

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA  
TESE DEFENDIDA POR NUBIA SUELY SILVA  
SANTOS..... E APROVADA  
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 30 / 09 / 2010

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

  
ORIENTADOR

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**Nubia Suely Silva Santos**

# **Análise Experimental e Teórica do Comportamento Mecânico sob Carregamentos Quase-estáticos de Compósitos Reforçados com Fibras Vegetais**

Campinas, 2010

**Nubia Suely Silva Santos**

# **Análise Experimental e Teórica do Comportamento Mecânico sob Carregamentos Quase-estáticos de Compósitos Reforçados com Fibras Vegetais**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico

Orientador: Eder Lima de Albuquerque  
Co-orientador: Cecília Amélia de Carvalho Zavaglia

Campinas

2010

i

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

Sa59a Santos, Nubia Suely Silva  
Análise experimental e teórica do comportamento mecânico sob carregamentos quase-estáticos de compósitos reforçados com fibras vegetais / Nubia Suely Silva Santos. --Campinas, SP: [s.n.], 2010.

Orientadores: Eder Lima de Albuquerque, Cecília Amelia de Carvalho Zavaglia.

Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Fibras vegetais. 2. Compósitos. 3. Micromecânica. I. Albuquerque, Eder Lima de. II. Zavaglia, Cecília Amelia de Carvalho. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. IV. Título.

Título em Inglês: Theoretical and experimental analysis of mechanical behavior under quasi-static loads of vegetable fibers reinforced composites

Palavras-chave em Inglês: Vegetable fibers, Composites, Micromechanics

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico

Titulação: Doutor em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Célia Marina Alvarenga Freire, Antonio Ludovico Beraldo, Carmen Gilda Barroso Tavares Dias, Flaminio Levy Neto

Data da defesa: 30/09/2010

Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE PROJETO MECÂNICO**

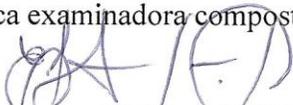
**TESE DE DOUTORADO**

**Análise Experimental e Teórica do Comportamento  
Mecânico sob Carregamentos Quase-estáticos de  
Compósitos Reforçados com Fibras Vegetais**

Autora: **Nubia Suely Silva Santos**

Orientador: **Eder Lima de Albuquerque**

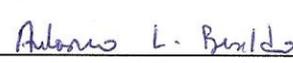
A banca examinadora composta pelos membros abaixo aprovou a Tese:

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Eder Lima de Albuquerque**

**Instituição: Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Mecânica**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof.<sup>a</sup> Dra. Célia Marina Alvarenga Freire**

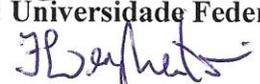
**Instituição: Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Mecânica**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Antonio Ludovico Beraldo**

**Instituição: Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Agrícola**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof.<sup>a</sup> Dra. Carmen Gilda Barroso Tavares Dias**

**Instituição: Universidade Federal do Pará – Instituto de Tecnologia**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Flaminio Levy Neto**

**Instituição: Universidade de Brasília – Faculdade de Tecnologia**

Campinas, 30 de Setembro de 2010.

## **Agradecimentos**

A Deus, pelo dom da vida.

Aos meus pais, Cosme e Socorro, e à minha família, pelo incentivo e apoio incondicional, sem os quais não teria começado nem terminado este trabalho.

Ao Prof. Manoel Ribeiro da Silva que, aqui em Campinas e nesse último ano, foi meu pai, minha mãe, irmão, orientador e amigo, e continua sendo meu companheiro de todas as horas.

Ao meu orientador Prof. Eder Lima de Albuquerque, por ter me acolhido como orientada, pela paciência, incentivo e amizade no decorrer deste trabalho.

À minha co-orientadora Prof<sup>ª</sup>. Cecília Amelia de Carvalho Zavaglia, que me incentivou na decisão de fazer o Doutorado, pela amizade e companheirismo durante esses 4 anos de muito trabalho.

À Prof<sup>ª</sup>. Elisabete Maria Saraiva Sanches, pelo incentivo e colaboração no desenvolvimento deste trabalho.

À Claudinete Vieira Leal, do Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura, pela colaboração e paciência durante as análises no microscópio eletrônico.

Aos amigos do Departamento de Projeto Mecânico: Adriana, Fabiano, André, Kerles, Dalmo e Luís, pela amizade e paciência.

Aos amigos do Departamento de Engenharia de Materiais: Hugo, Leonardo, Lola, Guinea, Danielle e Maria Aparecida, pelo apoio e companheirismo.

Aos meus amigos do Pará que também estão fazendo Doutorado neste momento: Clivia, Castro, Gisele, Fernando, Sandra, Sabina, Célio, Daniel e Laércio.

À Prof<sup>ª</sup>. Carmen Gilda Barroso Tavares Dias, pela parceria, colaboração e companheirismo na pesquisa.

À amiga Gisele pela ajuda na formatação deste trabalho.

A todas as pessoas, professores, técnicos e colegas que, de uma forma ou de outra, contribuíram com a feitura deste trabalho.

Meu muito obrigado a todos.

## Resumo

Neste trabalho foram elaborados compósitos poliméricos reforçados com fibras longas e contínuas de *miriti*, com frações de volume de fibra de 10, 20 e 30%. A fibra de *miriti* é proveniente do pecíolo da palmeira de burtiti (*Mauritia flexuosa* L.), palmeira abundante na região amazônica, utilizada na alimentação e na produção de artesanato popular. As características físicas, morfológicas, microestruturais e mecânicas da fibra de *miriti*, são estudadas. Para a elaboração dos compósitos as fibras receberam tratamento superficial com solução alcalina, a 5%, e a resina de poliéster insaturado foi utilizada como matriz. Foram elaborados neste trabalho, compósitos com as fibras de *miriti* alinhadas longitudinalmente, chamados de compósitos unidirecionais (UD), e compósitos com fibras de *miriti* em duas direções ortogonais entre si, chamados de compósitos bi-direcionais (2D). Os compósitos foram consolidados sob pressão, e em seguida foi conduzido o processo de pós-cura a 60 °C de temperatura. A caracterização mecânica dos compósitos foi feita sob carregamento de tração (norma ASTM D 638), e sob carregamento de flexão (norma ASTM D 790). Os corpos de prova foram retirados das placas moldadas, e 5 corpos de prova de cada compósito foram submetidos aos ensaios mecânicos. Os resultados obtidos após os ensaios de tração e flexão dos compósitos, mostram a influência da adição de fibras no comportamento mecânico dos compósitos, assim como a influência da orientação das fibras no compósito. A verificação teórica dos resultados experimentais é conduzida para os compósitos unidirecionais testados sob tração, e os valores teóricos foram obtidos por meio da regra da mistura, da teoria de micromecânica dos compósitos. Aspectos macroscópicos e microscópicos da fratura após os ensaios mecânicos foram observados e mostram região de dano e interface fibra-matriz, respectivamente. Os resultados mostram que a adição de fibras à matriz de resina poliéster insaturado, foi, de modo geral, favorável às propriedades mecânicas dos compósitos. A melhor performance mecânica foi obtida pelo compósito unidirecional com 30% em fração de volume de fibras de *miriti*, testados na direção do carregamento. Para os compósitos bi-direcionais (2D), a adição de fração em volume de fibras somente foi favorável para as propriedades mecânicas sob tração, sendo pouco significativa para os resultados das propriedades sob flexão. Segundo a verificação teórica feita para os resultados experimentais, acima de 25% de adição de fração em volume de fibras, começa a haver sinergia entre os componentes do compósito, evidenciando o efeito reforçante das fibras de *miriti*.

**Palavras-chave:** Fibras vegetais; ensaios de tração; eco-compósitos; micromecânica.

## Abstract

In this work continuous *miriti* fiber reinforced unsaturated polyester matrix composites were elaborated, with 10, 20 and 30% of fiber volume fraction. *Miriti* fibers are extracted from petiole of buriti palm (*Mauritia flexuosa* L.), which is a typical specie that grow in Amazonian region, used as food and handicrafts. Physical, morphological, microstructural and mechanical characteristics of *miriti* fibers were investigated. Treated fibers with a sodium hydroxide solution (5%) were used to elaborate composites in this work. Composites with continuous *miriti* fibers aligned on unidirectional direction, named as unidirectional composites (UD), and composites with continuous *miriti* fibers aligned in orthogonal directions, named as bi-directional (2D) composites were elaborated. The composites were consolidated under pressure and a post-cure process was conducted at a 60 °C temperature. Mechanical characterization of composites was made under tensile load (ASTM D 638), and under bending load (ASTM D 790). Specimens were taken from molded plates and five specimens of each composite were subjected to mechanical tests. Results obtained after the mechanical tests show the influence of fiber addition on mechanical behavior of composites, as well as the influence of fiber orientation. Theoretical verification of experimental results is conducted for unidirectional composites tested under tension, and the theoretical values were obtained by the mixture rule of micromechanical theory of composites. Macroscopic and microscopic aspects of fracture after the mechanical tests are observed and show the region of damage and fiber-matrix interface, respectively. Results obtained showed that fiber addition on unsaturated polyester resin was favorable to the mechanical properties of composites. The best mechanical performance was obtained by unidirectional composite with 30% in volume fraction of *miriti* fibers tested on the direction of loading. For 2D composites the addition of fiber volume fraction was only favorable for mechanical properties under tensile load, with little effect on bending properties. According to theoretical verification conducted to the experimental results, more than 25% of fiber volume fraction of *miriti* fibers, begins to have synergy between the components of the composite, which shows the *miriti* fibers.

**Key-words:** Vegetable fibers, tensile tests, eco-composites, micromechanical theory.

## Lista de Abreviaturas e Símbolos

m - metro

cm – centímetros

mm – milímetros

$\mu\text{m}$  – micrometros

Kg - quilograma

g – gramas

$\rho$  – densidade

$\varepsilon_f$  – deformação da fibra

$\varepsilon_m$  – deformação da matriz

$\varepsilon_c$  – deformação do compósito

## Lista de Ilustrações

Figura 2.1	Classificação geral das fibras vegetais.	5
Figura 2.2	Desenho esquemático de uma fibrila de celulose: (a) fibra elementar e (b) mecha de fibras elementares.	6
Figura 2.3	Parte do pseudo-caule da bananeira (a), fibras retiradas do caule (b).	12
Figura 2.4	Palmeiras de buriti agrupadas, (a) e (b), filho de palmeira de buriti (c), e ocorrência de nascentes na área das palmeiras (d).	14
Figura 2.5	Partes aproveitadas da palmeira de buriti: (a) e (b) folhas, (c) pecíolo verde, (d) pecíolo seco, e (e) coco do buriti.	15
Figura 2.6	Artesanato com as fibras da palmeira de buriti: (a) folhas secas, (b) bolsas e peneiras (c) embalagem, e (d) brinquedos de <i>miriti</i> .	16
Figura 2.7	Desenho esquemático da folha da palmeira do buriti.	17
Figura 2.8	Tipos de compósitos: (a) fibras curtas alinhadas, (b) fibras curtas aleatórias, (c) fibras longa alinhadas, e (d) fibras longas em duas direções.	20
Figura 2.9	Exemplos de aplicação de compósitos com fibras vegetais em partes internas do carro: revestimento de portas, painel frontal e caixa de marcha.	24
Figura 2.10	Gráfico tensão x deformação para compósitos unidirecionais: (a) tração na direção das fibras, e (b) tração na direção transversal às fibras.	26
Figura 2.11	Representação dos tipos de falhas em compósitos com fibras.	28
Figura 4.1	Talas de <i>miriti</i> (esquerda) e fibras de <i>miriti</i> (direita).	35
Figura 4.2	Fluxograma indicativo da parte experimental.	37
Figura 4.3	Obtenção da fibra de <i>miriti</i> (a) e (b) pecíolo do buriti, (c) talas largas, e (d) fibras de <i>miriti</i> .	38
Figura 4.4	Preparo das amostras de fibras para leitura da seção transversal pelo MEV.	40

Figura 4.5	Desenho dos <i>tabs</i> preparados para o ensaio de tração da fibra.	42
Figura 4.6	Suporte montado para alinhamento das fibras.	43
Figura 4.7	Dessecador e bomba de vácuo usados na secagem das fibras.	43
Figura 4.8	Seqüência de montagem das lâminas de fibras nos compósitos bi-direcionais conforme fração de volume: (a) 10%, (b) 20% e (c) 30%.	44
Figura 4.9	Molde utilizado na fabricação das placas de compósitos.	45
Figura 4.10	Prensa hidráulica utilizada na moldagem das placas.	45
Figura 4.11	Prensa hidráulica utilizada na moldagem das placas.	46
Figura 5.1	Histograma da distribuição do diâmetro médio das fibras de <i>miriti</i> (método 01).	51
Figura 5.2	Histograma da distribuição do diâmetro médio das fibras de <i>miriti</i> (método 02).	52
Figura 5.3	Morfologia da superfície da fibra: (a), (b) e (d) marcas de deformação plástica; (b) regularidade do alinhamento das fibrilas; (c) partículas soltas.	54
Figura 5.4	Morfologia da microestrutura da fibra: (a) alinhamento das fibrilas; (b) e (c) lúmen das fibrilas; (d) forma hexagonal das fibrilas.	55
Figura 5.5	Variedade na morfologia da seção transversal da fibra de <i>miriti</i> .	56
Figura 5.6	Fibra antes do tratamento alcalino (a), e fibra após o tratamento alcalino (b).	57
Figura 5.7	Espectros obtidos para fibras tratadas e não-tratadas, faixa de 2000 a 1900 $\text{cm}^{-1}$ .	58
Figura 5.8	Espectros obtidos para fibras tratadas e não-tratadas, faixa de 600 a 450 $\text{cm}^{-1}$ .	58
Figura 5.9	Curvas tensão x deformação para fibras tratadas e não-tratadas.	59
Figura 5.10	Patamares na curva tensão x deformação para fibras tratadas.	60
Figura 5.11	Resistência à tração em função do diâmetro médio da fibra.	61
Figura 5.12	Módulo elástico em função do diâmetro médio da fibra.	62
Figura 5.13	Placa de compósito unidirecional (a) e (b), e placa de compósito	

	bi-direcional (c).	64
Figura 5.14	Curvas tensão x deformação da fibra tratada, resina e compósitos.	66
Figura 5.15	Curvas tensão x deformação da fibra tratada, resina e compósitos, em detalhe.	66
Figura 5.16	Influência da adição de fibras na resistência à tração dos compósitos UD.	67
Figura 5.17	Influência da fração em volume de fibras no módulo elástico em tração dos compósitos UD.	68
Figura 5.18	Influência da fração em volume de fibras na resistência à tração dos compósitos 2D.	69
Figura 5.19	Influência da fração em volume de fibra no módulo elástico dos compósitos 2D.	70
Figura 5.20	Influência da adição de fibras na resistência à flexão dos compósitos UD.	72
Figura 5.21	Influência da adição de fibras no módulo elástico em flexão dos compósitos UD.	73
Figura 5.22	Influência da adição de fibras na resistência à flexão dos compósitos 2D.	75
Figura 5.23	Influência da adição de fibras no módulo em flexão dos compósitos 2D.	75
Figura 5.24	Valores experimentais e teóricos para as propriedades mecânicas em tração dos compósitos UD.	78
Figura 5.25	Perfil das curvas de degradação térmica da fibra de <i>miriti</i> não tratada e tratada, do compósito e da resina poliéster.	80
Figura 5.26	Aspecto macroscópico da fratura na tração para compósitos UD (a) e 2D (b).	81
Figura 5.27	Imagens do perfil de fratura em flexão para compósitos UD (a), e 2D (b), com pontos de indentação indicados pelas setas brancas.	82
Figura 5.28	Superfícies de fratura após ensaio de flexão para compósitos unidirecionais: (a) UD10, (b) UD20, e (c) UD30.	83
Figura 5.29	Superfícies de fratura após ensaio de flexão para compósitos bi-	

	direcionais: (a) 2D10, (b) 2D20, e (c) 2D30.	84
Figura 5.30	Micrografias da superfície de fratura sob tração para compósitos UD10 (a e b), UD20 (c e d), e UD30 (e e f).	86
Figura 5.31	Micrografias da superfície de fratura sob tração para compósitos 2D10 (a e b), 2D20 (c e d), e 2D30 (e e f).	87

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1	Propriedades mecânicas de fibras vegetais e sintéticas.	8
Tabela 4.1	Propriedades da resina poliéster na aplicação (*).	36
Tabela 5.1	Diâmetro médio da fibra de <i>miriti</i> .	53
Tabela 5.2	Propriedades mecânicas da fibra de <i>miriti</i> .	61
Tabela 5.3	Propriedades mecânicas de algumas fibras vegetais e da fibra de <i>miriti</i> .	63
Tabela 5.4	Propriedades mecânicas em tração dos compósitos UD e placa pura (UP).	65
Tabela 5.5	Propriedades mecânicas em tração dos compósitos 2D e placa pura (UP).	69
Tabela 5.6	Propriedades mecânicas em flexão dos compósitos UD e placa pura (UP).	71
Tabela 5.7	Propriedades mecânicas em flexão dos compósitos 2D e placa pura (UP).	74
Tabela 5.8	Propriedades mecânicas do compósito deste trabalho e outros compósitos encontrados na literatura.	77

## Sumário

1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Considerações iniciais .....	1
1.2 Motivação .....	2
1.3 Objetivos do trabalho .....	3
1.4 Descrição do presente trabalho .....	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
2.1 Fibras vegetais.....	5
2.1.1 Fibra de linho .....	11
2.1.2 Fibra do bagaço da cana.....	11
2.1.3 Fibra de bananeira .....	12
2.1.4 Fibra de juta.....	13
2.1.5 Fibra de <i>miriti</i> .....	13
2.2 Tratamento alcalino das fibras vegetais .....	17
2.3 Resina poliéster .....	18
2.4 Materiais compósitos.....	19
2.4.1 Definição .....	19
2.4.2 Compósitos poliméricos reforçados por fibras vegetais .....	20
2.4.3 Aplicações de compósitos com reforço de fibras vegetais .....	23
2.4.4 Processamento de compósitos poliméricos.....	25
2.4.5 Comportamento mecânico de compósitos reforçados por fibras .....	26
2.4.6 Comportamento térmico de fibras vegetais e compósitos .....	27
2.4.7 Tipos de falhas em compósitos .....	28
3 MICROMECAÂNICA DE UM COMPÓSITO REFORÇADO POR FIBRAS .....	30
3.1 Definições iniciais .....	30
3.1.1 Anisotropia.....	30
3.2 Fração de massa e de volume.....	31
3.3 Regra da mistura .....	33
3.4 Hipóteses simplificadoras.....	33
4 MATERIAIS E MÉTODOS .....	35

4.1 Materiais .....	35
4.1.1 Fibra de <i>miriti</i> .....	35
4.1.2 Resina poliéster .....	35
4.2 Metodologia .....	37
4.2.1 Extração da fibra .....	38
4.2.2 Caracterização física da fibra de <i>miriti</i> .....	39
4.2.3 Tratamento alcalino .....	41
4.2.4 Espectroscopia de infravermelho FT-IR .....	41
4.2.5 Caracterização mecânica da fibra de <i>miriti</i> .....	42
4.2.6. Elaboração das lâminas de fibras .....	43
4.3 Elaboração das placas de compósitos.....	44
4.3.1 Densidade dos compósitos .....	46
4.3.2 Caracterização mecânica dos compósitos.....	46
4.4 Verificação teórica dos resultados experimentais .....	48
4.5 Comportamento térmico de fibras e compósitos.....	49
4.6 Observação fratográfica.....	49
4.6.1 Fratura macroscópica.....	49
4.6.2 Fratura microscópica – MEV .....	49
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	51
5.1 Caracterização física da fibra de <i>miriti</i> .....	51
5.1.1 Densidade aparente.....	51
5.1.2 Dimensões médias .....	51
5.1.3 Caracterização morfológica de superfície e da microestrutura da fibra .....	53
5.2 Efeito do tratamento alcalino .....	56
5.3 Caracterização mecânica da fibra.....	59
5.4 Caracterização mecânica dos compósitos.....	63
5.4.1 Comportamento mecânico sob tração.....	64
5.4.2 Comportamento mecânico sob flexão .....	71
5.5 Verificação teórica dos resultados experimentais .....	78
5.6 Comportamento térmico da fibra de <i>miriti</i> e compósitos.....	79
5.7 Observação fratográfica.....	80

5.7.1 Aspectos macroscópicos da fratura .....	80
5.7.2 Aspectos microscópicos da fratura .....	85
6 CONCLUSÕES .....	88
6.1 Considerações finais .....	90
6.2 Sugestões para trabalhos futuros .....	91
REFERÊNCIAS .....	92
ANEXO 01 - Trabalhos em congressos e publicações .....	101
ANEXO 02 - Ensaio de tração das fibras de <i>miriti não-tratadas</i> .....	103
ANEXO 03 – Curvas médias força x deslocamento dos compósitos .....	105
ANEXO 04 – Boletim técnico resina poliéster. ....	105

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações iniciais

Os materiais feitos pelo homem, chamados de materiais sintéticos ou artificiais, são, em muitos casos, reconhecidos por possuírem melhores propriedades mecânicas e alta qualidade, sendo, desde a Revolução Industrial utilizados intensivamente na fabricação dos mais diversos produtos como, por exemplo: artigos de mobiliário, artigos esportivos, materiais e componentes para construção civil, eletro-eletrônicos, peças automotivas, etc. Com os avanços tecnológicos da sociedade moderna, e aumento da capacidade de consumo, a demanda por produtos também aumentou, e, assim, as pressões exercidas sobre as reservas naturais. A consciência da limitação dessas reservas, e a preocupação com a qualidade de vida do homem no futuro, fizeram com que a comunidade científica assumisse uma postura mais holística diante de tal problemática, onde palavras como “sustentabilidade”, e “sustentável”, começaram a ganhar espaço (MARINELLI et al., 2008). Particularmente na Europa, surgiram legislações para adequar algumas indústrias, como as do setor automotivo, a novas exigências ambientais de utilizar cada vez menos, fontes não renováveis de recursos, e diminuir a poluição ambiental por meio da redução do lixo. Em consequência disso, surgiu o interesse pelo uso de materiais naturais, como as fibras vegetais, como matéria-prima para a indústria, por apresentarem vantagens de serem materiais provenientes de fontes renováveis, de baixa densidade, de relativo baixo custo, e por serem biodegradáveis. Atualmente, umas das indústrias onde se registra a maior demanda por esse tipo de material, é a indústria automobilística, um dos setores que mais cresce no Brasil (BLEDZKI et al., 2006).

É assunto da comunidade científica, hoje, a discussão sobre a adequação ou não de materiais vegetais como substitutos de fibras sintéticas, como as fibras de vidro em compósitos poliméricos no setor automotivo (ZAH et al., 2007). A utilização de matérias-primas como as fibras vegetais, depende, no entanto, da resolução da equação que considera os aspectos tecnológicos, econômicos e ambientais, além do impacto social dessas atividades, em todo o ciclo de vida do material, incluindo sua produção e descarte.

Este trabalho apresenta um estudo sobre uma fibra vegetal extraída de uma palmeira típica da Região Norte do Brasil, importante na alimentação de comunidades amazônicas, e na produção de artesanato. Traz a proposta de se utilizar estas fibras em compósitos poliméricos para atuarem como reforço, e assim poderem originar materiais e/ou produtos para a indústria, como por exemplo, as do setor automotivo, que apresenta atualmente a maior demanda para fibras vegetais. Este trabalho, não tem, contudo, a pretensão de esgotar o assunto, todavia, tem o compromisso de estimular a discussão a respeito da tecnologia em favor do homem e do meio ambiente, e, dessa maneira, incentivar outras pesquisas sobre o tema.

## **1.2 Motivação**

O interesse por produtos feitos com matérias-primas naturais, como as fibras vegetais, surgido durante minha atuação como arquiteta, continuou com o início de minha atuação como docente no Centro de Ciências Naturais e Tecnologia da Universidade do Estado do Pará (UEPA). Nessa instituição, tive a oportunidade de coordenar o projeto intitulado “Alternativas para a utilização do trançado de palha na indústria de móveis e artefatos de madeira do Estado do Pará” (2002-2003), que transformou a curiosidade em ciência, abordando a parceria do trabalho artesanal com fibras como elemento decorativo para produtos de mobiliário. Logo depois ingressei no programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pará, e defendi a dissertação de mestrado com o título “Estudo da utilização de trançados vegetais na elaboração de compósitos laminados” (2006), que utilizou os resultados da pesquisa citada anteriormente, comprovando a importância do tema para a atualidade. Os resultados obtidos com a dissertação de mestrado, assim como a necessidade de continuar minha atuação em pesquisa numa universidade pública como a UEPA, motivaram minha decisão de ingressar em um programa de doutorado. Assim, no final de 2006 fui selecionada como aluna regular e em 2007 comecei o curso de doutorado na Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas.

### 1.3 Objetivos do trabalho

- Caracterizar a fibra de *miriti*, material de reforço do compósito, nos aspectos físicos, morfológicos, e mecânico;
- Preparar compósitos unidirecionais e bi-direcionais de matriz de resina poliéster insaturado e reforço de fibras de *miriti* tratadas, com frações de volume de fibras de 10, 20 e 30%;
- Avaliar as propriedades mecânicas sob carregamento de tração e flexão dos compósitos, tendo como referência, a placa de resina de poliéster insaturado;
- Avaliar a influência do teor de fibras e da orientação das fibras nas propriedades mecânicas dos compósitos;
- Confrontar os resultados experimentais obtidos para os compósitos unidirecionais sob carregamento de tração, com os resultados teóricos, por meio da aplicação da regra da mistura da teoria de micromecânica;
- Observar a morfologia da fratura nas escalas macroscópica e microscópica, dos compósitos rompidos nos ensaios mecânicos.

### 1.4 Descrição do presente trabalho

No capítulo 2 deste trabalho é feita uma revisão bibliográfica a respeito das fibras vegetais, incluindo a classificação geral das fibras, características mais relevantes como microestrutura e propriedades mecânicas, e comentários sobre sua utilização industrial. Em seguida são abordados alguns aspectos que devem ser levados em consideração quando da utilização de fibras vegetais, destacando os aspectos tecnológicos, econômicos e ambientais. Como forma de preparar o leitor para o estudo da fibra utilizada deste trabalho, são citadas as características mais relevantes de quatro fibras extraídas do caule ou do talo dos vegetais: fibra de linho, fibra do bagaço de cana, fibra de bananeira e fibra de juta. Logo após isso o leitor é inserido no contexto da fibra objeto deste estudo, a fibra de *miriti*. A classificação botânica e as características da espécie são apresentadas, assim como sua utilização e importância econômica para comunidades amazônicas.

Neste momento, é descrita a parte do vegetal de onde são extraídas as fibras utilizadas neste estudo. Em seguida são feitos alguns comentários a respeito do tratamento alcalino de fibras vegetais, e sobre a resina que será a matriz do compósito elaborado neste estudo. Segue-se a isso a definição e classificação dos materiais compósitos, e são citados alguns trabalhos sobre compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais, as aplicações deste tipo de material, o processamento, comportamento mecânico e térmico. Finalmente são abordados os tipos de falhas que podem ocorrer no material.

No capítulo 3, a teoria sobre a micromecânica de um compósito reforçado por fibras longas e contínuas, é introduzida com as definições de anisotropia, propriedades elásticas, e fração de massa e de volume. Em seguida, as definições sobre a regra da mistura, assim como as equações básicas que a descrevem, são apresentadas. Finalmente são destacadas as hipóteses simplificadoras, as quais são adotadas na abordagem micromecânica para os materiais compósitos.

No capítulo 4, os materiais e as metodologias utilizadas na elaboração do trabalho são descritas, com destaque para os procedimentos experimentais conduzidos para obtenção dos resultados apresentados neste estudo.

No capítulo 5, os resultados obtidos são apresentados, assim como as discussões respectivas. Esse capítulo pode ser dividido em duas partes: na primeira são apresentados e discutidos os resultados obtidos na investigação das fibras de *miriti*, como características físicas, morfológicas, microestruturais e mecânicas. Na segunda parte os resultados obtidos na investigação dos compósitos reforçados com fibras de *miriti*, são apresentados e discutidos: comportamento mecânico sob os carregamentos de tração e flexão, comportamento térmico, e aspectos macroscópicos e microscópicos da fratura. A verificação teórica dos resultados experimentais obtidos sob carregamento de tração para os compósitos unidirecionais, a partir da aplicação da regra da mistura também é apresentada nesse momento.

Finalmente, no capítulo 6, são listadas as principais conclusões alcançadas com este estudo, assim como são apresentadas algumas sugestões para futuras pesquisas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Fibras vegetais

As fibras vegetais ou fibras ligno-celulósicas são um tipo de fibra natural e podem ser distinguidas conforme sua origem na estrutura da planta, em: (i) fibras dos frutos, como coco e açaí, (ii) fibras do caule, como linho, juta, kenaf, (iii) fibras das folhas, como sisal e curauá, e (iv) fibras de sementes, como o algodão (MUELLER e KROBJILOWSK, 2003). Uma classificação geral das fibras vegetais é mostrada na figura 2.1. Em muitas partes do mundo e, principalmente em países em desenvolvimento, além de serem usadas na agricultura como fonte de alimentos, diferentes partes de plantas e frutos tem sido fontes viáveis de materiais para uso industrial (PRASAD et al., 2009).

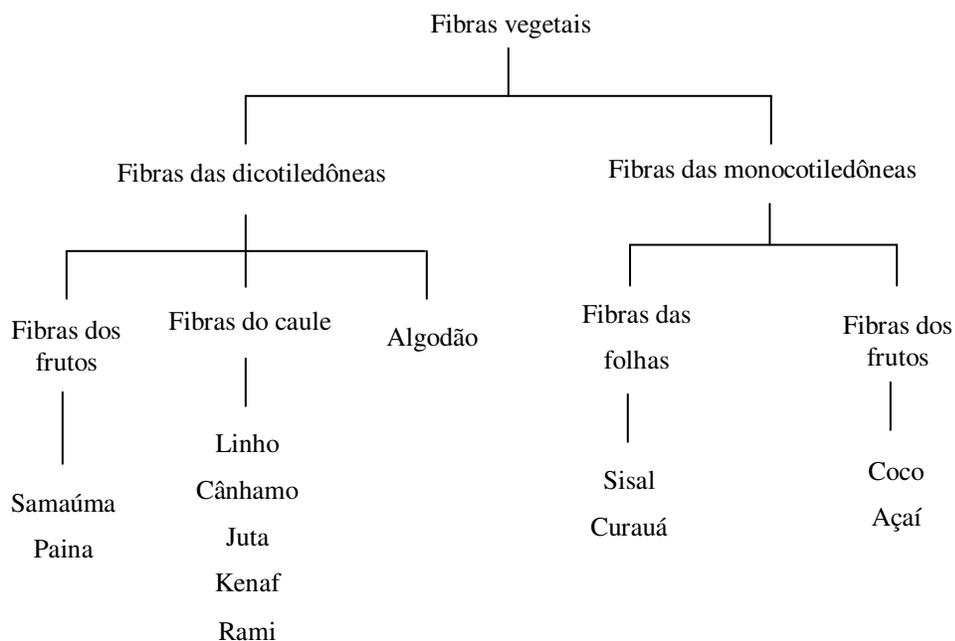


Figura 2.1 – Classificação geral das fibras vegetais (MUELLER e KROBJILOWSK, 2003, adaptado).

Do ponto de vista comercial e tecnológico, algumas fibras vegetais como algodão, kenaf, sisal, linho, coco e bananeira, são mais significativas, pois já são utilizadas como reforço de plásticos, como cordas, cabos, mantas, entre outros (RAO e RAO, 2007).

Todas as fibras ligno-celulósicas consistem basicamente de fibrilas de celulose imersas numa matriz amorfa de lignina (RAO e RAO, 2007), sendo, portanto consideradas como compósitos naturais, onde a celulose é a parte cristalina que permite às plantas suportar esforços internos e externos, e a lignina, que dá flexibilidade suficiente para permitir a expansão celular durante o crescimento da planta (BURGET, 2006). Estas fibrilas consistem de várias microfibrilas, as quais estão organizadas ao longo do comprimento da fibra: cada fibrila exibe uma estrutura complexa de camadas compostas por uma parede primária em volta de uma parede secundária, similar às fibras de madeira (RAO e RAO, 2007). Na figura 2.2 pode-se observar uma representação esquemática de uma fibrila de celulose, mostrando as paredes primária e secundária, assim como a presença do lúmen, estrutura presente em todas as fibras vegetais e que garante a baixa densidade deste tipo de material.

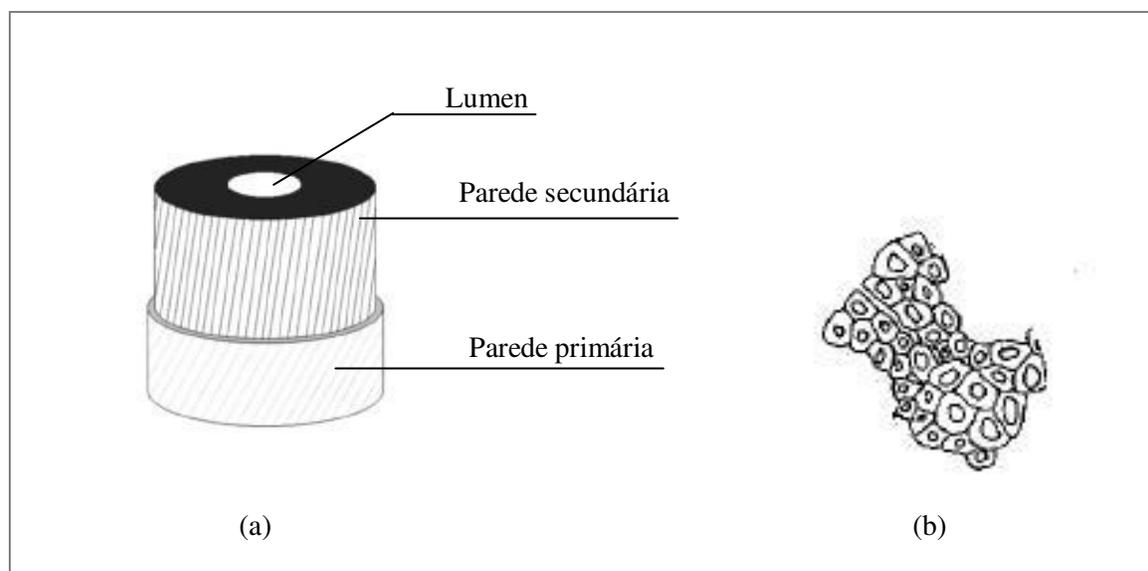


Figura 2.2 – Desenho esquemático de uma fibrila de celulose: (a) fibra elementar e (b) mecha de fibras elementares (CHARLET et al.,2007, adaptado).

Na tentativa de buscar respostas para a evolução dos vegetais, muitos pesquisadores começaram estudar a estrutura das plantas e concluíram que as propriedades macroscópicas da

planta se originam principalmente da organização da parede celular, fazendo com que, particularmente as escalas nano e microestrutural sejam relevantes para a formulação de aproximações sobre os aspectos biomecânicos (BURGET, 2006). Depois de alguns estudos nesse sentido, hoje se pode afirmar que as propriedades mecânicas de uma fibra vegetal dependem da espécie e idade da planta, da umidade relativa, e da forma como a fibra é extraída da planta (SGRICCIA et al., 2008).

O uso industrial das fibras vegetais é relativamente recente sendo que as primeiras pesquisas começaram a ser feitas a cerca de quatro décadas. Um grande impulso nessas pesquisas foi dado com o início das preocupações ambientais particularmente em países da Europa, onde já existem legislações que obrigam a indústria automotiva a efetuar uma substituição gradativa das fibras sintéticas pelas fibras vegetais.

Com o avanço das pesquisas sobre a utilização de fibras vegetais, observou-se que as propriedades mecânicas variavam conforme o local do vegetal de onde as fibras eram extraídas. Charlet et al. (2007) conduziram estudos sobre as características das fibras de linho em função de sua localização no caule, levando em consideração o diâmetro das fibras, módulo de elasticidade e resistência à tração. Encontraram valores distintos para as propriedades mecânicas de acordo com a localização da fibra no caule: se na base, no meio ou no topo, com os maiores valores de propriedades mecânicas encontrados para as fibras localizadas no meio do caule: 1454 MPa de resistência à tração, e 68 GPa de módulo elástico. No trabalho de Saleem et al. (2008), as diferenças entre as terminologias utilizadas na ciência e engenharia de materiais, e na botânica, são esclarecidas. As fibras vegetais utilizadas na engenharia são chamadas de fibras técnicas e representam aglomerados de fibras elementares, os quais são obtidos e/ou extraídos de parte de vegetais por meio de processos específicos. Neste trabalho será considerado como fibra de *miriti* ao material ligno-celulósico extraído da parte externa do pecíolo da palmeira de buriti. Esta fibra ainda é pouco conhecida, embora o pecíolo da palmeira já seja bastante utilizado por comunidades tradicionais no mobiliário, na decoração, e recentemente vem sendo utilizado na confecção de embalagens artesanais.

Um dos fatores determinantes para a utilização de fibras vegetais é a resistência mecânica por unidade de peso, também chamada de resistência mecânica específica, pois enquanto fibras sintéticas como as fibras de vidro possuem densidade aparente de aproximadamente  $2,5 \text{ g/cm}^3$ , uma fibra vegetal como a fibra de linho tem densidade de  $1,5 \text{ g/cm}^3$ . A utilização de uma fibra

vegetal resultaria assim, em produto ou componente de baixo peso, o que é particularmente interessante no caso da indústria automotiva (JOSHI et al., 2004).

Na tabela 2.1 são citadas as propriedades mecânicas de algumas fibras vegetais e sintéticas utilizadas em aplicações industriais.

Tabela 2.1 – Propriedades mecânicas de fibras vegetais e sintéticas

Fibra	Densidade Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Alongamento (%)	Tensão na Ruptura (MPa)	Módulo de Young (GPa)
Algodão (BLEDZKI et al., 2006)	1,51	3,00-10,00	400,00	12,00
Juta (Idem)	1,46	1,80	400,00-800,00	10,00-30,00
Rami (Idem)	1,50	3,6-3,8	500,00	44,00
Linho (Idem)	1,4	1,20-1,60	800,00-1500,00	60,00-80,00
Sisal (Idem)	1,33	2,0-3,00	600,00-700,00	38,00
Fibra de coco (Idem)	1,25	3,0	220,00	6,0
Vidro-E (Idem)	2,55	2,5	2400,00	73,00
Aramida (CAIN et al.,202)	1,4	3,3-3,7	3600,00	60,00
Carbono (CAIN et al.,202)	1,4	1,4-1,8	3500,00	230,00
Curauá (ZAH et al., 2007)	1,4	3,70-4,30	500,00-1150,00	11,80
Resina poliéster insaturada (ALBUQUERQUE et al., 2000)	1,10-1,30	5,98	38,10	0,81
Resina epóxi (LIZOT et al., 2009)	1,1	4,00	47,00	2,40

Alguns aspectos que devem ser considerados no estudo ou na utilização de fibras vegetais são sumarizados a seguir:

- Aspectos tecnológicos

Por apresentarem baixa densidade, as fibras vegetais possuem propriedades específicas interessantes (resistência mecânica por unidade de peso), e os componentes que utilizam esse tipo de material podem ser uma redução de peso de 20 a 30% (JOSHI et al., 2004). Devido a essa redução de peso, há também uma redução no consumo de energia, no caso da indústria automotiva, aumentando assim a eficiência do veículo. Componentes reforçados por fibras vegetais não geram superfícies cortantes quando fraturados, o que é importante para requisitos de segurança do veículo, além disso, as fibras vegetais não são tóxicas para o ser humano e nem abrasivas;

- Aspectos sócio-econômicos

Alguns estudos relatam a grande disponibilidade de matérias-primas como as fibras vegetais, que são originárias de fontes renováveis, principalmente em países com grande área territorial onde as plantas fornecedoras de fibras podem ser cultivadas (SATYANARAYANA et al., 2007). O cultivo de fibras vegetais depende principalmente da energia solar, e a produção e ou extração de fibras consome pouca quantidade de energia proveniente de fontes fósseis (JOSHI et al., 2004). A atividade de coleta e/ou extração, e beneficiamento de fibras vegetais, representa também uma alternativa de geração de renda para a população rural (MARINELLI et al., 2008). Na região Norte, por exemplo, pequenas associações de artesãos são estruturadas por comunidades tradicionais (ribeirinhos, quilombolas, indígenas), em torno dessas atividades. A organização dessas comunidades em cooperativa ou associações constitui-se numa forma de assegurar a parceria com a indústria (ALIX et al., 2008).

- Aspectos ambientais

As fibras vegetais são materiais obtidos de fontes renováveis e utilizam pouco ou nenhum combustível fóssil durante seu processamento, além de serem biodegradáveis. A adição de fibras vegetais em materiais poliméricos diminui a quantidade de matriz a ser utilizada, aumentando a performance ambiental dos componentes devido à biodegradabilidade das fibras vegetais (JOSHI et al., 2004). A utilização de fibras vegetais pela indústria pode contribuir com a conservação dos recursos naturais, desde que as atividades de cultivo e extração sejam feitas dentro dos parâmetros de sustentabilidade. Também é importante citar a redução da emissão de gases poluentes para a atmosfera, e a redução de resíduos quando do descarte do componente originado de matéria-prima biodegradável.

Algumas limitações ao uso de fibras vegetais devem ser consideradas, como a sua natureza higroscópica que lhe confere baixa resistência à umidade, assim como sua baixa temperatura de processamento (até 200 °C), fatores estes que restringem suas aplicações no projeto. A sazonalidade na produção de fibras se traduz no fato de que a disponibilidade de matérias-primas fibrosas está intimamente relacionada às questões climáticas como temperatura e índice pluviométrico, além da fertilidade do solo. Estes fatores restringem o uso intensivo de fibras vegetais, além de influenciar nas propriedades mecânicas das fibras. A grande variabilidade das propriedades mecânicas é inerente às matérias-primas vegetais, também limitando, de certa forma, seu uso industrial, pois dificilmente é possível obter propriedades uniformes ou constantes das fibras.

Para a utilização de recursos renováveis como as fibras vegetais, é necessário, portanto, investigar a compatibilidade ambiental, os aspectos econômicos e sociais ao longo de todo o ciclo de vida do produto, incluindo os processos de manufatura associados e métodos racionais de descarte (REIMER et al., 2010).

A seguir, são apresentadas algumas características das principais fibras vegetais originadas do caule ou talo da planta, que já são utilizadas na indústria ou que apresentam potencial para tal. Esta parte torna-se necessária para que se possa fazer aproximações com a fibra utilizada neste trabalho, originada do pecíolo (talo da folha) da palmeira do buriti.

### 2.1.1 Fibra de linho

As fibras de linho se originam do caule da planta cujo nome botânico é *Linum usitatissimum*, e é considerada como a mais importante fibra originária da haste ou do caule. No Egito antigo o linho foi usado como alimento e só depois como matéria-prima para tecidos, sendo mais tarde suplantado, nesse uso, pelo algodão. O cultivo de linho para extração da fibra é feito quase exclusivamente na Europa, onde também são cultivadas espécies para obtenção do óleo de linhaça a partir das sementes do linho (ERHARDT et al., 1976). Os feixes consistem de um grande número de fibras individuais unidas entre si e com as demais estruturas da planta, pelo adesivo vegetal (pectina). Na literatura encontram-se estudos recentes sobre a fibra de linho, como em Andersons et al. (2005), que investigaram a distribuição estatística das propriedades mecânicas sob tração das fibras de linho. Outro estudo aborda as características da fibra de linho considerando sua localização na haste (talo) da planta (CHARLET et al., 2007).

As fibras de linho são as fibras naturais mais utilizadas pela indústria, sobretudo em países da Europa onde se encontram as principais áreas de cultivo (MUELLER e KROBJILOWSK, 2003). A estrutura e morfologia das fibras de linho foram estudadas nos trabalhos de Mueller e Krobjilowsk (2003), e de Charlet et al. (2007), de onde se destacam como características principais, a forma hexagonal das fibrilas e a presença do lúmen \_ parte oca da fibra paralela ao comprimento.

### 2.1.2 Fibra do bagaço da cana

A cana de açúcar é amplamente produzida no Brasil para fabricação de açúcar e bioetanol (CORRADINI et al., 2009), e um subproduto dessa atividade agroindustrial é chamado de bagaço de cana, e podendo ser aproveitado como adubo ou como biomassa na geração de energia de baixo custo (SANCHEZ et al., 2010). O tamanho das partículas do bagaço depende principalmente do tipo de equipamento utilizado no processamento da cana e, de uma maneira menos significativa, da variedade da cana (SANCHEZ et al., 2010). Alguns estudos investigam a

viabilidade do bagaço de cana como reforço em compósitos poliméricos, abordando assuntos como efeito do processamento e tratamento químico das fibras do bagaço nas propriedades mecânicas (MOTA et al., 2005; CORRADINI et al., 2009). Apesar da grande disponibilidade e do baixo custo, a fibra de bagaço de cana de açúcar ainda é pouco utilizada na indústria.

### 2.1.3 Fibra de bananeira

A bananeira é uma espécie de planta cujo pseudo-caule tem de 3 a 9m de altura, com diâmetro variando entre 200 e 300 mm. O pseudo-caule da bananeira consiste de diferentes camadas contendo fibras longitudinais (figura 2.3). Essas fibras ocupam aproximadamente 24% do pseudo-caule, e apresentam diferentes propriedades conforme a camada em que se originam (SATYANARAYANA et al., 2007). Aproximadamente 2% de um total de 6,6 milhões de ton. de biomassa produzida anualmente pelo cultivo da banana, são aproveitados como matéria-prima para o artesanato, por algumas comunidades nos estados do Paraná e São Paulo, que são os maiores produtores (SATYANARAYANA et al., 2007). Recentes estudos avaliaram as propriedades mecânicas de compósitos de matriz polimérica reforçado com fibras de bananeira, como no trabalho de Savioli et al. (2008), que avaliaram as propriedades mecânicas e térmicas do compósito de matriz poliéster e fibras de bananeira. No trabalho de Prasad et al. (2009), fibras de bananeira foram utilizadas na fabricação de compósitos em matriz de resina poliéster insaturado, e testados em ensaios de tração e flexão para obtenção das propriedades mecânicas.

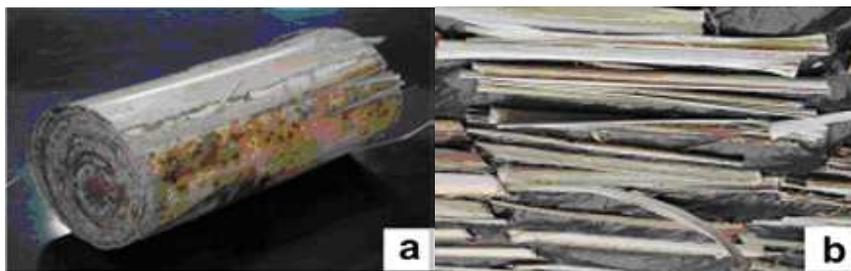


Figura 2.3 – Parte do pseudo-caule da bananeira (a), fibras retiradas do pseudo-caule (b) (SATYANARAYANA et al., 2007).

#### 2.1.4 Fibra de juta

A juta é uma planta introduzida no Brasil no início do século XX, é um arbusto que atinge de 3 a 4 m de altura, com nome científico de *Corchorus capsularis*, Linn. Originária da Índia, é cultivada intensamente na Amazônia para obtenção de fibras têxteis tradicionalmente utilizadas na produção de embalagens e sacos. Do fio de juta são produzidos diversos tipos de tecidos usados em confecções, decorações, revestimentos de piso e parede, artesanato, cortinas, sacolas, divisórias, base para gesso, e muitos outros itens que requerem uma matéria-prima consistente e duradoura. Segundo Gowda et al. (1999), a fibra de juta é interessante para ser utilizada como reforço em compósitos poliméricos devido a sua disponibilidade e relativo baixo custo, e, também, devido às suas várias formas disponíveis no mercado, como fios, cordas, tecidos e mantas. A fibra de juta possui uma estrutura multicelular composta de várias microfibrilas e uma seção transversal altamente irregular. Devido a isso as propriedades físicas e mecânicas podem se apresentar bastante variáveis e dependentes da origem geográfica e das condições climáticas de crescimento da planta, além das técnicas de processamento empregadas na obtenção das fibras (GOWDA et al., 1999). No trabalho de Stocchi et al. (2007), um tecido de fibras de juta foi tratado sob tensão para atuarem como reforço numa matriz de resina de viniléster. Observaram o comportamento mecânico dos compósitos submetidos ao carregamento de tração, e obtiveram como resultado que os compósitos tratados sob tensão durante 4 h apresentaram melhor desempenho mecânico que os compósitos com fibras não tratadas, e compósitos com fibras de juta tratadas sob tensão durante 24 h.

#### 2.1.5 Fibra de *miriti*

O *miriti* é matéria-prima proveniente da palmeira do buritizeiro (fig. 2.4), cujo nome botânico é *Mauritia flexuosa* L. (VALENTE e ALMEIDA, 2001), da qual se extraem de seu pecíolo – porção central que separa os folíolos de uma folha, uma vara de aproximadamente 8 cm de diâmetro, de característica um tanto quanto esponjosa que é revestida externamente por uma

camada mais resistente (VILHENA-POTYGUARA, 2003). Abundante na Região Amazônica essa palmeira é bastante utilizada por comunidades ribeirinhas principalmente na alimentação e na produção de artesanato popular (ALMEIDA, 2003). Na Região Amazônica, a palmeira do buriti ocorre geralmente em áreas baixas sujeitas a alagamentos no período chuvoso (áreas de várzea, margem de rios), ocorrendo de forma isolada (apenas um indivíduo), ou agrupada (vários indivíduos). A figura 2.4 apresenta o *habitats* da palmeira no Nordeste Paraense.



Figura 2.4 – Palmeiras de buriti agrupadas (a) e (b), filho de palmeira de buriti (c), e (d) ocorrência de nascentes na área das palmeiras (Autor, 2009).

A palmeira do buriti é importante principalmente no município de Abaetetuba (PA), que fica a 150 Km de Belém, e se localiza no Nordeste do Estado, sendo utilizada como uma das mais

importantes matérias-primas na manufatura dos "brinquedos de miriti", um dos ícones do artesanato popular da região (figura 2.6.d). Várias partes da palmeira são utilizadas pela comunidade do município, como mostrado na figura 2.5: (i) o coco (figura 2.5.e) é utilizado em mingaus e doces; (ii) o pecíolo (haste das folhas) é utilizado nos brinquedos artesanais e na cestaria; (iii) as folhas são também utilizadas no artesanato. A utilização alimentar da fruta (coco) não foi verificada na região onde foi coletado o material para este trabalho. A palmeira de buriti também ocorre na região do cerrado brasileiro, onde se ressalta a sua importância na preservação das nascentes da região, e utilização do pecíolo na construção civil e no mobiliário artesanal.

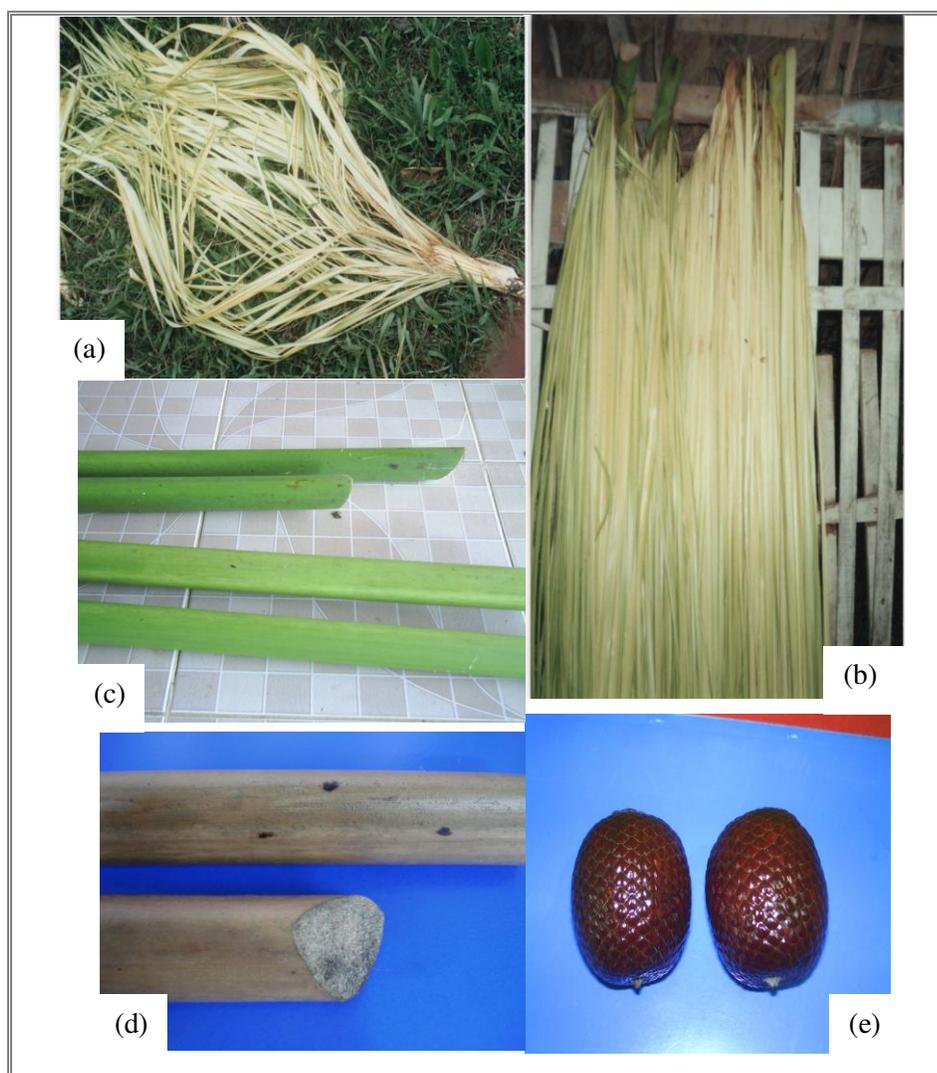


Figura 2.5 – Partes aproveitadas da palmeira de buriti: (a) e (b) folhas, (c) pecíolo verde, (d) pecíolo seco, e (e) coco do buriti (Autor, 2009).

Designar-se-á neste trabalho, como sendo fibra de *miriti*, ao material fibroso retirado do revestimento do pecíolo, também chamado de haste da folha da palmeira de buriti. *Miriti* é um nome vulgar escolhido para homenagear aqueles que trabalham na feitura dos chamados “brinquedos de *miriti*”, e outros artesãos que utilizam partes da palmeira ou seu fruto. A figura 2.7 mostra alguns exemplos de produtos artesanais que utilizam partes da palmeira do buriti como matéria-prima, com destaque para embalagens e os brinquedos (figura 2.6.c e 2.6.d, respectivamente).



Figura 2.6 – Artesanato com as fibras da palmeira de buriti: (a) folhas secas, (b) bolsas e peneiras (c) embalagem, e (d) brinquedos de *miriti* ( Autor, 2009).

Trabalhos recentes utilizando a fibra de *miriti* como reforço em compósitos são encontrados em Santos et al., (2007a), que avaliaram as propriedades mecânicas de flexão de compósitos de resina poliéster com reforço trançado de talas de *miriti*. Em outro estudo, as características mecânicas sob tração são determinadas para compósitos com fibras longas e curtas de *miriti* em matriz de resina de poliéster insaturado (SANTOS et al., 2007b). A figura 2.7 mostra desenho do pecíolo do buriti, local de onde são retiradas as fibras utilizadas neste trabalho.

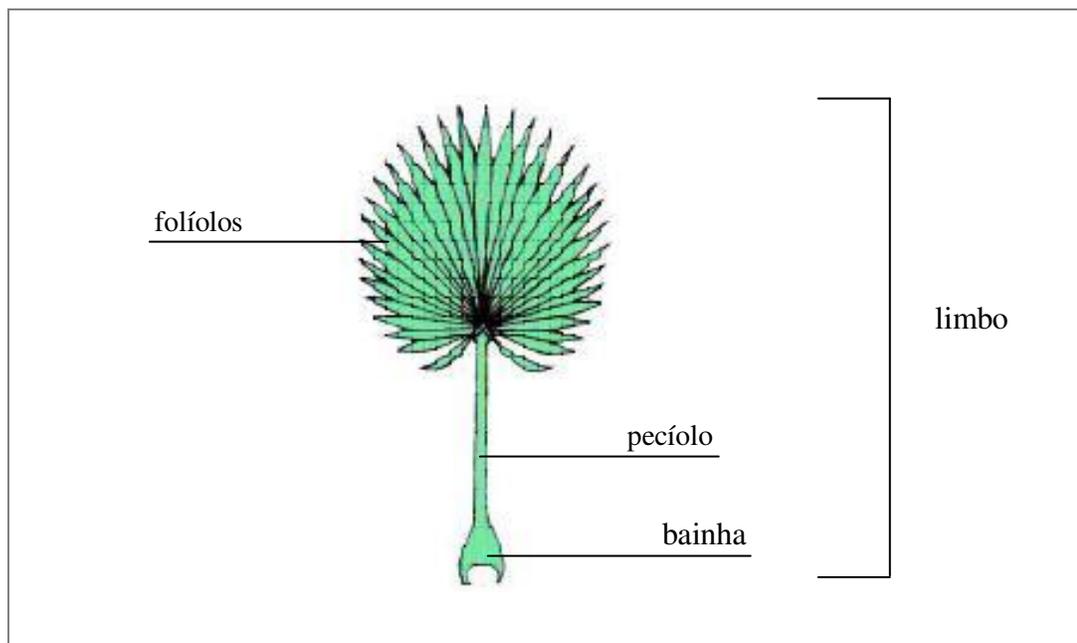


Figura 2.7 – Desenho esquemático da folha da palmeira do buriti.

## 2.2 Tratamento alcalino das fibras vegetais

A natureza higroscópica e o teor de extrativos das fibras ligno-celulósicas, além da presença de vazios e porosidade na superfície, tornam as fibras vegetais incompatíveis com a maioria das resinas poliméricas, sendo essa uma das principais limitações ao uso intensivo destes materiais como reforço em compósitos poliméricos. Essa limitação é assunto de muitas

pesquisas, as quais objetivam minimizar estas deficiências e tornar a superfície das fibras mais compatível com a resina polimérica.

O tratamento químico das fibras vegetais, feito com solução de hidróxido de sódio (NaOH), também chamado de tratamento alcalino, ajuda a remover impurezas como ceras, pectina, sais minerais e parte da hemicelulose. Além disso, o tratamento alcalino muda significativamente a morfologia da superfície das fibras, melhorando a aderência da fibra à matriz polimérica (STOCCHI et al., 2007). No estudo de Albuquerque et al. (2000a), as fibras de juta foram tensionadas para receber tratamento em solução alcalina com 10% de hidróxido de sódio por 3h em diferentes condições. Essas fibras foram utilizadas unidirecionalmente em compósitos de resina poliéster. Em Tita et al. (2002), foram utilizadas várias concentrações de hidróxido de sódio para tratar fibras de bagaço de cana-de-açúcar, sendo 10% a maior concentração utilizada, pelo tempo de 1h a uma temperatura de 0°C. O tratamento alcalino foi utilizado por John e Naidu (2004), para tratar fibras de sisal, as quais foram imersas em uma solução de 2% de hidróxido de sódio pelo período de 1h. Sgriccia et al. (2008), estudaram as características da morfologia de superfície de fibras naturais como kenaf, linho, cânhamo e sisal, e a influência do tratamento químico nas propriedades de flexão em compósitos reforçados pelas mesmas fibras. Utilizaram uma solução de 5% de hidróxido de sódio para tratar as fibras por 1h em temperatura ambiente. Concluíram que as fibras de kenaf apresentaram desempenho mecânico semelhante às fibras de cânhamo.

### **2.3 Resina poliéster**

As fibras geralmente não tem utilidade estrutural se não forem aglutinadas por uma matriz. A descoberta do processo de cura da resina poliéster insaturado tornou possível o desenvolvimento de materiais compósitos, que surgiram com a utilização de fibras de vidro numa matriz de poliéster. (REIMER et al., 2010).

A resina de poliéster é um dos polímeros que pode se apresentar tanto como termorrígido, quanto como termoplástico. Na forma saturada tem-se o poliéster termoplástico, na forma insaturada tem-se o poliéster termorrígido. Dois tipos de poliéster termorrígido podem ser

encontrados: o ortoftálico e o isoftálico, sendo este último o que apresenta melhores propriedades em termos de resistência química e à umidade. As resinas de poliéster termorrígido são geralmente fornecidas na forma de um líquido viscoso que se transforma em um sólido rígido infusível (termorrígido) por meio de um processo de cura (LEVY NETO e PARDINI, 2006).

As resinas termorrígidas como o poliéster, vêm sendo muito empregadas devido às diversas vantagens como: baixo custo, estabilidade térmica e dimensional e resistência química a altas temperaturas (MEDINA et al., 2009). Alguns estudos já investigam a obtenção da resina de poliéster a partir da reciclagem de garrafas PET, o que tornaria a resina um produto mais ambientalmente correto (MAHDI et al., 2007). Os novos avanços da indústria química, com certeza apresentarão no futuro, um poliéster insaturado mais viável ecologicamente.

## **2.4 Materiais compósitos**

### **2.4.1 Definição**

Os materiais compósitos são aqueles constituídos por duas ou mais fases bem definidas – a matriz e o reforço, geralmente com propriedades mecânicas distintas. A matriz é um material homogêneo que tem a finalidade de aglutinar as fibras ou partículas do material de reforço, melhorando assim as propriedades dos polímeros, além de reduzir os custos (TITA et al., 2002). O material de reforço tem a função de aumentar a resistência mecânica da peça, podendo ser encontrado na forma de partículas, fibras curtas e fibras longas. As fibras curtas e os particulados são amplamente utilizados como carga ou reforço em materiais termoplásticos injetados ou extrudados. Nesse caso são utilizados principalmente fibras de vidro picadas, negro de fumo e carbonato de cálcio para aumentar a rigidez e a resistência mecânica do produto final, buscando-se geralmente um comportamento isotrópico onde o controle da direção preferencial da fibra é quase nulo. As fibras longas, por sua vez, são adicionadas a matrizes de resinas termorrígidas como o poliéster insaturado, com métodos de processamento específicos (MEDINA et al., 2009). Na figura 2.8 é mostrado um desenho esquemático mostrando os vários tipos de compósitos segundo a orientação e/ou distribuição das fibras de reforço. Os materiais compósitos que

utilizam fibras longas como reforço, permitem um maior controle das propriedades mecânicas anisotrópicas pelo direcionamento das fibras e sua proporção na composição do material.

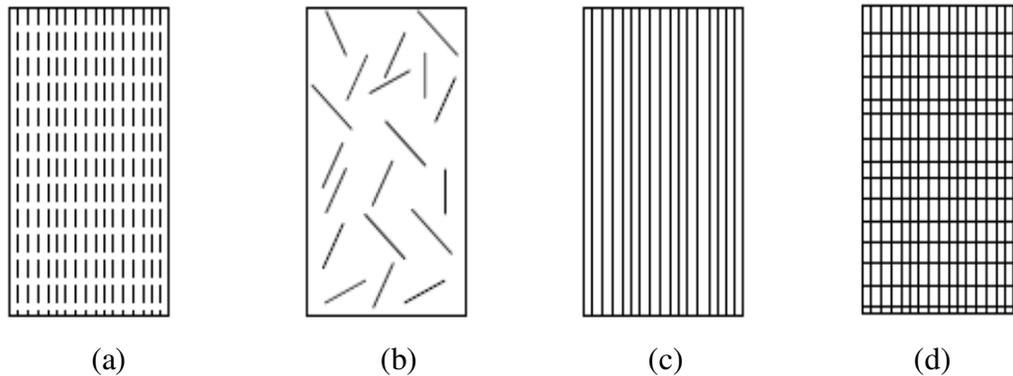


Figura 2.8 – Tipos de compósitos: (a) fibras curtas alinhadas, (b) fibras curtas aleatórias, (c) fibras longa alinhadas, e (d) fibras longas em duas direções (Desenho: Autor, 2010).

Dentre os materiais usados em engenharia, os compósitos apresentam a maior relação de rigidez por densidade, também chamada rigidez específica, e resistência mecânica por densidade, também chamada resistência mecânica específica (ALBUQUERQUE, 2001).

#### 2.4.2 Compósitos poliméricos reforçados por fibras vegetais

Quando as fibras vegetais são utilizadas como reforço em compósitos poliméricos, propriedades importantes das plantas são transferidas para o polímero, como elevada resistência à tração, módulo de elasticidade e baixa densidade (SALEEM et al., 2008). Propriedades como resistência mecânica e rigidez são maiores em polímeros reforçados com fibras do que naqueles sem reforço, e, principalmente em matrizes termorrígidas como o poliéster insaturado, as fibras são adicionadas com o objetivo aumentar a resistência e o módulo elástico da matriz. Compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais já são utilizados na construção civil, no mobiliário, e em peças automotivas. Vários estudos afirmam a tendência de se encontrar diferentes aplicações

para a utilização de fibras vegetais em compósitos poliméricos (KAMATH et al., 2005; PENDHARI et al., 2008; YU et al., 2008). A maioria dos autores têm se esforçado em pesquisar as propriedades e características das fibras vegetais para utilização em compósitos. A seguir é feita uma revisão de alguns destes trabalhos, os quais abordam: (i) a morfologia e microestrutura das fibras vegetais utilizadas; (ii) a influência do teor e da orientação das fibras nas propriedades mecânicas dos compósitos; (iii) a influência do tratamento das fibras na adesão fibra-polímero; e (iv) o comportamento térmico dos compósitos.

D´Almeida et al. (2006) avaliaram as propriedades mecânicas em tração e os aspectos químicos e morfológicos da fibra de piaçava. O valor médio encontrado para a tensão na ruptura foi  $133 \pm 13,5$  MPa. Para a análise termogravimétrica os autores observaram uma pequena perda de massa (5,18%) entre 75 e 80 °C, à qual atribuíram à perda de umidade inerente da fibra. Kuruvila et al. (1999) investigaram as propriedades tênséis dos compósitos de matriz poliéster reforçados por fibras curtas de sisal, em função do comprimento, teor e orientação das fibras. Obtiveram como resultados o aumento da resistência à tração com o aumento do comprimento das fibras, para um comprimento crítico de 55 mm, depois do qual os valores de resistência decresceram, para um teor de 30% de fibras. Os autores atribuíram esse decréscimo ao emaranhamento de fibras que ocorre quando são utilizados comprimentos maiores. No módulo elástico, no entanto, não houve alterações significativas. Baiardo et al. (2004) fabricaram compósitos de matriz de poliéster alifático, com 12,5, 25 e 37,5% em fração de volume de fibras curtas de linho tratadas quimicamente; observaram o aumento do módulo elástico em tração nos compósitos com o aumento da fração de volume. No trabalho de Bonelli et al. (2005), foram estudados compósitos de polímero reciclado com fibras curtas de piaçava com diferentes proporções de fibra: 5, 10 e 15%. Foram investigadas as propriedades térmicas, mecânicas e morfológicas. Nas curvas de TGA observaram perdas de massa relativa ao processo de degradação da fibra de piaçava, especialmente pirólise de seus constituintes principais: hemicelulose, celulose e lignina. Observaram a influência de fração em peso de fibra de piaçava nas propriedades de flexão do compósito e verificaram que houve aumento na resistência à flexão e módulo elástico com a adição de 15% de fibra. Nas propriedades de tração, a adição de fibras não-tratadas não apenas reduziu a resistência como não alterou o módulo elástico. As fibras tratadas quimicamente influenciaram positivamente no módulo elástico que atingiu seu maior valor com a adição de 15% de fração em peso de fibra de piaçava, sendo que o mesmo não foi

verificado para a resistência à tração que teve apenas um aumento não significativo para o compósito com adição de 5% de fração em peso de fibras. Recentes estudos relatam o uso das fibras vegetais combinadas com fibras sintéticas, como em Khalil et al. (2007), que conduziram estudos em compósitos de matriz poliéster com reforço híbrido de fibras de palma (EFB) e fibras de vidro. As propriedades físicas e mecânicas dos compósitos híbridos variando os teores de fibra vegetal e de vidro foram estudadas, tendo como resultado o incremento nas propriedades mecânicas com a adição de fibra de vidro à matriz. Silva (2008) et al. investigaram as propriedades mecânicas em flexão de um laminado de fibras contínuas de curauá em matriz de poliéster, em comparação com um laminado de fibra de vidro, e um laminado híbrido (fibra de curauá + fibra de vidro). Como resultado, concluíram que o baixo desempenho do laminado de curauá, apesar de as fibras serem fibras contínuas, pode ter sido consequência da técnica artesanal de fabricação dos compósitos. No trabalho de Prasad et al. (2009), foram elaborados compósitos de matriz poliéster insaturado com fibras longas de banana com o objetivo de estudar as propriedades mecânicas com a adição do reforço de fibras. O processo manual de *hand lay up* foi utilizado para preencher os moldes no formato dos corpos de prova para tração e flexão, sendo as fibras colocadas alinhadas paralelamente ao comprimento do molde. Os moldes receberam pressão de 0,05 MPa durante 24 h para o processo de conformação e cura. A maior fração volumétrica alcançada foi de 37%. Como resultado verificaram que nos testes de tração o compósito com 11% em fração de volume de fibras teve uma resistência à tração inferior ao da resina pura e, após esse valor crítico, houve incremento na resistência à tração até atingir o valor máximo de 37% em fração de volume de fibra de bananeira, para um valor de aproximadamente 45 MPa. Para o módulo elástico na tração o incremento foi proporcional à adição de fibras, alcançando um valor de 1 GPa. Observaram que a resistência à flexão decresceu com a adição de fibras apresentando valores inferiores aos da resina pura. Para o módulo elástico na flexão houve um incremento com a adição de 11% de fibras e, a partir desse valor, decresceu com a adição de fibras. Segundo os autores o baixo desempenho dos compósitos em flexão foi devido à falta de capacidade das fibras suportarem a tensão transmitida da matriz de poliéster. Para o decréscimo do módulo elástico com a adição de fibras, concluíram que foi devido a pouca adesão fibra-matriz, ou a falta de compatibilidade entre fibra e matriz. Tal desempenho insatisfatório também pode ser atribuído à falta de tratamento das fibras.

### 2.4.3 Aplicações de compósitos com reforço de fibras vegetais

Materiais compósitos reforçados com fibras sintéticas, como as fibras de vidro, aramida e carbono, são os tipos de compósitos poliméricos mais utilizados atualmente nas indústrias aeroespacial, automotiva, construção civil e esportiva. Avanços tecnológicos permitiram a substituição de alguns tipos de materiais metálicos, geralmente mais pesados, por materiais plásticos reforçados com fibras, bem mais leves, e apresentando performance mecânica semelhante aos materiais metálicos. Simultaneamente ao ganho tecnológico, estes materiais passaram a apresentar alguns inconvenientes para o meio ambiente, como o uso intensivo de energia não-renovável para sua fabricação, e a dificuldade de reciclagem, uma vez que a queima de materiais plásticos pode emitir para a atmosfera grande quantidade de dióxido de carbono, um dos gases responsáveis pelo efeito estufa (KHALIL et al., 2007). Neste cenário, particularmente na Europa, começaram a surgir legislações para adequar algumas indústrias a novas exigências ambientais de utilizar cada vez menos fontes não renováveis de recursos, e diminuir a poluição ambiental por meio de redução do lixo. O pensamento sobre o ciclo de vida do produto baseado em todas as etapas de produção – da extração da matéria-prima ao descarte do produto no meio ambiente, norteou algumas dessas exigências. Como consequência disso surgiu o interesse de usar matérias-primas naturais provenientes de fontes renováveis, como forma de atender a requisitos legais emergentes. Principalmente na indústria automotiva, normas como a “DIRECTIVE 2000/53/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 18 September, 2000, on end-of life vehicles”, da União Européia, obrigam a utilizar materiais recicláveis ou biodegradáveis nos veículos, como forma de reduzir o uso de matérias-primas de fontes não-renováveis e o consumo de energia. Neste sentido, vários estudos estão sendo conduzidos abordando assuntos tais como: identificação de novas fibras vegetais, estudos sobre características e propriedades, disponibilidade e comercialização de fibras vegetais, com o objetivo de atender a demanda crescente do setor automotivo (BLEDZKI et al. 2006; RAO E RAO, 2007).

Atualmente, a utilização de fibras vegetais como reforço ou carga em plásticos, pode ser encontrada, em indústrias dos setores de construção civil, embalagens e utilidades domésticas, por exemplo. No setor automotivo a utilização de fibras vegetais não é novidade, pois o primeiro

veículo a utilizar esse material data de 1950 – o *Eastern Germany's Trabant*, que possuía um chassis feito com fibras de algodão e matriz de resina poliéster (ZAH et al., 2007). A combinação entre propriedades mecânicas e baixo peso, tornaram o uso de fibras vegetais interessantes em algumas aplicações para o setor automotivo (RODRIGUEZ et al., 2005). A figura 2.9 ilustra alguns tipos de aplicações de compósitos com fibras vegetais no setor automotivo, geralmente em partes internas do veículo e em componentes que não recebam solicitações mecânicas intensas, como revestimento de portas, painéis frontais, e tampa do porta-mala, por exemplo.



Figura 2.9 – Exemplos de aplicação de compósitos com fibras vegetais em partes internas do carro: revestimento de portas, painel frontal e caixa de marcha (BLEDZKI et al., 2006).

Na literatura encontram-se estudos que relatam a utilização de fibras vegetais em variadas aplicações, e vários outros estudos estão sendo conduzidos no sentido de conhecer as características dessas fibras e seu verdadeiro potencial de aplicação industrial (YU et al., 2008; PENDHARI et al., 2008).

#### 2.4.4 Processamento de compósitos poliméricos

O processo de fabricação é também importante nas propriedades finais do compósito. Aspectos como custo do processo, escala de produção e dimensões do componente devem ser considerados na ocasião de escolha de método de processamento para compósitos reforçados com fibras. Processos como extrusão e moldagem por injeção são bastante utilizados na fabricação de compósitos reforçados por partículas ou fibras curtas, permitem uma alta escala de produção e são processos de tecnologia intensiva. No entanto, quando se trata de fibras longas e contínuas esses processos não são indicados, sendo utilizados: (i) pultrusão, processo mecanizado onde as fibras são impregnadas com resina passando por etapas de cura e laminação, sendo adequado para formação de seções retas constantes (barras e tubos); (ii) prepreg, também mecanizado, onde são formadas lâminas de fibras contínuas ou tecidos que são pré-impregnadas com resina sendo fornecidas parcialmente curadas para que a etapa de cura se complete na moldagem da peça final; a moldagem ou laminação manual \_ *hand lay-up*, geralmente utilizados quando as fibras longas se apresentam em forma de tecido, e a moldagem por compressão, quando a resina e o reforço são colocados em um molde e este é submetido à pressão e temperatura. A moldagem por compressão é um método antigo e vem sendo amplamente empregado por apresentar algumas vantagens, tais como:

- i) Fabricação de peças com excelente qualidade superficial;
- ii) Alto volume de produção e baixo custo;
- iii) Facilidade do uso de reforços com diferentes geometrias;
- iv) Fabricação de peças complexas.

O processo de moldagem por compressão pode ser utilizado para a moldagem de termorrígidos que curam a temperatura ambiente, como é o caso da resina poliéster insaturado (MEDINA et al., 2009). Durante o processo a resina é colocada no molde, geralmente metálico, e o reforço de fibras é colocado na sequência indicada no projeto para a formação do compósito. O molde então é fechado e submetido à pressão até o término do processo de cura da resina.

#### 2.4.5 Comportamento mecânico de compósitos reforçados por fibras

A resistência mecânica e o módulo elástico de compósitos reforçados por fibras longas e contínuas, sujeitos a carregamento de tração, dependem principalmente da orientação das fibras e, nesse caso podem-se destacar dois tipos principais de compósitos: (i) com fibras alinhadas unidirecionalmente ao longo do eixo longitudinal; e (ii) com fibras alinhadas em duas direções perpendiculares entre si. As propriedades dos compósitos com fibras alinhadas unidirecionalmente são altamente anisotrópicas e o máximo na resistência é obtido quando o material é testado na direção do alinhamento das fibras (figura 2.10). Na direção transversal ao alinhamento das fibras o reforço é virtualmente inexistente, e o material falha a tensões muito baixas, pois nesse caso as fibras atuam como defeitos na matriz.

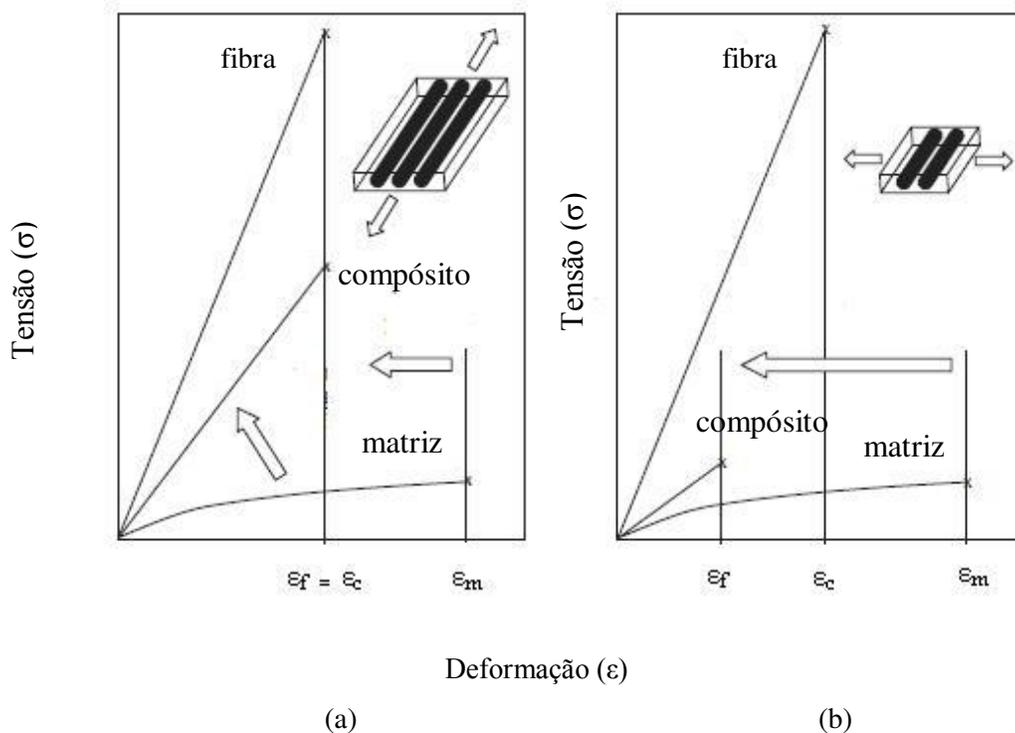


Figura 2.10 – Gráfico tensão x deformação para compósitos unidirecionais: (a) tração na direção das fibras, e (b) tração na direção transversal às fibras (MUELLER e KROBJILOWSK, 2003, adaptado).

As propriedades dos compósitos reforçados com fibras longas e alinhadas testados longitudinalmente ao reforço, são, portanto, superiores às dos mesmos compósitos testados transversalmente às fibras (MUELLER e KROBJILOWSK, 2003). Esse comportamento característico é mostrado nos gráficos esquemáticos de tensão x deformação da figura 2.10, para o comportamento de um compósito convencional.

Na figura 2.10.a, o compósito com reforço unidirecional tem propriedades intermediárias entre as propriedades da matriz, e as propriedades das fibras (mais rígidas), quando testados na direção das fibras, sendo este o comportamento esperado para este caso, pois percebe-se claramente o efeito reforçador das fibras. Quando testados na direção transversal às fibras, como ilustrado na figura 2.10.b, não há alteração significativa nas propriedades (CAIN et al., 2002), pois, como relatado anteriormente, nesse caso as fibras atuam como defeitos iniciadores de trincas na matriz, levando o compósito a falhar a tensões muito baixas.

#### 2.4.6 Comportamento térmico de fibras vegetais e compósitos

A estabilidade térmica de fibras vegetais e compósitos reforçados com fibras vegetais pode ser estudada pela análise termogravimétrica (TGA). O comportamento das fibras vegetais com a variação de temperatura é importante, pois fornece dados em relação à degradação de massa que pode ocorrer na fibra quando o processamento do compósito é feito a altas temperaturas (SAHEB et al., 1999). A temperatura de degradação térmica é a máxima temperatura que o material atinge sem que não haja nenhuma perda de massa. Em se tratando de uma fibra vegetal, a análise da curva de termogravimetria mostra o início da perda de umidade da fibra e a temperatura de degradação.

#### 2.4.7 Tipos de falhas em compósitos

Os materiais compósitos geralmente não têm o mesmo comportamento durante a falha que os materiais isotrópicos. Quando um compósito apresenta alto grau de anisotropia, como é o caso dos compósitos reforçados com fibras longas e contínuas, seu comportamento na fratura se manifesta de diferentes maneiras conforme sua microestrutura e geometria do reforço. Em um compósito polimérico a matriz apresenta comportamento elástico sem evidências macroscópicas de deformação plástica durante a falha (HUGHES et al., 2002). Aspectos como o tipo de matriz, teor e orientação das fibras, e métodos de processamento do compósito, são determinantes no comportamento do compósito durante a propagação da falha. Segundo Tita et al. (2002), as falhas intra-laminares que ocorrem em um compósito estrutural reforçado por fibra longas e alinhadas, são: (i) arrancamento das fibras, (ii) ponte de fibras (*fiber bridging*), efeito que ocorre quando as superfícies de uma trinca são interligadas por fibras, quebra das fibras, (iii) descolamento fibra-matriz, (iv) quebra de fibras, e (v) trincamento na matriz. Durante a propagação da falha, vários destes mecanismos podem ocorrer simultaneamente no compósito. A figura 2.11 mostra um desenho esquemático onde estão representados os vários tipos de falhas que podem ocorrer num compósito.

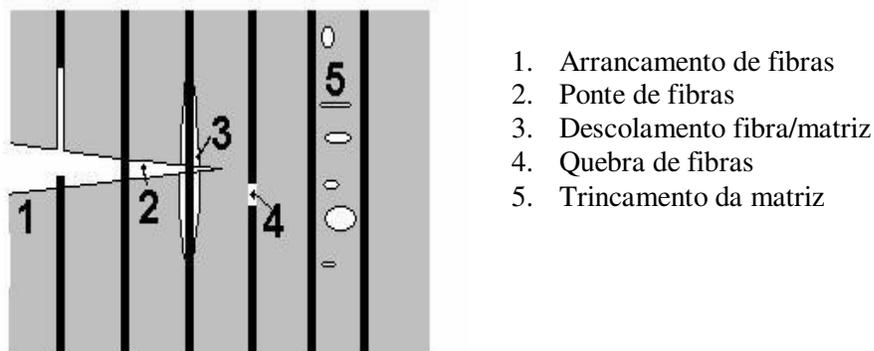


Figura 2.11 – Representação dos tipos de falhas em compósitos com fibras.

Os modos de propagação da trinca durante a sollicitação mecânica de um compósito polimérico reforçado por fibras longas e contínuas, influenciam a morfologia da superfície de fratura. A aparência da superfície de fratura da matriz polimérica depende de sua estrutura e das condições do ensaio. Matrizes poliméricas como o poliéster insaturado, são tradicionalmente consideradas frágeis, devido ao fato de que a alta densidade de ligações cruzadas impede o fluxo viscoso, no entanto verifica-se que pode haver considerável deformação plástica em nível microscópico.

## **3 MICROMECAÂNICA DE UM COMPÓSITO REFORÇADO POR FIBRAS**

### **3.1 Definições iniciais**

#### **3.1.1 Anisotropia**

Uma placa é um elemento estrutural definido por duas superfícies planas e paralelas onde as cargas são aplicadas transversalmente. A distância entre as duas superfícies define a espessura da placa.

Considerando as propriedades do material, uma placa pode se comportar de maneira anisotrópica, com diferentes propriedades em diferentes direções, ou isotrópica, com propriedades iguais em todas as direções.

O comportamento anisotrópico ocorre principalmente em materiais que possuem fibras contínuas não entrelaçadas e com uma orientação predominante imersa numa matriz de modo a melhorar sua eficiência estrutural (ALBUQUERQUE, 2001).

Os materiais anisotrópicos apresentam duas características interessantes. Se por um lado o grande número de variáveis e constantes elásticas necessárias para descrever o seu comportamento, tornam sua análise trabalhosa e complexa, por outro lado essas mesmas variáveis dão várias opções para a otimização do elemento projetado. As propriedades mecânicas podem ser maximizadas em determinadas direções, justamente aquelas que estarão sujeitas às maiores solicitações, sem um aumento significativo de peso (ALBUQUERQUE, 2001).

Embora a maioria dos materiais apresente algum grau de anisotropia, ela pode, em muitos casos, ser ignorada por não ser relevante para uma determinada aplicação. O exemplo mais importante desse comportamento é o aço laminado, no qual é notada uma resistência à tração ligeiramente maior na direção de laminação. Na maioria das aplicações essa diferença não é importante, porém em outras ela pode ser determinante.

As propriedades elásticas dos materiais são características mecânicas essenciais para a análise de tensões e para o projeto de componentes estruturais utilizados em diversos ramos da engenharia. Os compósitos estruturais, principalmente os de matriz polimérica, apresentam

comportamento linear elástico praticamente até atingirem a tensão de falha, e, nesse caso, o conhecimento das propriedades elásticas é fundamental. Por meio das propriedades elásticas é possível relacionar-se as tensões mecânicas e as deformações que ocorrem em um material. Uma das principais vantagens da micromecânica, a qual é basicamente uma técnica de homogeneização, é permitir o cálculo das propriedades elásticas de um compósito a partir das propriedades elásticas dos seus constituintes, desde que as frações volumétricas dos mesmos sejam conhecidas.

O compósito estrutural por definição é constituído por uma matriz (M), a qual é reforçada, em escala macroscópica, por um ou mais tipos de fibras (F) longas e/ou contínuas. Os compósitos mais simples são normalmente reforçados por um único tipo de fibra, que podem se apresentar em forma de fibras orientadas em uma só direção, chamadas de unidirecionais (UD), fibras orientadas em duas direções que são geralmente perpendiculares entre si, chamadas de bidirecionais (2D), que podem ser em forma de tecido ou não. Outro tipo de compósito é aquele que pode ser reforçado por mais de um tipo de fibra, chamado de compósito híbrido.

### 3.2 Fração de massa e de volume

O principal parâmetro indicativo da constituição de uma lâmina é a proporção relativa entre fibra e resina. Durante o processo de fabricação, no entanto, é mais fácil o uso e a medida de massas relativas, enquanto que os valores teóricos de propriedades usados no projeto e obtidos pela regra da mistura, são calculados em termos de fração de volume. O volume do compósito ( $V_C$ ) pode ser definido então pelo volume de fibras ( $V_F$ ) somado ao volume da matriz ( $V_M$ ). Tem-se então as seguintes relações, desconsiderando os vazios existentes na placa:

$$V_C = V_F + V_M \quad (3.1)$$

Da mesma forma, a massa do compósito ( $M_C$ ) pode ser definida pela massa da fibra ( $M_F$ ) somado à massa da matriz ( $M_M$ ):

$$M_C = M_F + M_M \quad (3.2)$$

Definem-se como  $v_f$  e  $v_m$  as frações volumétricas de fibra e matriz, e  $m_f$  e  $m_m$ , as respectivas frações de massa:

$$v_f = V_F / V_C, \quad v_m = V_M / V_C, \quad (3.3)$$

$$m_f = M_F / M_C, \quad m_m = M_M / M_C \quad (3.4)$$

Para os compósitos simples com dois componentes, tem-se:

$$v_f + v_m = 1 \quad \text{e} \quad m_f + m_m = 1 \quad (3.5)$$

As densidades (massa/volume) podem então ser definidas como  $\rho_c$ ,  $\rho_f$  e  $\rho_m$ , densidades do compósito, das fibras e da matriz, respectivamente. Com essas definições, a equação (3.2) pode ser reescrita como:

$$\rho_c V_C = \rho_f V_F + \rho_m V_M \quad (3.6)$$

Usando a equação (3.3) e dividindo-se ambos os lados por  $V_C$ , obtém-se:

$$\rho_c = \rho_f v_f + \rho_m v_m \quad (3.7)$$

### 3.3 Regra da mistura

As propriedades de uma lâmina de compósito unidirecional dependem das propriedades de seus constituintes e da magnitude de suas contribuições (XUE et al., 2005). Portanto, o módulo de elasticidade longitudinal de um compósito unidirecional ( $E_L$ ), considerando fibra e matriz de comportamento linear elástico, pode ser definida conforme mostrado por Jones (1975), em função da fração de volume de seus constituintes, da seguinte forma:

$$E_L = E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m \quad (3.8)$$

onde  $V_f$  é a fração volumétrica das fibras,  $V_m$  é a fração volumétrica da matriz,  $E_f$  é o módulo de elasticidade das fibras e  $E_m$  é o módulo de elasticidade da matriz.

A equação (3.8) é válida para lâminas com fibras dispostas unidirecionalmente.

### 3.4 Hipóteses simplificadoras

Na análise micromecânica de um compósito, algumas simplificações tem de ser feitas para se reduzir a complexidade das equações. Essas simplificações são chamadas de hipóteses pois dão uma visão ideal da realidade, conveniente para a adequação às regras. As hipóteses são feitas tanto para a matriz como para as fibras e são formuladas para tornar possível a abordagem micromecânica, que é uma abordagem essencialmente teórica. Para a matriz devem-se considerar as seguintes hipóteses:

- É homogênea;
- Tem comportamento mecânico linear elástico;

- É isotrópica.

Para as fibras:

- São homogêneas;
- Tem comportamento mecânico linear elástico;
- São isotrópicas;
- Estão perfeitamente alinhadas, isto é, paralelas umas às outras;
- Estão igualmente espaçadas entre si.

As deformações higrotérmicas a que estão sujeitas as matrizes termofixas, como o epóxi e o poliéster, e que ocorrem devido a alterações de umidade e temperatura, não serão consideradas para efeito de aplicação das equações de micromecânica.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Materiais

#### 4.1.1 Fibra de *miriti*

Foi utilizada neste trabalho a matéria-prima lignocelulósica denominada de fibra de *miriti*, conforme mostrado na figura 4.1, obtidas do pecíolo da palmeira *Mauritia flexuosa* L. as fibras são obtidas a partir das talas estreitas com um estilete.

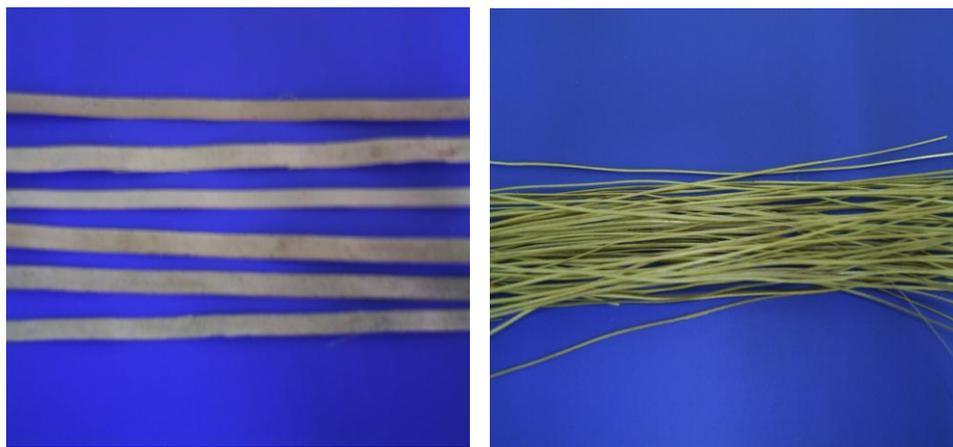


Figura 4.1 – Talas de *miriti* (esquerda) e fibras de *miriti* (direita).

#### 4.1.2 Resina poliéster

Para fabricação dos compósitos é utilizada como matriz a resina poliéster insaturado PolyLite 10316 fornecida pela Fiber Center, juntamente com catalisador MEK-P fornecido pela mesma empresa. A formulação usada consiste de 100 partes de resina por peso para 1% de

catalisador. A resina poliéster insaturada foi escolhida por ser de baixo custo a apresentar bom desempenho mecânico quando utilizada com reforço de fibras. Na tabela 4.1 são apresentadas as principais propriedades da resina utilizada neste trabalho, conforme está no boletim técnico do fornecedor (anexo 04).

Tabela 4.1 - Propriedades da resina poliéster na aplicação (\*).

Características	Valores típicos
Resistência Máxima à tração (MPa)	40
Módulo de Elasticidade em Tração (MPa)	3.500
Elongação Máxima (%)	2,0
Resistência Máxima à flexão (MPa)	60
Módulo de Elasticidade em Flexão (MPa)	3.800
Deformação Máxima (%)	1,6

(\*) Sem reforço; sistema de catálise MEK-P; pós-cura 48h a 60 °C.

Fonte: Boletim técnico Reichhold *composites*, resina PolyLite 10316-10.

## 4.2 Metodologia

Para melhor entendimento das etapas que constroem a metodologia da parte experimental deste trabalho, estas foram organizadas num fluxograma mostrado na figura 4.2.

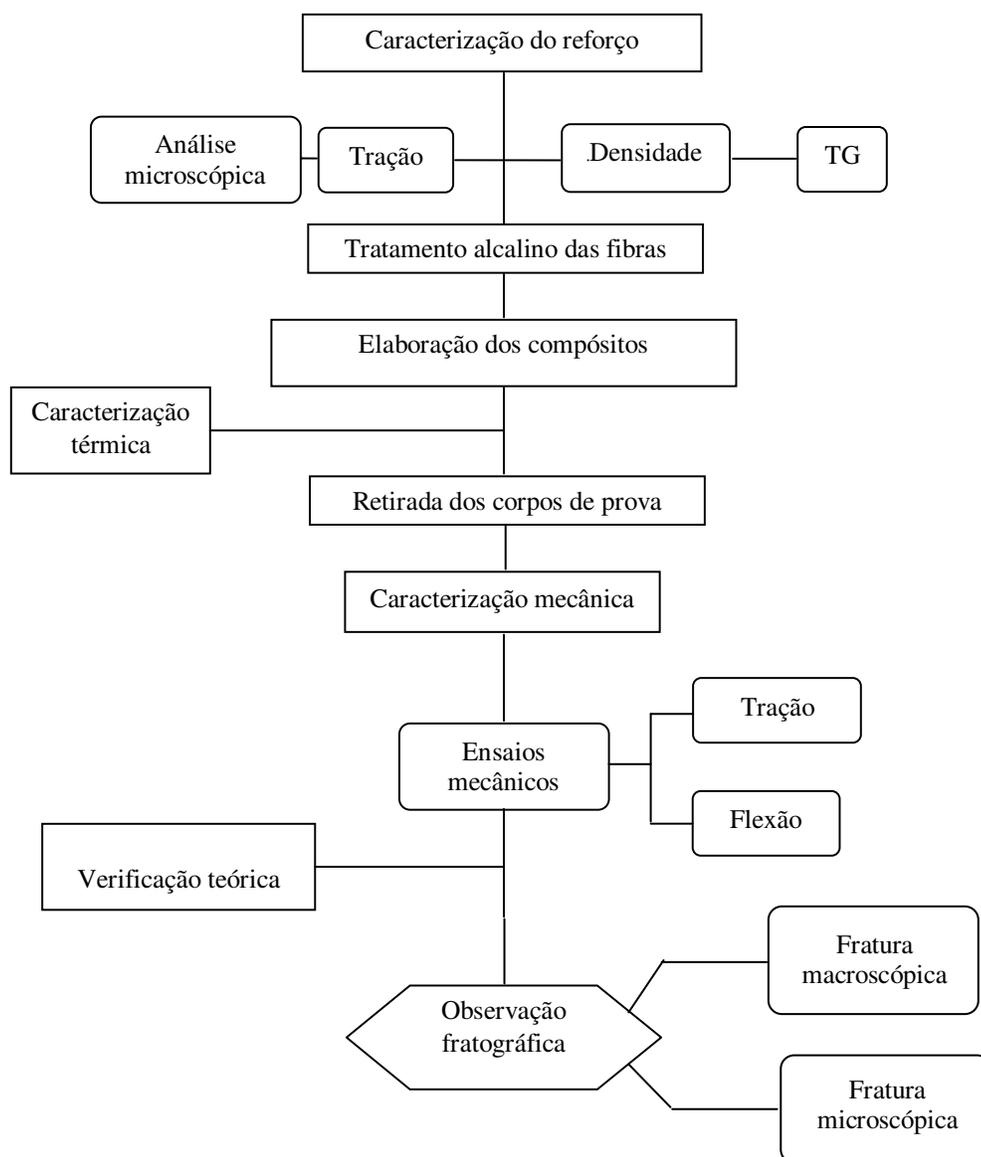


Figura 4.2 – Fluxograma indicativo da parte experimental.

#### 4.2.1 Extração da fibra

Para a obtenção das fibras utilizadas neste trabalho, a parte da palmeira de buriti fornecedora do material fibroso – o pecíolo, foi cuidadosamente coletada de palmeiras localizadas numa fazenda do município de Capanema, Estado do Pará (PA). O pecíolo é coletado ainda verde da palmeira, sendo em seguida retiradas talas largas de aproximadamente 2 cm com a ajuda de uma faca (figura 4.3). Com um estilete as talas largas se transformam em talas mais estreitas, de aproximadamente 5 mm, que, depois, se transformam no que denominamos de fibras de *miriti*. Foi verificada a perda de água gradativa do material após a retirada da palmeira.



Figura 4.3 – Obtenção da fibra de *miriti* (a) e (b) pecíolo do buriti, (c) talas largas, e (d) fibras de *miriti* (Autor, 2009).

## 4.2.2 Caracterização física da fibra de *miriti*

### 4.2.2.1 Densidade aparente

A densidade aparente das fibras de *miriti* não-tratadas e tratadas foi determinada segundo a norma ASTM D792 (método A). Durante o procedimento colocou-se água deionizada numa proveta de 50 mL, e anotou-se o volume inicial ( $V_i$ ); em seguida adicionou-se a amostra de fibra de massa conhecida, e anotou-se o volume final ( $V_f$ ). O volume da fibra ( $V_F$ ) foi então determinado a partir da diferença entre  $V_f$  e  $V_i$ , sendo utilizado na equação 4.9 para determinação da densidade da fibra.

$$D_F = M_F / V_F \quad (4.9)$$

Todos os procedimentos foram realizados a uma temperatura de 19,9 °C e 30% de umidade relativa.

### 4.2.2.2 Dimensões

Para o estudo da dimensão da seção transversal da fibra de *miriti*, esta foi considerada como sendo de seção circular. O estudo do diâmetro médio das fibras de *miriti* foi feito utilizando-se duas técnicas de mensuração. A primeira consistiu na utilização de um relógio comparador, na qual foi utilizado um total de 50 espécimes de fibras de *miriti*, escolhidos aleatoriamente, cujo comprimento variava entre 25 a 30 cm. As medidas foram feitas em 3 pontos pré-determinados ao longo do comprimento de cada fibra. A média das 3 medidas foi obtida resultando no diâmetro médio de cada fibra. A segunda consistiu em medidas feitas pela técnica de microscopia

eletrônica de varredura (MEV), no microscópio da JEOL modelo JXA-840, a partir das imagens da seção transversal das fibras, utilizando a ferramenta de medida do software Noran System-Six, acoplado ao microscópio. Foram utilizados 50 espécimes de fibras de *miriti* escolhidos aleatoriamente, sendo que cada espécime foi seccionado com uma tesoura em 3 pontos no comprimento da fibra, como mostrado na fig. 4.4, sendo as partes montadas em suporte apropriado para que fossem feitas as imagens da seção transversal. De cada espécime então, foram obtidas 3 imagens da seção transversal, sendo as medidas do diâmetro médio feitas em cada uma das 3 imagens e, em seguida, obteve-se a média das medidas, resultando no diâmetro médio da fibra. A figura 4.4 mostra um desenho esquemático da preparação das amostras para leitura da seção transversal da fibra no MEV.

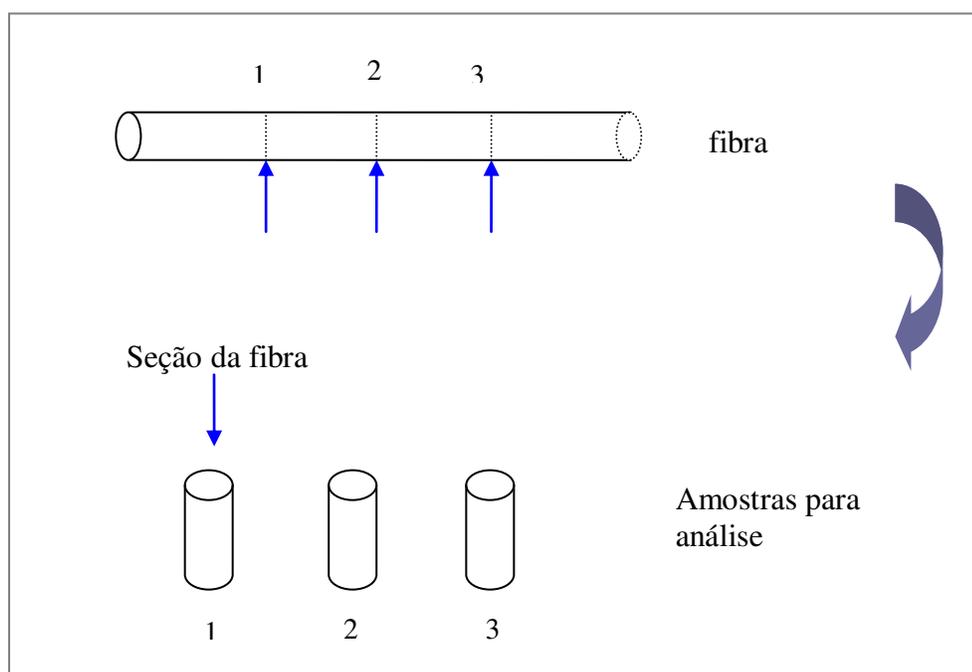


Figura 4.4 – Preparo das amostras de fibras para leitura da seção transversal pelo MEV.

#### 4.2.2.3 Caracterização morfológica de superfície e da microestrutura da fibra de *miriti*

Na análise da morfologia de superfície, da microestrutura, e da morfologia da seção transversal da fibra de *miriti*, utilizou-se a técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV),

feita no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP. Para a análise da microestrutura as amostras de fibras foram criofraturadas de forma a mostrar detalhes que só seriam percebidos por meio de fratura frágil. Todas as amostras foram submetidas ao recobrimento com ouro, colocadas no vácuo e a leitura das imagens foram feitas a uma voltagem de 25 kV, no microscópio da JEOL modelo JXA-840.

#### 4.2.3 Tratamento alcalino

O tratamento químico das fibras de *miriti* foi feito com hidróxido de sódio (NaOH), solução a 5%. Antes do tratamento com a solução alcalina as fibras foram pré-tratadas com toluol:etanol 2:1 (MAMEDE, 2010; NISGOSKI et al., 2010), com o objetivo de favorecer a retirada de substâncias voláteis de baixo peso molecular, tais como ceras e graxas. O tempo deste pré-tratamento foi de 60 min. Em recipiente de vidro e com as fibras em repouso. Após esse tempo as fibras foram secas em estufa com circulação de ar e conduzidas ao tratamento com hidróxido de sódio, em temperatura ambiente, durante 80 minutos, também em recipiente de vidro e com as fibras em repouso. Em seguida as fibras foram lavadas com água destilada até equilibrar o pH e então secas em dessecador preparado com vácuo, durante 12 h, após os quais foram utilizadas no preparo das lâminas.

#### 4.2.4 Espectroscopia de infravermelho FT-IR

A técnica de espectroscopia no infravermelho foi utilizada para detectar as mudanças ocorridas devido ao tratamento alcalino das fibras de *miriti*. Os espectros foram obtidos para fibras tratadas e fibras não tratadas. As análises foram feitas com o equipamento portátil Thermo Nicolet IR 100, no modo de transmissão com resolução de  $4\text{ cm}^{-1}$ , operando na faixa de  $4000\text{-}400\text{ cm}^{-1}$ .

#### 4.2.5 Caracterização mecânica da fibra de *miriti*

As propriedades mecânicas da fibra de *miriti* foram determinadas sob carregamento de tração, sendo os espécimes preparados segundo a norma ASTM D3379. *Tabs* de papel foram preparados para o ensaio das fibras, conforme mostra o desenho da figura 4.5. Os ensaios foram feitos utilizando fibras não-tratadas e tratadas com solução alcalina, e foram conduzidos na Máquina Universal EMIC modelo DL 500, célula de carga de 500 kgf, a velocidade de 5 mm/min. Em temperatura de 21°C e 75% de umidade relativa.

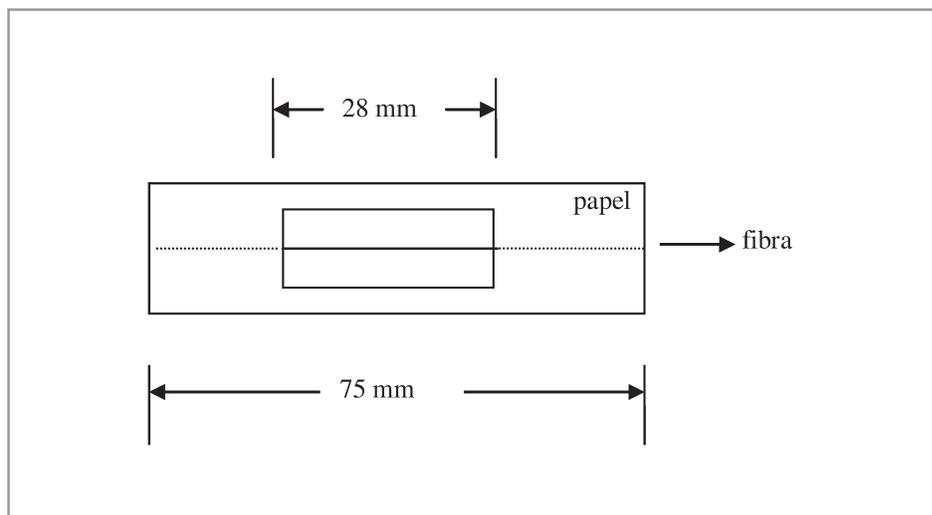


Figura 4.5 – Desenho dos *tabs* preparados para o ensaio de tração da fibra.

Ensaiou-se um total de 50 espécimes, para fibras não-tratadas e tratadas, sendo obtidos valores médios de resistência mecânica à tração e módulo de elasticidade da fibra, assim como os respectivos valores do coeficiente de variação (CV). Todos os ensaios mecânicos das fibras de *miriti* foram realizados no Laboratório de Plásticos do Colégio Técnico da Unicamp (COTUCA).

#### 4.2.6. Elaboração das lâminas de fibras

Para a montagem das lâminas unidirecionais de fibras longas (lâminas UD), foi desenvolvido um suporte de madeira para prender as fibras e mantê-las retilíneas. Com as fibras fixadas no suporte foi passada uma camada estreita de resina poliéster nas extremidades da lâmina para que continuassem retilíneas após a retirada do suporte (figura 4.6). As lâminas prontas foram acondicionadas no vácuo em dessecador de vidro (figura 4.7), até a utilização na moldagem dos compósitos.



Figura 4.6 – Suporte montado para alinhamento das fibras.



Figura 4.7 – Dessecador e bomba de vácuo usados na secagem das fibras.

### 4.3 Elaboração das placas de compósitos

Foram elaboradas placas com fibras orientadas unidirecionalmente (UD), e com fibras orientadas em duas direções ortogonais entre si (2D), com de 10, 20 e 30% em fração de volume de fibra. As camadas dos compósitos unidirecionais (UD) são 3, 4 e 5 camadas, para as frações de volume de 10, 20 e 30% respectivamente (figura 4.8). A sequência de montagem das lâminas de fibras nos compósitos em duas direções ortogonais, chamados de compósitos bidirecionais (2D), é mostrada na figura 4.9., sendo 3, 5 e 7 camadas para os compósitos com frações de volume de 10, 20 e 30%, respectivamente.

Para a moldagem das placas a resina de poliéster foi preparada com 1% de catalisador e vertida em molde de alumínio com revestimento de teflon e cavidade de 12 x 12 cm (figura 4.10). Após isso as lâminas de fibras foram dispostas no molde, que foi fechado e submetido a uma pressão de aproximadamente 1,0 tonelada (SANTOS et al., 2007b), durante 24 h em prensa hidráulica para a realização do processo de conformação cura, como mostrado na figura 4.11.

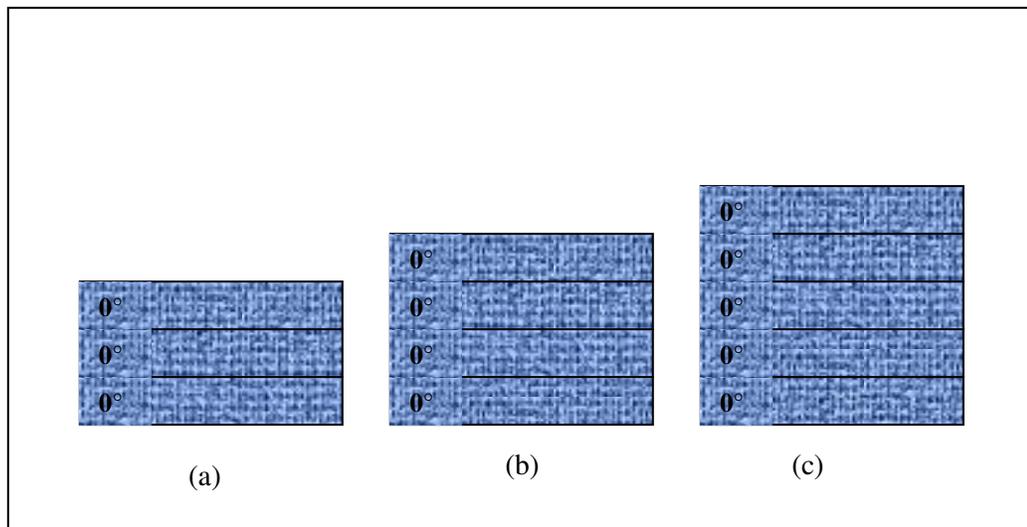


Figura 4.8 – Seqüência de montagem das lâminas de fibras nos compósitos unidirecionais conforme fração de volume: (a) 10%, (b) 20% e (c) 30%.

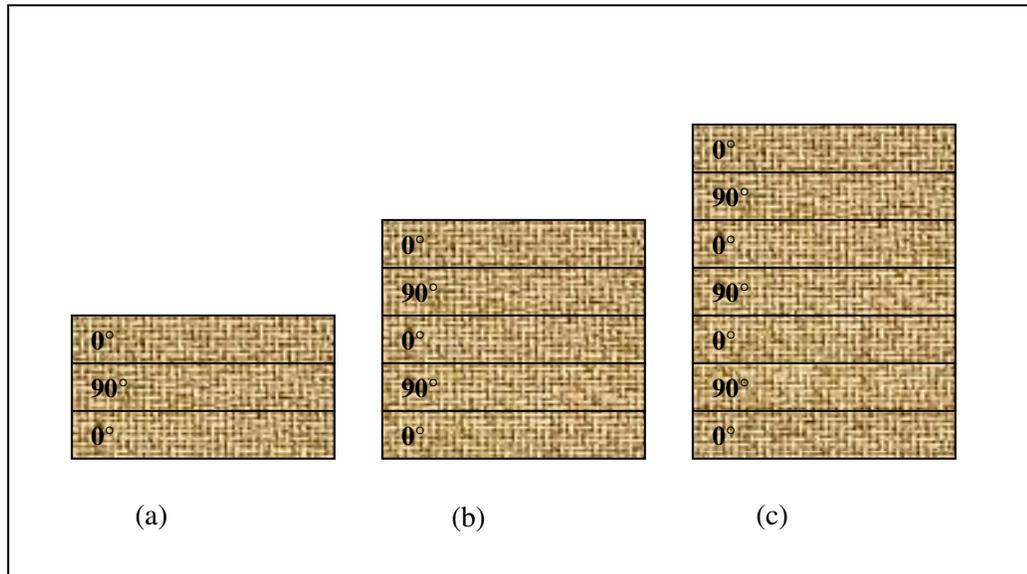


Figura 4.9 – Seqüência de montagem das lâminas de fibras nos compósitos bi-direcionais conforme fração de volume: (a) 10%, (b) 20% e (c) 30%.

Após esse período foi feita a pós-cura em estufa com circulação de ar, durante 24 h a temperatura de 60 °C. Todos os procedimentos de moldagem das placas de compósitos foram realizados no Laboratório de Materiais Cerâmicos da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP.

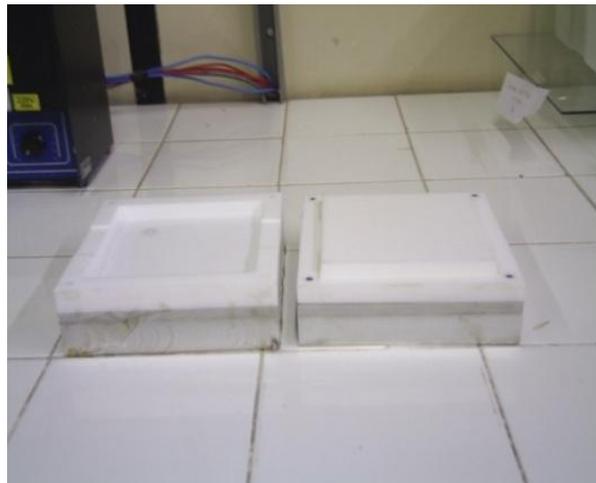


Figura 4.10 – Molde utilizado na fabricação das placas de compósitos.



Figura 4.11 – Prensa hidráulica utilizada na moldagem das placas.

#### 4.3.1 Densidade aparente dos compósitos

A densidade aparente da placa de resina de poliéster insaturado e dos compósitos foi determinada segundo a norma ASTM D792 (método A), conforme está descrito na seção 4.2.2.1. Todos os procedimentos foram realizados a uma temperatura de 19,9 °C e 30% de umidade relativa. Os valores obtidos nas análises foram utilizados no cálculo das propriedades específicas dos materiais estudados neste trabalho.

#### 4.3.2 Caracterização mecânica dos compósitos

##### *4.3.1.1 Ensaio de tração*

As propriedades mecânicas dos compósitos unidirecionais (UD) e bi-direcionais (2D), sob carregamento de tração, foram determinadas de acordo com a norma ASTM D638. A geometria

dos corpos de prova é retangular (GOMES et al., 2007; PRASAD et al., 2009), com dimensões de 3 x 19 x 120 mm.

Os ensaios foram conduzidos na Máquina Universal EMIC modelo DL 500, utilizando célula de carga de 500 kgf, velocidade de 5 mm/min., em temperatura de 21°C e 50% de umidade relativa. Foram ensaiados 5 corpos-de-prova de cada placa de compósito, sendo obtidos valores médios de resistência à tração e módulo de elasticidade dos compósitos. Todos os ensaios mecânicos, aplicados aos compósitos, foram feitos no Laboratório de Ensaios Destrutivos e Não-destrutivos, do Instituto de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Os corpos-de-prova foram preparados com fita crepe para melhor adequação à garra da máquina.

#### *4.3.1.2 Ensaio de flexão em 3 pontos*

As propriedades mecânicas das placas de compósitos unidirecionais (UD) e bi-direcionais (2D) sob carregamento de flexão, foram determinadas de acordo com a norma ASTM D790-92. A geometria dos corpos-de-prova é retangular com dimensões de 3 x 16 x 60 mm., e o espaço entre os vãos de 45 mm.

Os ensaios foram conduzidos na Máquina Universal EMIC modelo DL 500, utilizando célula de carga de 500 kgf, a velocidade de 5 mm/min., em temperatura de 21°C e 50% de umidade relativa. Foram ensaiados 5 corpos-de-prova de cada placa de compósito, sendo obtidos valores médios de resistência à flexão e módulo de elasticidade na flexão dos compósitos. Todos os ensaios mecânicos realizados nos compósitos foram feitos no Laboratório de Ensaios Destrutivos e Não-destrutivos, do Instituto de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI).

A resistência à flexão ou módulo de rotura ( $M_r$ ) é dada pela equação,

$$M_r = \frac{3 \cdot F_{\max} \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (4.10)$$

sendo  $F_{max}$  a força máxima de flexão, e  $L$  a distância entre os apoios; e  $b$  e  $h$  a largura e altura do corpo-de-prova retangular em mm, respectivamente.

O módulo de elasticidade em flexão é dado pela equação,

$$E = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot y \cdot I} \quad (4.11)$$

sendo que  $y$  é a flecha medida para a força ( $F$ ) aplicada a meio vão, e  $I$  o momento de inércia, dado pela relação abaixo:

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (4.12)$$

#### 4.4 Verificação teórica dos resultados experimentais

A aplicação da teoria micromecânica por meio da regra da mistura, foi utilizada com o objetivo de confrontar os resultados experimentais com os resultados teóricos. Para isso, são utilizados os valores das propriedades mecânicas da fibra de *miriti* (módulo elástico), os valores das propriedades mecânicas da resina de poliéster insaturado (módulo elástico), assim como as frações em volume de fibras utilizadas nos compósitos UD. O módulo de elasticidade longitudinal dos compósitos unidirecionais sob carregamento de tração, foi, então, obtido com o auxílio da equação (3.8), constituindo-se no resultado teórico do comportamento mecânico sob tração dos compósitos unidirecionais.

## **4.5 Comportamento térmico de fibras e compósitos**

As curvas das análises termogravimétrica (TGA) foram obtidas para fibras tratadas e não tratadas, para a resina de poliéster insaturado, e para o compósito. As análises foram realizadas em amostras de aproximadamente 10 mg, que foram aquecidas a uma taxa de 20 °C/minuto, desde a temperatura ambiente até a temperatura de 1000 °C. As análises foram feitas em fluxo de nitrogênio, e as curvas obtidas mostram o perfil de degradação térmica do material com a evolução da temperatura. As análises de TGA foram realizadas no Laboratório de Microscopia Ótica e Análise Térmica da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP.

## **4.6 Observação fraturográfica**

### **4.6.1 Fratura macroscópica**

Imagens macroscópicas dos compósitos testados nos ensaios de tração e flexão foram obtidas com uma máquina digital Sony Cyber-Shot DSC W55 (7.2 megapixels), com o objetivo de estudar o comportamento de propagação da falha nos compósitos.

### **4.6.2 Fratura microscópica – MEV**

A morfologia da superfície de fratura dos corpos de prova dos compósitos rompidos no ensaio de tração, foi estudada utilizando a técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV), no microscópio modelo JEOL JXA-840A. Por meio das imagens pôde-se observar os modos de falha ocorridos nos compósitos e a adesão interfacial fibra-matriz. Todas as análises foram

realizadas no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura, da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Caracterização física da fibra de *miriti*

#### 5.1.1 Densidade aparente

O valor obtido para a densidade aparente da fibra de *miriti* foi de  $0,886 \text{ g/cm}^3$ , tanto para as fibras não-tratadas como para as fibras tratadas, pois o tratamento alcalino a baixa concentração feito nas fibras não interferiu na sua estrutura. O valor da densidade é inferior ao da água, compatível com a microestrutura do material que contém muitos vazios.

#### 5.1.2 Dimensões médias

Na figura 5.1 é mostrada a distribuição dos diâmetros médios das fibras de *miriti*, conforme os resultados obtidos das medições realizadas com o relógio comparador (método 01).

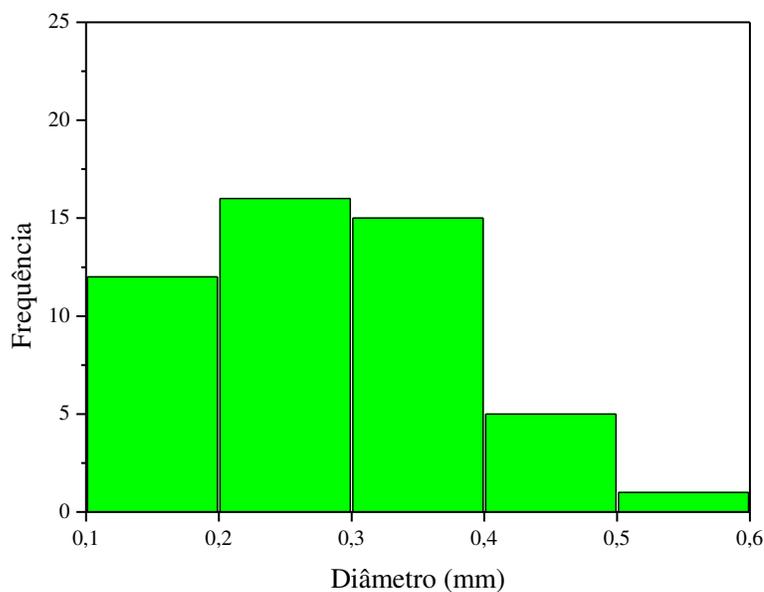


Figura 5.1 – Histograma da distribuição do diâmetro médio das fibras de *miriti* (método 01).

Observa-se a grande variabilidade nos resultados, característica das fibras vegetais, e que a maioria dos valores obtidos se situa na faixa de 0,200 a 0,300 mm.

Os resultados das medidas obtidas a partir de imagens de microscopia da seção transversal das fibras (método 02), podem ser observados na figura 5.2. Também se pode observar, nesse caso, a grande variabilidade de resultados, e que a maioria dos valores se situam na faixa 0,3 a 0,4 mm. Estudos sobre as dimensões da fibra de *miriti* foram feitos considerando apenas o diâmetro médio, uma vez que o comprimento da fibra pode chegar a até 1,5 m. Os dois métodos de medição utilizados neste trabalho mostram um perfil diferente para a frequência da distribuição das medidas, sendo que o método 01 apresentou relativamente maior espalhamento na faixa de 0,10 a 0,40 mm. O método 02 apresentou menor espalhamento em relação ao método 01, mostrando que a maior parte dos valores de diâmetro médio se localizam na faixa de 0,30 a 0,40 mm, seguido pela faixa de 0,40 a 0,50 mm.

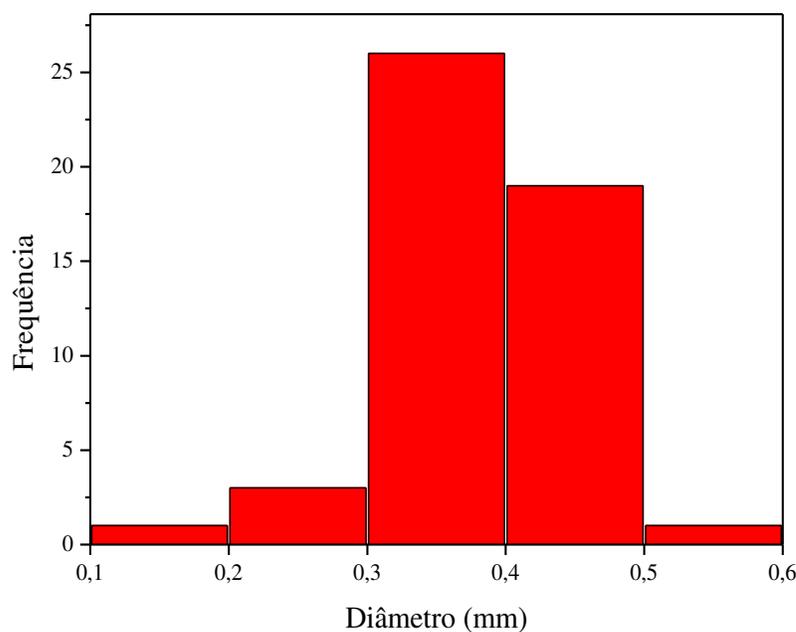


Figura 5.2 – Histograma da distribuição do diâmetro médio das fibras de *miriti* (método 02).

A tabela 5.1 apresenta os valores de diâmetro médio, desvio padrão e coeficiente de variação das fibras de *miriti* utilizadas neste trabalho. O estudo das propriedades mecânicas da fibra foi feito considerando o diâmetro de 0,35 mm, valor este obtido da média das medidas de maior frequência obtidas pelo método 02 de determinação do diâmetro da fibra, e considerado o valor mais representativo das medidas. O método 02 foi escolhido por ter apresentado o menor desvio padrão e menor dispersão dos valores em torno da média em relação ao método 01.

Tabela 5.1 – Diâmetro médio da fibra de *miriti*.

<b>Função Estatística</b>	<b>Amostra (espécimes)</b>	<b>Média (mm)</b>	<b>Desvio Padrão (mm)</b>	<b>Coeficiente de Variação (%)</b>
<b>Método 01</b>	50	0,325	0,095	30
<b>Método 02</b>	50	0.387	0,071	18

Não é possível afirmar que o método utilizado para extrair as fibras do pecíolo possa ter influenciado no diâmetro médio, uma vez que não existem estudos sobre a mesma fibra utilizando métodos diversos de extração. É possível afirmar, no entanto, que a maceração biológica, ou a extração mecânica das fibras, possa resultar numa maior produtividade, aspecto considerado fundamental para sua utilização industrial (SATYANARAYANA et al., 2007). A grande dispersão obtida pelos valores das dimensões das fibras vegetais é reportada em Satyanarayana et al. (2007) e Charlet et al. (2007).

### 5.1.3 Caracterização morfológica de superfície e da microestrutura da fibra

No estudo da morfologia de superfície do material utilizado neste trabalho e denominado de fibra de *miriti*, apresentado na figura 5.3, observam-se características bastante peculiares e que podem ser resultado do método de extração da fibra de *miriti*.

Marcas de deformação plástica são visíveis em praticamente todas as imagens da figura 5.3, assim como o alinhamento regular das fibrilas que compõem a fibra, fator que pode influenciar nas propriedades mecânicas da fibra. A existência de partículas soltas na superfície da fibra é evidente na figura 5.3.c; tal característica justifica o tratamento químico das fibras para utilização em compósitos poliméricos. Na imagem da figura 5.3.a, nota-se a deformação plástica da lamela intermediária que reveste as fibrilas, ocorrido durante a extração da fibra (LU et al., 2003).

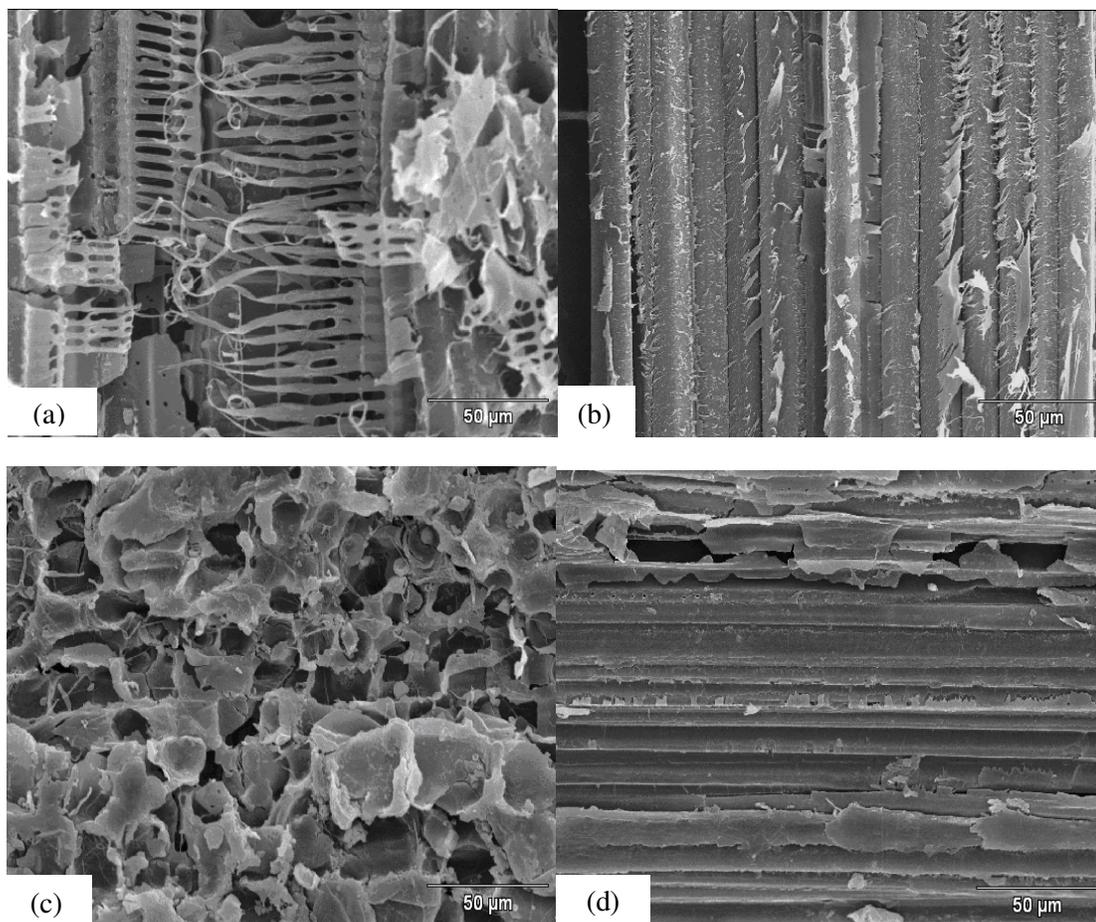


Figura 5.3 – Morfologia da superfície da fibra: (a), (b) e (d) marcas de deformação plástica; (b) regularidade do alinhamento das fibrilas; (c) partículas soltas.

As imagens feitas após fratura criogênica mostram a microestrutura característica do material. Na figura 5.4.a nota-se a regularidade do alinhamento das fibrilas, que, juntas, constituem uma fibra de *miriti*. A presença do lúmen, formação típica das fibras lignocelulósicas, é evidente nas imagens (figura 5.4.b, c, d). A grande quantidade de fibrilas orientadas unidirecionalmente presentes na fibra, assim como a existência do lúmen em cada fibrila, são favoráveis às propriedades mecânicas do material, assim como a baixa densidade da fibra. A forma hexagonal das fibrilas também fica claro nas imagens da figura 5.4, assim como a existência de uma membrana que parece envolver as fibrilas, reportado na literatura como sendo a lamela intermediária, é mostrada em detalhe na figura 5.4.d (LU et al., 2003). Na mesma imagem pode-se observar que os espaços entre as fibrilas de maior seção transversal, estão preenchidas por fibrilas de menor seção garantindo um maior grau de empacotamento nesta região da fibra.

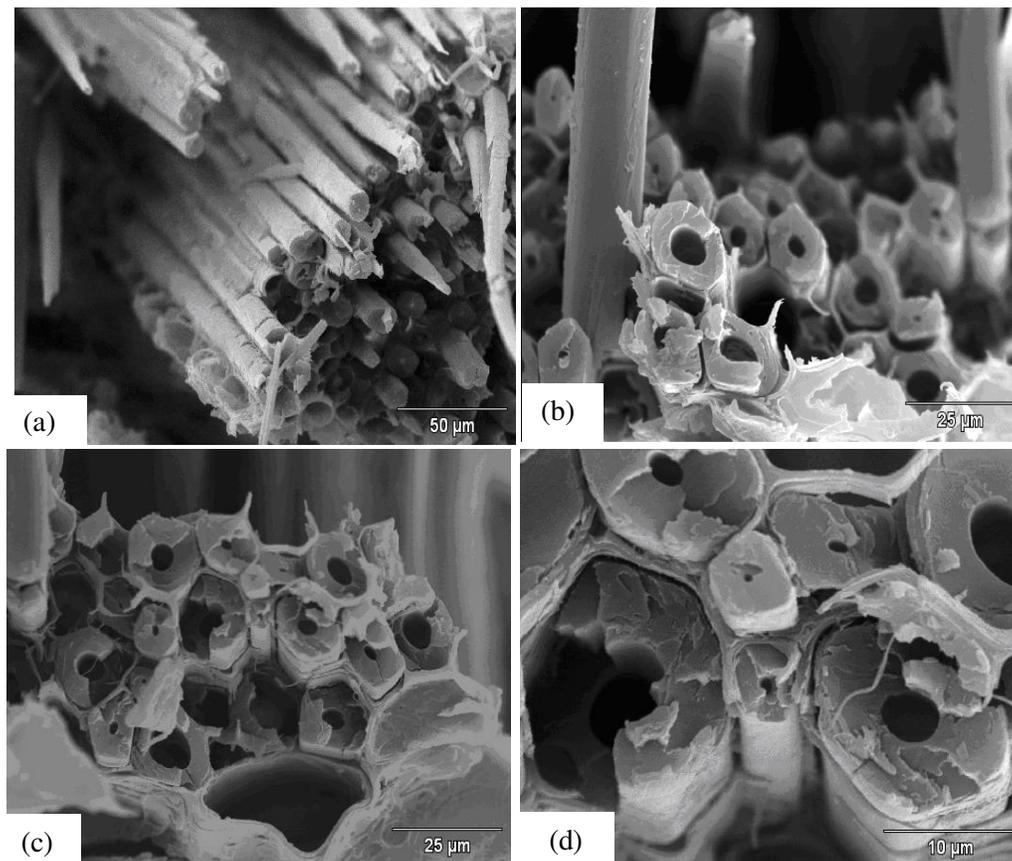


Figura 5.4 – Morfologia da microestrutura da fibra: (a) alinhamento das fibrilas; (b) e (c) lúmen das fibrilas; (d) forma hexagonal das fibrilas.

Na figura 5.5 podem-se observar os diversos formatos da seção transversal das fibras de *miriti*, obtidos a partir de imagens de MEV. No entanto, para efeito de determinação das dimensões médias (diâmetro médio) das fibras, e para o cálculo das propriedades mecânicas, as fibras de *miriti* são consideradas como sendo de seção circular, e com diâmetro médio de 0,35 mm, conforme figura 5.2.

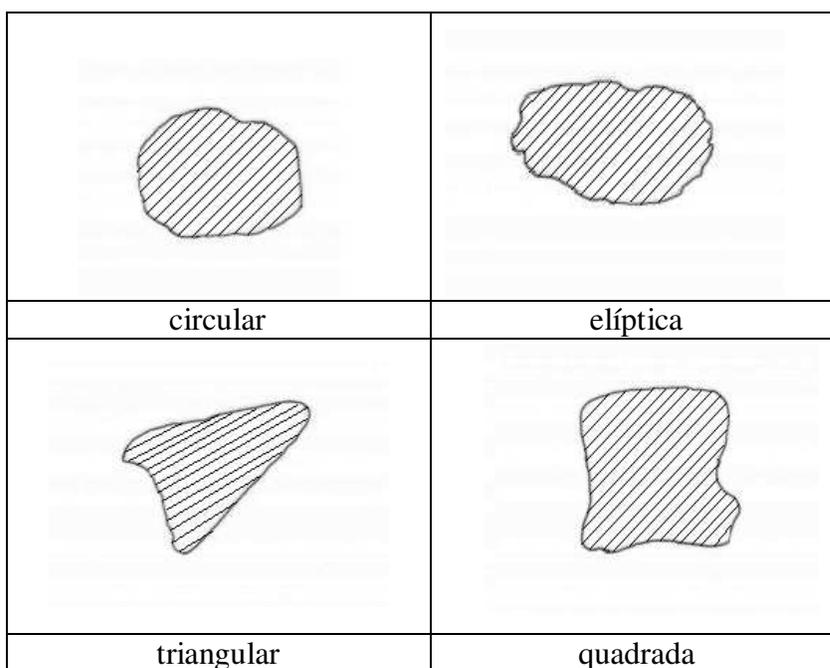


Figura 5.5 – Variabilidade na morfologia da seção transversal da fibra de *miriti*.

## 5.2 Efeito do tratamento alcalino

Segundo Sgriccia et al. (2008), as fibras vegetais são tratadas com solução alcalina para remover a lignina, pectina, substâncias cerosas, graxas e óleos naturais existentes na superfície das paredes celulares. Nas micrografias da figura 5.6 observa-se claramente a mudança na morfologia da superfície da fibra após o tratamento alcalino. Na imagem da fibra antes do tratamento encontram-se muitas partículas soltas na superfície da fibra, as quais podem tornar difícil a adesão com a matriz polimérica, influenciando de modo negativo nas propriedades

mecânicas do compósito (ONAL et al., 2009). Na imagem da fibra após o tratamento a mesma se encontra livre das partículas soltas podendo oferecer mais acessibilidade à matriz de resina poliéster.

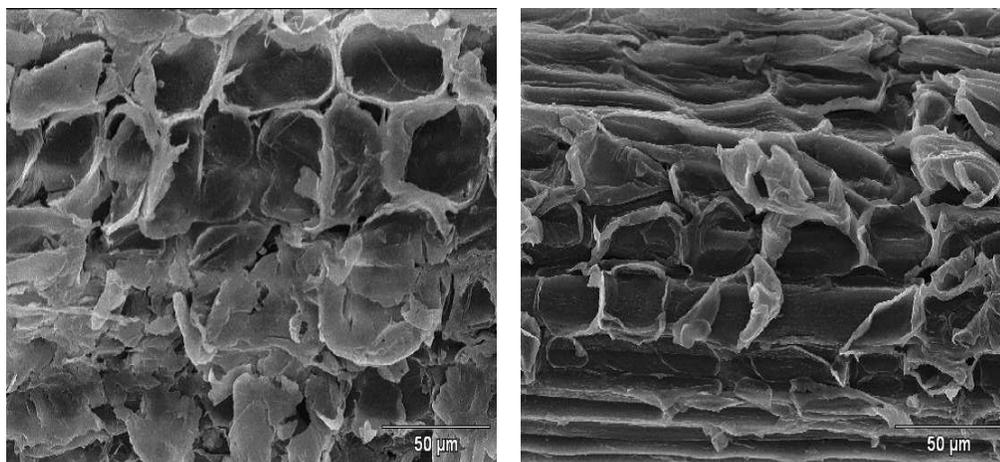


Figura 5.6 – Superfície da fibra antes do tratamento alcalino (a), e fibra após o tratamento alcalino (b).

O efeito do tratamento alcalino na superfície das fibras de *miriti*, também pode ser observado nos espectros de FTIR mostrados nas figuras 5.7 e 5.8, obtidos para fibras tratadas e não tratadas. Na figura 5.7, observam-se bandas características de mudança na superfície das fibras tratadas com solução alcalina, em torno dos picos 1967 e 1945  $\text{cm}^{-1}$  (MATUANA et al., 2001; MWAIKAMBO e ANSELL 2002). Na figura 5.8, os espectros apresentam decréscimo característico dos compostos orgânicos, constituintes de ceras e graxas presentes na superfície das fibras, em torno do pico 559  $\text{cm}^{-1}$ , confirmando a modificação devido ao tratamento alcalino (OH et al., 2005).

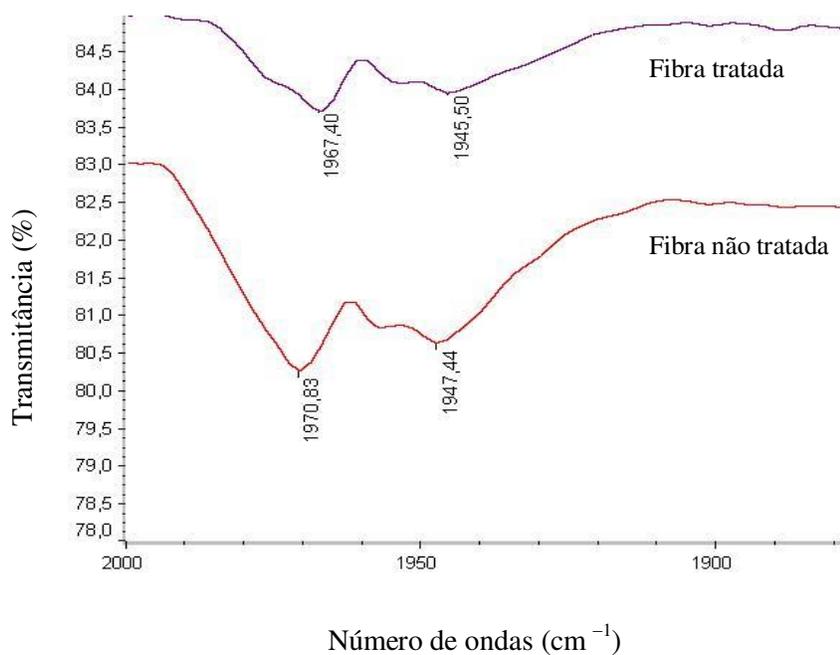


Figura 5.7 – Espectros obtidos para fibras tratadas e não-tratadas, faixa de 2000 a 1900 cm<sup>-1</sup>.

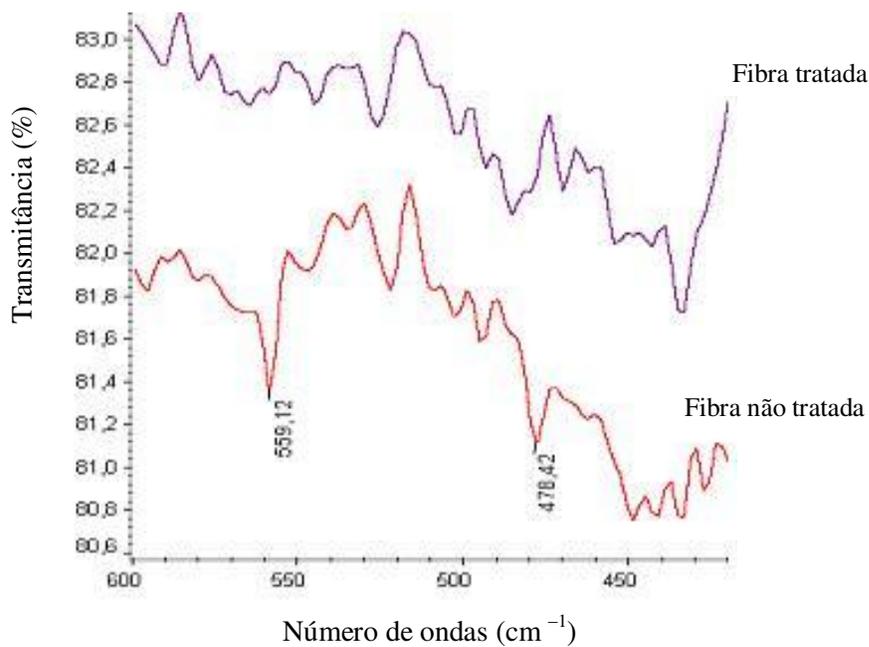


Figura 5.8 – Espectros obtidos para fibras tratadas e não-tratadas, faixa de 600 a 450 cm<sup>-1</sup>.

### 5.3 Caracterização mecânica da fibra

O estudo das propriedades mecânicas da fibra de *miriti* foi feito considerando o diâmetro médio da fibra de 0,35 mm. O comportamento mecânico de tração da fibra de *miriti* com e sem tratamento, é apresentado nas figuras 5.9 e 5.12, por meio das curvas tensão x deformação obtidas no ensaio de tração. Na figura 5.9, onde são mostradas as curvas tensão x deformação de fibras tratadas e não tratadas, observa-se a influência do tratamento alcalino no comportamento geral sob tração da fibra. A retirada de parte da hemicelulose e lignina da superfície das fibras, devido ao tratamento alcalino, favoreceu o desfibramento das fibras (separação das fibrilas), processo que pode ter atuado na absorção de energia durante o ensaio, levando as fibras tratadas a resistirem mais a esforços do que as fibras não tratadas. Esse desfibramento pode ser melhor visualizado no gráfico da figura 5.10, e está representado pelos patamares existentes na curva tensão x deformação da figura, indicados pelas elipses.

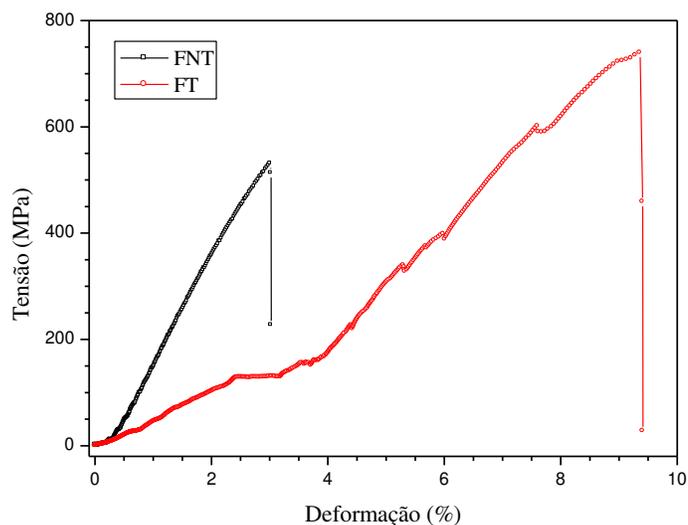


Figura 5.9 – Curvas tensão x deformação para fibras tratadas (FT) e não-tratadas (FNT).

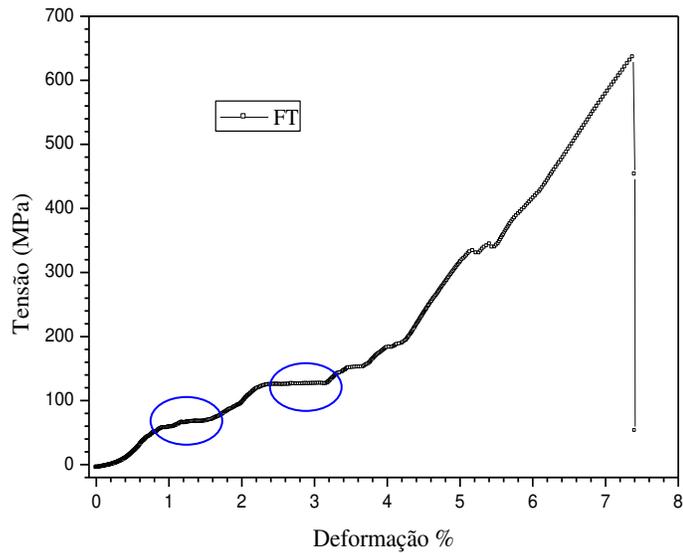


Figura 5.10 – Patamares na curva tensão x deformação para fibras tratadas (FT).

Os valores médios das propriedades mecânicas da fibra de *miriti* com e sem tratamento são apresentadas na tabela 5.2., assim como os respectivos coeficientes de variação (CV). Observa-se uma diminuição do módulo elástico e aumento da deformação de ruptura da fibra tratada em relação à fibra não tratada, podendo-se deduzir que o tratamento alcalino promoveu a diminuição da rigidez da fibra. Altos valores do CV foram obtidos para as propriedades das fibras tratadas, caracterizando uma distribuição bastante heterogênea para os valores de resistência à tração na ruptura, e para o módulo elástico. Tal característica pode ter sido ocasionada devido ao tratamento alcalino feito na superfície da fibra e que favoreceu o desfibramento da mesma. Convém lembrar também, que a seção transversal da fibra é bastante irregular, podendo gerar vários perfis de desfibramento, acumulando a variabilidade apresentada pelas medidas. A influência do diâmetro médio da fibra não tratada nas propriedades mecânicas é apresentada nas figuras 5.11 e 5.12, onde se pode verificar a clara tendência do aumento da resistência à tração e módulo elástico com a diminuição do diâmetro médio da fibra.

Tabela 5.2 – Propriedades mecânicas da fibra de *miriti*.

PROPRIEDADE	Resistência à Tração na Ruptura (MPa)	Módulo Elástico (GPa)	Resistência Específica (MPa/(kg/m <sup>3</sup> ))	Módulo Específico (GPa/(kg/m <sup>3</sup> ))	Deformação de Ruptura (%)
Fibra não-tratada	492,74±102,29 (CV 21%)	24,87±5,37 (CV 21%)	55,61	2,80	2,60
Fibra tratada	768,69±301,76 (CV 39%)	12,36±5,70 (CV 46%)	86,76	1,62	9,30

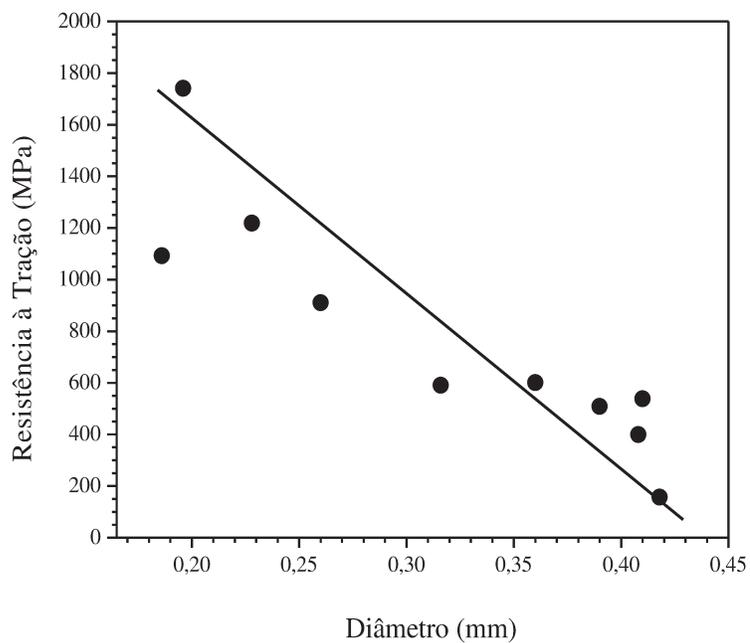


Figura 5.11 – Resistência à tração em função do diâmetro médio da fibra não tratada.

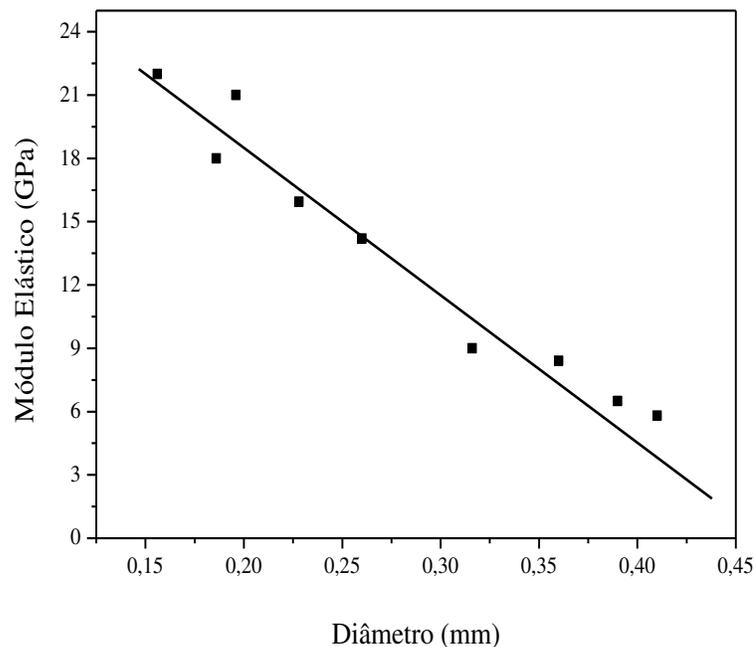


Figura 5.12 – Módulo elástico em função do diâmetro médio da fibra não tratada.

As características mais importantes de uma fibra vegetal para que a mesma possa atuar como reforço em compósitos poliméricos, são a resistência e módulo sob carregamento de tração, assim como os valores específicos respectivos, determinados considerando a densidade do material. Os valores obtidos para as fibras de *miriti* não tratadas – resistência à tração de 493 MPa e módulo de 25 GPa, estão próximos dos valores encontrados para as fibras de juta - 393 a 773 MPa de resistência à tração, e módulo elástico de 26,5 GPa. São também comparáveis aos valores encontrados para as fibras de linho – 345 a 1035 MPa de resistência à tração e 27,6 a 45 GPa de módulo elástico (MUELLER e KROBJILOWSKI, 2003).

Na tabela 5.3 são apresentados alguns valores de propriedades mecânicas de algumas fibras de caule ou talo, para efeito de comparação com a fibra de *miriti*, no qual as fibras de linho e juta são as mais utilizadas, devido provavelmente à sua disponibilidade no mercado.

Tabela 5.3 – Propriedades mecânicas de algumas fibras vegetais e da fibra de *miriti*.

<b>Fibra</b>	<b>Densidade Aparente (g /cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Resistência à Tração na Ruptura (MPa)</b>	<b>Módulo Elástico (GPa)</b>
Miriti (fibra não tratada) (neste trabalho)	0,886	492,74 ± 102,29 (CV 21%)	24,87 ± 5,37 (CV 21%)
Miriti (fibra tratada) (neste trabalho)	0,886	768,69 ± 301,76 (CV 39%)	12,36 ± 5,70 (CV 46%)
Linho (CHARLET, et al., 2007)	1,5	1454,00 ± 835,00 (CV 57%)	68,20 ± 35,80 (CV 52,5%)
Juta (RODRIGUEZ, et al., 2005)	1,3	500,00	23,00
Bananeira (PRASAD et al., 2009)	–	62,40	2,00

A fibra de *miriti* apresentou densidade aparente inferior à densidade da água – 0,886g/cm<sup>3</sup>, o que resultou em interessantes valores específicos de resistência e módulo sob tração, como mostrado na tabela 5.2. A microestrutura das fibras (figura 5.4), pode ter influenciado favoravelmente nas propriedades mecânicas da fibra, embora não tenham sido feitos estudos sobre o ângulo da microfibrila, e composição química da fibra (BURGET, 2006).

#### 5.4 Caracterização mecânica dos compósitos

A figura 5.13.(a). apresenta imagens das placas de compósitos unidirecional (UD), e bidirecional (2D), com dimensões de 12 cm x 12 cm. Apesar do uso do suporte para alinhar as fibras, as mesmas não ficaram completamente alinhadas antes da moldagem, sendo que, durante o processo de conformação as fibras ficaram ainda mais desalinhadas dentro das lâminas. Na figura 5.13 é possível visualizar nas imagens o desalinhamento das fibras dentro das placas, resultado da técnica artesanal de conformação dos compósitos. Esse desalinhamento muda a microestrutura do compósito e influencia nas propriedades mecânicas (HARPER et al., 2009).



Figura 5.13 – Placa de compósito unidirecional (a) e (b), e placa de compósito bi-direcional (c).

#### 5.4.1 Comportamento mecânico sob tração

##### 5.4.1.1. *Compósitos Unidirecionais (UD)*

Os valores médios e o desvio padrão das propriedades mecânicas dos compósitos UD ensaiados sob tração, os respectivos coeficientes de variação (CV), assim como os valores específicos das propriedades, a densidade experimental e teórica, são apresentados na tabela 5.4, e se comparam os valores obtidos pelos compósitos e pela placa de resina sem adição de fibra. Tais valores indicaram aumento da resistência e módulo sob carregamento de tração proporcional à adição de fibras, principalmente para os compósitos com 20 e 30% em fração de volume de fibras. O comportamento sob carregamento de tração das fibras tratadas, resina e compósitos, é

mostrado nas figuras 5.14 e 5.15, por meio das curvas tensão x deformação, e indica que os compósitos apresentaram comportamento intermediário entre a resina e a fibra, fato que sugere existir interação entre a matriz e o reforço. A respeito dos valores de densidade aparente dos compósitos obtidos experimentalmente e por meio da equação da micromecânica, observa-se uma tendência de diminuição dos valores com o aumento do teor de fibras no compósito. Tal fato pode ser atribuído à adição do reforço de baixa densidade á matriz polimérica, o que também favoreceu os valores das propriedades específicas calculadas experimentalmente para os compósitos.

Tabela 5.4 – Propriedades mecânicas em tração dos compósitos UD e placa pura (UP)

<b>PROPRIEDADE</b>	<b>UP</b>	<b>UD10</b>	<b>UD20</b>	<b>UD30</b>
Resistência à Tração (MPa)	26,61 ± 2,96 (CV 11%)	40,83 ± 7,60 (CV 18%)	74,23 ± 4,98 (CV 6%)	96,64 ± 17,71 (CV 18%)
Módulo Elástico (GPa)	1,90 ± 0,14 (CV 7%)	2,73 ± 0,12 (CV 4%)	3,50 ± 0,18 (CV= 5%)	5,80 ± 0,78 (CV 13%)
Densidade Exp. (g/cm <sup>3</sup> )	1,3	1,317	0,944	0,866
Resistência Específica	20,47	31,00	70,07	111,59
Módulo Específico	1,46	2,07	3,70	6,70
Densidade Teórica (g/cm <sup>3</sup> )	–	1,25	1,21	1,17

**UP** – Resina poliéster insaturado

**UD10** - Compósito com fração de volume de fibra de 10%

**UD20** - Compósito com fração de volume de fibra de 20%

**UD30** - Compósito com fração de volume de fibra de 30%

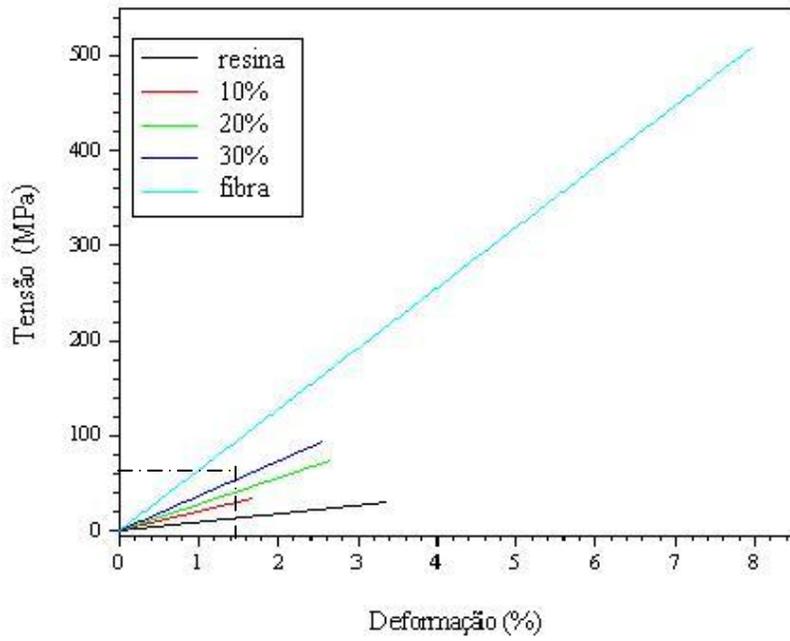


Figura 5.14 – Curvas tensão x deformação da fibra tratada, resina e compósitos.

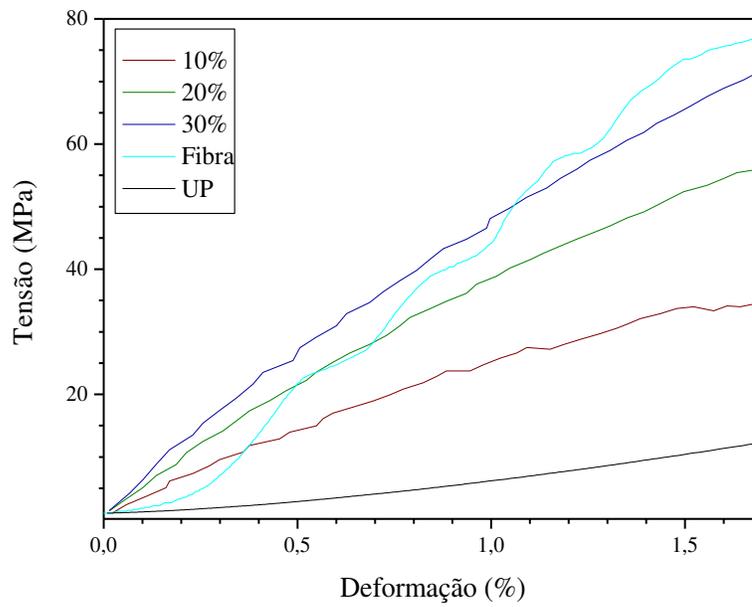


Figura 5.15 – Curvas tensão x deformação da fibra tratada, resina e compósitos, em detalhe.

Como observado nas figuras 5.14 e 5.15, o comportamento mecânico da matriz muda gradativamente com a adição de fibras, tornando-se mais fraco e mais resistente. O compósito UD20 apresentou um incremento na resistência à tração de 87% em relação ao compósito com apenas 10% em fração de volume de fibras, o UD10. O compósito UD30 apresentou um incremento na resistência à tração de 30% em relação ao compósito UD20. Para o módulo elástico, o compósito UD20 apresentou um incremento de 28% em relação ao módulo do compósito UD10. O compósito UD30 apresentou um incremento no módulo elástico de 65% em relação ao compósito UD20. A fibra tratada, que mostrou grande capacidade de suportar esforços, parece ter transferido parte dessa propriedade à resina polimérica, indicando que houve sinergia entre os componentes do compósito. A influência da adição de fibras à resina polimérica na resistência à tração e no módulo elástico dos compósitos pode ser observada nas figuras 5.16 e 5.17, respectivamente. Para a resistência à tração dos compósitos, verificou-se que com baixo teor de fibras, 10% em fração de volume, não há efeito de reforço no polímero. No entanto, observou-se que a partir de aproximadamente 15% de teor de fibras, o efeito da adição de fibras torna-se evidente.

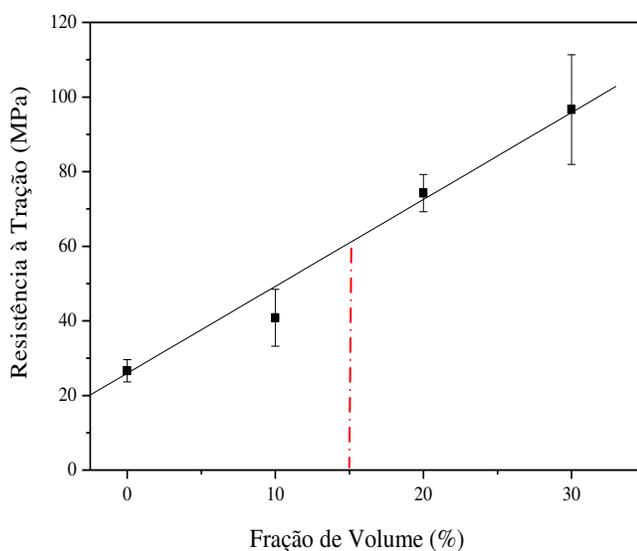


Figura 5.16 – Influência da fração em volume de fibras na resistência à tração dos compósitos UD.

Isso acontece porque à medida que o teor de fibras aumenta, as tensões passam a ser mais uniformemente distribuídas e a resistência do compósito aumenta. Na figura 5.17, observa-se o aumento do módulo elástico em tração dos compósitos com o aumento da fração de volume, e a dispersão dos valores obtidos pelo compósito com 30% em fração de volume de fibras, que pode ter sido ocasionado pelo aumento da quantidade de fibras desalinhadas no compósito. Observa-se também que a adição de fibras foi mais favorável ao módulo elástico do que na resistência à tração, ambos aumentando continuamente com a adição de fibras.

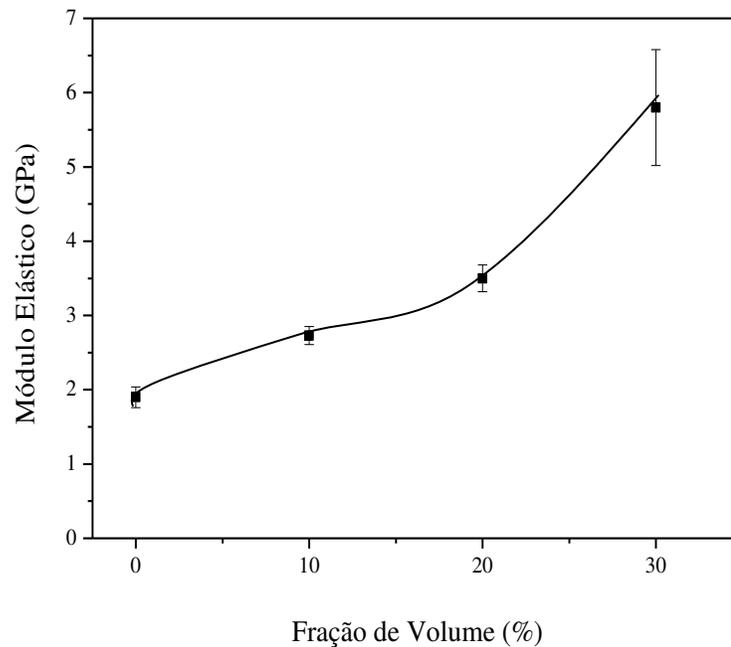


Figura 5.17 – Influência da fração em volume de fibras no módulo elástico em tração dos compósitos UD.

#### 5.4.1.2. Compósitos bidirecionais (2D)

Os valores médios das propriedades mecânicas sob carregamento de tração dos compósitos 2D, e da amostra de referência, assim como os respectivos coeficientes de variação (CV), são

apresentados na tabela 5.5. A influência da fração em volume de fibras nos compósitos bi-direcionais é ilustrada nas figuras 5.18 e 5.19.

Tabela 5.5 – Propriedades mecânicas em tração dos compósitos 2D e placa pura (UP).

PROPRIEDADE	UP	2D10	2D20	2D30
Resistência à Tração (MPa)	26,61 ± 2,96 (CV= 11%)	17,63 ± 4,19 (CV= 24%)	24,23 ± 1,82 (CV= 7,5%)	53,50 ± 8,29 (CV= 15%)
Módulo Elástico (GPa)	1,90 ± 0,14 (CV= 7%)	0,48 ± 0,096 (CV= 20%)	0,86 ± 0,035 (CV= 4%)	2,01 ± 0,16 (CV= 8%)

**UP** – Resina poliéster insaturado

**2D10** - Compósito com fração de volume de fibra de 10%

**2D20** - Compósito com fração de volume de fibra de 20%

**2D30** - Compósito com fração de volume de fibra de 30%

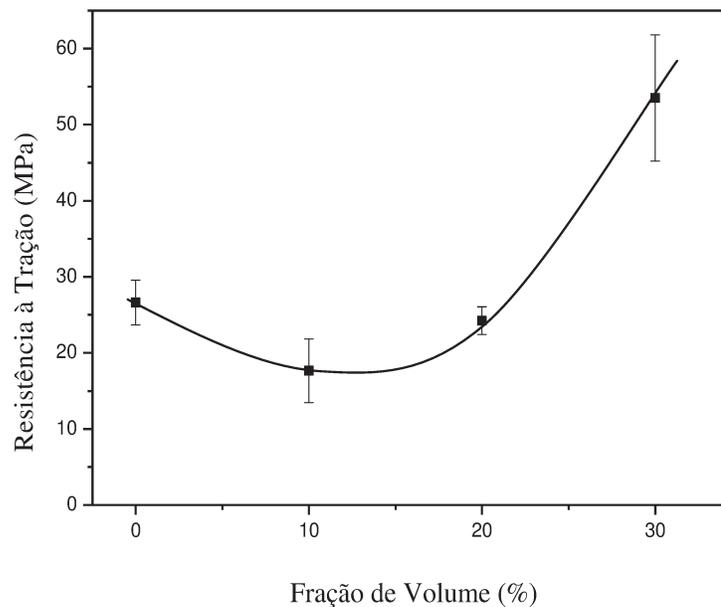


Figura 5.18 – Influência da fração em volume de fibras na resistência à tração dos compósitos 2D.

Na figura 5.18 observa-se que a resistência dos compósitos tende a decrescer até aproximadamente a fração de volume de fibras de 15%, depois aumenta gradativamente com a fração em volume de fibras. Portanto, até a fração de volume de fibras de 20%, as fibras colocadas no compósito na direção transversal, atuam mais como defeitos do que como reforço, fazendo com que o compósito tenha propriedades mecânicas inferiores às propriedades da resina polimérica. No entanto, após a fração de aproximadamente 25% de fibras, a resistência à tração dos compósitos aumenta, em torno de 100% em relação à amostra de referência. Na figura 5.19, tem-se o comportamento do módulo elástico dos compósitos 2D com a adição da fração em volume de fibras de *miriti*, onde se pode perceber que a adição de fibras não foi favorável à rigidez dos compósitos bi-direcionais, provavelmente devido, mais uma vez, à adição de fibras na direção transversal ao carregamento, e, também devido ao desalinhamento das fibras. Os módulos dos compósitos 2D10 e 2D20 foram inferiores ao módulo da resina polimérica, a amostra de referência, sendo que o compósito 2D30, com 30% em fração de volume de fibras de *miriti*, apresentou resultado semelhante ao da resina.

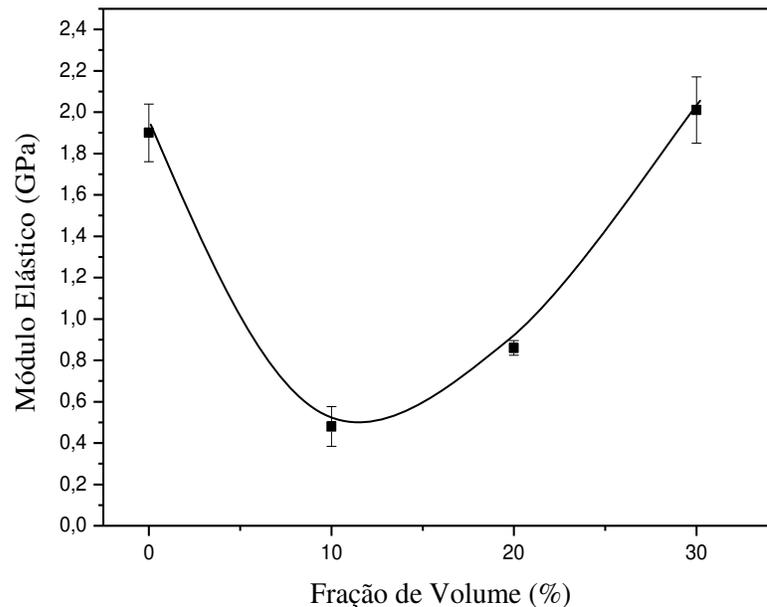


Figura 5.19 – Influência da fração em volume de fibra no módulo elástico dos compósitos 2D.

## 5.4.2 Comportamento mecânico sob flexão

### 5.4.2.1. Compósitos Unidirecionais (UD)

Os valores médios das propriedades mecânicas sob carregamento de flexão dos compósitos UD, assim como os respectivos coeficientes de variação (CV), são apresentados na tabela 5.6, e mostram os valores obtidos pelos compósitos e pela amostra de referência. Para os resultados de resistência à flexão, os compósitos mostram um incremento significativo e proporcional à adição de fibras, com o melhor desempenho obtido pelo compósito UD30.

Tabela 5.6 – Propriedades mecânicas em flexão dos compósitos UD e placa pura (UP).

<b>PROPRIEDADE</b>	<b>UP</b>	<b>UD10</b>	<b>UD20</b>	<b>UD30</b>
Resistência à Flexão (MPa)	49,29 ± 17,67 (CV= 36%)	51,30 ± 5,18 (CV= 10%)	126,56 ± 30,00 (CV= 24%)	137,39 ± 35,60 (CV= 26%)
Módulo Elástico (GPa)	2,95 ± 0,36 (CV= 12%)	4,12 ± 0,41 (CV= 9%)	5,23 ± 0,46 (CV= 9%)	6,00 ± 0,38 (CV= 6%)

**UP** – Resina poliéster insaturado

**UD10** - Compósito com fração de volume de fibra de 10%

**UD20** - Compósito com fração de volume de fibra de 20%

**UD30** - Compósito com fração de volume de fibra de 30%

Para o compósito UD10, a adição de apenas 10% em fração de volume de fibras parece não haver alterado as propriedades em flexão da resina de poliéster insaturado. O mesmo não aconteceu para o compósito UD20 que apresentou um incremento na resistência à flexão de aproximadamente 150% em relação à amostra de referência e ao compósito UD10, resultado semelhante ao obtido pelo compósito UD30, com adição de 30% em fração de volume de fibras

de *miriti*. Para o módulo elástico em flexão o incremento nos valores médios foi proporcional à adição de fibras, com todos os compósitos apresentando módulo significativamente superior que a da amostra de referência, indicando que a inserção de fibras de *miriti* tratadas à resina de poliéster foi favorável à rigidez dos compósitos unidirecionais. A influência da adição da fração de volume de fibras na resistência à flexão e no módulo elástico em flexão dos compósitos é apresentada nas figuras 5.20 e 5.21, respectivamente, e mostram comportamentos diferentes, indicando que existe um valor crítico de volume de fibras, necessário para dar uma resposta favorável à resistência à flexão dos compósitos. Conforme mostrado na figura 5.20, este valor crítico de fração de volume de fibras fica em torno de 15%. Novamente, a grande dispersão de valores apresentados pelos compósitos UD20 e UD30, deva-se ao desalinhamento das fibras de *miriti* nesses dois compósitos, além da variação característica das propriedades dos materiais vegetais (SILVA et al., 2008).

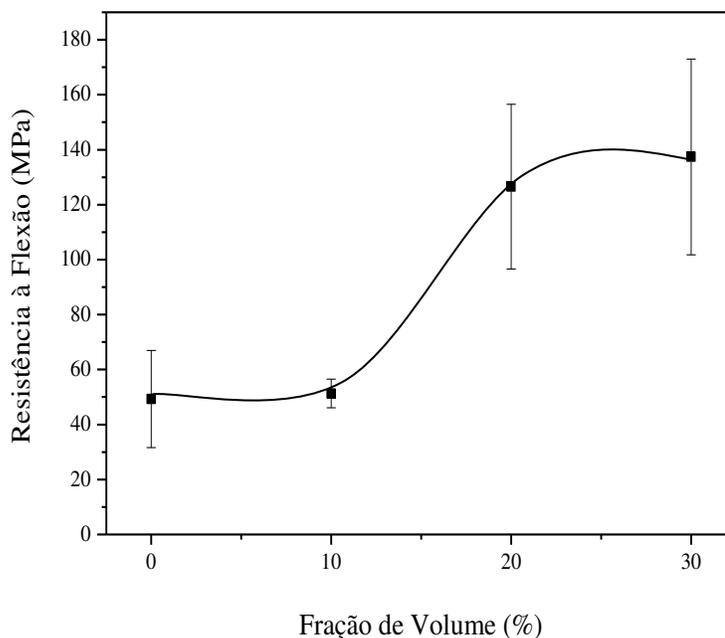


Figura 5.20 – Influência da adição de fibras na resistência à flexão dos compósitos UD.

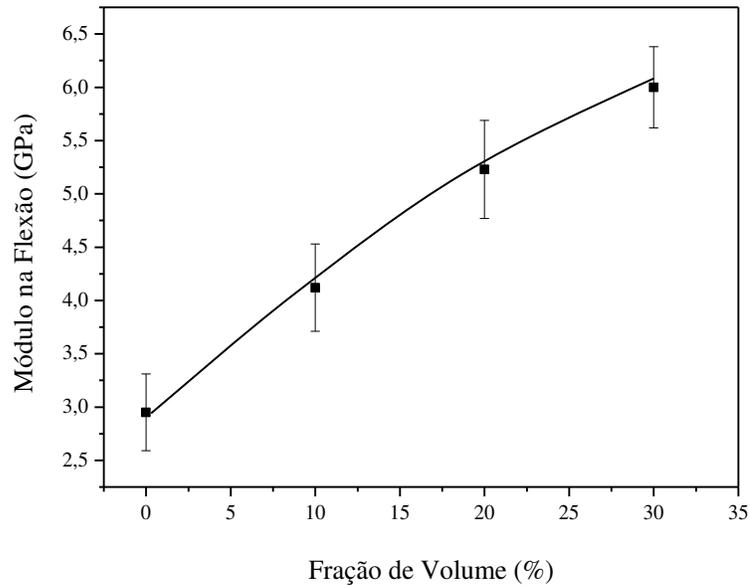


Figura 5.21 – Influência da adição de fibras no módulo elástico em flexão dos compósitos UD.

#### 5.4.2.2. Compósitos bidirecionais (2D)

Os valores médios das propriedades mecânicas sob carregamento de flexão dos compósitos 2D são apresentados na tabela 5.7, e mostram os valores obtidos pelos compósitos e pela amostra de referência. Para os resultados de resistência à flexão, o compósito 2D10 apresentou valor semelhante à amostra de referência. O compósito 2D20 apresentou um incremento na resistência à flexão bem mais significativo em relação à amostra de referência, de aproximadamente 52%. Os resultados obtidos para o compósito 2D30 indicam um decréscimo na resistência à flexão, em relação ao compósito 2D20. Para o módulo em flexão, os compósitos com adição de fração de volume de 10 e 20%, tiveram um incremento de aproximadamente 47% em relação à placa de resina, e o compósito com adição de 30% em fração de volume de fibras apresentaram um incremento de aproximadamente 100%. A influência da adição da fração em volume de fibras na resistência à flexão e no módulo

elástico em flexão dos compósitos é apresentada nas figuras 5.22 e 5.23, respectivamente, e mostram comportamentos diferentes, indicando que existe um valor crítico de volume de fibras, necessário para dar uma resposta favorável à resistência à flexão dos compósitos. No entanto, se considerar-se a dispersão observada para os valores de resistência à flexão, pode-se admitir que os resultados obtidos pelos compósitos bi-direcionais, com a adição de fibras de *miriti*, não apresentaram incremento significativo na resistência à flexão dos compósitos em relação à resina poliéster (PRASAD et al., 2009).

Tabela 5.7 – Propriedades mecânicas em flexão dos compósitos 2D e placa pura (UP).

<b>PROPRIEDADE</b>	<b>UP</b>	<b>2D10</b>	<b>2D20</b>	<b>2D30</b>
Resistência à Flexão (MPa)	49,29 ± 17,67 (CV= 36%)	58,59 ± 7,43 (CV= 13%)	76,58 ± 18,75 (CV= 24%)	70,30 ± 12,32 (CV= 17%)
Módulo Elástico (GPa)	2,95 ± 0,36 (CV= 12%)	4,36 ± 0,21 (CV= 5%)	4,46 ± 0,79 (CV= 17%)	6,46 ± 1,06 (CV= 16%)

**UP** – resina poliéster insaturado

**2D10** - compósito com fração de volume de fibra de 10%

**2D20** - compósito com fração de volume de fibra de 20%

**2D30** - compósito com fração de volume de fibra de 30%

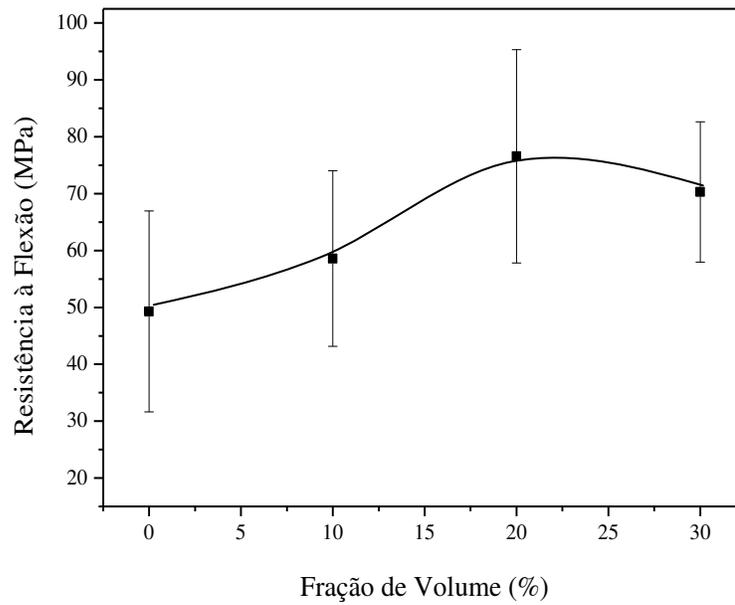


Figura 5.22 – Influência da adição de fibras na resistência à flexão dos compósitos 2D.

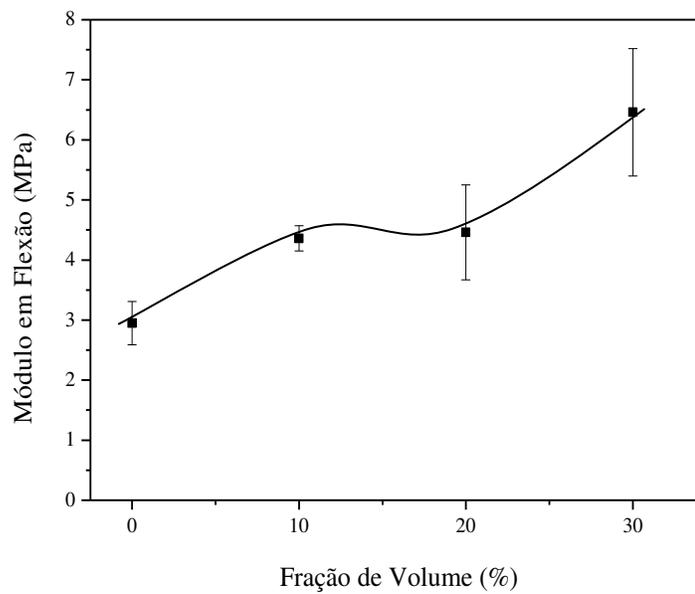


Figura 5.23 – Influência da adição de fibras no módulo em flexão dos compósitos 2D.

Para o módulo elástico em flexão, a adição da fração em volume de fibras de *miriti* parece ter sido favorável, conforme mostrado na figura 5.23, onde o compósito 2D30 apresentou um valor aproximadamente 100% superior ao valor obtido pela amostra de referência. Nesse caso, também pode-se observar a existência de um valor crítico de aproximadamente 25% em fração de volume de fibras de *miriti*, a partir do qual o efeito de reforço das fibras é evidente, aumentando a rigidez do compósito.

Na tabela 5.8 os valores das propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com fibras de *miriti* são relacionados com resultados de outros estudos sobre compósitos encontrados na literatura.

Tabela 5.8 - Propriedades mecânicas do compósito elaborado neste trabalho e outros compósitos reforçados com fibras vegetais.

<b>Compósito</b>	<b>Resistência à Tração (MPa)</b>	<b>Módulo de Elasticidade (GPa)</b>	<b>Alongamento Total (%)</b>	<b>Resistência à Flexão (MPa)</b>	<b>Módulo em Flexão (GPa)</b>
<b>Miriti/poliéster UD (neste trabalho)</b>	<b>40,83 - 96,64</b>	<b>2,73 - 5,80</b>	<b>1,85 – 3,00</b>	<b>51,30-137,39</b>	<b>4,12-6,46</b>
<b>Miriti/poliéster 2D (neste trabalho)</b>	<b>17,63 – 53,50</b>	<b>0,48 – 2,01</b>	–	<b>58,59 – 70,30</b>	<b>4,36 – 6,46</b>
Coco/poliéster <b>(fibras curtas)</b> (Monteiro et al., 2005)	–	–	–	9-31,2	–
Curauá/poliéster <b>(manta de fibra)</b> (Silva et al., 2008)	–	–	–	85 - 95	40 - 55
Sisal/poliéster <b>(fibras curtas)</b> (Kuruvila et al.,1999)	26,68 – 115,82	0,91 – 3,07	1,02 – 7,80	–	–
Piaçava/polietileno <b>(fibras curtas)</b> (Bonelli et al., 2005)	15 – 25	0,69 – 0,875	–	19 – 25	0,325 – 0,40
Hemp/epóxi <b>(fibras partículas)</b> (Sgriccia et al., 2008)	–	–	–	–	2,8 - 3,8
Juta/viniliéster <b>(tecido de juta)</b> (Stocchi et al., 2007)	30,0 – 59,0	5,0 – 7,6	–	–	–
Banana/poliéster <b>(fibras longas UD)</b> (Prasad et al., 2009)	29,00 – 44,00	0,80 – 1,025	–	28,00 – 55,00	0,6 - 2,25

## 5.5 Verificação teórica dos resultados experimentais

A aplicação da teoria da micromecânica para predição das propriedades de um compósito com reforço de fibras longas e unidirecionais, é feita através da regra da mistura, conforme descrito no capítulo 3, equação (3.8). Neste trabalho, para efeito de verificação teórica dos resultados experimentais, foram utilizados os resultados obtidos sob carregamento de tração dos compósitos UD, mais precisamente o módulo elástico dos compósitos (CAIN et al., 2002). Na figura 5.24, observa-se a curva com resultados teóricos, em azul, e resultados experimentais, em vermelho.

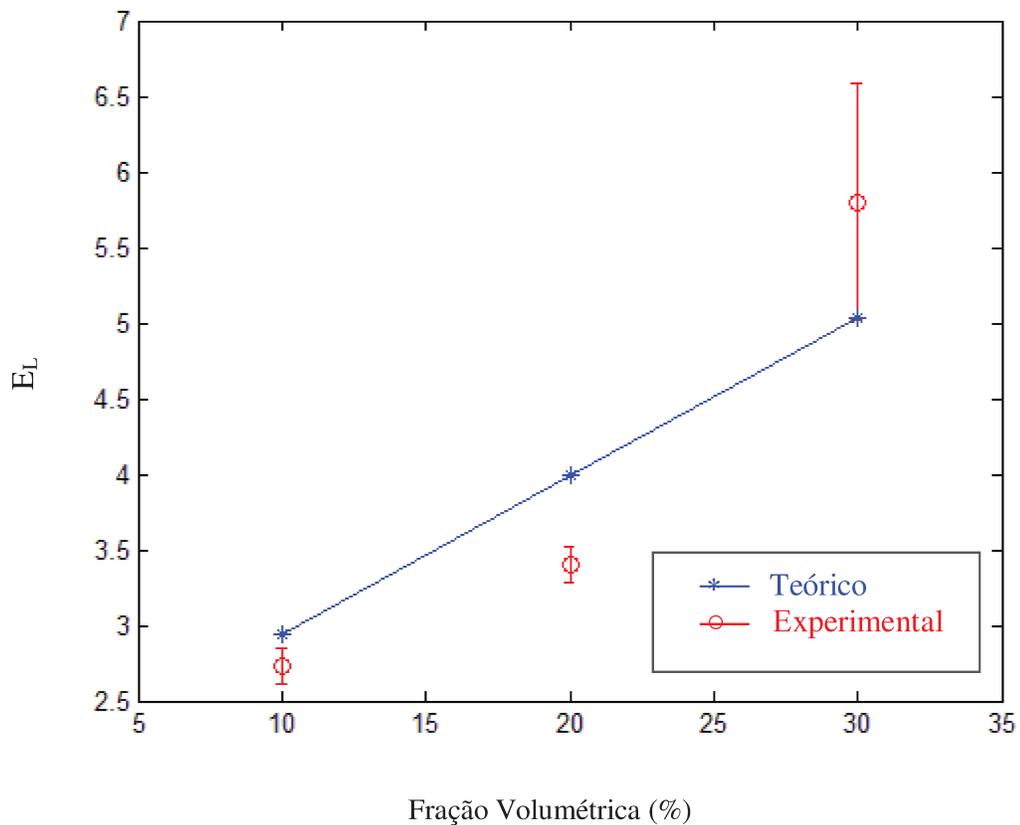


Figura 5.24 – Valores experimentais e teóricos para as propriedades mecânicas em tração dos compósitos UD.

Para a interpretação dos resultados teóricos, assume-se que todas as fibras têm o mesmo diâmetro e estão perfeitamente alinhadas com o eixo longitudinal do compósito unidirecional. Também, que não existem vazios na placa e que as fibras estão perfeitamente aderidas à resina. A consideração de todas essas simplificações torna a predição das propriedades do compósito por meio da teoria micromecânica, um método não exato, principalmente quando um dos materiais do compósito ainda foi pouco estudado, e se trata de um material vegetal, com grande variabilidade nas propriedades. Para os materiais convencionais de reforço, como as fibras de vidro, carbono e kevlar, no entanto, a teoria da micromecânica é bastante utilizada, principalmente na etapa de projeto de materiais compósitos, pois evita que gastos desnecessários de tempo e recursos sejam feitos no laboratório (XUE et al., 2005). Todavia, a aplicação da teoria da micromecânica através da regra da mistura, para os compósitos unidirecionais deste trabalho, fornece um perfil do comportamento mecânico esperado para o material. Esse comportamento é ilustrado na figura 5.24, e sugere a existência de um valor crítico de fração volumétrica de fibras, aproximadamente 25%, a partir do qual o compósito começa a apresentar características de sinergia entre os componentes. Essa provável sinergia, indica que a transferência de esforços da resina para a fibra, foi eficiente, o que ocorre quando há interação entre fibra de reforço e matriz polimérica. A existência dessa interface favorável à transferência de esforços pode ser visualizada nas imagens da morfologia da superfície de fratura, mostradas na figura 5.30.

## **5.6 Comportamento térmico da fibra de *miriti* e compósitos**

A degradação térmica das fibras de *miriti* acontece em dois estágios: o primeiro corresponde à depolimerização da hemicelulose, que acontece numa faixa de temperatura de 220 a 280 °C; o segundo corresponde à degradação da lignina, numa faixa de 280 até aproximadamente 380 °C, conforme mostrado na figura 5.25 (SAHEB e JOG, 1999; D'ALMEIDA et al., 2006). Diferenças sensíveis são observadas entre as curvas das fibras tratadas e fibras não-tratadas, podendo-se evidenciar o baixo teor de umidade da fibra tratada com solução alcalina. Para as curvas da resina e do compósito com 30% em fração de volume de fibras, observa-se que o primeiro estágio de degradação acontece numa faixa de 250 a 400°C,

aproximadamente. Os resíduos provenientes do processo de pirólise dos constituintes do compósito ficaram em torno de 13% de massa.

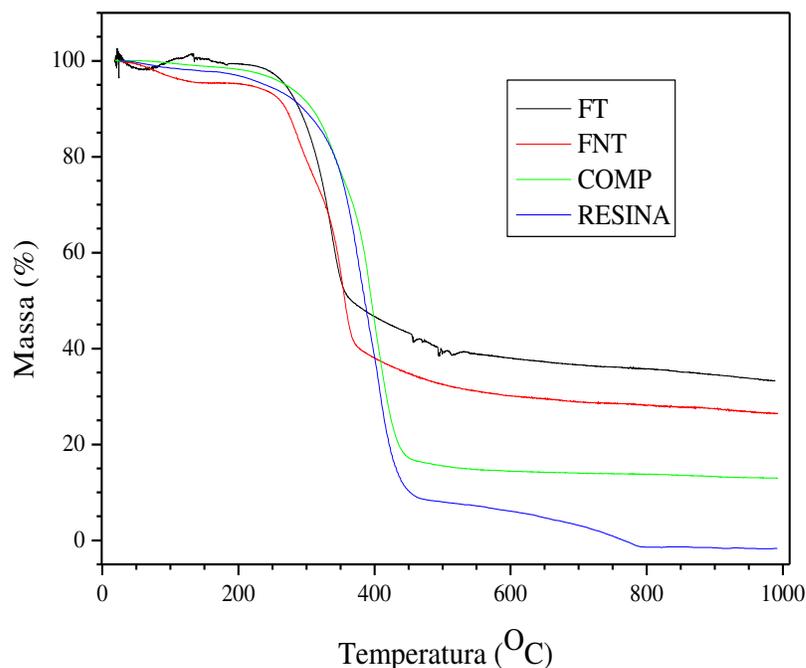


Figura 5.25 – Perfil das curvas de degradação térmica da fibra de *miriti* não tratada (FNT) e tratada (FT), do compósito e da resina poliéster.

## 5.7 Observação fratógráfrica

### 5.7.1 Aspectos macroscópicos da fratura

O comportamento característico de propagação da falha em escala macroscópica, após o ensaio de tração dos compósitos, é mostrado na figura 5.26(a), para os compósitos unidirecionais. A trinca principal que levou à fratura do material ocorreu num ângulo de 45° e avança no corpo-de-prova na direção do carregamento, dando origem a trincas secundárias na matriz, na direção perpendicular ao carregamento. Nesse caso, a região de dano é extensa e o modo de falha

presente é o “ ponte de fibras”, no qual apenas a matriz polimérica falha. Quando compósitos unidirecionais são carregados na direção do reforço, eles tendem a falhar por quebra das fibras de reforço, que pode ser acompanhado por trincas transversais na matriz, e trincas transversais devido aos esforços de cisalhamento.

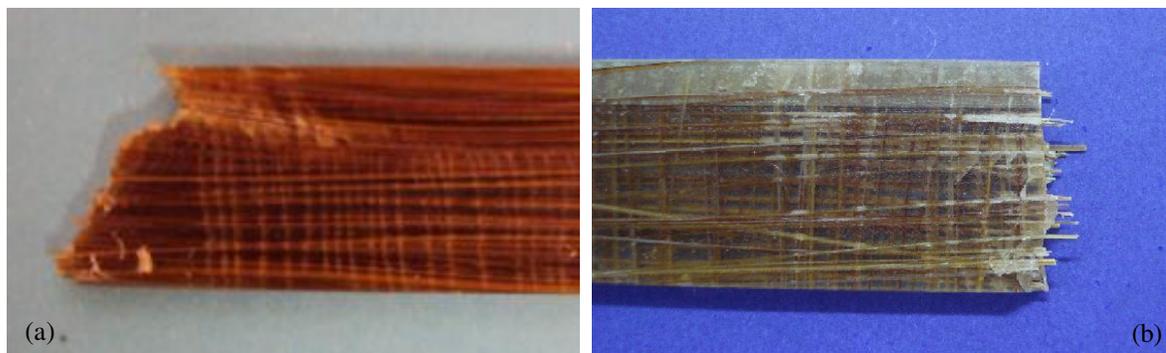


Figura 5.26 – Aspecto macroscópico da fratura na tração para compósitos UD (a) e 2D (b).

Para os compósitos bi-direcionais (2D), o comportamento característico após o ensaio de tração está representado na figura 5.26(b). Nesse caso a resposta mecânica vai ser dada pela matriz e pelas fibras a  $0^\circ$  funcionando como iniciadoras de trinca, levando à fratura do material na mesma direção. A região de dano foi mínima e localizada próximo à região de fratura, significando que o material teve pouca capacidade de absorver energia durante a fratura, provavelmente devido à inserção das fibras na direção transversal nos compósitos 2D (bi-direcionais).

O comportamento característico de propagação da falha em escala macroscópica, após os ensaios de flexão dos compósitos, é mostrado nas figuras 5.27 a 5.29, para os compósitos unidirecionais e bi-direcionais. Quando o corpo-de-prova é submetido à flexão são geradas tensões trassivas e compressivas. A trinca sempre se inicia na região tracionada do corpo-de-prova e se propaga para o lado compressivo. Desta forma, as fibras que efetivamente atuam no reforço do compósito são as que estão localizadas do lado tracionado do corpo-de-prova (SABARIZ et al., 2006). Na figura 5.27 observa-se os perfis típicos de fratura em flexão obtidos para os compósitos unidirecionais (UD) e bi-direcionais (2D), onde percebe-se que a falha devido

a tensões de cisalhamento ocorre aproximadamente no ponto médio da espessura da placa (SABARIZ et al., 2006).

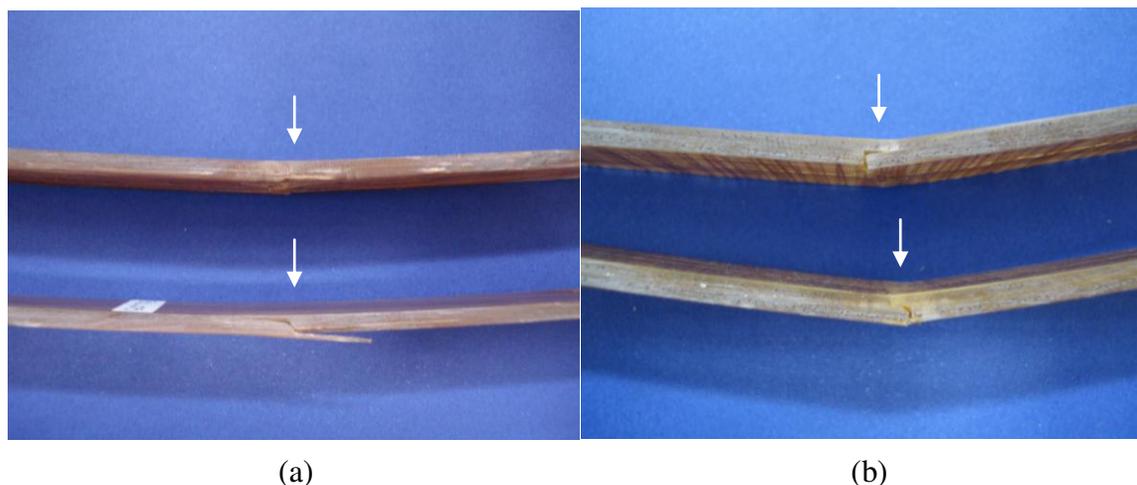


Figura 5.27 – Imagens do perfil de fratura em flexão para compósitos UD (a), e 2D (b), com pontos de indentação indicados pelas setas brancas.

As superfícies dos corpos-de-prova dos compósitos unidirecionais (UD), após o ensaio de flexão são mostradas na figura 5.28. Como previsto na literatura, as trincas no material podem ser observadas na superfície sob tração do corpo-de-prova, com a sombra dessa região de falha sendo observada na superfície sob compressão (SABARIZ et al., 2006). A dimensão da região de dano nos dá uma estimativa de quanta energia foi absorvida pelo material até a tensão de falha, verificando-se que os compósitos UD20 e UD30, apresentaram maior capacidade de absorção de energia que o compósito UD10, com apenas 10% em fração de volume de fibras de *miriti*. As superfícies de fratura dos compósitos bi-direcionais após ensaio de flexão são mostradas na figura 5.29, onde pode-se observar a limitada região de dano nos corpos de prova, confirmando os resultados das figuras 5.20 a 5.23, que mostram as propriedades mecânicas sob flexão dos compósitos unidirecionais (UD), superiores aos resultados dos compósitos bi-direcionais (2D).

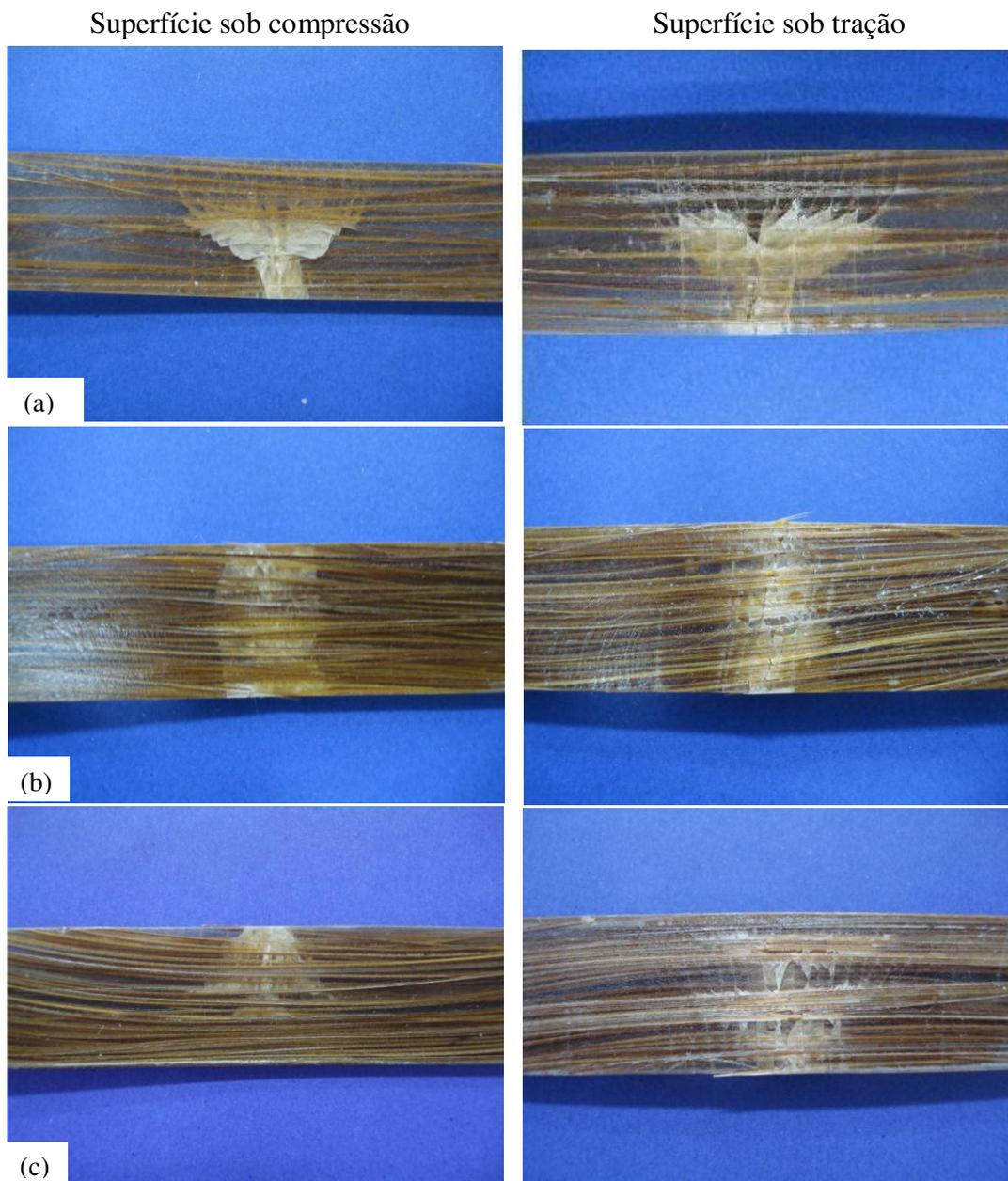


Figura 5.28 – Vistas superior (compressão) e inferior (tração), das superfícies de fratura após ensaio de flexão para compósitos unidirecionais: (a) UD10, (b) UD20, e (c) UD30.

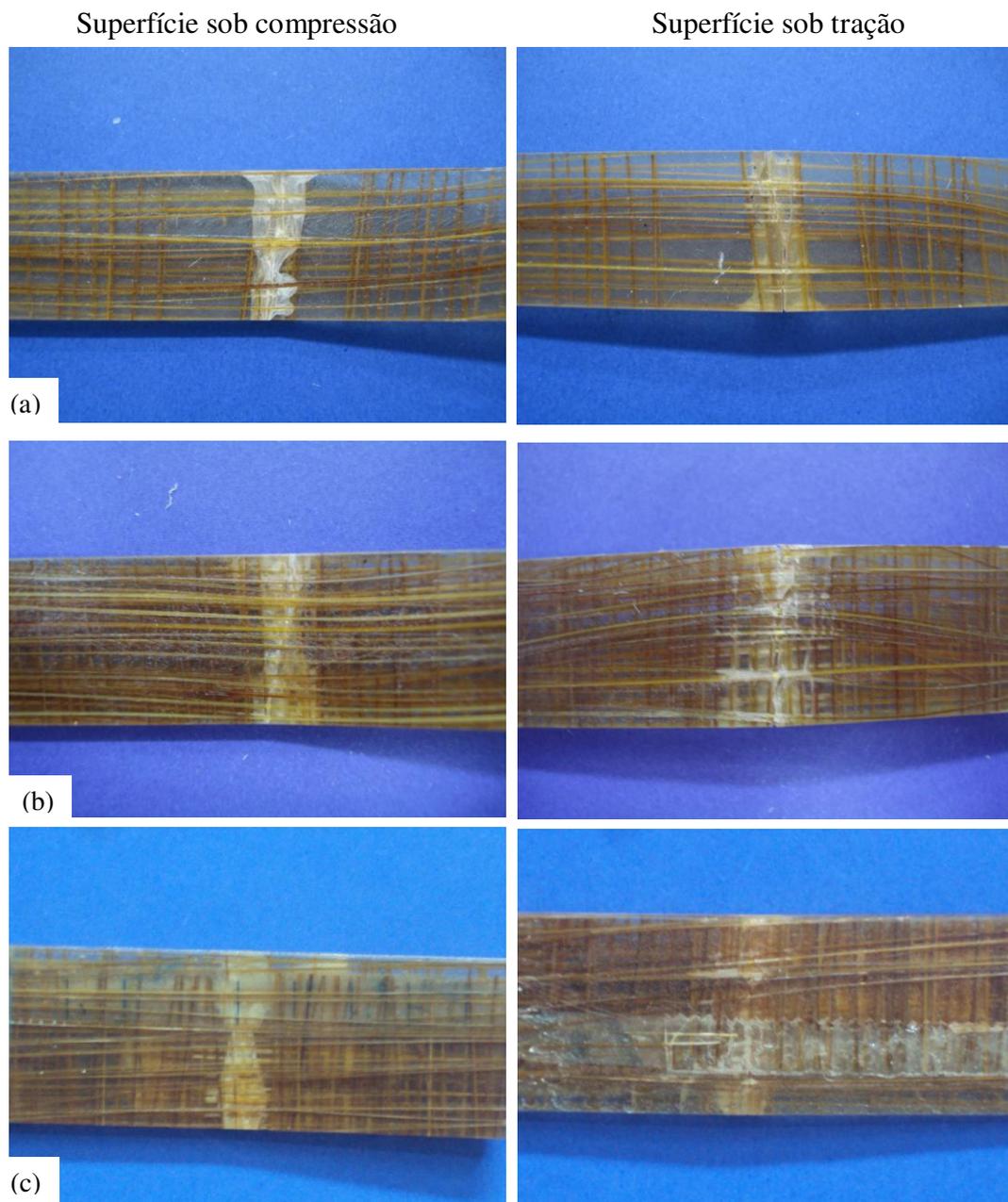


Figura 5.29 – Vistas superior (compressão) e inferior (tração), das superfícies de fratura após ensaio de flexão para compósitos bi-direcionais: (a) 2D10, (b) 2D20, e (c) 2D30.

### 5.7.2 Aspectos microscópicos da fratura

As micrografias da figura 5.30 apresentam a superfície de fratura dos compósitos unidirecionais (UD), rompidos durante o ensaio de tração. Os aspectos microscópicos da fratura fornecem, principalmente, informações a respeito da adesão interfacial fibra-matriz, a qual influencia sobremaneira no comportamento de falha do compósito e nos resultados finais de propriedades mecânicas (SAHEB e JOG, 1999). Uma adesão fraca fibra-matriz pode favorecer o surgimento de alguns tipos de falhas, como por exemplo, o arrancamento de fibras (pull out), que ocorre quando a fibra é sacada da matriz. Uma boa adesão fibra-matriz é resultado da interação entre os dois componentes, o que pode ser favorecido quando as fibras vegetais são submetidas a algum tipo de tratamento. Por meio das micrografias da superfície de fratura, também é possível verificar se muita ou pouca energia foi consumida na fratura, e identificar em que tipos de falhas essa energia foi utilizada (ALVAREZ et al., 2006).

Pela análise das micrografias da figura 5.30, observa-se a existência de vários planos de fratura, apresentando vários modos de falha, como desfibramento da fibra, como mostrado na figura 5.29 (a) e (b) para o compósito com 10% em fração de volume de fibras, indicando que a energia dissipada durante a fratura foi intensa para estes casos. A perda de coesão fibra-matriz é caracterizada pelo espaçamento existente entre a fibra e a matriz polimérica ocorrido durante a solitação mecânica, e pode ser verificada nas imagens da figura 5.30 (b) e (f), para os compósitos com 10 e 30% em fração de volume de fibras, respectivamente (STROHAECKER, 2010). A quebra de fibras, assim como alguma deformação plástica na fibra e na matriz também pode ser observada em todas as micrografias da figura 5.30. Estes aspectos indicam que houve uma boa interação fibra-matriz, o que pode ter acontecido devido ao tratamento alcalino aplicado na superfície das fibras.

Na figura 5.31 são mostradas as micrografias da superfície de fratura dos compósitos bidirecionais (2D), onde se verifica a influência da orientação das fibras nos mecanismos de fratura dos compósitos. Como nas micrografias da figura 5.31, também se verifica a perda de coesão fibra-matriz ocorrida durante a solitação mecânica, assim como a existência de várias trincas na matriz de resina poliéster insaturado. Na figura 5.31 (d) observa-se alguma deformação plástica

na matriz, assim como a natureza triaxial das trincas verificadas nos compósitos bi-direcionais fraturados sob tração.

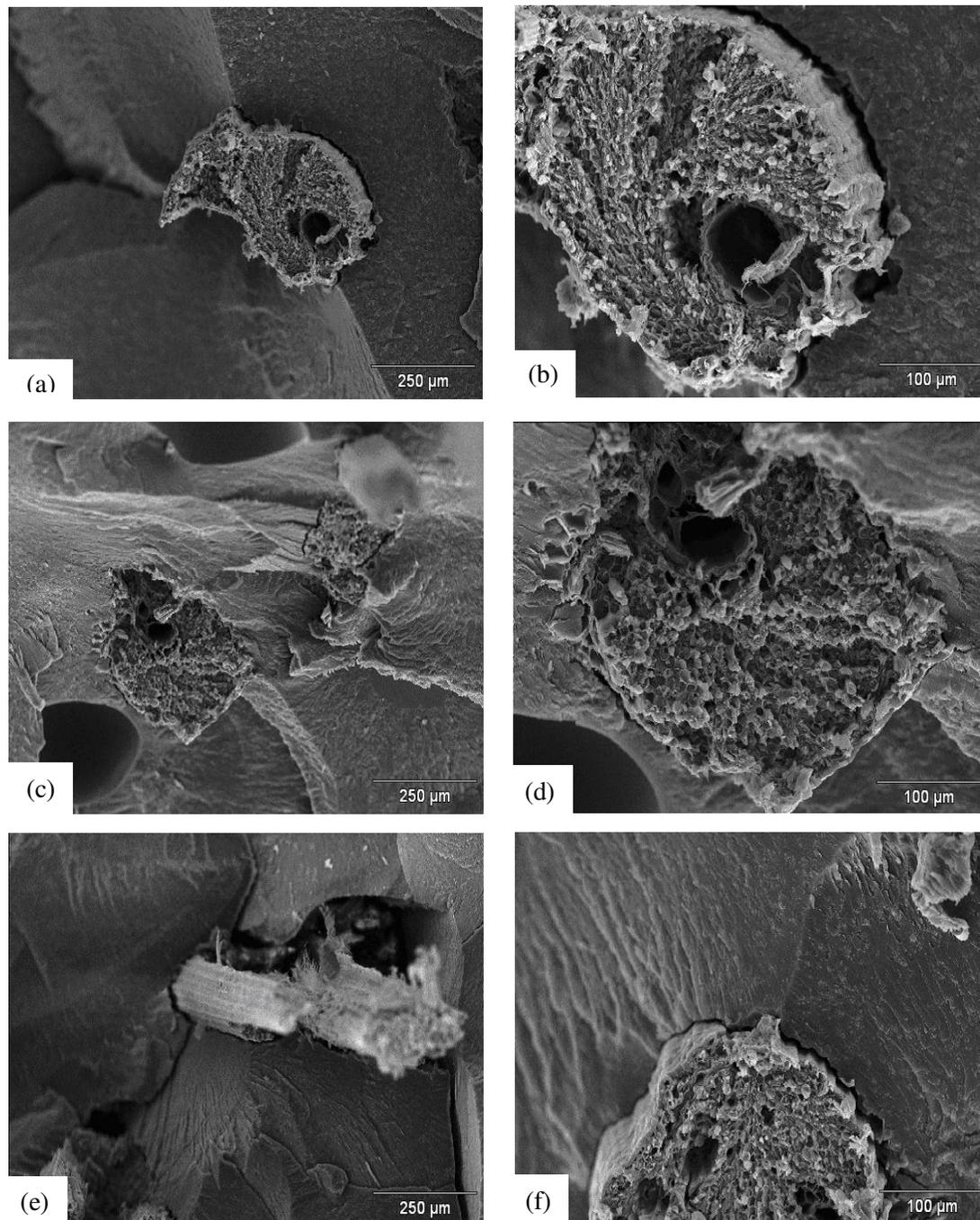


Figura 5.30 – Micrografias da superfície de fratura sob tração para compósitos UD10 (a) e (b), UD20 (c) e (d), e UD30 (e) e (f).

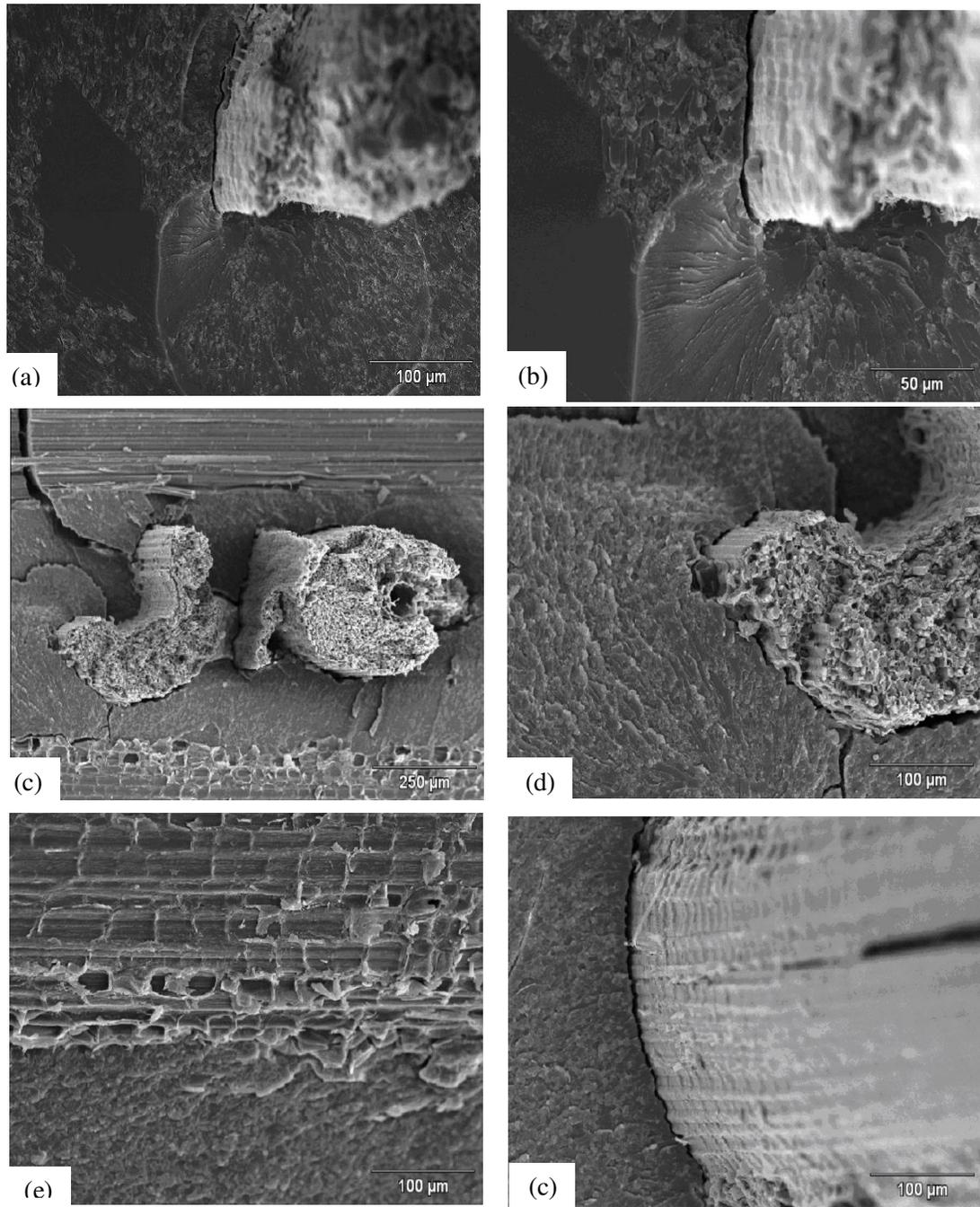


Figura 5.31 – Micrografias da superfície de fratura sob tração para compósitos 2D10 (a) e (b), 2D20 (c) e (d), e 2D30 (e) e (f).

## 6 CONCLUSÕES

As principais conclusões obtidas com os resultados deste estudo são listadas a seguir:

- ✓ As dimensões médias do diâmetro da fibra de *miriti* apresentaram grande dispersão, característica das fibras vegetais. A maioria dos valores obtidos se situou na faixa de 0,200 a 0,300 mm, no método 01, e na faixa de 0,40 a 0,50 mm no método 02, tendo este apresentado menor dispersão do que o método 01;
- ✓ A morfologia e microestrutura da fibra apresentaram características similares às reportadas para outras fibras vegetais, como a existência do lúmen e a forma hexagonal das fibrilas, assim como a grande porosidade do material, que lhe garantiu um valor de densidade inferior ao da água;
- ✓ A mudança sensível na superfície da fibra proporcionada pelo tratamento alcalino ocasionou o incremento da resistência à tração da fibra que apresentou quase o dobro do valor da resistência à tração da fibra não tratada (768,69 MPa), contudo, apresentando módulo elástico a metade do valor da fibra não tratada (12,36 GPa). O desfibramento da fibra durante a sollicitação mecânica atuou como dissipador de energia fazendo com que a fibra resistisse mais até a ruptura;
- ✓ Como reportado na literatura, o diâmetro médio da fibra tem relação inversa às propriedades mecânicas, pois os menores diâmetros alcançaram os maiores valores de resistência e módulo sob carregamento de tração;
- ✓ O incremento das propriedades mecânicas sob tração apresentado pelos compósitos UD foi bastante significativo, principalmente com a adição de 30% em fração de volume de fibras à matriz polimérica de poliéster insaturado, tendo esse compósito apresentado um incremento na resistência à tração de 30% em relação ao compósito

UD20 (96,64 MPa), e um incremento no módulo elástico de 65% em relação ao compósito UD20 (5,80 GPa). Isso indica que a influência das fibras de *miriti* como reforço, foi favorável. A grande dispersão nas propriedades, nesse caso, pode ter sido devido ao maior número de fibras desalinhadas presentes no compósito;

- ✓ Para os compósitos bi-direcionais (2D) testados sob tração, após a fração de aproximadamente 25% de fibras, a resistência à tração dos compósitos aumentou em torno de 100% em relação à amostra de referência (53,50 MPa), não sendo verificado o mesmo comportamento para o módulo elástico sob tração;
- ✓ As propriedades mecânicas sob carregamento de flexão para os compósitos unidirecionais (UD), também apresentaram incremento significativo após a adição de aproximadamente 15% em fração de volume de fibras de *miriti*, indicando que nesse caso a influência da adição de fibras à matriz foi favorável;
- ✓ Para os compósitos bi-direcionais (2D) testados sob flexão, a influência da adição da fração em volume de fibras parece não ter sido favorável, pois, se considerar-se a dispersão dos valores, estes são similares ao da resina poliéster insaturado. Isso pode ter acontecido devido à adição de fibras na direção transversal, e ao desalinhamento das fibras na matriz;
- ✓ A comparação dos resultados obtidos nos ensaios de tração dos compósitos unidirecionais (UD), com os valores teóricos estimados pela regra da mistura, indicaram que o efeito de reforço das fibras de *miriti* na resina poliéster insaturado, somente é verificado de maneira mais significativa, após a adição de 25% em fração de volume de fibras, sugerindo a existência de um valor crítico a partir do qual o efeito de reforço das fibras de *miriti* é evidente. Nesse caso, os resultados indicaram haver sinergia entre os componentes do compósito, o qual apresentou um incremento significativo nas propriedades mecânicas sob carregamento de tração, com uma concentração de 30% de fibras de *miriti*;

- ✓ Os aspectos macroscópicos da fratura sob carregamento de tração dos compósitos indicaram que os compósitos unidirecionais (UD), apresentaram maior região de dano que os compósitos bi-direcionais (2D), o que leva a considerar que os compósitos UD tiveram maior capacidade de absorver energia até a ruptura, do que os compósitos 2D;
- ✓ Os aspectos macroscópicos da fratura sob carregamento de flexão dos compósitos indicaram, novamente, que os compósitos unidirecionais (UD) apresentaram maior região de dano que os compósitos bi-direcionais (2D), com as trincas sendo observadas na superfície sob tração dos corpos-de-prova;
- ✓ Os aspectos microscópicos da fratura após os ensaios de tração dos compósitos indicaram que houve uma adesão satisfatória entre fibra e polímero, característica favorável para que possa haver uma adequada transferência de esforços da matriz polimérica para as fibras, influenciando positivamente nas propriedades mecânicas.

## **6.1 Considerações finais**

Embora a demanda para utilização de fibras vegetais como reforço em compósitos poliméricos seja verificada com mais intensidade no setor automotivo, como peças interiores de automóveis, o compósito elaborado neste trabalho poderia ser aplicado também, como peças de mobiliário e na construção civil, entre outros. Entretanto, sua utilização industrial necessitaria de mais estudos, principalmente sobre métodos de extração da fibra mais adequados e produtivos, que garantisse alguma disponibilidade de fornecimento destas fibras. Além disso, um plano de manejo seria necessário para que a retirada dos pecíolos das palmeiras fosse feita de maneira a não interferir na vida e produtividade da planta, que também é importante para a alimentação de algumas comunidades amazônicas.

## 6.2 Sugestões para trabalhos futuros

- ✓ Utilização do método de Weibull para análise estatística dos dados sobre dimensões e propriedades mecânicas da fibra de *miriti*;
- ✓ Estudo da composição química da fibra, e determinação do ângulo da microfibrila, ambos aspectos importantes no estudo das propriedades mecânicas da fibra;
- ✓ Investigar a influência da distância entre garras no ensaio de tração das fibras, assim como a influência da velocidade do ensaio;
- ✓ Fazer o estudo da cristalinidade da fibra pelo método de difração de Raio-X;
- ✓ Verificar o efeito do tratamento alcalino nas propriedades mecânicas do compósito;
- ✓ Elaborar compósitos com fibras de *miriti* e outros tipos de matrizes, como a resina epóxi;
- ✓ Elaborar compósitos com fibras de *miriti* moídas;

## REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 638-08: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics**. USA, 2008, 16p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 790-03: Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials**. USA, 2003, 11p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 3379-75: Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus for High-Modulus Single-Filament Materials**. USA, 1989, 4p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 792-08: Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement**. USA, 2001, 6p.

ALBUQUERQUE, A.C.; KURUVILLA, J.; CARVALHO, L.H.; D'ALMEIDA, J.R.M. Effect of wettability and ageing conditions on the physical and mechanical properties of uniaxially oriented jute-roving-reinforced polyester composites. *Composites Science and Technology*, v.60, p.833-844, 2000.

ALBUQUERQUE, E.L. **Análise de Problemas Dinâmicos em Materiais Anisotrópicos Usando o Método dos Elementos de Contorno**. 2001. 125p. Tese de doutorado – Faculdade de Engenharia mecânica, Universidade estadual de Campinas, Campinas, 2001.

ALIX, S., MARAIS, S., MORVAN, C., LEBRUN, L. Biocomposite materials from flax plants: Preparation and properties. *Composites: Part A*, v. 39, p. 1793–1801, 2008.

ALMEIDA, S.S. Palmeiras da Amazônia Oriental: importância paisagística, florística e econômica. In: **54° CONGRESSO NACIONAL DE BOTÂNICA**, 2003, Belém. Anais **54° CONGRESSO NACIONAL DE BOTÂNICA**, 2003. Belém: Museu Paraense Emilio Goeldi, 2003. p. 218-247.

ANDERSONS, J., SPÄRNIŠ, E., JOFFE, R., WALLSTROM. Strength distribution of elementary flax fibres. *Composites Science and Technology*, v.65, p.693-702, 2005.

ALVAREZ, V., VAZQUEZ, A., BERNAL, C. Effect of microstructure on the tensile and fracture properties of sisal fiber/starch-based composites. *Journal of Composite Materials*, v.40, p.21-35, 2006.

BAIARDO, M., ZINI, E., SCANDOLA, M. Flax fibre–polyester composites. *Composites: Part A*, v.35, p.703–710, 2004.

BLEDZKI, A.K., FARUK, O, SPERBER, V.E. Cars from Bio-fibres. *Macromol. Mater. Eng.*, v.291, p. 449-457, 2006.

BONELLI, C.M.M.; ELZUBAIR, A., SUAREZ, J.C.M.; MANO, E.B. Comportamento Térmico, Mecânico e Morfológico de Compósitos de Polietileno de Alta Densidade Reciclado com Fibra de Piaçava. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 15, n. 4, p. 256-260, 2005.

BURGET, I., Exploring the micromechanical design of plant cell walls. *American Journal of Botany*, v.93, p.1391-1401, 2006.

CAIN, R., PINFOLD, M.K., LINDSEY, K.A. **An Introduction to Automotive Composites**. Rapra Technology Limited: United Kingdom, 2002.

CHARLET, K.; BAILEY, C.; MORVAN, C.; JERNOT, J.P.; GOMINA, M.; BRÉARD, J. Characteristics of Herme`s flax fibres as a function of their location in the stem and properties of the derived unidirectional composites. *Composites: Part A*, v. 38, p.1912–1921, 2007.

CORRADINI, E., ITO, E.N.I., MARCONCINI, J.M., RIOS, C.T., AGNELLI, J.A.M., MATTOSO, L.H. Interfacial behavior of composites of recycled poly(ethylene terephthalate) and sugarcane bagasse fiber. *Polymer Testing*, v. 28, p.183–187, 2008.

D`ALMEIDA, J.R.M.; AQUINO, R.C.M.P.; MONTEIRO, S.N. Tensile mechanical properties, morphological aspects and chemical characterization of piassava (*Attalea funifera*) fibers. *Composites: Part A*, v.37, p.1473–1479, 2006.

DIRECTIVE 2000/53/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL, 18 September, 2000 on end-of life vehicles. *Official Journal of the European Communities*. L. 269/34, 21.10.2000.

ERHARDT, T., BLUMCKE, A., BURGER, W., MARKLIN, M., QUINZLER, G. **Curso Técnico Têxtil**. EPU: São Paulo, 1976.

GOMES, A.; MATSUO, T.; GODA, K.; OHGI, J. Development and effect of alkali treatment on tensile properties of curaua fiber green composites. *Composites: Part A*, v. 38, p.1811–1820, 2007.

GOWDA, T.M., NAIDU, A.C.B., CHHAYA, R. Some mechanical properties of untreated jute fabric-reinforced polyester composites. *Composites: Part A*, v.30, p.277–284, 1999.

HARPER, L.T., TURNER, T.A., MARTIN, J.R.B., WARRIOR, N.A. Fiber Alignment in Directed Carbon Fiber Preforms - A Feasibility Study. *Journal of Composite Materials*, v. 43, p.57-74, 2009.

HUGHES, M., HILL, C. A. S., HAGUE, J. R. B. The fracture toughness of bast fibre reinforced polyester composites, Part 1 *Evaluation and analysis*. *Journal of Materials Science*, v. 37, p.4669 – 4676, 2002.

JOHN, K.; NAIDU, S.V. Sisal fiber/glass fiber hybrid composites: the impact and compressive properties. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, v.23, n.12, p. 1253-1258, 2004.

JONES, R. **Mechanics of Composite Materials**. MacGraw Hill: New York, 1975.

JOSHI, S.V., DRZAL; L.T., MOHANTY, A.K., ARORAC, S. Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites? *Composites: Part A* 35 (2004) 371–376.

KAMATH, G. S. BHAT,G. S., PARIKH, D.V., MUELLER, D. Cotton Fiber Nonwovens For Automotive Composites, *INJ Spring*, 2005.

KHALIL, H.P.S.A.; HANIDA, S.; KANG, C.W.; FUAAD, N.A.N. Agro-hybrid composite: The effects on mechanical and physical properties of oil palm fiber (EFB)/glass hybrid reinforced polyester composites. *Journal of reinforced plastics and composites*, v.26, p.203-218, 2007.

KURUVILLA, J.; MEDEIROS, E.S., CARVALHO, L.H. Compósitos de Matriz Poliéster Reforçados por Fibras Curtas de Sisal. *Polímeros: Ciência e Tecnologia* - Out/Dez – 1999.

LEVY NETO, F., PARDINI, L.C. **Compósitos Estruturais: Ciência e Tecnologia**. 1. Ed. – São Paulo: Edgerd Blucher, 2006.

LU, X.; ZHANG, M.Q.; RONG, M.Z.; SHI, G.; YANG, G.C. Self-reinforced melt processable composites of sisal. *Composites Science and Technology*, v.63, p.177-186, 2003.

LIZOT, A.; OLIVEIRA,F.G.; SUSIN, S.B.; FIORIO, R.; ZATTERA, A.J. Estudo sobre a Dispersão de argila MMT em resina epóxi para Obtenção de nanocompósitos. **UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL, LABORATÓRIO DE POLÍMEROS**, 2009. (Apresentação de Trabalho/Seminário).

MAHDI, F., KHAN, A.A., ABBAS, H. Physiochemical properties of polymer mortar composites using resins derived from post-consumer PET bottles. *Cement & Concret Composites*, v.29, p.241-248, 2007.

MAMEDE, N.J. Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras vegetais. **GECIM – Grupo de Energia e Ciência dos Materiais**. Projeto de pesquisa. EDITAL PIBIC/UFBA 01/2010.

MARINELLI, A.L.; MONTEIRO, M.R.; AMBRÓSIO, J.D. Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras vegetais naturais da biodiversidade: uma contribuição para a sustentabilidade Amazônica. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v.18, p.92-99, 2008.

MATUANA, L.M., BALATINECZ, J.J., SODHI, R.N.S., PARK, C.B. Surface characterization of esterified cellulosic fibers by XPS and FTIR Spectroscopy. *Wood Science and Technology*, v.35, p.192-2001, 2001.

MEDINA, L., SCHLEDJEWSKI, R., SCHLARB, A.K. Process related mechanical properties of press molded natural fiber reinforced polymers. *Composites Science and Technology* , v.69, p.1404–1411, 2009.

MONTEIRO, S.N.; TERRONES, L.A.H.; LOPES, F.P.D.; D'ALMEIDA, J.R.M. Mechanical Strength of Polyester Matrix Composites Reinforced with Coconut Fiber Wastes. *Revista Matéria*, v. 10, n. 4, p. 571-576, 2005.

MOTA, J.M., LUZ, S.M., DEL'ARCO JR, A.P., GONÇALVES, A.R. Estudo do reprocessamento de compósitos de polipropileno reforçado com diferentes tipos de fibras de bagaço de cana-de-açúcar. In: **VI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica**, UNICAMP, 2005. Anais do **VI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica**, UNICAMP, 2005.

MUELLER, D.H.; KROBJILOWSKI, A. New Discovery in the Properties of Composites Reinforced with Natural Fibers. *J. Ind. Text.*, v.33, p.110-130, 2003.

MWAIKAMBO, L.Y., ANSELL, M.P. Chemical Modification of Hemp, Sisal, Jute, and Kapok Fibers by Alkalization. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 84, p.2222–2234, 2002.

NISGOSKI, S., MARINHO, N., MUNIZ, G.I.B., KLOCK, U. Características do bambu (*Dendrocalamus giganteus* Munro) aos cinco anos de idade. In: **XVIII EBRAMEM**, Lavras, 2010. Caderno de resumos do EBRAMEM, Lavras, 2010.

ONAL, L., KARADUMAN, Y. Mechanical Characterization of Carpet Waste Natural Fiber-reinforced Polymer composites. *Journal of Composite Materials*, v. 43, No. 16/2009.

OH, YOUN, S. YOO, D.I., SHIN, Y., SEO, G. FTIR analysis of cellulose treated with sodium hydroxide and carbon dioxide. *Carbohydrate Research*, v. 340, p. 417–428, 2005.

PENDHARI, S.S., KANT, T., DESAI, Y.M. Application of polymer composites in civil construction: A general review. *Composite Structures*, v.84, p.114–124, 2008.

PRASAD, A.V.R., MOHANA, K., NAGASRINIVASULU, G. Mechanical properties of banana empty fruit bunch fibre reinforced polyester composites. *Indiana Journal of Fibre & Textile Research*, v.34, p. 162-167, 2009.

RAO, K.M.M., RAO, K.M. Extraction and tensile properties of natural fibers: Vakka, date and bamboo. *Composites structures*, v.77, p.288-295, 2007.

REIMER, V. KUNKEL, A., PHILIPP, S. Avaliação da ecoeficiência de polímeros obtidos a partir de fonte renováveis. In: *Revista Plástico industrial*. Aranda Editora, n.139, Março 2010.

RODRIGUEZ, E., PETRUCCI, P., PUGLIA, D., KENNY, J.K., VAZQUEZ, A. Characterization of Composites Based on Natural and Glass Fibers Obtained by Vacuum Infusion. *Journal of Composite Materials*, v. 39, 2005.

SABARIZ, A.; SILVA, V.R.V.; SILVA, L.J.; MARQUES, M. Propriedades mecânicas de compósitos formados por matriz epoxídica reforçada com fibras vegetais. In: **17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, 2006, Foz do Iguaçu. Anais do **17º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Foz do Iguaçu, 2006**, p.3650-3660.

SAHEB, D., JOG, J.P. Natural fiber polymer composites: a review. *Advances in Polymer Technology*, v.18, p. 351-363, 1999.

SALEEM, Z.; RENNEBAUM, H.; PUDEL, F.; GRIMM, E. Treating bast fibres with pectinase improves mechanical characteristics of reinforced thermoplastic composites. *Composites Science and Technology*, v.68, p.471–476, 2008.

SANCHEZ, E.M.S., CAVANI, C.S.C., LEAL, C.V., SANCHEZ, C.G. Compósito de Resina de Poliéster Insaturado com Bagaço de Cana de Açúcar: Influência do Tratamento das Fibras nas Propriedades. *Polímeros*, xx, p.xx-xx, 2010.

SANTOS, N.S.S., SANCHEZ, E.M.S.; CAVANI, C.S.; SANCHEZ, C.G.; DIAS, C.G.B.T.; ZAVAGLIA, C.A.C.; ALBUQUERQUE, E.L. Compósitos de resina poliéster insaturado com fibras de miriti: propriedades mecânicas de flexão. In: **9º Congresso Brasileiro de Polímeros**, Campina Grande, 2007. Anais do **9º Congresso Brasileiro de Polímeros**, Campina Grande, 2007a.

SANTOS, N.S.S., SANCHEZ, E.M.S.; ZAVAGLIA, C.A.C.; ALBUQUERQUE, E.L. Mechanical properties of Amazonian vegetable fiber/unsaturated polyester composites. In: **VI Congresso da Sociedade Brasileira de Pesquisa em Materiais**, Natal (RN), 2007. Anais do **VI Congresso da Sociedade Brasileira de Pesquisa em Materiais**, Natal, 2007b.

SATYANARAYANA, K.G.; GUIMARÃES, J.L.; WYPYCH, F. Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part I: Source, production, morphology, properties and applications. *Composites: Part A*, v.38, p.1694–1709, 2007.

SAVIOLI, R.G.; RIBEIRO, A.L.A.; SÁNCHEZ, C.G.; SANCHEZ, E.M.S. Avaliação das propriedades mecânicas e térmicas do compósito de fibra de bananeira em matriz polimérica de poliéster insaturado. In: Anais do **18º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência do Materiais**, Porto de Galinhas, 2008. Anais do **18º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência do Materiais**, Porto de Galinhas, 2008.

SGRICCIA, N., HAWLEY, M.C., MISRA, M. Characterization of natural fiber surfaces and natural fiber composites. *Composites: Part A*, v.39, 1632–1637, 2008.

SILVA, R.V., AQUINO, E.M.F., RODRIGUES, L.P.S., BARROS, A.R.F. Desenvolvimento de um compósito laminado híbrido com fibra natural e sintética. *Revista Matéria*, v.13, n. 1, p. 154-161, 2008.

STOCCHI, A.; LAUKE, B.; VÁZQUEZ, A., BERNAL, C. A novel fiber treatment applied to woven jute fabric/vinylester laminates. *Composites: Part A*, v.38, p.1337–1343, 2007.

STROHAECKER, T.R. **Mecânica da fratura**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia: Laboratório de Metalurgia Física, 2007 (material didático).

TITA, S.P.S.; PAIVA, J.M.F.; FROLLINI, E. Resistência ao impacto e outras propriedades de compósitos lignocelulósicos: matrizes termofixas fenólicas reforçadas com fibras de bagaço de cana-de-açúcar. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v.12, n. 4, p.228-239, 2002.

VALENTE, R.M.; ALMEIDA, S.S. **As palmeiras de Caxiuanã**. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 2001.54f.

VILHENA-POTYGUARA, R.C. Panorama sobre as pesquisas em anatomia de órgãos vegetativos das palmas (Arecaceae). In: **54° CONGRESSO NACIONAL DE BOTÂNICA**, 2003, Belém. Anais do **54° CONGRESSO NACIONAL DE BOTÂNICA**, Belém: Museu Paraense Emilio Goeldi, 2003. p. 246-247.

XUE, P., CAO, J, CHEN, J. Integrated micro/macro-mechanical model of woven fabric composites under large deformation. *Composite Structures*, v.70, p. 69-80, 2005.

YU, H.N., KIM, S.S., HWANG, I.U., LEE, D.G. Application of natural fiber reinforced composites to trenchless rehabilitation of underground pipes. *Composite Structures*, v.86, p.285–290, 2008.

ZAH, R.; HISCHIER, R.; LEÃO, A.L.; BRAUN, I. Curauá fibers in the automobile industry – a sustainability assesment. *Journal of Cleaner Production*, v.15, p.1032-1040, 2007.

## **ANEXO 01 - Trabalhos em congressos e publicações**

SANTOS, N.S.S., SANCHEZ, E.M.S.; CAVANI, C.S.; SANCHEZ, C.G.; DIAS, C.G.B.T.; ZAVAGLIA, C.A.C.; ALBUQUERQUE, E.L. Compósitos de resina poliéster insaturado com fibras de miriti: propriedades mecânicas de flexão. In: **9º Congresso Brasileiro de Polímeros**, Campina Grande 2007. Anais do **9º Congresso Brasileiro de Polímeros**, Campina Grande, 2007 (trabalho completo).

SANTOS, N.S.S., SANCHEZ, E.M.S.; ZAVAGLIA, C.A.C.; ALBUQUERQUE, E.L. Mechanical properties of Amazonian vegetable fiber/unsaturated polyester composites. In: **VI Congresso da Sociedade Brasileira de Pesquisa em Materiais**, Natal, 2007 (Resumo expandido).

SANTOS, N.S.S.; DIAS, C.G. B.T.; SANCHES, ZAVAGLIA, C.A.C.; ALBUQUERQUE, E.L. Caracterização microestrutural e mecânica da fibra de miriti para utilização como reforço em compósitos poliméricos. In: **18º Congresso Brasileiro de Ciência e Engenharia de Materiais**, Porto de Galinhas, 2008. Anais do **18º Congresso Brasileiro de Ciência e Engenharia de Materiais**, Porto de Galinhas, 2008 (trabalho completo).

SANTOS, N.S.S., SANCHEZ, E.M.S.; ZAVAGLIA, C.A.C.; ALBUQUERQUE, E.L. Influência do tratamento químico nas propriedades de impacto do compósito de fibras de miriti/resina de poliéster insaturado. In: **18º Congresso Brasileiro de Ciência e Engenharia de Materiais**, Porto de Galinhas, 2008. Anais do **18º Congresso Brasileiro de Ciência e Engenharia de Materiais**, Porto de Galinhas, 2008(trabalho completo).

SANTOS, N.S.S.; SILVA, M.R.; ZAVAGLIA, C.A.C. ALBUQUERQUE, E.L. Morphological and physics aspects, and tensile mechanical properties of miriti fibers for reinforced composites. In: **1st TMS-ABM International Materials Congress**, Rio de Janeiro, 2010 (trabalho completo).

COSTA, L.L.; MONTEIRO, S.N.; PORTELA, T.G.R.; SANTOS, N.S.S. CHARACTERIZATION OF A NATURAL BIOFOAM FROM THE BURITI PALM TREE. In: **1st TMS-ABM International Materials Congress**, Rio de Janeiro, 2010 (trabalho completo).

PORTELA, T.G.R.; COSTA, L.L.; SANTOS, N.S.S.; LOPES, F.P.; MONTEIRO, S. Tensile Behavior of Polyester Composites Reinforced with Stronger Buriti Fibers. In: **1st TMS-ABM International Materials Congress**, Rio de Janeiro, 2010.

SANTOS, N.S.S.; SILVA, M.R.; DIAS, C.G.B.T.; ZAVAGLIA, C.A.C.; ALBUQUERQUE, E.L. Damage propagation of continuous vegetable fiber-reinforced polyester composite. In: **7th International Symposium on Natural Polymers and Composites**, Gramado, 2010 (Resumo extendido).

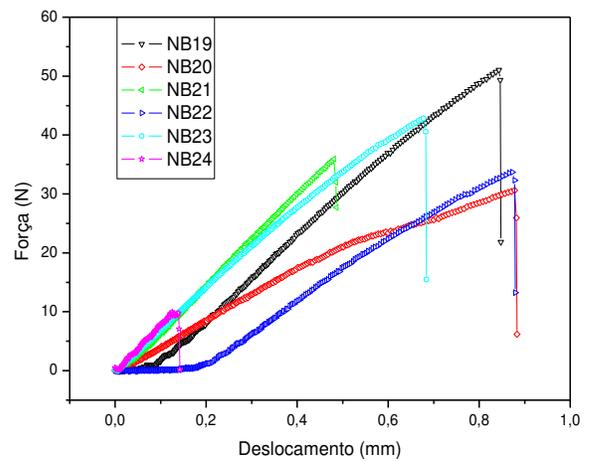
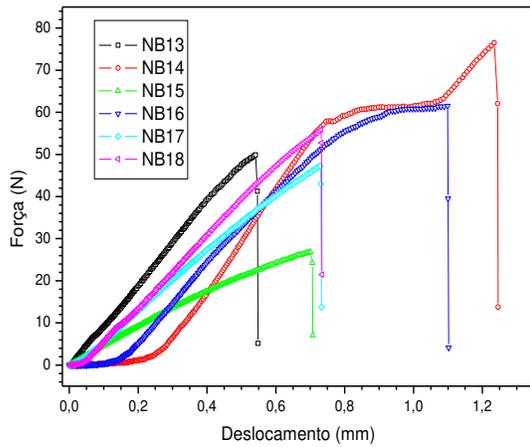
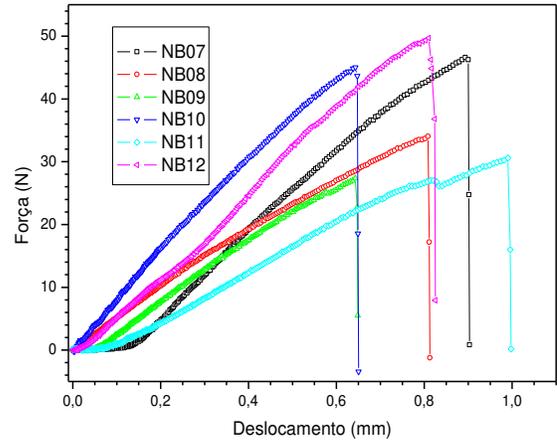
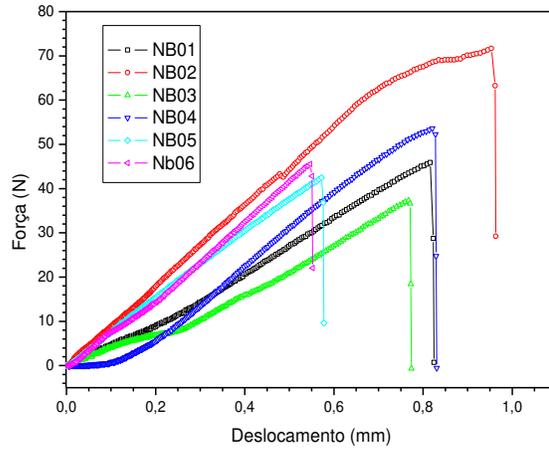
SANTOS, N.S.S.; SILVA, M.R.; DIAS, C.G.B.T.; ZAVAGLIA, C.A.C.; ALBUQUERQUE, E.L. Influência do teor de fibras nas propriedades de flexão do compósito de fibras longas de miriti/resina poliéster insaturado. In: **19<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de Ciência e Engenharia de Materiais**, Campos do Jordão, 2010. Anais do **19<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de Ciência e Engenharia de Materiais**, Campos do Jordão, 2010 (trabalho completo).

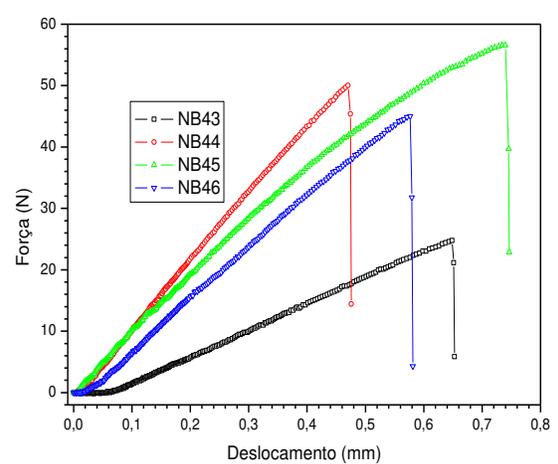
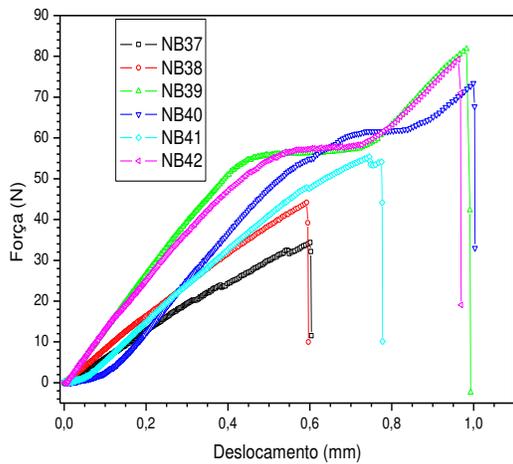
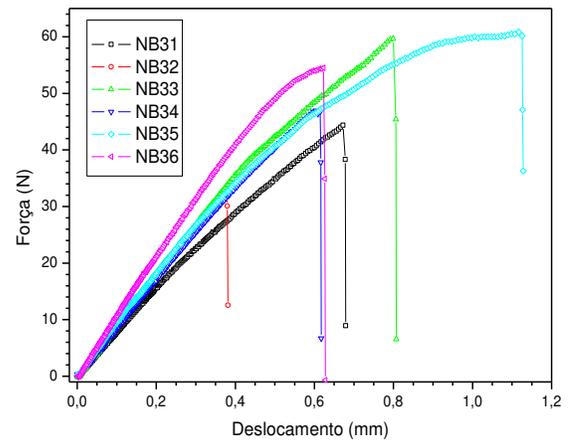
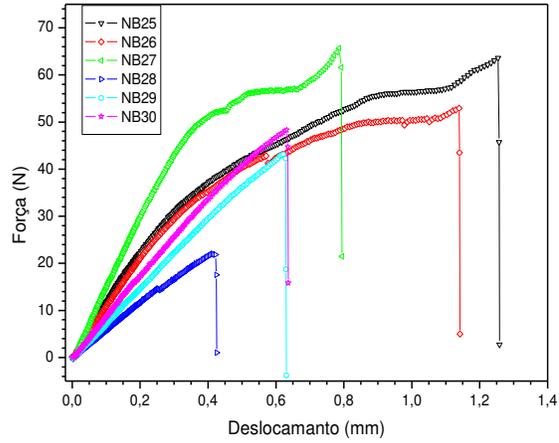
### **Publicações**

MONTEIRO, S.N.; RODRIGUEZ, R.J.S.; COSTA, L.L.; PORTELA, T.G.R.; SANTOS, N.S.S. Thermal behavior of buriti biofoam. *Revista Matéria*, v.15, n.2, p.104-109, 2010.

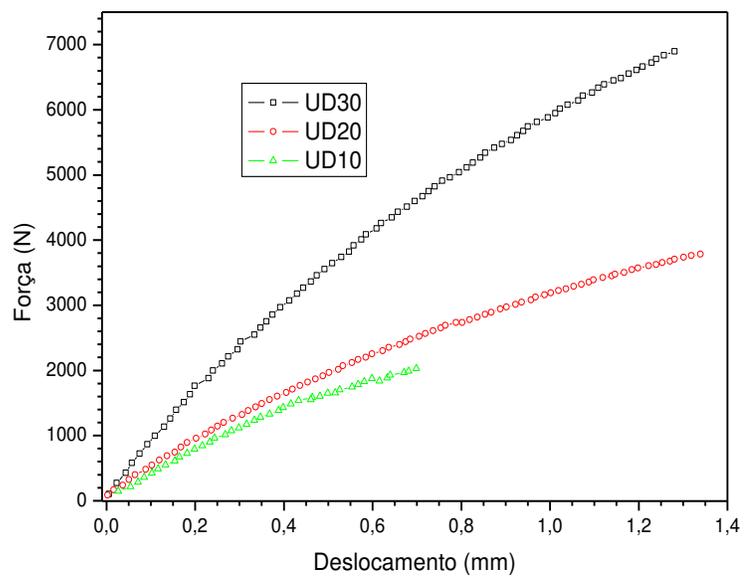
PORTELA, T.G.R.; COSTA, L.L.; SANTOS, N.S.S.; LOPES, F.D.P.; MONTEIRO, S.N. Tensile behavior of lignocellulosic fiber reinforced polymer composites: Part II buriti petiole/polyester. *Revista Matéria*, v.15, n.2, p.195-201, 2010.

## ANEXO 02 - Ensaio de tração das fibras de *miriti* não- tratadas

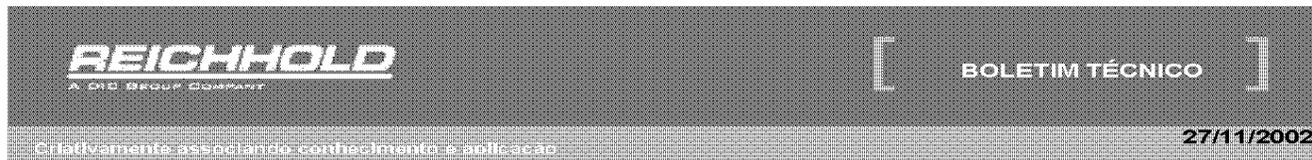




### ANEXO 03 – Curvas médias força x deslocamento dos compósitos.



## ANEXO 04 – Boletim técnico resina poliéster.



### COMPOSITES

## POLYLITE 10316 - 10

#### DESCRIÇÃO

Resina poliéster insaturado, totalmente polimerizável, baixa viscosidade, tixotrópica, pré-acelerada.

#### APLICAÇÕES

Piscinas, banheiras, peças automotivas, caixas d'água e acessórios reforçados com fibras de vidro, moldados em processo aberto (laminação manual ou a pistola).

#### CARACTERÍSTICAS

- Excepcional característica de molhabilidade das fibras de vidro
- Excelente resistência à hidrólise

As informações aqui citadas são de carácter geral com o propósito de auxiliar nossos clientes a determinar se os nossos produtos são adequados às suas aplicações. Os nossos produtos são recomendados para clientes industriais. Nós recomendamos aos nossos clientes que inspecionem e avaliem tecnicamente o desempenho dos nossos produtos em suas próprias condições, para aprovação prévia à sua comercialização. Nós garantimos que nossos produtos atenderão às especificações técnicas aqui descritas. **Nada aqui contido deverá constituir qualquer outra garantia expressa ou implícita, incluindo qualquer garantia de comerciabilidade ou adequação a um propósito específico** e nenhuma proteção de qualquer lei ou patente poderá ser inferida. Todos os direitos à patente são reservados. A exclusiva remediação para todas as reivindicações fundamentadas se limitarão à reposição dos nossos materiais e em nenhum evento seremos responsáveis por danos especiais, incidentais ou consequentes.

REICHHOLD S.A.C. \* 0800-19-8001 \* Av Amazonas, 1100, 08744-340 Mogi das Cruzes, SP Brasil



**PROPRIEDADES DA RESINA NA APLICAÇÃO (\*):**

CARACTERÍSTICAS	MÉTODO DE ANÁLISE	VALORES TÍPICOS
Resistência Máxima à Tração (MPa)	PP 09 - 035	40 mínimo
Módulo de Elasticidade em Tração (MPa)	PP 09 - 035	3500 mínimo
Elongação Máxima (%)	PP 09 - 035	2,0 máximo
Resistência Máxima à Flexão (MPa)	PP 09 - 039	60 mínimo
Módulo de Elasticidade em Flexão (MPa)	PP 09 - 039	3.800 mínimo
Deformação Máxima (%)	PP 09 - 039	1,6 máximo
Dureza Barcol	PP 09 - 034	38 mínimo
Contração Linear	PP 09 - 050	2,0 máximo

(\*) Sem reforço de fibras de vidro  
Sistema de Catálise: MEK-P  
Pós Cura: 48 hs à 60°C

**ARMAZENAGEM**

As resinas poliéster insaturado devem ser mantidas à temperatura de 25°C ou menor. A não observância dessa condição pode resultar em alterações das características do produto, inclusive na diminuição de sua vida útil.

**EMBALAGEM**

Esta resina encontra-se disponível em tambores de 220 kg e a granel.

**ESTABILIDADE**

Sob as condições recomendadas de armazenamento, a estabilidade do POLYLITE 10316 – 10 será de 4 meses, após a data de fabricação.

**SEGURANÇA**

As instruções sobre manuseio e precauções, recomendadas para o uso desta resina, estão contidas na "Folha de Informações de Segurança de Produtos Químicos". Queira solicitá-la, caso haja interesse em utilizar o produto descrito.