ciência dos materiais, tornando-se assim um material com grande potencial. A seguir serão apresentados os objetivos e o desenvolvimento experimental deste trabalho, que demonstram as boas propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com a fibra de guarumã.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Esse trabalho tem como objetivo determinar as propriedades mecânicas de compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras contínuas e alinhadas de guarumã.

1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar as propriedades físicas e diâmetro médio da fibra de Guarumã;
- Estudar o comportamento mecânico em tração de compósitos poliméricos de matriz epóxi reforçados com 10, 20, 30% em volume de fibras contínuas e alinhadas.
- Avaliar a morfologia da fibra, bem como estudar a região da fratura dos compósitos ensaiados em tração.

1.3 Justificativa

A relevância deste trabalho se dá pela necessidade de contribuir para o meio científico e tecnológico, a partir do desenvolvimento de novos materiais, como é caso do compósito feito a partir de resina epóxi com reforço de fibras de guarumã.

Justifica-se ainda por sua relevância ambiental, uma vez que o trabalho utiliza fibra natural, retirada de uma planta que é encontrada em abundância na região amazônica, e ainda pelo aproveitamento integral das fibras.

Cientificamente, justifica-se pela compreensão das propriedades mecânicas e dos mecanismos de reforço entre a fibra de guarumã e a matriz epóxi, assim como a possibilidade de se obter um compósito com um bom desempenho mecânico.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Polímeros

Um polímero é uma macromolécula composta por várias unidades de repetição que são denominadas meros, ligadas por meio de ligação covalente (CANEVAROLO, 2010). Os polímeros podem ser usados em uma ampla variedade de aplicações na engenharia e ciência dos materiais.

Em geral os polímeros são caracterizados por seu peso, pois são materiais leves, que dentre suas várias aplicabilidades, podem ser utilizados como isolantes elétricos e térmicos, além de serem flexíveis e apresentarem boa resistência à corrosão e baixa resistência ao calor (NASCIMENTO,2009).

Segundo Canevarolo (2010) os polímeros podem ser classificados quanto sua estrutura química, seu método de preparação, suas características tecnológicas, e quanto ao seu comportamento mecânico. Dentre as classificações acima a melhor maneira para descrever os polímeros é em termos de seu comportamento mecânico e térmico, e as três principais categorias de polímeros são: termoplástico, termofixo e elastômeros (ASKELAND, 2014).

Polímeros termoplásticos são capazes de passar por vários processos de moldagem, pois possuem a característica de se tornarem fluidos com o aumento da temperatura, e com a diminuição da mesma os polímeros se solidificam (NASCIMENTO, 2009). Estes tipos de polímeros são considerados recicláveis pois ao sofrerem novas alterações de temperatura e pressão, o processo de moldagem se reinicia. Estas alterações acontecem em nível molecular, com o aumento da temperatura as forças de ligações secundárias diminuem, assim há uma facilitação no movimento relativo de cadeias adjacentes quando uma tensão é aplicada (BARBOSA, 2011).

Os termofixos, ou termorrígidos são polímeros em rede que quando submetidos a um aumento de temperatura e pressão, amolecem e fluem, assumindo a forma do molde, após reações químicas formam ligações cruzadas entre cadeias e assumem a forma sólida (CANEVALORO, 2010). Uma nova alteração na temperatura e pressão não têm mais influência neste polímero, pois uma vez solidificado o mesmo não retorna a forma de fluido, tornando este material não-reciclável.

Os elastômeros são polímeros que podem deformar seu comprimento inicial na temperatura ambiente pelo menos duas vezes, pois suas cadeias poliméricas comportam-se como molas, que se deformam de maneira reversível com aplicação de uma tensão mecânica (ASKELAND, 2014).

2.1.1 Resinas poliméricas

O termo resina por muitas vezes pode se confundir com a expressão matrizes poliméricas, pois resina pode ser identificada como um polímero ou ainda como uma matriz polimérica. De acordo com Marinucci (2011) a resina confere aos compósitos características importantes, como proteção contra agente externos, resistências a produtos químicos, mantem a orientação do reforço na estrutura, e permite a transferência do carregamento imposto ao compósito para as fibras, que atuam como elemento de reforço. O quadro 1 ilustra as principais características e limitações das resinas termorrígidas mais utilizadas.

Quadro 1 - Principais Características e Limitações das Resinas Termorrígidas.

Resina	Características	Limitações
Epóxi	<ul style="list-style-type: none"> - Excelente propriedade em compósitos - Muito boa resistência química e propriedades elétricas - Boas propriedades térmicas - Baixa contração na cura 	<ul style="list-style-type: none"> - Longos ciclos de cura - Melhores propriedades obtidas em altas temperaturas de cura
Poliéster	<ul style="list-style-type: none"> - Amplamente utilizada - Fácil uso - Cura a temperatura ambiente - Ótimas propriedades em compósitos - Boa resistência química - Boas propriedades elétricas 	<ul style="list-style-type: none"> - Emissão de estireno - Contração durante a cura - Inflamável

Quadro 1 - Principais Características e Limitações das Resinas Termorrígidas.

(Continuação)

Resina	Características	Limitações
Fenólica	<ul style="list-style-type: none"> - Ótimas propriedades térmicas - Boa resistência ao fogo - Boas propriedades elétricas 	<ul style="list-style-type: none"> - Cor
Poliamida	<ul style="list-style-type: none"> - Excelentes propriedades térmicas -Boas propriedades em compósitos - Boa resistência ao fogo - Boas propriedades elétricas 	<ul style="list-style-type: none"> - Cor
Poliuretano	<ul style="list-style-type: none"> - Boas propriedades em compósitos - Muito boa resistência química - Alta dureza (resistência ao impacto) - Boa resistência a abrasão 	<ul style="list-style-type: none"> - Cor - Isocianetos como agentes de cura
Silicone	<ul style="list-style-type: none"> - Ótimas propriedades térmicas - Excelente resistência química - Ótimas propriedades elétricas - Resistente a hidrólise e oxidação - Boa resistência ao fogo - Não tóxico 	<ul style="list-style-type: none"> - Adesão - Longos ciclos de cura - Cura somente a altas temperaturas
Vinil Ester	<ul style="list-style-type: none"> - Boa resistência à fadiga - Excelentes propriedades em compósitos - Boa resistência química - Boa dureza 	<ul style="list-style-type: none"> - Emissão de estireno - Contração durante a cura – Inflamável

Fonte - Adaptado de Aquino (2003).

2.1.2 Resina epóxi

As resinas epóxi são polímeros obtidos pela reação de epícloridrina com bisfenol e apresentam na sua molécula grupos terminais formados pela ligação de um átomo de oxigênio com dois átomos de carbono, chamados de grupos etoxilínicos (MARINUCCI, 2011). A resina epóxi é um polímero de grande importância e pertence à classe de polímeros termofixos podendo ser usado para aplicações estruturais, pois possuem alta força de tensão e módulo, e de fácil processamento, além de possuir boa resistência química e térmica (NASCIMENTO, 2009).

Segundo AQUINO (2003) a resina epóxi tem como principais vantagens: Excelente propriedade em compósitos, muito boa resistência química e propriedades elétricas, boas propriedades térmicas e baixa contração na cura. No processo de cura deste tipo de resina podem ser utilizados vários endurecedores e aceleradores, com uso ou não de calor, resultando em polímeros termofixos que possuem um elevado teor de ligações cruzadas (MARINUCCI, 2009).

Ainda segundo MARINUCCI (2009), para que ocorra o processo de cura, é necessário que haja uma reação dos grupos de epóxi da resina com quantidades estequiométricas de agentes de cura, que geralmente são produtos à base de amina. As reações químicas envolvidas neste processo provocam mudança de estado físico, passa de um estado líquido viscoso, para um gel, e ao final se transforma em um estado sólido vitrificado.

As principais características da resina epóxi, destacam a mesma quando comparada com outras resinas do tipo termorrígidas, podendo se criar uma demanda de novas aplicações comerciais, a partir dos esforços para melhorar o desempenho dos produtos existentes e através de modificadores de impacto termoplásticos (NASCIMENTO, 2009).

2.2 Fibras naturais

As fibras naturais também conhecidas como fibras vegetais, ou ainda fibras lignocelulosicas, possuem estruturas alongadas com secção transversal vazada e arredondadas, são encontradas por todo vegetal, e sua classificação pode ser feita

de acordo com sua origem anatômica, como fibras de talo, fibras de folha, fibras de lenho e fibras de superfície (BARBOSA, 2011).

Ao longo de muitos anos as fibras lignocelulosicas vem sendo utilizadas pelo homem no processo industrial, no Brasil são encontradas em grande quantidade e variedade, isto facilita a manufatura. Estas fibras podem ser aproveitadas em construções e ferramentas, são de grande importância principalmente por contribuírem com o seu caráter ecológico de benefício ao meio ambiente (MARGEM, 2013). Esse tipo de fibra, também vem sendo muito empregada como material de reforço, e são constituídas principalmente de celulose, hemicelulose e lignina. A Tabela 1 mostra a composição química das fibras naturais em (%).

Tabela 1 – Composição química das fibras naturais em (%).

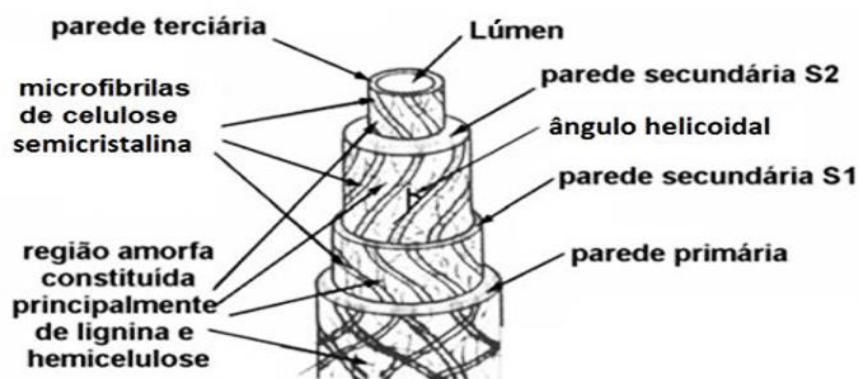
Fibra	Celulose	Hemicelulose	Lignina
Piaçava	29	11	45
Bagaço	48	22	20
Bambu	35	15	27
Cana	45	20	23
Linho	60	16	4
Juta	60	15	16
Cânhamo	67	16	8
Rami	69	13	1
Cânhamo de manilha	63	20	6
Sisal	60	12	10
Madeira	45	22	25

Fonte - Aquino (2003).

A lignina é responsável pela rigidez das plantas, é um ligante amorfo, hidrofóbico e que possui um alto grau de polimerização (LUZ, 2014). A hemicelulose está associada a flexibilidade e a elasticidade da planta, e está disposta de maneira intercalar nas microfibrilas (AGUIAR, 2010).

As fibras estão organizadas em uma complexa estrutura, constituída de parede primária, secundária e terciária, na parede secundária há uma subdivisão em outras três camadas, onde as microfibrilas estão arranjadas de forma helicoidal. O ângulo microfibrilar que é formado entre o eixo da fibra e as microfibrilas, e a razão entre a lignina e a hemicelulose, variam de acordo com o tipo de fibra. Com isso, as fibras naturais apresentam diferentes propriedades mecânicas, que são determinadas pelos parâmetros estruturais de cada tipo de fibra (JOHN e THOMAS, 2008). A Figura 1 mostra uma representação da estrutura da fibra natural.

Figura 1 – Representação estrutural da fibra natural.



Fonte: Adaptado de John e Thomas (2008).

As propriedades das fibras dependem ainda do teor de celulose, do grau de polimerização e do ângulo das fibrilas. De acordo com Jayaraman (2003) fibras com maior conteúdo de celulose, alto grau de polimerização e um baixo ângulo microfibrilar, possuem alta resistência à tração e rigidez.

O uso das fibras naturais está relacionado principalmente a suas propriedades e características como baixo custo, baixa densidade, boas propriedades mecânicas e flexibilidade no processamento (D'ALMEIDA, 2004). A tabela 2 mostra as propriedades de algumas fibras naturais e fibras sintéticas.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas de algumas fibras naturais e fibras sintéticas.

Fibras	Densidade ρ (g/cm ³)	Tensão Máxima σ (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Máximo σ/ρ (MPa.cm ³ /g)
Bambu (<i>bambusa vulgaris</i>)	1,03 – 0,49	106	-	-
Banana (<i>Musa sapientum</i>)	0,67 – 1,50	700 - 800	27- 32	1194
Buriti (<i>Mauritia flexuosa</i>)	0,63 – 1,12	129 - 254	-	403
Coco (<i>Cocos nucifera</i>)	1,15 – 1,52	95 - 220	4 – 6	191
Algodão (<i>Gossypium M.</i>)	1,51 - 1,60	287 - 800	6 - 13	530
Curauá (<i>Ananas erectifolium</i>)	0,57 – 0,92	117 - 3000	27 - 80	2193
Linho (<i>Linum esitatissimum</i>)	1,30 – 1,50	344 - 1035	26 - 28	496
Juta (<i>Corchorus capsularis</i>)	1,30 – 1,45	393 – 800	13 - 27	615
Piassava (<i>Attalea funifera</i>)	1,10 – 1,45	109 - 1750	5 - 6	1591
Abacaxi (<i>Ananas comoscus</i>)	1,44 – 1,5	6362 -1627	35 - 83	1130
Rami (<i>Boehmeria nivea</i>)	1,5	400 - 1620	61 - 128	1080
Sisal (<i>Agave sisalana</i>)	1,26 – 1,50	287 - 913	9 - 28	725
Madeira macia	0,46 – 1,50	112 - 1000	11 - 40	2174
Vidro	2,50 – 2,58	2000 - 3450	70 - 73	1380
Carbono	1,78 – 1,81	2500 - 6350	230 - 400	3567
Aramida	1,44	3000 - 4100	63 - 131	284

Fonte: Monteiro et al. (2011).

Outros fatores podem alterar as propriedades das fibras lignocelulosicas, como o local de retirada do vegetal, ou ainda o local da plantação do vegetal. Diversos estudos estão sendo desenvolvidos com diferentes tipos de fibras lignocelulosicas, e que podem ser retiradas de diferentes partes do vegetal

(CANDIDO, 2014). O Quadro 2 indica as fibras naturais que estão sendo estudadas com mais frequência, e o local de retirada da fibra.

Quadro 2 – Fibras naturais que estão sendo estudadas com mais frequência.

Fibra	Parte da planta	Nome científico
Banana	Folha	<i>Musa sapientum</i>
Coco	Mesocarpo	<i>Cocus nucifera</i>
Curauá	Folha	<i>Ananas erectifolius</i>
Alcodão	Semente	Gossipium M.
Abacaxi	Folha	<i>Ananas comoscis</i>
Juta	Caule	<i>Corchorus capsularis</i>
Piaçava	Bainha Foliar	<i>Attaleia funifera</i>
Sisal	Folha	<i>Agava sisalana</i>
Bucha	Fruto	<i>Luffa cylindrica</i>
Rami	Caule	<i>Boehmeria nivea</i>
Cana-de-açúcar	Caule	<i>Sacharum officirarum</i>

Fonte: Cândido (2014).

2.2.1 Fibras de Guarumã

O guarumã é uma espécie nativa da região do salgado paraense e abundante na região de várzea, utilizado há muitos séculos pelas tribos indígenas, o guarumã pertence à família das marantáceas, espécie *Ischinosiphon koern* (VALENTE; ALMEIDA 2001). O guarumã pode alcançar até 4 m de altura e possui haste caulinar verde, de forma cilíndrica e lisa. Folhas em rosetas no ápice da haste, ovaladas, base arredondada, ápice agudo, inflorescência em espigas longas, protegidas por brácteas esverdeadas; flores amarelas, as talas da haste caulinar são usadas na confecção de paneiros, armação de torda e trançados em geral (OLIVEIRA, 2006). A Figura 2 apresenta a foto da planta do guarumã.

Figura 2 – Planta do guarumã.



Fonte – Autoria Própria (2018).

A tala do Guarumã é de aspecto liso e possui alta flexibilidade, assim como outras fibras naturais, o guarumã possui vantagens em relação aos reforços sintéticos como a biodegradabilidade e o baixo custo.

2.3 Materiais compósitos

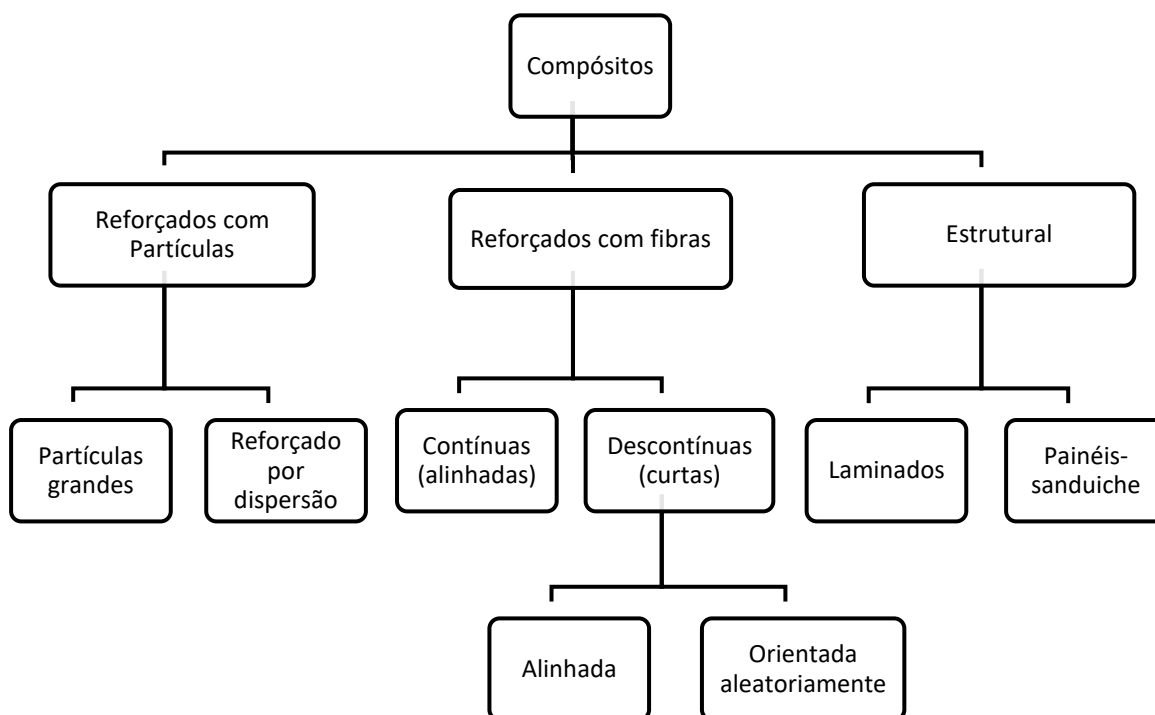
Compósitos são materiais que apresentam ou são formados por dois ou mais constituintes com distintas composições, estruturas e propriedades e que estão separados por uma interface (CALLISTER, 2016). O objetivo principal em se produzir compósitos é de combinar diferentes materiais para produzir um único material com propriedades superiores às dos componentes unitários (ASKELAND, 2014).

Muitos dos materiais compósitos são constituídos por apenas duas fases; uma é denominada matriz, a qual é contínua e envolve a outra fase, chamada de fase dispersa (CALLISTER, 2016). Assim, a matriz tem por finalidade agregar o

material de reforço, e transmitir os esforços entre a matriz e o reforço, o qual geralmente se encontra sob uma orientação preferencial.

Ainda segundo Callister (2016), os compósitos possuem três divisões principais: os compósitos reforçados com partículas, reforçados com fibras e compósitos estruturais. A Figura 3 mostra um esquema de classificação para vários tipos de compósitos.

Figura 3 - Classificação dos materiais compósitos.



Fonte - Adaptado de Callister (2016).

Os compósitos particulados se dividem em compósitos com partículas grandes e compósitos reforçados por dispersão, a diferença entre essas subclassificações se baseia no mecanismo de reforço e no aumento da resistência mecânica. Compósitos reforçados com fibras possuem um elevado potencial, pois a carga aplicada neste tipo de compósito é transmitida e distribuída entre as fibras pela fase matriz, e sofre a influência da orientação e da concentração das fibras. Os compósitos estruturais são constituídos tanto por materiais homogêneos como por materiais compósitos, cujas propriedades dependem não somente das

características dos materiais constituintes, mas também do projeto geométrico dos vários elementos que compõem suas estruturas (CALLISTER, 2016).

Os compósitos têm uma grande vantagem sobre outros materiais estruturais, pois moldes com formas complexas são facilmente adaptáveis aos processos em utilização. Os compósitos além de sua longevidade tradicional apresentam fáceis e simples técnicas de reparo e manutenção (MARGEM, 2013).

2.3.1 Materiais compósitos reforçados com fibras

Materiais compósitos apresentam como características, alta resistência e rigidez em relação ao peso, que podem ser expressas em termos dos parâmetros de resistência específica e módulo específico (CALLISTER, 2016). Compósitos reforçados com fibras são subclassificados em relação a orientação das fibras e ao seu comprimento na matriz.

De acordo com Callister (2016), com base na orientação e no comprimento das fibras, são possíveis três tipos de compósitos reforçados com fibras:

- Fibras contínuas e alinhadas: que possuem propriedades mecânicas altamente anisotrópicas, assumem um caráter direcional, onde o reforço e a resistência são máximos na direção do alinhamento, geralmente na direção longitudinal.
- Fibras descontínuas e alinhadas: na direção longitudinal são possíveis resistências e rigidez significativas.
- Fibras descontínuas e com orientação aleatória: possui propriedades isotrópicas, apesar de algumas limitações na eficiência do reforço.

Em relação ao comprimento da fibra, para cada combinação de fibra-matriz existe um comprimento crítico, que contribui para o aumento na resistência e rigidez, o valor deste comprimento depende do diâmetro e da resistência da fibra, e pode ser obtido pela seguinte equação 2.1:

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

Onde: l_c é o comprimento crítico;

σ_f^* é o limite de resistência à tração;

d é o diâmetro da fibra;

τ_c é a tensão de escoamento ou cisalhamento da matriz.

Quando as fibras são contínuas, apresentam comprimento maior que o comprimento crítico, já as fibras descontínuas apresentam comprimento menor que o comprimento crítico e quando submetidas a uma solicitação mecânica, geralmente não fornecem a matriz um aumento efetivo na resistência (CALLISTER, 2016).

Para Cândido (2014), a determinação da resistência na interface fibra-matriz, a análise do comprimento crítico da fibra e das propriedades físicas, mecânicas e térmicas são de grande importância para determinação de projetos de engenharia.

Em seu estudo Gomes et al. (2013), avaliou a utilização de resíduo de fibra natural em substituição à fibra de vidro. Os compósitos estudados foram produzidos a partir de Polietileno de Alta Densidade (HDPE), e fibra de bananeira com fração mássica (m/m) de 10, 20, 30 e 40%, assim como compósitos com fibra de vidro de mesma matriz polimérica e nas mesmas proporções, que foram preparados para comparação. Após a realização de ensaios mecânicos foi possível concluir que houve aumento no grau de reforço mecânico nos compósitos por meio da incorporação da fibra natural, sendo possível comprovar a substituição da fibra de vidro pela fibra de bananeira em determinados percentuais, quando misturados ao (HDPE).

Monteiro et al. (2010), estudaram a relação entre o diâmetro e a resistência a tração das fibras, foi realizado o dimensionamento de diferentes tipos de fibras naturais, com base em medições precisas do diâmetro foi possível obter fibras com resistência à tração relativamente maior. A avaliação estatística foi realizada através da análise Weibull, onde foi possível comprovar que, para todas as fibras analisadas, a resistência à tração mantém uma relação inversa com o diâmetro da fibra. Estatisticamente esta relação está em conformidade com um tipo de equação analítica hiperbólica, que revela a possibilidade de fibras que possuem um alto valor de resistência serem selecionadas em associação com diâmetros muito pequenos. E através de análise estrutural, utilizando microscopia eletrônica de varredura, obteve-se uma explicação para os mecanismos de fortalecimento responsáveis pelo desempenho superior dessas fibras selecionadas dimensionalmente.

Barbosa (2015) estudou o desempenho da fibra natural de piaçava nas propriedades mecânicas de compósitos de matriz polimérica, foi investigado o efeito

da adição de fibras naturais de piaçava com 1 cm, nas propriedades de compósitos de matriz polimérica. Através da técnica de moldagem foram feitos os corpos de prova com 20% em massa de fibra, dispostas de maneira orientada em resina epóxi. Os resultados do estudo mostraram que os corpos de prova reforçados com a fibra de piaçava apresentam melhores propriedades mecânicas em relação as propriedades das matrizes poliméricas.

Nascimento (2009), realizou a caracterização de fibras de piaçava em matriz poliéster e epóxi, os corpos de prova foram confeccionados com uma variação de 0 a 40 % em de volume de fibras. Os resultados obtidos, mostraram um grande potencial para compósitos poliméricos reforçados com fibras de piaçava, quando comparados com outras fibras naturais. Assim seu estudo revelou ser possível desenvolver compósitos com boas propriedades, utilizando fibras de piaçava como carga e também como reforço de matriz polimérica.

Rodrigues et al. (2015), estudaram como as principais variáveis do processo de infusão afetam as propriedades do compósito quando são utilizadas fibras naturais como reforço de uma matriz de poliéster insaturado. Foram produzidas placas reforçadas com fibras de curauá, juta e palha da costa dispostas na forma de fios alinhados. A caracterização foi realizada quanto à sua resistência à tração, módulo de elasticidade, impacto Charpy e porosidade. Os resultados mostraram que o processo de infusão possibilitou a fabricação de compósitos com até 45% de fração volumétrica de fibra, com porosidade em torno de 2% e excelente estabilidade dimensional. Verificou-se ainda que, no geral, a elevação do nível de vácuo alterou significativamente as condições de compactação dos reforços, e esta alteração depende da estrutura da fibra utilizada, e da eficiência da interface matriz/reforço.

2.3.2 Materiais Compósitos Reforçados Com Fibras de Guarumã

Os compósitos constituídos de fibras naturais surgem como alternativa para substituir as fibras sintéticas, pois podem ser aplicados em diversos setores da indústria, além de apresentarem alto desempenho mecânico e serem ambientalmente corretos. Por estes motivos, a produção destes tipos de materiais tem se tornado cada vez mais alvo de estudos.

Neste contexto, a fibra de guarumã, assim como as demais fibras naturais, pode possuir um bom desempenho quando utilizada como reforços de materiais compósitos. Em seu estudo, Costa et al. (2014) avaliaram os resultados de resistência à tração dos compósitos de matriz poliéster reforçados com fibra de guarumã. Foi observado que a resistência do compósito foi inferior à resistência da matriz, no entanto superiores quando comparados a outros compósitos reforçados por fibras naturais. A Tabela 3 mostra os resultados de resistência a tração da matriz poliéster e dos compósitos reforçados com fibra de guarumã.

Tabela 3 – Resultados de resistência a tração dos corpos de prova da matriz poliéster e dos compósitos.

Corpos de Prova(CP)	Resistencia à Tração (σ) (MPa)	Deformação (ϵ) (mm/mm)
Resina(sem reforço)	32,446 \pm 5,59	0,1203 \pm 0,041
5mm	11,061 \pm 1,95	11,061 \pm 1,95
10mm	15,975 \pm 3,87	15,975 \pm 3,87
15mm	23,454 \pm 3,89	23,454 \pm 3,89

Fonte - Costa et al. (2014).

Foi observado ainda, que quanto maior o comprimento da fibra maior a resistência à tração do compósito.

A necessidade do desenvolvimento de novos materiais capazes de conciliar melhores propriedades e adequação ao meio ambiente tem despertado um grande interesse atual, pois a produção desses materiais favorece sua utilização em diversos setores industriais, principalmente por obterem melhoria em seu desempenho mecânico. Dessa forma, a incorporação de fibras de guarumã pode contribuir para o desenvolvimento de um novo material que agrega várias características como, material ambientalmente correto, com baixo custo e boas propriedades mecânicas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais utilizados

As fibras de guarumã utilizadas neste trabalho foram coletadas na região metropolitana de Belém. A matriz polimérica utilizada para a fabricação dos compósitos foi a resina epóxi a base de Bisfenol A (SQ 2001), cedida pela empresa de tintas veloz, bem como o catalisador a base de poliamina (SQ 3154), utilizado em uma proporção de 1:2, uma parte de catalisador para duas partes de resina. A Figura 4 mostra a resina e o catalisador.

Figura 4 – Resina e Catalisador cedidos pela empresa de tintas Veloz



Fonte - Aatoria Própria (2018)

3.2 Caracterização das fibras de guarumã

As fibras foram desfiadas manualmente e cortadas em um comprimento médio de 10 cm, as medidas foram feitas com o auxílio de uma régua graduada. As Figuras 5, 6 e 7 apresentam respectivamente, a tala de guarumã, as fibras de guarumã desfiadas e a medição da fibra de guarumã.

Figura 5 – Tala de guarumã.



Fonte - Aatoria Própria (2018)

Figura 6 – Fibras de guarumã desfiadas.



Fonte - Aatoria Própria (2018)

Figura 7 – Medição da fibra.



Fonte - Aatoria Própria (2018)

3.3 Medição do diâmetro fibrilar

As fibras foram separadas de acordo com suas espessuras, em fibras finas, fibras médias e fibras grossas, de cada espessura foram tiradas 3 amostras para a medição do diâmetro fibrilar, realizada em microscópio ótico da marca NIKON, modelo ECLIPSE LV150/LV150A no laboratório de microscopia do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia (PRODERNA) da Universidade Federal do Pará (UFPA). As medidas foram realizadas em 5 posições ao longo da fibra. Em cada posição obteve-se uma segunda medida girando a fibra em noventa graus e considerando-se a média das duas medidas nesta posição. Este procedimento foi realizado devido ao fato da seção reta da fibra não ser perfeitamente circular, característica da variabilidade de fibras naturais.

3.4 Determinação da massa específica

A massa específica foi obtida a partir da relação entre a massa e o volume da fibra, o valor da massa foi verificado com o auxílio de uma balança analítica da marca Chyo modelo JK 200 mostrada na Figura 8.

Figura 8 – Balança analítica



Fonte - Autoria Própria (2018)

Para obter-se o valor do volume foi levado em consideração que a fibra possui uma geometria cilíndrica perfeita, e o cálculo do volume médio da fibra foi efetuado utilizando a equação 3.1.

$$V_m = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot l_m}{4} \quad (3.1)$$

Onde:

V_m – Volume médio da fibra;

d – Diâmetro médio da fibra;

l_m – Comprimento médio.

Com os valores obtidos para a massa da fibra e o volume médio, calculou-se a massa específica, de acordo com a equação 3.2.

$$\rho = \frac{m}{V_m} \quad (3.2)$$

Onde:

ρ – Massa específica;

m – Massa;

V_m – Volume médio da fibra.

3.5 Preparação dos compósitos

Os corpos de prova foram fabricados com resina epóxi e fibras de guarumã em molde de silicone. A resina foi inicialmente pesada para que se obtivesse a proporção exata da adição de seu catalizador, a Figura 9 ilustra o catalizador e a resina utilizados. Após este procedimento, ambos foram misturados e essa mistura foi vertida no molde onde foram colocadas as fibras de forma contínua e alinhada.

Os corpos de prova ficaram por 24 horas no molde para que ocorresse o processo de cura. A Figura 10 mostra a fabricação dos corpos de prova.

Figura 9 - Catalisador e resina.



Fonte - Autoria Própria (2018)

Figura 10 – Fabricação dos corpos de prova.



Fonte - Autoria Própria (2018)

Foram produzidos compósitos com 0, 10, 20 e 30% em volume de fibra. A Tabela 4 apresenta a relação de quantidade resinas/fibras utilizada nesse trabalho.

Tabela 4 – Relação de quantidades de resina e fibra.

Composição	Quantidade de Corpos de prova produzidos	Resina (%)	Fibra (%)
CEF0	3	100	0
CEF10	3	90	10
CEF20	3	80	20
CEF30	3	70	30

Fonte - Elaborado pelo autor (2018).

Composição: CEF0 – Resina. CEF10 – Compósito de matriz epóxi com 10% em volume de fibra. CEF20 - Compósito de matriz epóxi com 20% em volume de fibra. CEF30 – Compósito de matriz epóxi com 30% em volume de fibra.

Para a determinação da quantidade de massa de fibra necessária em cada corpo de prova foi utilizada a regra da mistura, calculada pela equação 3.3:

$$\% f = \frac{\frac{mf}{\rho f}}{\frac{mf}{\rho f} + \frac{mr}{\rho r}} \quad (3.3)$$

Onde:

$\% f$ é a porcentagem de fibra

mf é a massa da fibra

ρf é a densidade da fibra

mr é a massa da resina

ρr é a densidade da resina

Com a equação 3.3 foi possível obter os valores de massa de fibra necessária para a produção dos corpos de prova. Após a etapa de cura os corpos de prova foram lixados e medidos. A Figura 11 mostra os corpos de prova após o desmolde.

Figura 11 – Corpos de prova após o desmolde.



Fonte - Autoria Própria (2018)

O lixamento dos corpos de prova, foi realizado com o objetivo de retirada das superfícies irregulares, e para adequar-se às especificações necessárias ao ensaio de tração. Este processo foi realizado com lixas de diferentes granulometrias, que variaram de 60 a 1200. A Figura 12 mostra os corpos de prova após o processo de lixamento.

Figura 12 – corpos de prova lixados.



Fonte - Autoria Própria (2018)

A Figura 13 mostra o corpo de prova medido com o auxílio de um paquímetro após a etapa de lixamento.

Figura 13 – Medição do corpo de prova.

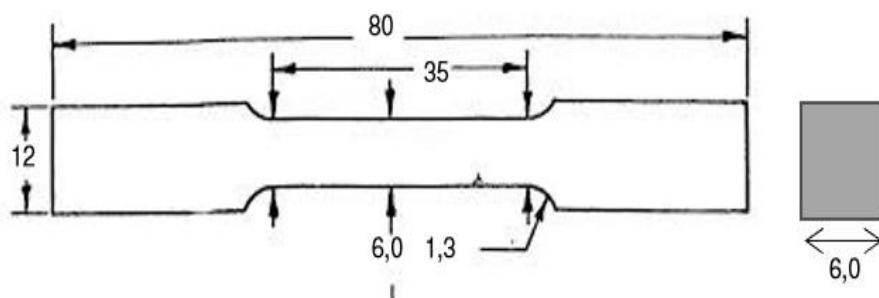


Fonte - Autoria Própria (2018)

3.6 Caracterização mecânica

Os ensaios de tração foram realizados no Laboratório de Ensaio Mecânicos (LABEM) da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM) da UFPA, seguindo as diretrizes da norma ASTM D 638. A Figura 14 apresenta uma representação esquemática dos corpos de prova para ensaio de tração com as dimensões iguais a 6 x 6 mm de seção transversal e 35 mm de comprimento útil.

Figura 14 – Representação esquemática dos corpos de prova para ensaio de tração.



Fonte - Candido (2014)

Na Figura 15 estão apresentados os compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras de guarumã preparados para o ensaio de tração.

Figura 15 – Corpos de prova preparados para o ensaio de tração.



Fonte - Autoria Própria (2018)

Para este ensaio foi utilizada a máquina fabricada pela KRATOS modelo IKCL3-USB mostrada na Figura 16. O corpo de prova foi posicionado para aplicação de uma carga de 5 kN em seu centro, com uma célula de carga de 3 kN a uma velocidade de ensaio de 2 mm/min.

Figura 16 – Equipamento utilizado no ensaio de tração.



Fonte - Autoria Própria (2018)

A tensão máxima que os corpos de prova suportam, foi obtida pela equação 3.4 que relaciona a força aplicada com a área útil do corpo de prova.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3.4)$$

Onde:

σ é a tensão máxima

F é a força aplicada

A é a área da seção retangular do corpo de prova.

Para o cálculo do módulo de elasticidade foi utilizada a equação 3.5 que relaciona a tensão máxima e a deformação.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3.5)$$

Onde:

E é módulo de elasticidade

σ é a tensão máxima

ε é a deformação.

3.7 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A análise morfológica da região da fratura foi realizada em microscópio eletrônico de varredura da marca HITACHI modelo TM3000, no laboratório de microscopia do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia (PRODERRNA) da Universidade Federal do Pará (UFPA). A figura 17 mostra o microscópio utilizado.

Figura 17 – Microscópio eletrônico de varredura.



Fonte - Autoria Própria (2018)

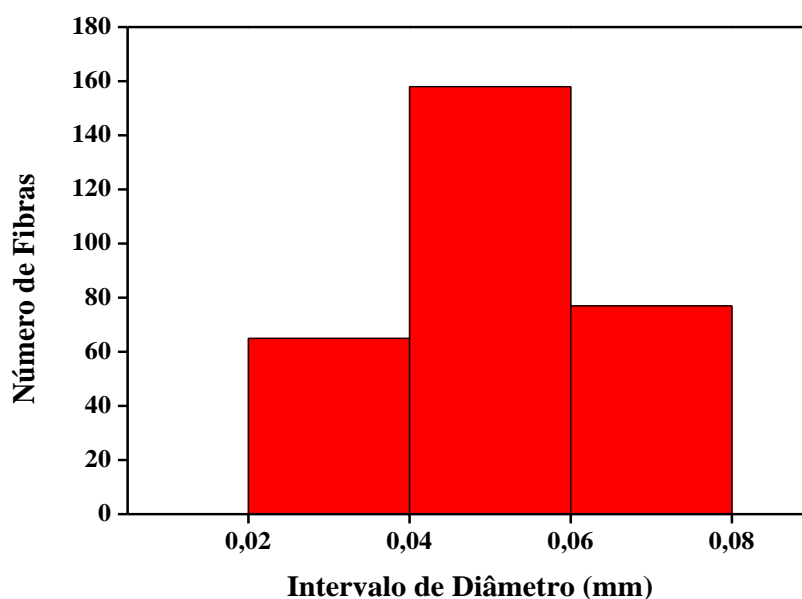
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização das fibras

4.1.1 Caracterização dimensional e determinação da massa específica das fibras de Guarumã.

A análise da distribuição do número de fibras de guarumã por intervalo de diâmetro, foi feita a partir da medição de 300 fibras aleatórias e individuais. A figura 18 mostra o padrão de distribuição diametral.

Figura 18 – Padrão de distribuição diametral.



Fonte - Autoria Própria (2018)

Observa-se que o maior número de fibras está no intervalo de 0,04 a 0,06, este fato pode estar associado à natureza das fibras que geralmente é mais compacta e de menor diâmetro. Os valores médios de diâmetros encontrados neste trabalho podem ser comparados com os valores obtidos por MARGEM (2013), que ao realizar a medição do diâmetro de fibras de malva, observou um maior número de fibras no intervalo de 0,035mm a 0,05mm.

A massa específica das fibras em função da distribuição do intervalo diametral está apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 – Massa específica em função do diâmetro médio.

Espessura da fibra	Diâmetro médio (mm)	Massa específica (g/cm³)
Fibras finas	0,03	0,44
Fibras médias	0,05	0,17
Fibras grossas	0,07	0,15

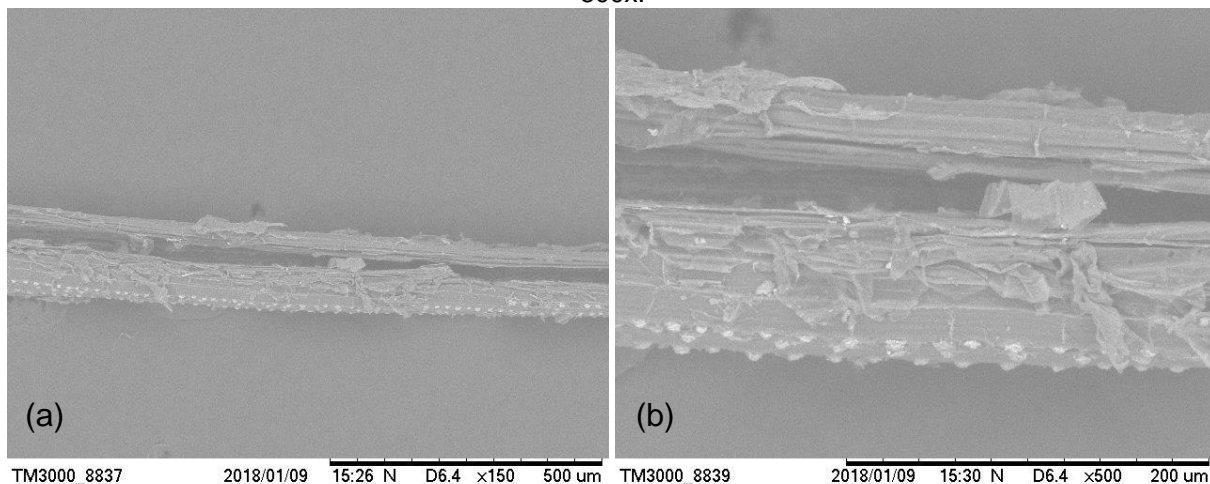
Fonte – Aatoria Própria (2018).

De acordo com a Tabela 4.1, observa-se que com o aumento do diâmetro, há uma diminuição da massa específica aparente. Isso indica que fibras de menor diâmetro são mais compactas, e possuem menos espaços vazios em sua microestrutura. Esse padrão está associado ao fato dessas fibras possuírem menos poros para a passagem das seivas bruta e elaborada que fibras mais grossas, o que sugere que fibras finas, sejam mais resistentes que as fibras grossas. O mesmo padrão foi identificado por Nascimento (2009) ao realizar a caracterização de fibras de buriti, onde constatou que fibras com menores diâmetros apresentam poucos defeitos em sua estrutura sendo mais coesas, e fibras de maiores diâmetros apresentam um número maior de filamentos rompidos de forma irregular e a presença de espaços vazios entre as fibrilas.

4.1.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da fibra de Guarumã

A microscopia eletrônica de varredura foi realizada em três grupos de fibras, de acordo com suas espessuras: fibras finas, fibras médias e fibras grossas. A Figura 19 apresenta a micrografia da fibra fina de guarumã com diferentes aumentos.

Figura 19 – Micrografias obtidas por MEV da fibra fina de guarumã. (a) aumento 150x e (b) aumento 500x.

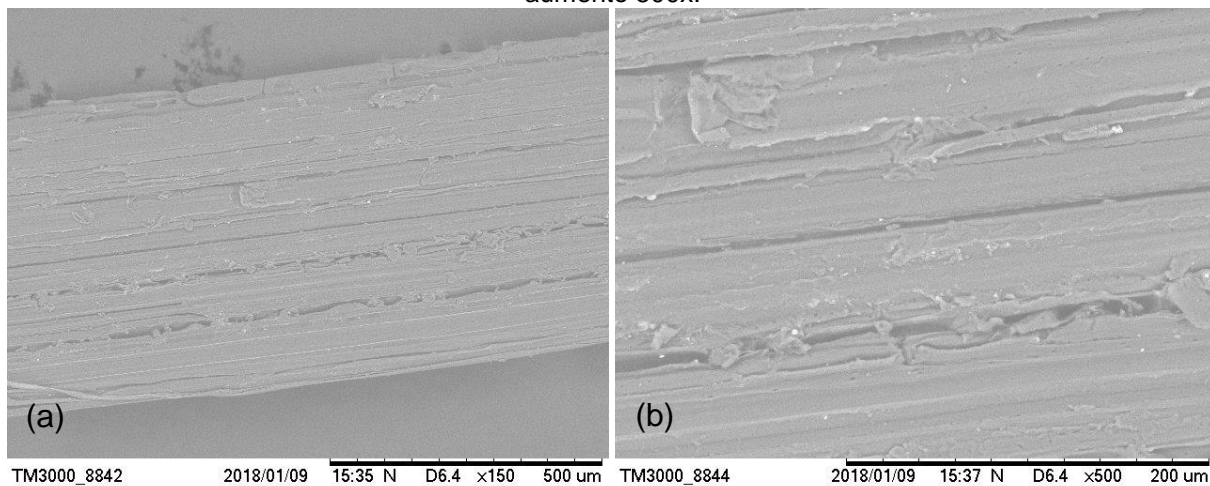


Fonte - Autoria Própria (2018)

Pode-se observar que a fibra fina, ao longo de todo seu comprimento, apresenta áreas rugosas e espaços vazios entre as microfibrilas.

A Figura 20 apresenta a micrografia de fibra de média de guarumã.

Figura 20 – Micrografias obtidas por MEV da fibra média de guarumã. (a) aumento 150x e (b) aumento 500x.

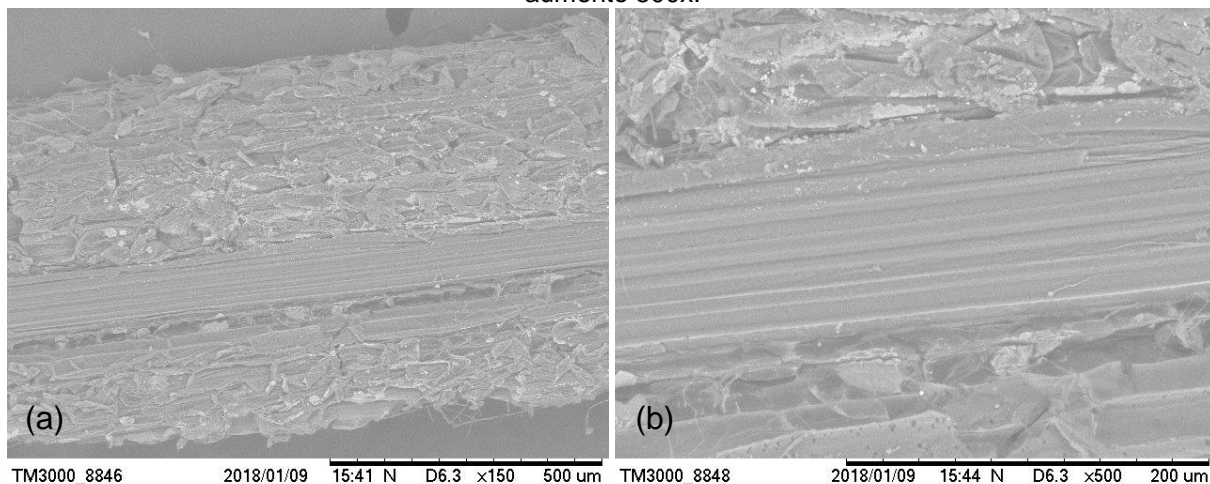


Fonte - Autoria Própria (2018)

Observou-se a partir da análise do MEV que, as fibras com diâmetro médio apresentam poucas imperfeições e superfície lisa com poucas áreas rugosas.

A Figura 21 apresenta a micrografia da fibra grossa de guarumã.

Figura 21 - Micrografias obtidas por MEV da fibra grossa de guarumã. (a) aumento 150x e (b) aumento 500x.



Fonte - Autoria Própria (2018)

Pode-se observar com a análise do MEV, que as fibras mais grossas apresentam muitas áreas rugosas e poucas áreas lisas quando comparado com as fibras finas e médias, além de apresentarem defeitos em sua estrutura, sugerindo que as fibras grossas apresentem menor resistência mecânica que as demais. CANDIDO (2014) ao realizar a caracterização de fibras de bagaço de cana-de-açúcar verificou que as fibras mais grossas apresentaram menor resistência em tração que as fibras mais finas. Além disso, foi observado também, que as fibras de maior calibre apresentaram maior quantidade de poros e defeitos ao longo de seu comprimento.

4.2 Caracterização mecânica

4.2.1 Ensaio de tração

Na Figura 22 estão apresentados os compósitos ensaiados em tração de matriz epóxi reforçados com fibras de guarumã.

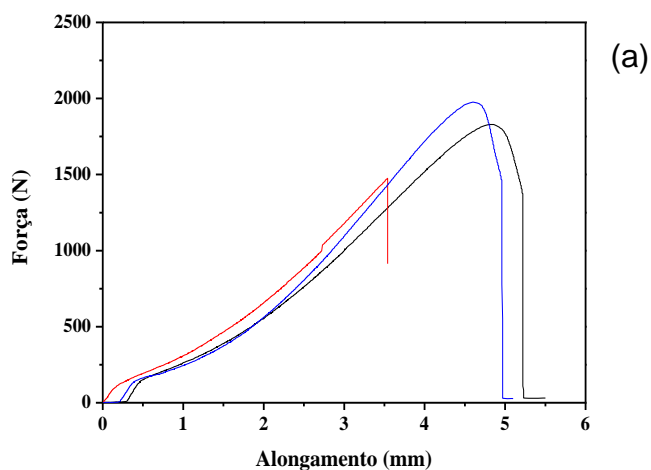
Figura 22 – Aspecto macroscópico da fratura dos compósitos ensaiados em tração.

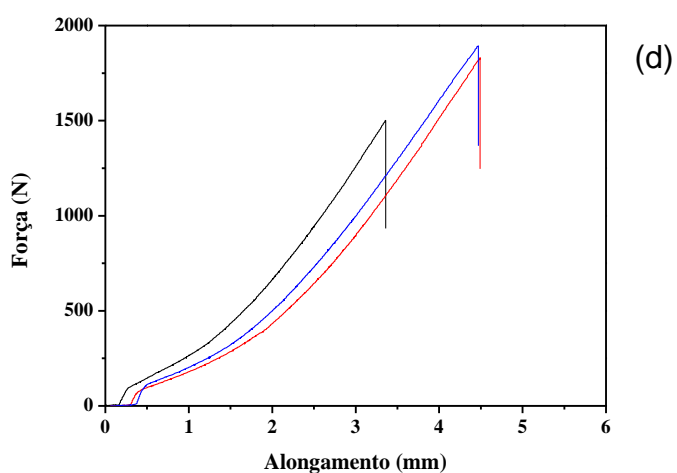
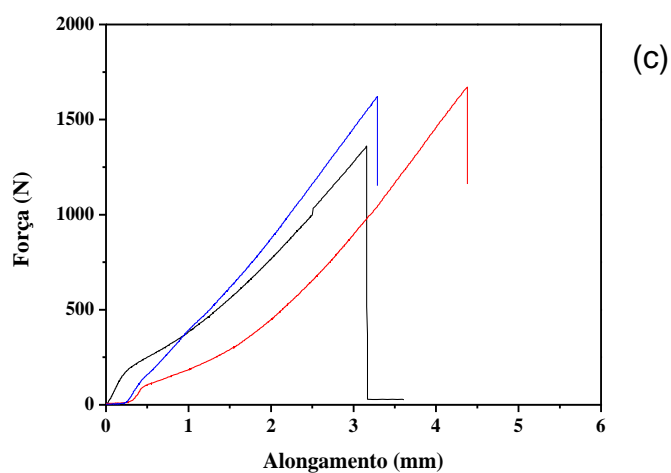
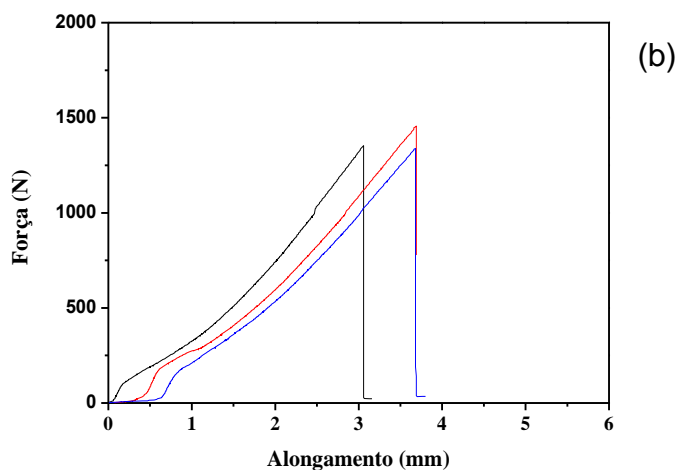


Fonte - Autoria Própria (2018)

Os corpos de prova apresentaram fratura dentro do comprimento útil, isto é característica dos compósitos reforçados com fibras naturais. Além disso não é possível identificar a olho nu, indicando que os corpos de prova apresentaram um comportamento frágil. A Figura 23 ((a), (b), (c) e (d)) apresenta as curvas típicas de ensaio de tração para a resina epóxi e dos compósitos reforçados com 10, 20 e 30% em volume de fibras de guarumã, respectivamente.

Figura 23 – Curvas de tração da resina epóxi (a) e dos compósitos com 10 (d), 20 (c) e 30% (d) em volume de fibras de guarumã.





Fonte - Autoria Própria (2018)

De acordo com a curva de tração, a resina epóxi apresentada na Figura 4.6 (a), apresenta um comportamento parabólico com uma suave inclinação indicando

certa plasticidade. Já as composições com 10, 20% e 30% em volume de fibras, figura 4.6 (b), (c) e (d), revelam uma tendência linear sugerindo que esses materiais apresentam um comportamento elástico terminando com a ruptura de forma frágil.

Os valores referentes à resistência à tração, ao módulo de elasticidade e à deformação dos compósitos, obtidos a partir dos gráficos, estão apresentados na Tabela 6.

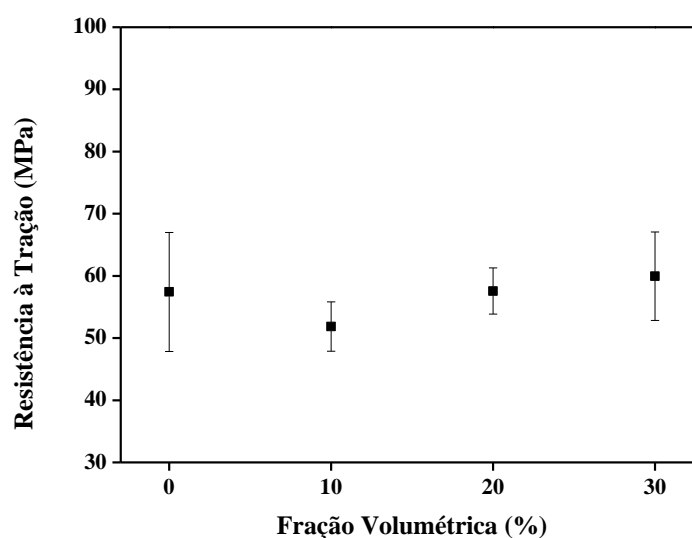
Tabela 6 – Resultados das propriedades mecânicas obtidas a partir do ensaio de tração.

Composição	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de elasticidade	Deformação
CEF0	57,42 ± 9,57	0,25 ± 0,02	0,24 ± 0,05
CEF10	51,87 ± 3,97	0,29 ± 0,01	0,18 ± 0,02
CEF20	57,07 ± 3,73	0,31 ± 0,03	0,19 ± 0,03
CEF30	59,94 ± 7,13	0,29 ± 0,02	0,21 ± 0,03

Fonte - Elaborado pelo autor (2018).

A Figura 24 apresenta o gráfico da propriedade de resistência à tração em relação a fração volumétrica e a média de desvio padrão, obtidos a partir das curvas Força versus Alongamento.

Figura 24 – Resistencia à tração.



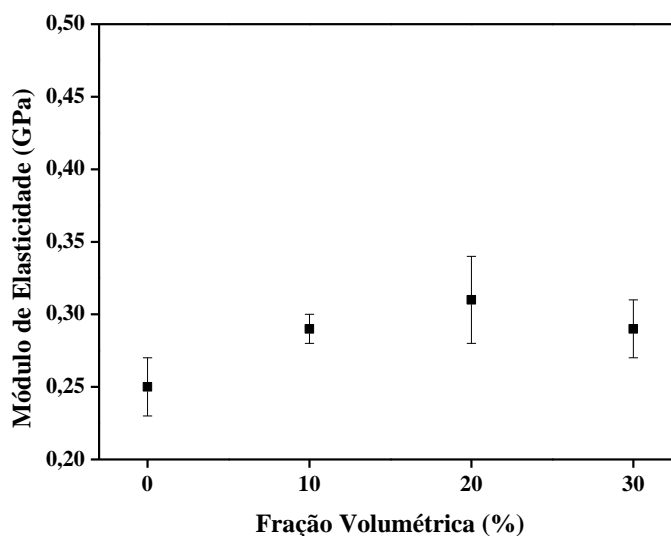
Fonte - Autoria Própria (2018)

De acordo com o gráfico de resistência à tração, observa-se que os valores desta propriedade de maneira geral não apresentaram variação estatística significativa, entretanto quando são observados os valores médios de resistência nota-se que incorporação das fibras de guarumã induziu a um ligeiro aumento de resistência, sendo a composição com 30% em volume de fibra, a que apresentou maior valor para resistência à tração, isso mostra que o maior número de fibras incorporadas a matriz induz a um melhor reforço dessa matriz. Os valores relacionados a resistência a tração de estão próximos de 60 MPa, e este valor é superior ao observado por Costa et al. (2014) ao incorporar fibras curtas e aleatórias de guarumã em matriz poliéster. Tal comportamento está associado ao fato de no presente trabalho serem utilizadas fibras longas e alinhadas na matriz. Essa disposição favorece a transferência de carga ao logo do comprimento da fibra contribuindo para o ganho de resistência mecânica. Além disso, o maior valor para o limite de resistência à tração está relacionado a matriz epóxi, o que pode ter contribuído para obtenção dos valores mais elevados, para esta propriedade.

Em seu estudo Cândido (2014), avaliou a resistência à tração de compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras de bagaço de cana-de-açúcar, e os valores obtidos para essa propriedade, em todas porcentagens de volume de fibras incorporadas, foram menores que os valores apresentados neste trabalho. Margem (2013), ao avaliar as propriedades em tração de compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras de malva, destacou que quando as fibras são acrescentadas a matriz, há uma melhora significativa nas propriedades. O valor observado pelo autor foi de 56,2 MPa para fração volumétrica de 30% que é menor que o obtido neste trabalho para a mesma fração volumétrica.

Com aumento do volume de fibra incorporado a matriz, a ruptura tende a se tornar mais heterogênea, isto é característica de compósitos reforçados por fibras naturais. O mesmo foi identificado por Barbosa (2011) ao estudar o efeito da incorporação de fibras de buriti em matriz epóxi, que obteve um valor de resistência à tração, para adição de 30% em volume, igual a 76,07 MPa.

A Figura 25 apresenta o gráfico do módulo de elasticidade em relação a fração volumétrica e a média de desvio padrão.

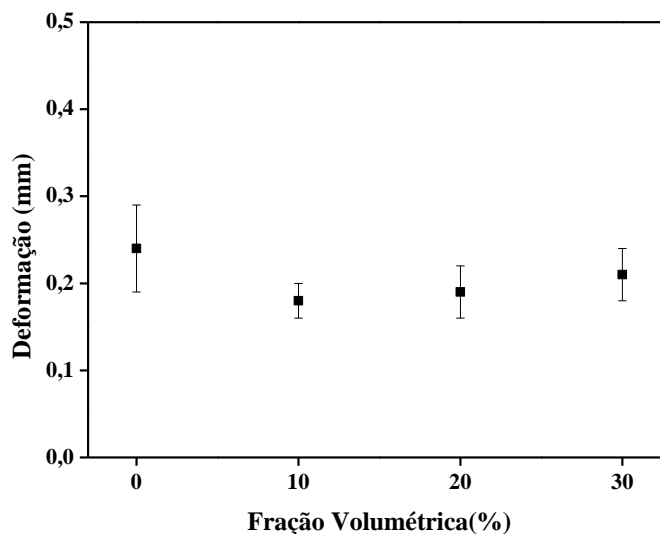
Figura 25 – Módulo de elasticidade.

Fonte - Autoria Própria (2018)

Para o módulo de elasticidade, a adição das fibras gerou um aumento nessa propriedade quando comparado à resina pura. Porém o compósito com 30 % em volume de fibra (CEF30) apresentou uma diminuição nessa propriedade quando comparado ao compósito com 20% em volume de fibra (CEF20). De acordo com CALLISTER (2016), o módulo de elasticidade está relacionado com a rigidez do material, quanto maior o módulo de elasticidade mais rígido é o material, ou sua deformação elástica será menor. Assim, levando em consideração a margem de erro estatístico, a resina (CEF0) obteve o menor valor para esta propriedade e entre os compósitos reforçados por fibras, o CEF30 obteve o menor valor, e dentre todas as composições o CEF20 é o material mais rígido.

Os resultados obtidos para o módulo de elasticidade neste trabalho, foram menores quando comparados com a incorporação das fibras de buriti, bagaço de cana-de-açúcar e malva, assim o compósito produzido com matriz epóxi reforçado com fibras de guarumã é o menos rígido dentre estes.

A Figura 26 apresenta o gráfico da deformação em relação a fração volumétrica e a média de desvio padrão.

Figura 26 – Deformação.

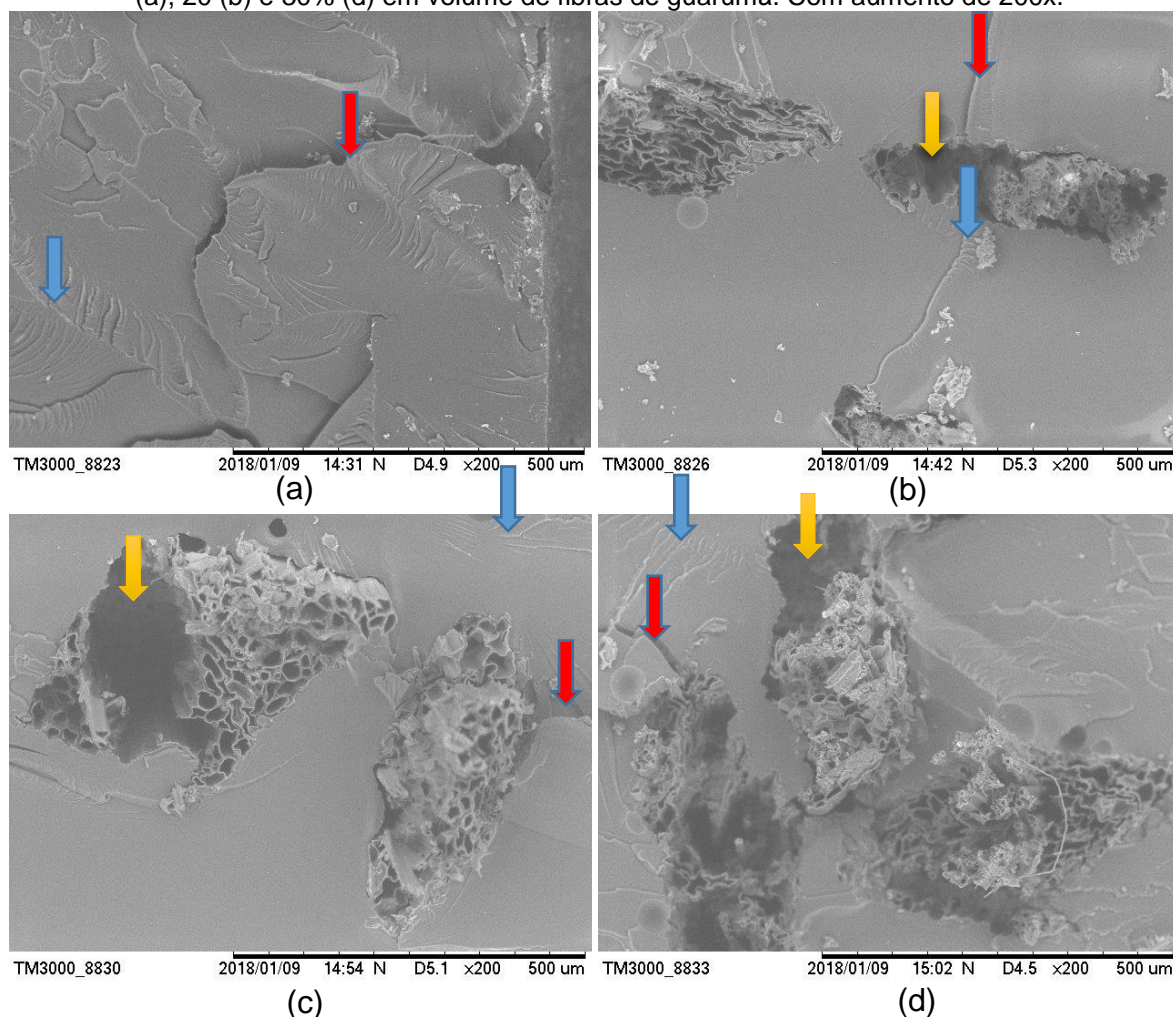
Fonte - Autoria Própria (2018)

Em relação à deformação dos compósitos, o maior valor está associado à resina epóxi, esse resultado confirma o comportamento apresentado na curva Carga versus Alongamento. Na medida em que fibras são adicionadas a matriz, aumenta a rigidez do material, confirmando o resultado obtido para o módulo de elasticidade.

4.2.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) em compósitos de matriz epóxi reforçada com fibras de Guarumã.

A Figura 27 ((a), (b), (c) e (d)) apresenta, respectivamente, as micrografias obtidas por MEV da região da fratura dos corpos de prova ensaiados em tração, para a resina epóxi e compósitos reforçados com 10, 20 e 30% em volume de fibras de guarumã.

Figura 27 - Micrografias obtidas por MEV da resina epóxi (a) e dos compósitos reforçados com 10 (a), 20 (b) e 30% (d) em volume de fibras de guarumã. Com aumento de 200x.



Fonte - Autoria Própria (2018)

As micrografias obtidas por MEV revelam que tanto a resina, Figura 27 (a), quanto os compósitos, Figura 27 ((b), (c) e (d)) apresentam aspecto de fratura frágil, comprovadas pela presença de marcas de rio, que podem ser identificadas na figura pelas setas azuis. Nota-se ainda a presença de franjas de fratura principalmente na resina, indicando que a fratura não ocorreu de forma plana, as setas em vermelho indicam as franjas de fratura. Pode-se observar ainda que, as composições com 10, 20 e 30% em volume de fibra, apresentam regiões em que fibras foram arrancadas da matriz identificadas pelas setas em amarelo, essa baixa adesão está associada a presença de lignina e celulose, que diminuem a aderência de fibras na matriz, por isso essas fibras foram arrancadas o que sugeri que o tratamento químico das fibras possa melhorar esta adesão.

Os valores encontrados na caracterização mecânica, mostraram que apesar do baixo desempenho mecânico quando relacionado com a matriz, a adição de fibras de guarumã tende a um ligeiro reforço na matriz epoxídica. As micrografias obtidas por MEV, mostraram que todos os compósitos reforçados com fibras de guarumã, apresentaram fratura frágil e regiões em que as fibras foram descoladas da matriz, sugerindo baixa energia interfacial entre a matriz e o agente de reforço.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A determinação das propriedades de tração de compósitos de matriz epóxi reforçados com fibra de Guarumã revelou que:

O maior número de fibras apresentou-se no intervalo de 0,04 mm a 0,06 mm.

A massa específica aparente das fibras diminuiu com o aumento do diâmetro, pois fibras de menor diâmetro são mais compactas, e possuem menos espaços vazios, devido a menor quantidade de defeitos em sua microestrutura.

A microscopia eletrônica de varredura mostrou que as fibras mais grossas apresentam maior quantidade de defeitos em sua estrutura, com muitas áreas rugosas e poucas áreas lisas. Esse padrão morfológico sugere que as fibras mais grossas podem apresentar menor resistência mecânica quando comparadas a fibras de menor calibre.

A caracterização mecânica dos compósitos revelou que, a adição das fibras em matriz epóxi aumentou a resistência à tração apenas na composição com 30% em volume de fibra. Levando em consideração o percentual de fibras na matriz, observou-se uma melhora das propriedades mecânicas com o aumento da porcentagem de fibra.

No que se refere ao módulo de elasticidade, a resina (CEF0) obteve o menor valor para esta propriedade e a composição CEF20 obteve o maior valor sugerindo que a adição de 20% em volume de fibra induz a um aumento da rigidez do compósito.

A utilização das fibras como agente de reforço da matriz epoxídica levou a um aumento da deformação na medida em que se aumentou o volume de fibras adicionado, confirmando o resultado obtido no módulo de elasticidade.

A caracterização microestrutural da resina epóxi e dos compósitos revelou que os materiais como um todo apresentaram fratura frágil, revelada pela presença de marcas de rio. Além disso, por algumas micrografias apresentarem regiões em que as fibras foram arrancadas da matriz, pode-se concluir que houve uma baixa aderência entre a fibra e a matriz.

A incorporação da fibra de Guarumã em matriz epóxi mostrou-se eficiente, considerando que os compósitos produzidos obtiveram uma resistência à tração com valor superior a outros compósitos que foram pesquisados na literatura, e que utilizaram o mesmo tipo de fibra ou a mesma matriz. Assim, sugere-se que o

percentual de fibra mais indicado para incorporação à matriz é o de 30%, pois apresentou os maiores valores de resistência à tração e melhor aderência interfacial.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nesse estudo, algumas sugestões de trabalhos futuros podem ser levantadas, tais como:

- Realizar o estudo do comportamento mecânico em tração e do comportamento térmico das fibras de guarumã.
- Estudar a relação entre a resistência mecânica e a distribuição diametral das fibras de guarumã.
- Produzir compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras finas, médias e grossas distribuídas de maneira alinhadas na matriz.
- Caracterizar mecanicamente por ensaio de flexão e impacto, os compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras de guarumã.
- Estudar o efeito do tratamento químico das fibras de guarumã no desempenho mecânico dos compósitos poliméricos.
- Avaliar o desempenho mecânico dos compósitos de outra matriz polimérica, quando reforçados com fibras de guarumã.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, C. M. **Hidrólise enzimática de resíduos lignocelulósicos utilizando celulasas produzidas pelo fungo *Aspergillus Níger***. 2010. 106 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2010.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. D 638. **Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics**. Pennsylvania: ASTM, 2008.
- AQUINO, R. C. M. P.; MONTEIRO, S. N.; D'ALMEIDA, J. R. M. Desenvolvimento de Compósitos de Matriz Polimérica e Piaçava. In: **Net, Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**. 2000.
- AQUINO, RCMP. **Desenvolvimento de compósitos de fibras de piaçava da espécie *attalea funifera mart* e matriz de resina**. 2003. 150 p. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2003.
- ASKELAND, Donald R. **Ciência e engenharia dos materiais**. 3. ed. São Paulo: Cengage learning, 2014.
- BARBOSA, A. de P. **Características estruturais e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de buriti**. 2011. 159 p. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2011.
- BARBOSA, V.C.S. et al. DESEMPENHO DA FIBRA NATURAL DE PIAÇAVA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA. **Blucher Chemical Engineering Proceedings**, São Paulo v. 1, n. 2, p. 8205-8212, 2015.
- CALLISTER, W. D. Jr. **Ciência e Tecnologia de Materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- CANDIDO, V. S. **Caracterização e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de bagaço de cana-de-açúcar**. 2014. 188 p. Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais) - Instituto Militar de Engenharia, 2014.
- CANEVAROLO Jr, Sebastião V. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 3. ed. São Paulo: Artliber, 2010.
- CASTRO, D. O. *et al.* A Preparação e caracterização de biocompósitos baseados em fibra de curauá, biopolietileno de alta densidade (BPEAD) e polibutadieno líquido hidroxilado (PBHL). **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Paulo, v. 23, n. 1, p. 65-73, 2013.
- COSTA, M. O.; SOUSA, F. S. de; SOUSA, F. V. A. de; ANDRADE, S.M.C. **Ensaio de tração e de absorção de água em compósitos de resina poliéster e fibra de tala de guarumã**. In: CBECIMAT - CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA

E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 21, Cuiabá, 2014. Anais. São Paulo: Metallum, 2014. p.3736-3741.

D'ALMEIDA, J. R. M. **Desempenho de compósitos reforçados por fibras lignocelulósicas – situação atual e perspectivas.** In: CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MATERIAIS E METALURGIA, 59, São Paulo, 2004. Anais. São Paulo: ABM, 2004. p. 4760-4769.

GOMES, Thiago S.; VISCONTE, Leila LY; PACHECO, E. B. A. V. Substituição da fibra de vidro por fibra de bananeira em compósitos de polietileno de alta densidade. Parte 1. Avaliação mecânica e térmica. **Polímeros**, São Paulo, v. 23, n. 2, p. 206-211, 2013.

JAYARAMAN, K. **Manufacturing sisal-polypropylene composites with minimum fibre degradation.** Composites Sci. Technol. v. 63, p. 367-374, 2003.

JOHN, M.J.; THOMAS, S. Biofibers and Biocomposites. **Carbohydrate Polymers**, v. 71, p. 343-364, 2008.

LUZ, F. S. da. **Avaliação do comportamento balístico de blindagem multicamada com compósito de epóxi reforçado com fibra de juta.** 2014. 119p. Dissertação (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2014.

MARGEM, J. I. **Estudo das características estruturais e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de malva.** 2013. 134 p. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) -- Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2013.

MARINELLI, A. L., MONTEIRO, M. R., AMBRÓSIO, J. D., BRANCIFORTI, M. C., KOBAYASHI, M., NOBRE, A. D. Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras vegetais naturais da biodiversidade: uma contribuição para a sustentabilidade amazônica. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Paulo, v.18, n 2, p. 92-99, 2008.

MARINUCCI, Gerson. **Materiais compósitos poliéricos.** São Paulo: Artiliber, 2011.

MONTEIRO, S. N. et al. Tenacidade ao entalhe por impacto charpy de compósitos de poliéster reforçados com fibras de piaçava. **Revista Matéria**, v. 11, n. 3, p. 204-210, 2006.

MONTEIRO, S. N. et al. G. Efeito da incorporação de fibras de coco no comportamento dinâmico-mecânico de compósitos com matriz poliéster. **Tecnologia em metalurgia e materiais**, v. 5, n. 2, p. 111-115, 2008.

MONTEIRO, S.N. et al. Natural Lignocellulosic Fibers as Engineering Materials - An Overview. **Metallurgical And Materials Transactions A**, v. 42A, p.2963-2974, 2011.

NASCIMENTO, D. C. de O. **Análise das propriedades de compósitos de fibras de piaçava e matriz de resina epóxi.** 2009. 136 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2009.

OLIVEIRA, J.; POTIGUARA, R.C.; LOBATO, L.C.B.; Fibras vegetais utilizadas na pesca artesanal na microrregião do Salgado, Pará. **Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi. Ciências Humanas**, Belém, v. 1, n. 2, 113-127 p., maio-ago, 2006.

PIRES, E. N et al. Efeito do tratamento alcalino de fibras de juta no comportamento mecânico de compósitos de matriz epóxi. **Polímeros**, São Paulo, v. 22, n. 4, p. 339-344, 2012.

RODRIGUES, J.; FUJIYAMA, R.; SOUZA, J. A. Compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais da Amazônia fabricados por infusão. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 4, p. 946 – 960, 2015.

SALOMÃO, R.de P. et al. As florestas de Belo Monte na grande curva do rio Xingu, Amazônia Oriental. **Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi. Ciências Naturais**, Belém, v. 2, n. 3, 57-153 p., set-dez. 2007.

TOMEZAK, F. **Estudos sobre a estrutura e propriedades de fibras de coco e curauá do Brasil**. 2010. 149 p. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Federal do Paraná, 2010.

TOMEZAK, F.; SYDENSTRICKER, T. D. S.; SATYANARAYANA, K. G. “Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part II: Morphology and properties of Brazilian coconut fibers”. **Composites: Part A** 38, p. 1710–1721. 2007.

VALENTE, R., ALMEIDA, S. **As Palmeiras de Caxiuanã**. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 2001.