

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS  
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**RAFAEL MARQUES VANDERLEI**

**CONFECÇÃO E CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE COMPÓSITOS  
DE MATRIZ EPOXÍDICA REFORÇADA COM FIBRAS DE RAMI**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**LONDRINA**

**2016**

RAFAEL MARQUES VANDERLEI

**CONFECÇÃO E CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE COMPÓSITOS  
DE MATRIZ EPOXÍDICA REFORÇADA COM FIBRAS DE RAMI**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior de Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Londrina.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Cezar Ferreira

LONDRINA

2016



Ministério da Educação  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
Campus Londrina  
Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais  
Coordenação de Engenharia de Materiais



---

## TERMO DE APROVAÇÃO

### **CONFECÇÃO E CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE COMPÓSITOS DE MATRIZ EPOXÍDICA REFORÇADA COM FIBRAS DE RAMI**

Por

**RAFAEL MARQUES VANDERLEI**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 10:00 do dia 07 de novembro de 2016 como requisito para a obtenção do título de BACHAREL EM ENGENHARIA DE MATERIAIS. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho **APROVADO**.

---

**Prof. Dr. Fábio Cezar Ferreira**  
(UTFPR-LD - Departamento Acadêmico de Química - DAQUI)  
Orientador

---

**Prof. Dr. Felipe de Almeida La Porta**  
(UTFPR-LD - Departamento Acadêmico de Química - DAQUI)

---

**Profa. Dra. Elisângela Corradini**  
(UTFPR-LD - Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais - DAEMA)

---

**Prof. Dr. Odney Carlos Brondino**  
Responsável pelo TCC do Curso de Engenharia de Materiais

**Obs.:** A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia de Materiais

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha família pelo apoio neste momento tão importante em minha vida, em especial ao meu pai, Prof. Dr. Luiz Carlos Marques Vanderlei, que me iluminou nos momentos de dúvida. Gostaria de agradecer todo o apoio recebido pelos meus amigos de estudo e a todos que me ajudaram durante os experimentos do trabalho.

Reverencio o Prof. Dr. Fábio Cezar Ferreira pela sua dedicação e orientação neste trabalho e, por meio dele, eu me reporto a toda a comunidade da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) pelo apoio incondicional. Agradeço aos professores da banca examinadora pela atenção e contribuição dedicadas a este estudo. Agradeço, também, ao Prof. Dr. Lucas Freitas Berti por me sugerir o tema escolhido e pelos momentos de aprendizado.

## RESUMO

VANDERLEI, Rafael M. Confecção e Caracterização Mecânica de Compósitos de Matriz Epoxídica Reforçada com Fibras de Rami. 2016. 47 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2005.

Os compósitos de matriz polimérica reforçada com fibras naturais têm ganhado destaque nas indústrias em função do seu baixo custo e boa propriedade mecânica. Uma fibra vegetal com grande potencial para a fabricação de compósitos é a fibra de rami. Investigou-se o comportamento mecânico de compósitos de matriz epóxi reforçada com fibras curtas de rami aleatoriamente orientadas. Um microscópio ótico foi utilizado para observar o diâmetro e características superficiais do feixe de fibras e das fibras de rami. Foram analisados corpos de prova contendo 0%, 5%, 10% e 15% em massa de fibra por meio de ensaio de tração e impacto Izod. As superfícies de fratura foram também avaliadas utilizando-se uma câmera. Observou-se que as fibras utilizadas eram curtas e finas, com diâmetro médio de  $48 \pm 17 \mu\text{m}$ . A resistência a tração dos compósitos teve um aumento de até 28,2%, porém com perda de ductilidade de até 76,4%. Foi observado também que algumas fraturas por tração ocorreram na presença de bolhas que atuaram como pontos de concentração de tensão. A resistência ao impacto Izod aumentou exponencialmente com a incorporação de fibra de rami até o maior percentual estudado, atingindo um aumento de até 185,7% em relação ao termorrígido puro. Desta forma, é possível dizer que a fibra de rami é uma excelente alternativa como reforço em compósitos poliméricos.

**Palavras-chave:** Compósitos. Fibra de rami. Resina epoxídica.

## ABSTRACT

VANDERLEI, Rafael M. Preparation and Mechanical Characterization of Epoxy Matrix Composites Reinforced with Ramie Fibers. 2016. 47 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2005.

There has been growing interest in natural fiber reinforced polymer composites by the industry due to its low cost and good mechanical properties. A natural fiber that has a great potential for making polymer composites is the ramie fiber. The mechanical behavior of epoxy matrix composites reinforced with randomly oriented ramie fibers was investigated. In this study, tensile test and Izod impact were applied to specimens containing fiber mass fractions of 0%, 5%, 10% and 15%. The diameter and surface characteristics of the fiber bundle and the individual ramie fibers were identified by using an optical microscope. The fracture surfaces of each test were observed by using a camera. The ramie fibers were thin, with an average diameter of  $48 \pm 17 \mu\text{m}$ . The tensile strength of the composites increased by 28.2%, but with a loss of ductility around 76.4%. It was also observed that some tensile fractures occurred in bubbles, which were localized points of stress concentration. The Izod impact strength increased exponentially with the ramie fiber fraction, reaching an increase of 185.7% compared to pure thermoset. Therefore, it is possible to conclude that the ramie fiber is an excellent alternative for reinforced polymer composites.

**Keywords:** Composites. Epoxy resin. Ramie fiber.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Uso de fibras vegetais nas indústrias aeronáutica, automobilística, de calçados, eletroeletrônica, moveleira e naval.....	11
Figura 2 - Algumas configurações de compósitos de matriz polimérica .....	15
Figura 3 - Classificação e alguns exemplos de fibra naturais e não-naturais.....	16
Figura 4 - Planta de rami ( <i>Boehmeria nivea</i> ).....	20
Figura 5 - Reação química entre epícloridrina e bisfenol A .....	22
Figura 6 - Propriedades mecânicas dos compósitos de fibra de rami. (a) Variação da tensão máxima em função da fração volumétrica de fibras; (b) Variação do módulo de elasticidade em função da fração volumétrica de fibras. ....	25
Figura 7 - Energia de impacto Izod de compósitos de resina poliéster em junção da fração volumétrica de fibras de rami. ....	26
Figura 8 - Energia de impacto Charpy de compósitos epoxídicos com fração em volume de fibras de rami. ....	27
Figura 9 - Superfície de fratura do corpo de prova do compósito epoxídico com 30% de fibras de rami. (a) Vista geral com baixo aumento; (b) Detalhes com maior aumento .....	28
Figura 10 - Resumo da metodologia aplicada neste trabalho. ....	29
Figura 11 - Amostra de barbante de fibra de rami utilizado no trabalho.....	30
Figura 12 - Confecção do molde de silicone. (a) Suporte de madeira e corpos de prova de tração tipo 1 utilizados no vazamento do silicone e catalizador; (b) Molde de silicone curado após 24 horas do vazamento.....	32
Figura 13 - Impacto Izod. (a) Dimensões do corpo de prova de impacto tipo Izod D; (b) Ferramenta utilizada para criar o entalhe em V.....	34
Figura 14 - Espectro de infravermelho da amostra de barbante seco.....	35
Figura 15 - Microscopia ótica das amostras de barbante em magnificação de 50x. (a) Feixe das fibras de rami; (b) Fibras de rami limpas e desaglomeradas..	36
Figura 16 - Dispersão homogênea das fibras de rami nos corpos de prova. (a) Corpos de prova do ensaio de tração; (b) Corpos de prova do impacto Izod .....	37
Figura 17 - Defeitos nos corpos de prova. (a) Rebarbas; (b) Superfície irregular; (c) Bolhas.....	38
Figura 18 - Representação gráfica dos ensaios de tração realizados em amostras medianas do compósito de matriz epóxi reforçada com fibra de rami ....	39
Figura 19 - Superfícies de fratura dos corpos de prova dos ensaios de tração. (a) Fonte de luz artificial; (b) Fonte de luz natural .....	41
Figura 20 - Variação da energia de impacto Izod de compósitos de matriz epoxídica em função da fração mássica de fibra de rami .....	42
Figura 21 - Superfícies de fratura dos corpos de prova dos ensaios de impacto Izod. (a) Fonte de luz artificial; (b) Fonte de luz natural.....	43

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação e exemplos de fibras lignocelulósicas .....	17
Tabela 2 - Propriedades mecânicas de fibras vegetais e sintéticas .....	18
Tabela 3 - Composição dos principais constituintes de algumas fibras vegetais .....	19
Tabela 4 - Bandas de absorção características de fibras lignocelulósicas.....	23
Tabela 5 - Propriedades do sistema de resina epoxídica SQ2004 e SQ3154 .....	33
Tabela 6 - Propriedades de tração de compósitos de matriz epóxi reforçada com fibras de rami em diferentes porcentagens mássicas .....	40



## LISTA DE SÍMBOLOS

$\sigma_T$	Limite de resistência a tração
$E$	Módulo de elasticidade
$\varepsilon_T$	Deformação total
$\rho$	Massa específica

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>13</b>
2.1 OBJETIVO GERAL.....	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	13
<b>3 JUSTIFICATIVA</b> .....	<b>14</b>
<b>4 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>15</b>
4.1 COMPÓSITOS .....	15
4.2 FIBRAS NATURAIS .....	16
4.2.1 Fibras Lignocelulósicas .....	17
4.2.2 Constituintes das fibras lignocelulósicas .....	18
4.2.3 Fibra de rami .....	20
4.3 RESINA EPOXÍDICA.....	21
4.4 ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO.....	23
4.5 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO .....	24
4.6 ENSAIO DE IMPACTO.....	25
4.7 MICROSCOPIA .....	27
<b>5 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>29</b>
5.1 AQUISIÇÃO DAS AMOSTRAS DE RAMI .....	30
5.2 ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO.....	30
5.3 LIMPEZA E DESAGLOMERAÇÃO DAS FIBRAS DE RAMI .....	31
5.4 MICROSCOPIA .....	31
5.5 PREPARAÇÃO DOS MOLDES.....	31
5.6 PREPARAÇÃO DOS COMPÓSITOS.....	32
5.7 ENSAIOS DE TRAÇÃO.....	33
5.8 ENSAIOS DE IMPACTO IZOD.....	34
<b>6 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>35</b>
6.1 ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO.....	35
6.2 CONFECÇÃO DAS AMOSTRAS .....	36
6.3 DEFEITOS MACROSCÓPICOS .....	37
6.4 ENSAIOS DE TRAÇÃO.....	39
6.5 ENSAIOS DE IMPACTO IZOD.....	42
<b>7 CONCLUSÃO</b> .....	<b>44</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>45</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A busca por materiais leves e de alta resistência mecânica tem ganhado grande destaque nas últimas décadas. Particularmente, uma das possibilidades de se obter tais propriedades é por meio da combinação de dois ou mais materiais. Esta combinação normalmente envolve um material de baixa massa específica e outro com excelentes propriedades mecânicas. O material constituído por este arranjo é denominado compósito, sendo comumente utilizados termoplásticos e termorrígidos como matriz que envolve um reforço, geralmente fibras sintéticas como a fibra de vidro e a fibra de carbono (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

A crescente preocupação com o meio ambiente tem guiado o desenvolvimento de novas tecnologias para que causem um menor impacto ambiental negativo. Dentro da área de compósitos, é possível citar a substituição de fibras sintéticas por fibras naturais, podendo ser animal, mineral ou vegetal, para aplicações menos nobres (ARAÚJO, 2009; HARAGUCHI et al., 2009). Esta substituição é explicada pelo fato das fibras naturais serem de baixo custo, baixa massa específica, biodegradáveis e terem origem em fontes renováveis. (FERREIRA, 2001; LEVY NETO; PARDINI, 2006).



**Figura 1 - Uso de fibras vegetais nas indústrias aeronáutica, automobilística, de calçados, eletroeletrônica, moveleira e naval. Fonte: SECTI-BA, 2009.**

A indústria recentemente incorporou o uso de fibras vegetais dentro de seus produtos, como pode ser observado na Figura 1. Um exemplo bastante positivo é a fabricação de peças automobilísticas com compósitos de matriz polimérica reforçada com fibras naturais. Exemplos comuns dessa prática são as fibras de coco, curauá e sisal, também utilizadas em aplicações nas indústrias aeronáutica, eletroeletrônica, naval, moveleira e de calçados (ARAÚJO, 2009; CHAWLA; SILVA; TOLEDO FILHO, 2008; LEVY NETO; PARDINI, 2006; PIRES, 2009).

Uma das fibras vegetais com grande potencial no uso em compósitos de matriz polimérica é o rami. A fibra da planta de rami é conhecida pelo homem a milhares de anos, porém seu uso se restringiu a fabricação de tecidos. Por muitos séculos o plantio de rami foi bastante limitado, tendo destaque apenas a produção da China; entretanto, o cultivo se estendeu recentemente para outros países, como o Brasil. Sua utilização em tecidos é fruto da elevada resistência mecânica em relação a outras fibras naturais, o que é um atrativo para a área de compósitos (BEVITORI, 2014; SOARES, 2012). Neste contexto, a proposta deste trabalho é verificar as principais propriedades mecânicas de compósitos de matriz epoxídica reforçada com fibras de rami.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Obter e caracterizar mecanicamente os compósitos de matriz epoxídica reforçada com fibras de rami.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Este trabalho tem como objetivos específicos:

- Obter os feixes de fibras da planta de rami;
- Verificar com a literatura o espectro de infravermelho da fibra obtida;
- Limpar e desaglomerar as fibras em água;
- Caracterizar a superfície e a geometria das fibras após a limpeza por meio de microscopia óptica;
- Produzir compósitos de matriz epoxídica reforçada com fibras de rami em frações mássicas de 0%, 5%, 10% e 15%;
- Caracterizar mecanicamente os compósitos produzidos por meio de ensaios de tração e de impacto Izod;
- Analisar as superfícies de fratura dos corpos de prova ensaiados.

### 3 JUSTIFICATIVA

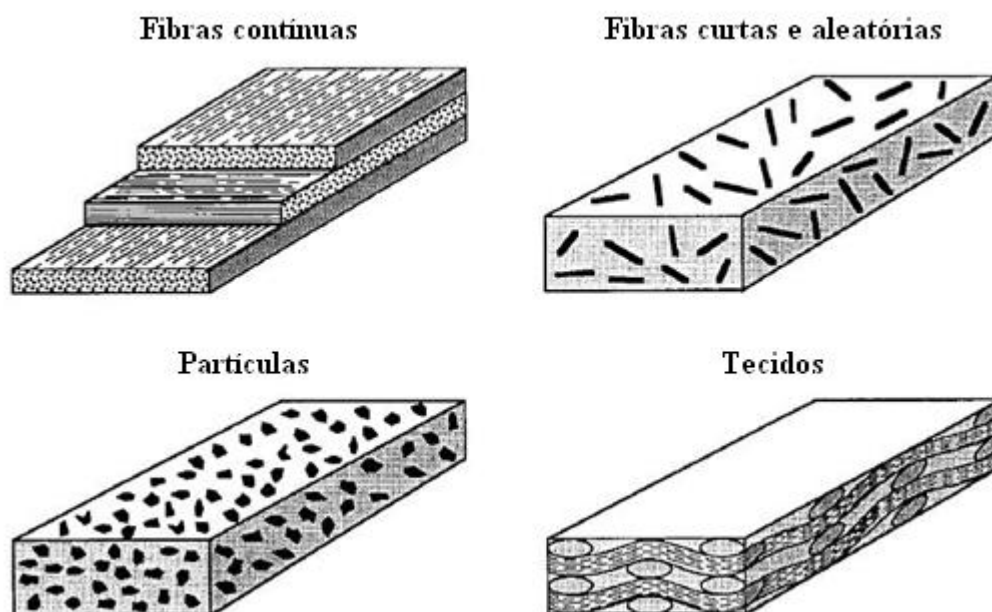
Este trabalho proporciona um estudo sobre a fibra extraída do caule da planta rami e o seu uso em compósitos de matriz epoxídica. O rami é amplamente utilizado na indústria têxtil, porém sua utilização em compósitos ainda é pequena. Portanto, esse trabalho incentiva o uso de fibras de rami na fabricação de compósitos poliméricos. Além disso, pretende-se despertar o interesse da comunidade rural e científica ao tema deste trabalho.

Pode-se citar ainda a valorização dos produtores de rami caso haja interesse no material por parte de indústrias que utilizam compósito. Este interesse apresentaria tanto um impacto social para os produtores rurais, referente à maior demanda pela produção de rami, quanto um impacto econômico para as empresas, que utilizariam um material com impacto ambiental menor e preço reduzido em relação aos compósitos de fibra sintética. Além disso, existe o incentivo ao desenvolvimento de novas tecnologias que envolvam fontes naturais renováveis e baratas que não agredam tanto o meio ambiente.

## 4 REFERENCIAL TEÓRICO

### 4.1 COMPÓSITOS

A fabricação de compósitos tem como objetivo obter um novo material com propriedades superiores aos materiais de origem, sendo comum o enfoque em excelentes propriedades mecânicas e baixa massa específica. Um compósito focado em resistência mecânica pode ser definido como a combinação de duas ou mais fases macroscopicamente distintas, as quais atuarão como reforço ou matriz, como pode ser observado na Figura 2.



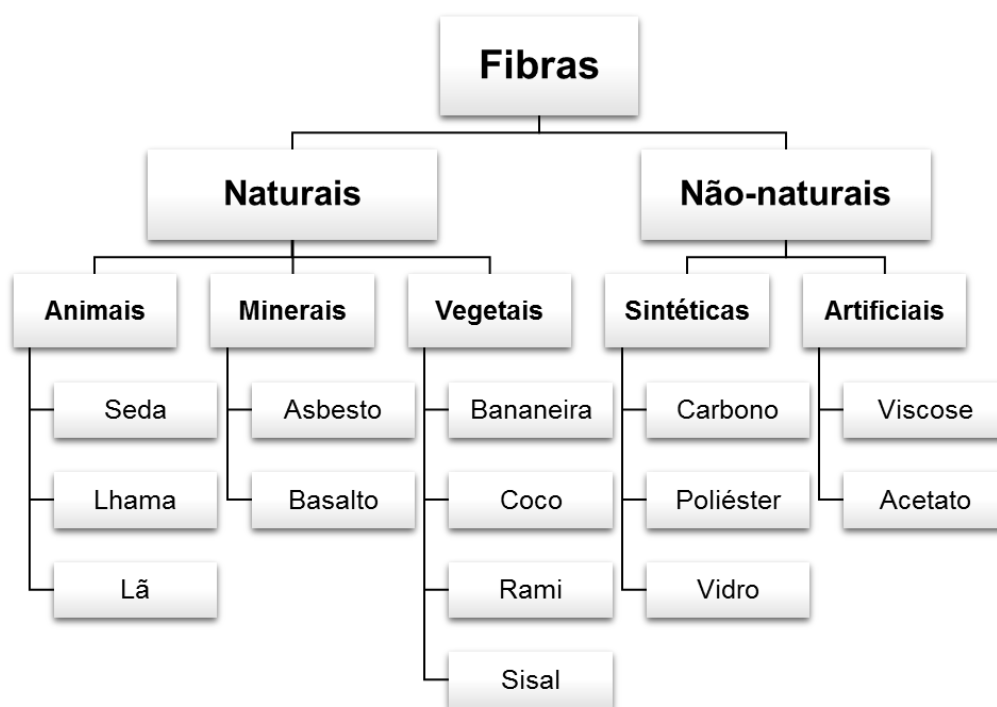
**Figura 2 - Algumas configurações de compósitos de matriz polimérica**  
Fonte: Adaptado de KUTZ, 2006.

O reforço pode apresentar diversas geometrias, sendo mais utilizado fibra, partícula e tecido. Estes componentes podem ser introduzidos na matriz de várias maneiras, por exemplo, fibras aleatoriamente distribuídas ou orientadas em uma direção de interesse. Esse é o componente responsável por fornecer resistência mecânica ao compósito. Por outro lado, a matriz envolverá o reforço permitindo estabilidade mecânica e distribuição de carga no corpo (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

Existem diversos fatores que interferem nas propriedades de um compósito, dentre eles destacam-se a natureza de cada fase, assim como a sua proporção, geometria e orientação. Por exemplo, um compósito de matriz epoxídica reforçada com fibras longas pode apresentar anisotropia em suas propriedades dependendo da orientação das fibras. De forma similar, a variação das propriedades também está relacionada com a geometria e o teor de fibras no compósito (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

## 4.2 FIBRAS NATURAIS

As fibras naturais são aquelas produzidas por fontes naturais e são classificadas como animal, mineral ou vegetal dependendo de sua origem, como pode ser observado na Figura 3.



**Figura 3 - Classificação e alguns exemplos de fibra naturais e não-naturais**  
Fonte: Adaptado de IEMI, 2011.



As fibras animais são retiradas do próprio animal ou de suas secreções, destacando-se a lã, obtida do pelo de ovelhas, e a seda, retirada de casulos produzidos por lagartas de alguns tipos de mariposas. Por outro lado, as fibras minerais têm sua origem em rochas e possuem, de maneira geral, silicatos como seu constituinte principal. A fibra de asbesto, ou amianto, é o maior representante de fibras minerais. Além da fibra de asbesto, destaca-se a fibra de basalto devido a sua alta estabilidade térmica e elevada resistência mecânica. As fibras vegetais, também denominadas de fibras lignocelulósicas, são retiradas de diversas partes da planta, como o caule, folhas e frutos (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

#### 4.2.1 Fibras Lignocelulósicas

Como já foi mencionado, as fibras lignocelulósicas podem ser extraídas de diversas partes da planta, incluindo principalmente folhas e caules. Diversos exemplos de fibras lignocelulósicas, assim como a sua origem, estão listados na Tabela 1.

**Tabela 1 - Classificação e exemplos de fibras lignocelulósicas**

<b>Origem da fibra</b>	<b>Exemplos de fibras vegetais</b>
Caules e entrecascas	Cânhamo, linho, juta e rami
Folhas	Abacá, abacaxi, bananeira, curauá, kenaf, piaçava, sisal
Frutas e sementes	Açaí, Algodão, baobá, coco, sumaúma
Gramíneas e juncos	Arroz, cevada, trigo, milho
Madeiras	Bordo, eucalipto e pinheiro

**Fonte: Adaptado de YOUNG (1997).**

As fibras lignocelulósicas, possuem resistência mecânica à tração interessante para a fabricação de compósitos de baixa massa específica. Embora possuam propriedades mecânicas inferiores à maioria das fibras sintéticas, as fibras lignocelulósicas possuem certas vantagens, destacando-se principalmente a origem de fontes renováveis e baixo custo de produção (ARAÚJO, 2009; CHAWLA; SILVA; TOLEDO FILHO, 2008; LEVY NETO; PARDINI, 2006). A Tabela 2 compara a

resistência à tração ( $\sigma_T$ ), módulo de elasticidade ( $E$ ), deformação final ( $\varepsilon_T$ ), e massa específica ( $\rho$ ) de algumas fibras lignocelulósicas e sintéticas.

**Tabela 2 - Propriedades mecânicas de fibras vegetais e sintéticas**

Fibra	$\sigma_T$ (MPa)	$E$ (GPa)	$\varepsilon_T$ (%)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
Algodão	287 - 597	5,5 - 12,6	7,0 - 8,0	1,5 - 1,6
Curauá	636 - 1.000	26 - 36	2 - 4	1,1
Coco	95 - 149	2,80 - 13,7	3,3 - 5,1	1,18 - 1,45
Juta	320 - 773	12,0 - 128	1,3 - 2,8	1,3 - 1,5
Linho	345 - 1035	27,6	2,7 - 3,2	1,5
Malva	160	17,4	5,2	1,41
Piaçava	143	5,60	5,9	1,0 - 1,2
Rami	393 - 900	7,30 - 25,0	1,8 - 5,3	1,51
Sisal	126 - 800	3,80 - 62,0	2,8 - 10	1,27 - 1,50
PBO (1)	5.800	180	-	1,55
T-1000 (2)	7.050	290	-	-
Thornel P-120 (3)	2.400	830	0,30	-
Vidro E (4)	2.000 - 3.500	70,0	2,5	2,54
Vidro S (5)	4.570	86,0	2,8	2,55

Fonte: Adaptado de ARAÚJO, 2009; CHAWLA; SILVA; TOLEDO FILHO, 2008; LEVY NETO; PARDINI, 2006; AMBRISIO et al., 2008.

**Notas:**

- (1) PBO é o estado da arte em fibras de reforços poliméricos;
- (2) Fibra de carbono de ultra-alta resistência derivada de poliacrilonitrila;
- (3) Fibra de carbono de ultra-alto módulo derivada de piche;
- (4) Fibra de vidro para aplicações elétricas;
- (5) Fibra de vidro para aplicações militares.

#### 4.2.2 Constituintes das fibras lignocelulósicas

De um ponto de vista fundamental, as fibras lignocelulósicas são constituídas de celulose, hemicelulose, pectina e lignina. A celulose é um componente semicristalino, enquanto que a hemicelulose, pectina e lignina são amorfas. É importante ressaltar que a lignina e outros açúcares são solúveis em água e solventes orgânicos (ALVES, 2011; ARAÚJO, 2009; BEVITORI, 2014). As porcentagens dos principais componentes que formam as fibras lignocelulósicas podem ser conferidas na Tabela 3.

**Tabela 3 - Composição dos principais constituintes de algumas fibras vegetais**

<b>Fibra</b>	<b>Celulose (%)</b>	<b>Hemicelulose (%)</b>	<b>Lignina (%)</b>	<b>Pectina (%)</b>
Algodão	91,80	6,30	-	-
Curauá	73,6	9,9	7,5	-
Juta	60,0	22,1	15,9	1,0
Linho	64,1	16,7	2,0	1,8
Rami	68,60	13,10	0,60	1,90
Sisal	73,10	13,30	11,00	0,90

Fonte: ARAÚJO, 2009; BEVITORI, 2014.

A celulose é o principal constituinte da parede celular de plantas superiores. Este componente consiste em um polissacarídeo linear de alta massa molar, cuja unidade de repetição é a celobiose. Devido à presença de grupos hidroxilas, este polissacarídeo faz ligações de hidrogênio intra e intermolecular, o que permite o desenvolvimento de fibrilas semicristalinas. Estas ligações de hidrogênio e a estrutura fibrilar fornecem boa resistência à tração, mas pouco alongamento e solvatação (ALVES, 2011; BEVITORI, 2014; FERREIRA, 2001).

A hemicelulose, também chamada de poliose, está associada a celulose e lignina na parede celular. Sua composição envolve diversas unidades de açúcares formando um polissacarídeo amorfo de baixa massa molecular que pode ser solubilizado em água e solventes orgânicos (ALVES, 2011; BEVITORI, 2014; FERREIRA, 2001).

A lignina pode ser considerada o segundo componente mais abundante em plantas vasculares. Ela pode ser considerada um polímero fenólico amorfo formado a partir de três álcoois: álcool coniferílico, sinapílico e p-cumarílico. Desta forma, é possível entender que a lignina é uma macromolécula complexa e que sua estrutura é única para cada planta. Independentemente de sua estrutura, a principal função da lignina é endurecer a estrutura fibrilar de celulose, envolvendo e fixando cada fibrila, além de funcionar como barreira contra a degradação (ALVES, 2011; BEVITORI, 2014; FERREIRA, 2001).

Desse modo, a resistência mecânica das fibras lignocelulósicas é resultado de seus constituintes. Pode-se considerar a fibra em si um compósito, onde o reforço consiste em microfibrilas de celulose, resistentes mecanicamente, e a matriz pela hemicelulose e lignina, a qual envolvem a celulose permitindo a distribuição de carregamentos mecânicos.

### 4.2.3 Fibra de rami

A planta de rami da espécie *Boehmeria nivea* pertence à ordem natural das Urticáceas. O rami possui folhas características em formato de coração com um tom prateado na face inferior, como pode ser observado na Figura 4. Esta espécie de urtiga cresce entre alturas de 1,2 a 2,4 metros e pode render entre 3 a 4 safras por ano (BEVITORI, 2014).



**Figura 4 - Planta de rami (*Boehmeria nivea*)**  
**Fonte: SCAMPERDALE, 2013.**

A planta de rami era produzida no sudeste de São Paulo, entretanto a produção se expandiu para o estado do Paraná, principalmente na área rural de Londrina. O município de Londrina, até o final da década de noventa, possuía em torno de 130 produtores, os quais produziam cerca de 15 hectares cada (LUZ; NOLASCO; SAVASTANO JUNIOR, 1997; BEVITORI, 2014). Recentemente, a produção de rami se espalhou em pequena quantidade para outras regiões, se destacando principalmente o nordeste brasileiro (BEVITORI, 2014).

Atualmente a produção de rami se encontra em declínio, sendo substituída por outras culturas mais rentáveis para o produtor rural. A fibra de rami é proveniente do tecido fibroso da planta, o qual se encontra no caule. A retirada do tecido fibroso é realizada manualmente pelos trabalhadores ou então em uma máquina de desmembramento. Após o desmembramento, as fibras são normalmente secas e

alvejadas no sol. A fibra proveniente do rami é uma fibra longa, atingindo entre 150 a 200 milímetros de comprimento, e possui elevadas propriedades mecânicas, como pode ser visto na Tabela 2, sendo uma das fibras vegetais mais resistentes (BEVITORI, 2014).

As propriedades mecânicas da fibra de rami são derivadas de sua microestrutura, sendo constituída por um feixe de fibrilas ocas de celulose envolvidas e ligadas por uma matriz de lignina e hemicelulose, as quais protegem e enrijecem o feixe (ALVES, 2011; BEVITORI, 2014). Segundo Bevitori (2014), o feixe é composto por fibrilas que se arranjam em forma de espiral. Quanto menor o ângulo entre as fibrilas e o eixo da fibra, melhor será a resistência e rigidez da fibra. A autora também menciona que as propriedades da fibra de rami são dependentes da quantidade e distribuição de imperfeições, as quais são facilmente encontradas em fibras lignocelulósicas.

Devido a sua resistência mecânica, a planta de rami é cultivada principalmente para fins têxteis, destacando-se a fabricação de sacarias, tapeçarias, cordas, barbantes e roupas. Pode-se utilizá-la ainda como fonte de celulose na produção de papel moeda, além de alimento devido ao seu poder nutritivo (BEVITORI, 2014).

#### 4.3 RESINA EPOXÍDICA

As resinas epoxídicas são polímeros termorrígidos que possuem grupos oxiranos terminais (LEVY NETO; PARDINI, 2006; RODRIGUES, 1992). Este termorrígido tem como base o diglicidil éter do bisfenol A (DGEBA), representado na Figura 5. Este componente é comumente sintetizado a partir de epicloridrina e bisfenol A em diversas relações molares, as quais resultam em propriedades diferentes. Dependendo da relação molar utilizada, as resinas epoxídicas do tipo DGEBA podem ser fluidas, viscosas ou até mesmo sólidas. Quanto maior o valor de 'n', maior será a massa molar da molécula, assim como a sua viscosidade ou ponto de fusão dependendo do estado físico em que se encontra (LEVY NETO; PARDINI, 2006; RODRIGUES, 1992).

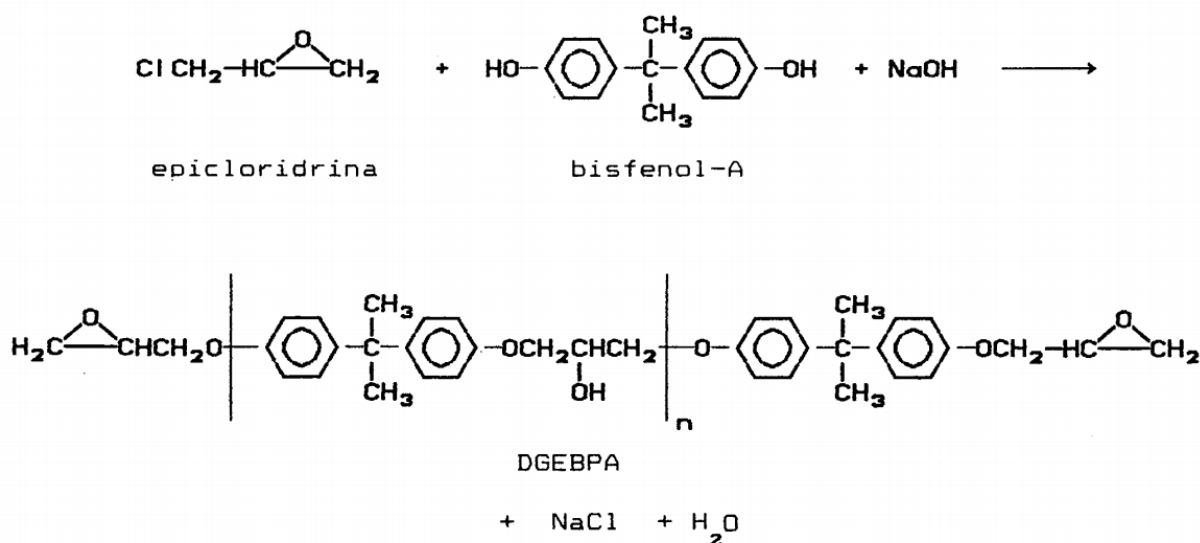


Figura 5 - Reação química entre epicloridrina e bisfenol A  
 Fonte: RODRIGUES (1992).

Para se reticular a resina epoxídica, é necessário atacar o grupo epóxi, o qual é suscetível a diversos compostos (RODRIGUES, 1992). Dentre os agentes de cura, destacam-se as aminas alifáticas e as aminas aromáticas. Devido a sua estrutura molecular, as aminas aromáticas são menos reativas e necessitam de altas temperaturas de cura, geralmente entre 150 e 180°C. Por outro lado, as aminas alifáticas são altamente reativas, o que pode ser observado pelo curto tempo de gel mesmo em temperatura ambiente (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

Um outro agente de cura para resinas epoxídicas são os endurecedores anidridos, os quais são menos reativos que as aminas aromáticas e, portanto, proporcionam uma cura relativamente longa. É importante ressaltar que a reação de cura envolve apenas os grupos oxiranos reativos as extremidades da cadeia polimérica da resina, sendo assim um processo de cura relativamente simples se comparado com outras resinas (LEVY NETO; PARDINI, 2006, RODRIGUES, 1992).

A resina epoxídica é uma das mais utilizadas na área de compósitos, apresentando boa compatibilidade com fibras vegetais e propriedades mecânicas interessantes. De acordo com Levy Neto e Pardini (2006), as resinas epoxídicas exibem alto desempenho mecânico. Para os autores, o termorrígido apresenta resistência a tração entre 40 e 90 MPa, resistência à compressão entre 100 e 220 MPa, módulo de elasticidade entre 2,5 e 6,0 GPa e deformação de ruptura de até 6%. Entretanto é importante ressaltar que as propriedades mecânicas da resina são

dependentes de seus precursores e dos parâmetros de processamento, como a temperatura de cura e pressão utilizada.

#### 4.4 ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO

A espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) consiste em analisar, de forma rápida, a energia na região do infravermelho absorvida por uma amostra quando um feixe de luz infravermelha é emitido através da mesma. A energia absorvida pela amostra permite o aumento da frequência de vibração e estiramento das ligações químicas das moléculas que a constituem. Desta forma é possível relacionar as ligações químicas com as faixas de absorção do espectro de infravermelho (SKOOG, 2009). A Tabela 4 mostra as bandas de absorção características de fibras lignocelulósicas.

**Tabela 4 - Bandas de absorção características de fibras lignocelulósicas**

<b>Origem da banda</b>	<b>Posição da banda</b>
Estiramento de O-H	3450 – 3400
Estiramento O-H (alifático e aromático)	3050 – 2840
Estiramento C=O (grupos carboxílicos, ésteres e cetonas não conjugadas)	1740 – 1710
Estiramento C=O em conjugação com anel aromático	1675 – 1660
Vibração de anel aromático	1605 – 1600
Vibração de anel aromático	1515 – 1505
Deformação de C-H	1470 – 1460
Vibração de anel aromático	1430 – 1425
Deformação de C-H	1370 – 1365
Respiração de anel Siringílico	1330 – 1325
Respiração de anel Guaiacílico	1275 – 1270
Estiramento de C-C	1230 – 1220
Estiramento de C-O	1230 – 1220
Estiramento C-O de grupos ésteres conjugados em lignina amorfa	1172
Deformação de C-H	1085 – 1030
Deformação de C-O	1085 – 1030
C-H fora do plano em unidades de p-hidroxifenil	835

Fonte: Adaptado de FAIX, 2009.

A FTIR é uma ferramenta fundamental para a caracterização de fibras vegetais, principalmente após algum tratamento químico ou químico-mecânico. Choudhury et al. (2016) realizaram uma espectroscopia de infravermelho, pelo método de reflexão total atenuada, da fibra de rami. Os resultados mostram picos característicos da estrutura da fibra de rami crua, como bandas características da hemicelulose em  $2854\text{ cm}^{-1}$  e  $2924\text{ cm}^{-1}$ , estiramento da ligação C-H, e em  $1744\text{ cm}^{-1}$  e  $1611\text{ cm}^{-1}$ , estiramento da ligação C=O. Foi observado também picos em  $1315\text{ cm}^{-1}$  referente ao estiramento das ligações C-H e deformação das ligações C-O de polissacarídeos. Por fim, o pico em  $1026\text{ cm}^{-1}$  está relacionado ao estiramento das ligações C-O e O-H pertencentes a celulose.

#### 4.5 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

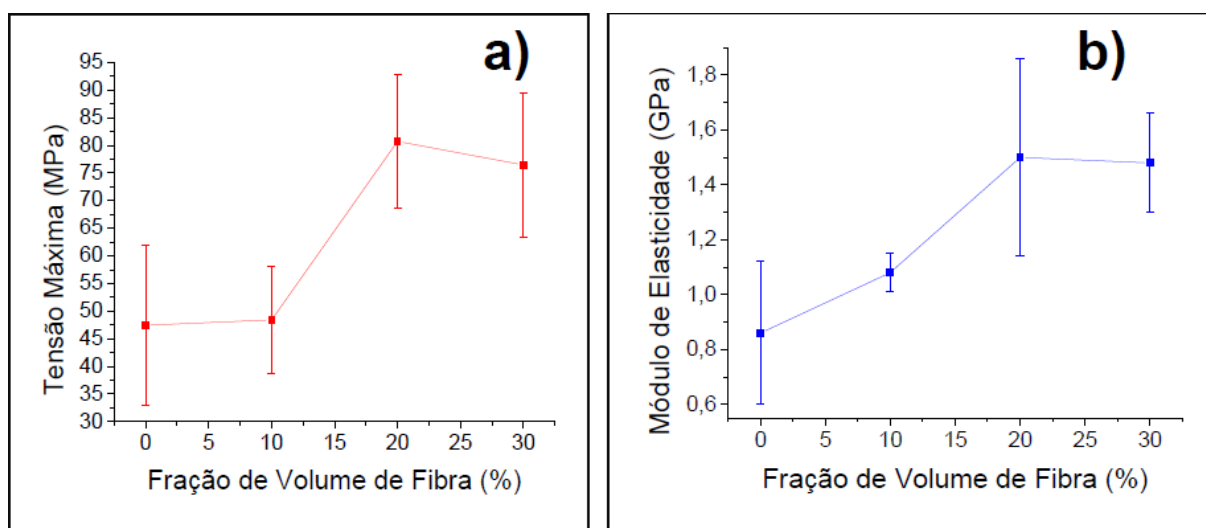
O ensaio de resistência a tração consiste na aplicação de uma carga de tração causando deformação crescente sobre um corpo de prova. Este ensaio revela algumas propriedades mecânicas da amostra, como módulo de elasticidade, limite de resistência à tração, tensão de ruptura, tenacidade, entre outros. É recomendado que o corpo de prova seja padronizado de acordo com a norma que rege o ensaio de tração para certo material (GARCIA et al., 2000).

As propriedades mecânicas de fibras de rami individuais e compósitos de rami em resina epoxídica e poliéster foram estudadas por Bevitori (2014). Foi observado que a fibra de rami não possui nenhuma deformação plástica após o regime elástico. A autora, junto com seu grupo de pesquisa, também identificou uma relação inversamente proporcional entre a resistência à tração e o diâmetro da fibra quando ensaiada individualmente. Isto pode ser explicado devido à presença de fibrilas relativamente menores em fibras mais finas. Como já esperado, a incorporação da fibra de rami em uma matriz termorrígida permitiu o aumento da resistência à tração e módulo de elasticidade, além da redução da elongação do compósito, tanto para a resina epoxídica quanto para a resina de poliéster (BEVITORI, 2014; MARGEM et al., 2013; OLIVEIRA et al., 2013).

Os melhores resultados obtidos pelo grupo para os compósitos de matriz epoxídica reforçada com fibra de rami incluem resistência à tração de  $60,80 \pm 16,69$



MPa e módulo de elasticidade de  $1,44 \pm 0,20$  GPa. Estes dados representam um aumento de propriedades mecânicas de aproximadamente 95% em relação à resina epóxi pura, conforme pode ser confirmado na Figura 6. É importante ressaltar que foram analisadas frações volumétricas de até 30% para ambos os compósitos (BEVITORI, 2014; MARGEM et al., 2013; OLIVEIRA et al., 2013).



**Figura 6 - Propriedades mecânicas dos compósitos de fibra de rami. (a) Variação da tensão máxima em função da fração volumétrica de fibras; (b) Variação do módulo de elasticidade em função da fração volumétrica de fibras.**

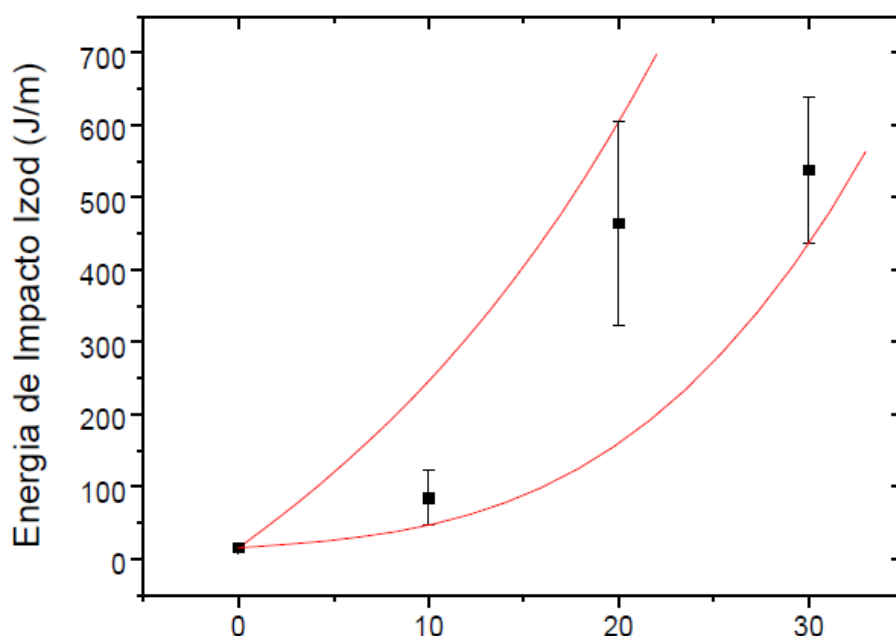
Fonte: OLIVEIRA et al., 2013.

Outro resultado importante foi observado por Soares (2012) após a realização de ensaios de tração em compósitos de matriz epoxídica reforçados com fibras unidirecionais de rami até fração volumétrica de 60%. A autora identificou que a resistência à tração dos compósitos se manteve praticamente constante para frações volumétricas acima de 40%. Foi observado também a boa aderência das fibras de rami na resina epoxídica devido à falta de arrancamento das fibras por meio do ensaio de tração.

#### 4.6 ENSAIO DE IMPACTO

O ensaio de impacto consiste no impacto de um martelo em um corpo de prova. A altura de onde o pendulo de impacto é liberado e o tipo de martelo e de corpo de prova são determinados por normas técnicas. Com o impacto, o material absorverá

a energia do martelo à medida que o corpo de prova se deforma e fratura. Se o material falhar com o esforço de flexão mediante impacto, é possível determinar a energia absorvida pelo material por meio da diferença de altura entre a posição inicial e final do pêndulo. Esta energia corresponde a energia necessária para a fratura do material e depende do material utilizado, temperatura do material, geometria do corpo de prova e taxa de deformação exercida pelo pêndulo (GARCIA et al., 2000).

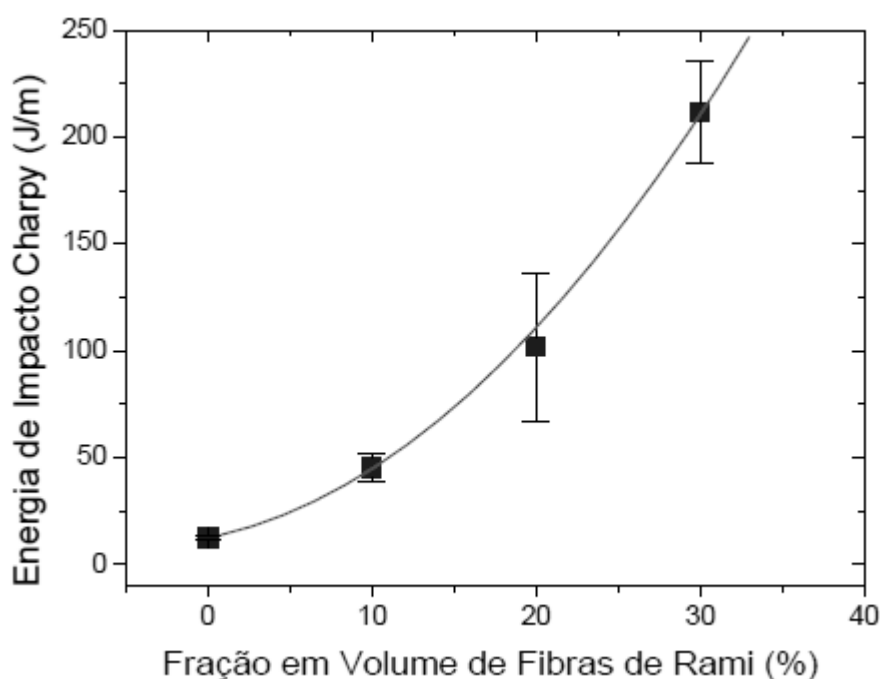


**Figura 7 - Energia de impacto Izod de compósitos de resina poliéster em junção da fração volumétrica de fibras de rami.**  
Fonte: MARGEM, 2009.

Após analisar a resistência ao impacto Izod de compósitos de matriz de resina poliéster reforçada com fibra de rami até um teor de 30% em volume de fibras, Margem (2009) observou uma relação exponencial entre a energia absorvida pelo compósito e a fração volumétrica. O compósito com 30% em volume de fibra de rami obteve a maior resistência ao impacto, sendo cerca de 35 vezes superior à resistência ao impacto da resina poliéster pura. De acordo com o autor, esse desempenho é resultado da dificuldade de ruptura atribuída pelas fibras de rami, assim como a ótima interação fibra/matriz do compósito. Os resultados dos ensaios de impacto realizados por Margem estão disponíveis na Figura 7 (MARGEM, 2009).

Monteiro (2009) e seu grupo de pesquisa analisou a resistência ao impacto Charpy de compósitos de matriz epoxídica e de resina poliéster reforçadas com fibra de rami até um teor de 30% em volume de fibras. Assim como Margem (2009), o grupo

também observou uma relação exponencial entre a energia absorvida pelo compósito e a fração volumétrica. Embora a resina de poliéster tenha apresentado resultados mais interessantes, a adição de fibras de rami aumentou consideravelmente a resistência ao impacto de ambos os compósitos de matriz termorrígida, observando-se um aumento de 17 vezes para os compósitos de matriz epoxídica, como pode ser observado na Figura 8. Os compósitos de fibras de rami apresentaram sinais de adesão, o que comprova a compatibilidade entre a matriz e o reforço. Foi identificado também um aumento do desvio padrão com teores de fibras maiores, o que é explicado pela maior probabilidade de defeitos comuns em fibras lignocelulósicas



**Figura 8 - Energia de impacto Charpy de compósitos epoxídicos com fração em volume de fibras de rami.**

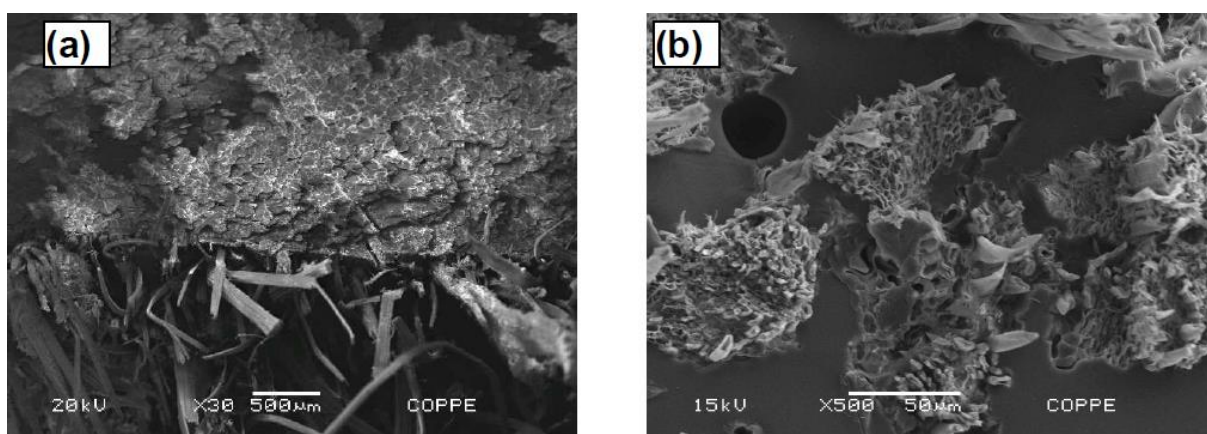
Fonte: MONTEIRO; MARGEM; SANTOS, 2009.

#### 4.7 MICROSCOPIA

Microscopia é a ciência que estuda objetos de tamanho reduzido a partir do uso de uma ferramenta ou equipamento, como lupa ou microscópio. A microscopia ótica é uma técnica utilizada para analisar objetos por meio de um microscópio ótico.

Embora não atinja magnificação extremamente alta quanto um microscópio eletrônico, o microscópio ótico ainda permite verificar a adesão entre fibra e matriz de um compósito polimérico.

Margem (2009) utilizou um microscópio eletrônico de varredura para analisar a fratura de compósitos epoxídicos reforçados com fibra de rami partidos por impacto Izod. As imagens obtidas pelo autor estão dispostas na Figura 9, onde é possível identificar fibras descoladas e fibras fraturadas. De acordo com Margem (2009), os compósitos com fração volumétrica de 20% e 30% em fibra foram fraturados preferencialmente na superfície entre fibra e matriz, devido à baixa tensão de cisalhamento da interface. Embora a tensão necessária seja baixa, a grande área envolvida nesta fratura, devido a quantidade de fibra, demanda uma grande quantidade de energia para ser fraturada. Assim, a adição de fibra de rami na matriz epoxídica resultou em um grande aumento na resistência ao impacto do compósito.



**Figura 9 - Superfície de fratura do corpo de prova do compósito epoxídico com 30% de fibras de rami. (a) Vista geral com baixo aumento; (b) Detalhes com maior aumento**  
Fonte: MARGEM (2009).

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia aplicada para a realização deste trabalho se encontra resumida na Figura 10.



**Figura 10 - Resumo da metodologia aplicada neste trabalho. Fonte: Autoria própria.**

## 5.1 AQUISIÇÃO DAS AMOSTRAS DE RAMI

As amostras de rami utilizadas neste trabalho foram adquiridas por meio de barbantes de rami bruto, ilustrados na Figura 11, os quais foram fabricados com matéria-prima da região de Londrina.



**Figura 11 - Amostra de barbante de fibra de rami utilizado no trabalho**  
**Fonte: Autoria própria.**

## 5.2 ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO

Foram realizadas FTIR antes da limpeza das fibras com o objetivo de verificar se o produto adquirido era realmente fibra de rami. Para se realizar a FTIR, utilizou a técnica de pastilhamento com pó de KBr para a confecção das amostras. O barbante foi cortado no menor tamanho possível, sendo posteriormente moído com um almofariz e pistilo. Pastilhas de KBr de 500 mg foram confeccionadas com uma proporção de 1% de fibra e prensadas com o auxílio de uma prensa manual. Foi obtido o espectro de infravermelho dentro da faixa de  $400\text{ cm}^{-1}$  e  $4000\text{ cm}^{-1}$ .

### 5.3 LIMPEZA E DESAGLOMERAÇÃO DAS FIBRAS DE RAMI

Para incorporar as fibras de rami na resina epóxi, realizou-se uma limpeza das impurezas presentes nas fibras do barbante, assim como a sua desaglomeração. Foi utilizado um béquer de 1 litro preenchido com água deionizada, a qual foi aquecida por meio de um agitador magnético com aquecimento. Com o auxílio de um termômetro digital, a água foi mantida a 60°C e as fibras ficaram imersas durante 1 hora. Após a limpeza, as fibras de rami foram secas em estufa a 60°C até massa constante. Em seguida, os feixes que compõe o barbante foram isolados manualmente e desaglomerados com o uso de lixas metalográficas de granulometria 80. Por fim, as fibras foram cortadas em tamanhos de 1 cm de comprimento.

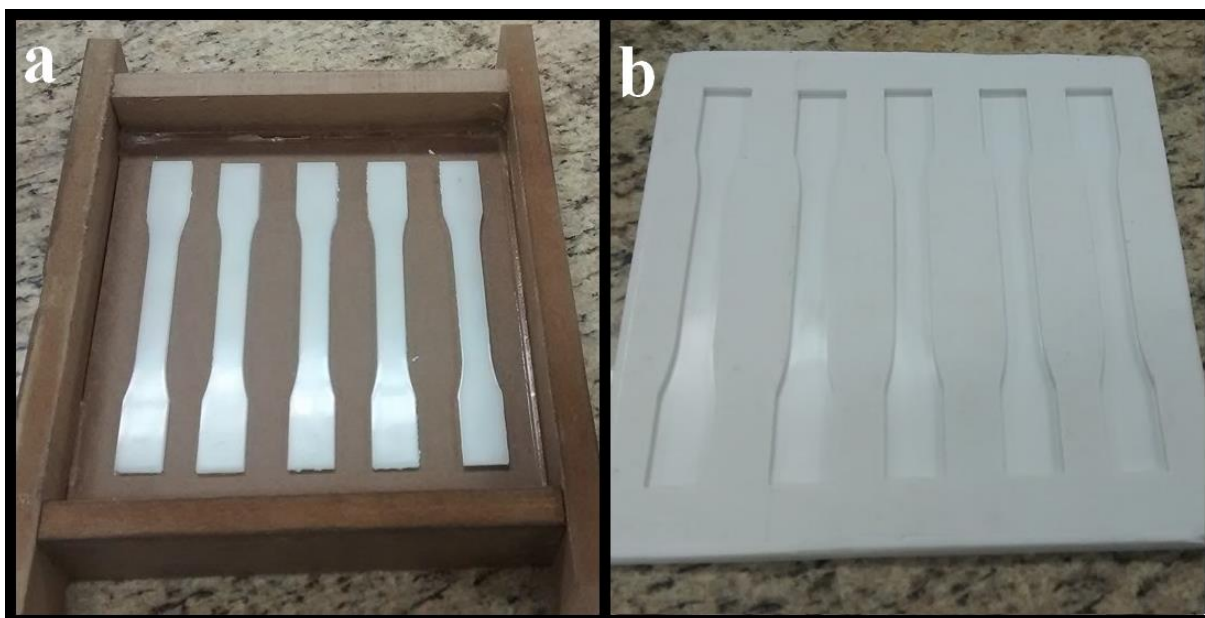
### 5.4 MICROSCOPIA

O feixe de fibras de rami e as fibras limpas e desaglomeradas foram observadas com o uso de um microscópio óptico da marca Zeiss com o intuito de analisar o diâmetro médio do feixe e da fibra e a superfície da fibra de rami. O diâmetro médio foi identificado a partir da média aritmética de 5 medidas ao longo das fibras observadas. Além disso, os compósitos fabricados e suas superfícies de fratura foram analisadas utilizando-se uma câmera da Samsung de 16 megapixel.

### 5.5 PREPARAÇÃO DOS MOLDES

O processo de fabricação das amostras de compósito necessitou da confecção de moldes onde ocorreriam a prensagem e cura da resina epoxídica. Optou-se por fabricar dois moldes de borracha de silicone branca da marca Siqmol: o primeiro com 5 cavidades de corpos de tração do tipo 1; e o segundo com 4 cavidades de corpos de impacto Izod D sem entalhe, o qual será adicionado posteriormente.

Para a confecção do molde de silicone, uma caixa de madeira foi preparada para o vazamento do silicone em cima de modelos dos corpos de prova desejados, como pode ser observado na Figura 12a no caso do molde de amostras de tração. Para a cura, utilizou-se 5% de catalizador e o desmolde ocorreu 24 horas após o vazamento, obtendo-se o molde de silicone, como pode ser observado na Figura 12b. Os modelos utilizados na confecção dos moldes de silicone já possuíam as dimensões dos corpos de prova de acordo com as respectivas normas. Para o ensaio de tração, foi adotada a norma ASTM D638-14 e para o ensaio de impacto Izod, a norma ASTM D256-10.



**Figura 12 - Confecção do molde de silicone. (a) Suporte de madeira e corpos de prova de tração tipo 1 utilizados no vazamento do silicone e catalizador; (b) Molde de silicone curado após 24 horas do vazamento**

Fonte: Autoria própria.

## 5.6 PREPARAÇÃO DOS COMPÓSITOS

Para a confecção dos compósitos foi utilizado o sistema de resina epoxídica SQ2004 e SQ3154 da marca Redelease, a qual consiste em um pré-polímero feito pela reação de epicloridrina e bisfenol A e um endurecedor à base de poliamina modificado. De acordo com o fabricante, esta resina possui boa fluidez e simples



processamento, o que facilita na preparação do compósito. Algumas propriedades da resina após a cura se encontram na Tabela 5.

**Tabela 5 - Propriedades do sistema de resina epoxídica SQ2004 e SQ3154**

Propriedade da Resina	Valor
Temperatura de Deflexão Térmica	70 – 80°C
Resistência à compressão	27,6 MPa
Resistência à tração	20,7 – 42,7 MPa
Elongação	4,9%
Energia de Impacto Izod	16,0 – 32,0 J/m
Dureza Barcol	20 – 30

Fonte: Adaptado de SILAEX QUÍMICA LTDA, 2004.

Para este trabalho, foram produzidos compósitos de matriz epoxídica reforçada com fibras de rami aleatoriamente orientadas em frações mássicas de 0%, 5%, 10% e 15%. Iniciou-se a fabricação do compósito com a mistura da resina e endurecedor numa proporção em massa de 2:1, respectivamente. A mistura foi realizada cuidadosamente para evitar o aparecimento de bolhas. Após a homogeneização, foram adicionadas as fibras de rami as quais absorveram grande parte da resina, criando uma massa fibrosa. A massa foi então alocada nas cavidades do molde em quantidades iguais com o auxílio de uma balança semi-analítica. Por fim, as amostras foram prensadas com 8 kg, cerca de 2 MPa, e desmoldadas após a sua cura parcial em temperatura ambiente. Para os corpos de prova que apresentaram rebarbas, estas foram removidas manualmente ou com o auxílio de uma mini retífica. Foram confeccionados 5 corpos de prova para cada composição.

## 5.7 ENSAIOS DE TRAÇÃO

O ensaio de tração foi realizado com uma máquina universal eletrônica de ensaios da marca Time Group, com parâmetros definidos pela norma ASTM D638, já que esta é a mais recomendada para compósitos com fibras aleatoriamente orientadas (ASTM, 2014). A velocidade de deslocamento das garras foi de

2 mm.min<sup>-1</sup>. As propriedades mecânicas do compósito foram obtidas pela média aritmética dos valores retirados dos gráficos de tração fornecidos pelo equipamento.

## 5.8 ENSAIOS DE IMPACTO IZOD

O ensaio de impacto foi realizado com um pêndulo de impacto analógico Izod/Charpy da marca PANTEC de acordo com a norma D256-10. Foram ensaiados corpos de prova tipo Izod D como demonstrado na Figura 13a. O entalhe em formato V com ângulo de 45° foi feito manualmente com a ajuda de uma lima triangular usinada no ângulo adequado, como pode ser visto na Figura 13b. A energia absorvida pelo compósito foi calculada pela média aritmética dos resultados fornecidos pelo equipamento.

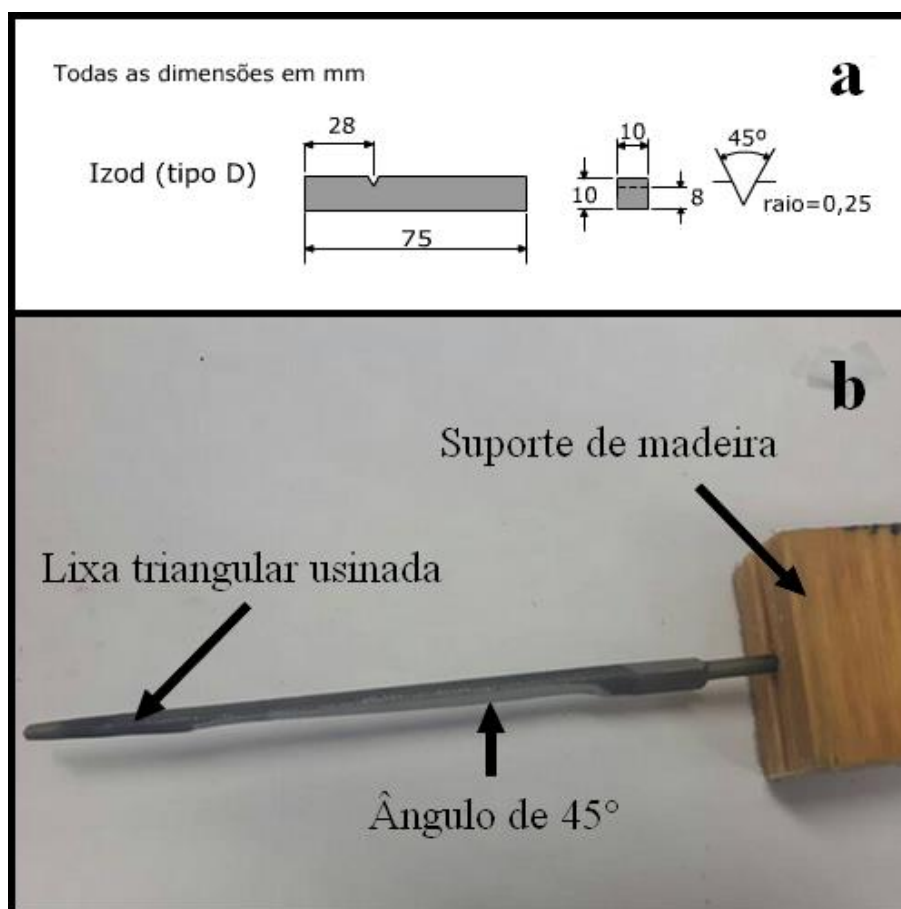
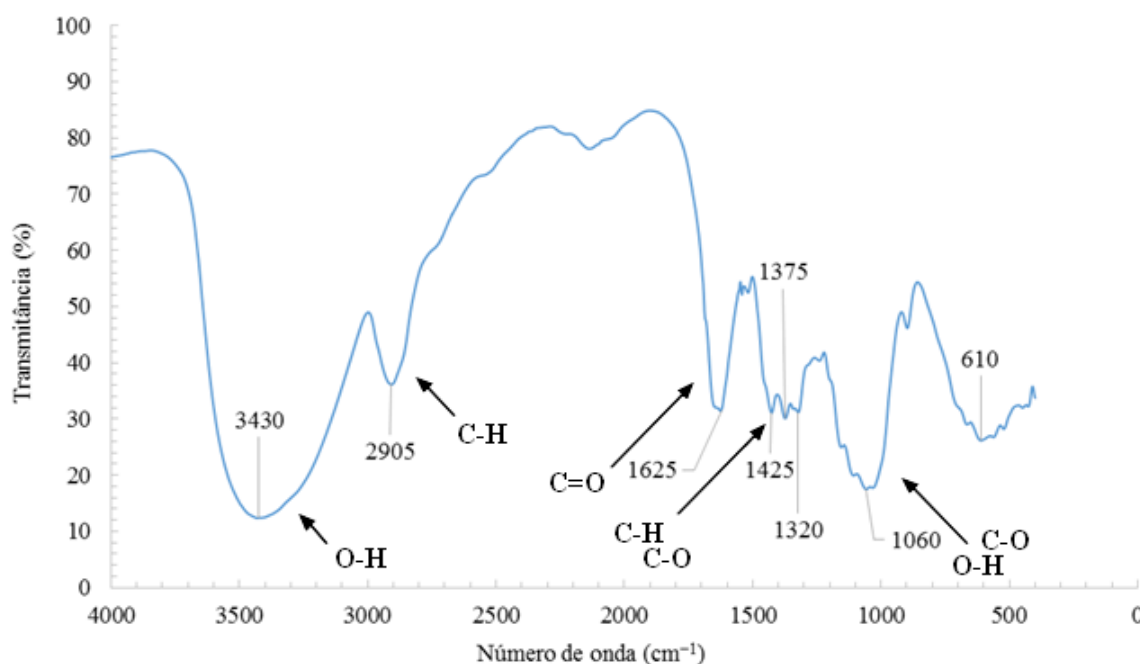


Figura 13 - Impacto Izod. (a) Dimensões do corpo de prova de impacto tipo Izod D; (b) Ferramenta utilizada para criar o entalhe em V  
Fonte: Adaptado de Grupo CIMM (2016).

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO

O espectro de infravermelho obtido das amostras de barbante está representado na Figura 14. Comparando-se os picos da Figura 14 com aqueles encontrados por Choudhury (2016) é possível confirmar que as amostras obtidas são realmente fibras de rami.



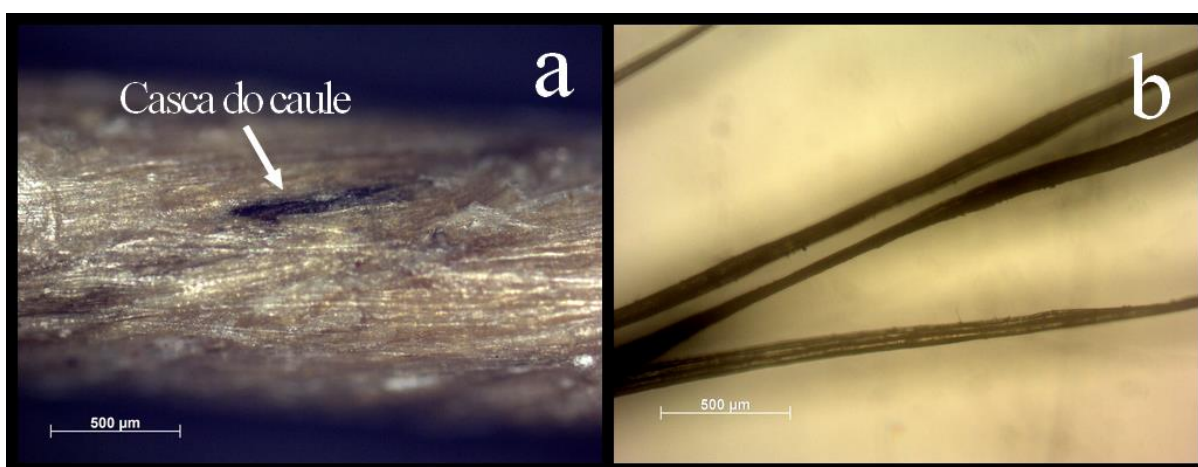
**Figura 14 - Espectro de infravermelho da amostra de barbante seco**  
 Fonte: Autoria própria.

O espectro de infravermelho apresenta bandas características das estruturas de celulose, hemicelulose e polissacarídeos. O pico em  $1060\text{ cm}^{-1}$  representa o estiramento das ligações C-O e O-H da celulose. A hemicelulose está representada pela banda em  $2905\text{ cm}^{-1}$  e  $1625\text{ cm}^{-1}$ , devido ao estiramento das ligações C-H e C=O, respectivamente. As bandas entre  $1450\text{ cm}^{-1}$  e  $1300\text{ cm}^{-1}$  são causadas devido a absorção de infravermelho pelo estiramento das ligações C-H e deformações das ligações C-O de polissacarídeos. Por fim, o pico em  $3430\text{ cm}^{-1}$  representa o

estiramento da ligação O-H, devido principalmente à presença de água que não foi eliminada na secagem (CHOUDHURY et al., 2016).

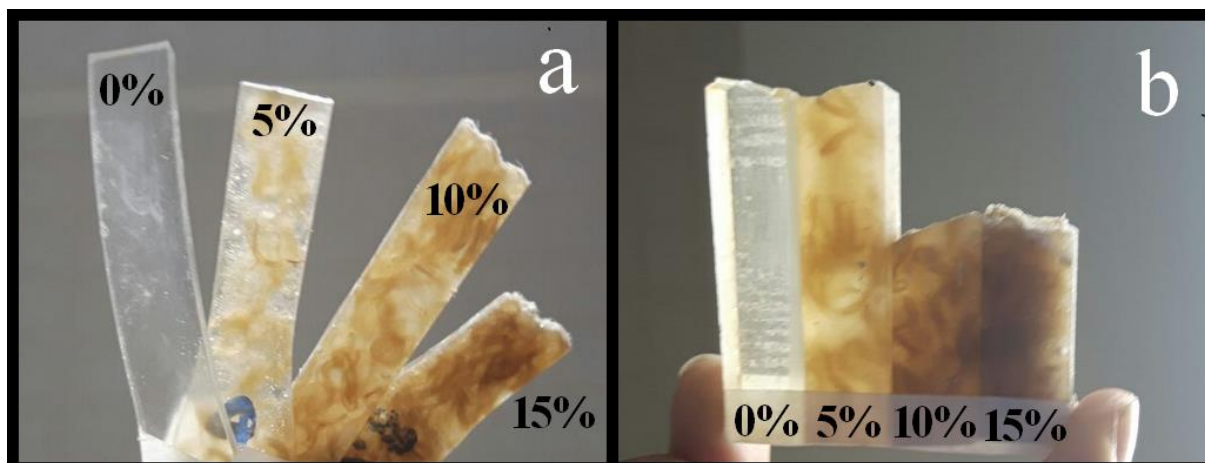
## 6.2 CONFECÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras dos compósitos foram confeccionadas a partir das fibras limpas e desaglomeradas oriundas dos feixes de fibra do barbante. Parte do feixe de fibras de rami, o qual possuía cerca de  $1,14 \pm 0,03$  mm de diâmetro, está ilustrado na Figura 15a. Foi possível observar ainda restos da casca do caule da planta, o que confirma a natureza bruta da matéria-prima. A Figura 15b exibe as fibras de rami após o processo de lavagem e desaglomeração. As fibras individuais apresentaram diâmetro médio de  $48 \pm 17$   $\mu\text{m}$  e uma superfícies relativamente lisa com pouquíssimas microfibrilas.



**Figura 15 - Microscopia ótica das amostras de barbante em magnificação de 50x. (a) Feixe das fibras de rami; (b) Fibras de rami limpas e desaglomeradas**  
Fonte: Autoria própria.

A Figura 16 mostra alguns corpos de prova para ambos os ensaios iluminados com uma fonte de luz. Foi possível observar nessas imagens que a dispersão das fibras dentro da matriz epoxídica foi homogênea e que é possível identificar as diferentes porcentagens pela quantidade de fibras presentes nos corpos de prova. Foi possível observar ainda que alguns feixes de fibra não foram totalmente desaglomerados.



**Figura 16 - Dispersão homogênea das fibras de rami nos corpos de prova. (a) Corpos de prova do ensaio de tração; (b) Corpos de prova do impacto Izod**  
 Fonte: Autoria própria.

### 6.3 DEFEITOS MACROSCÓPICOS

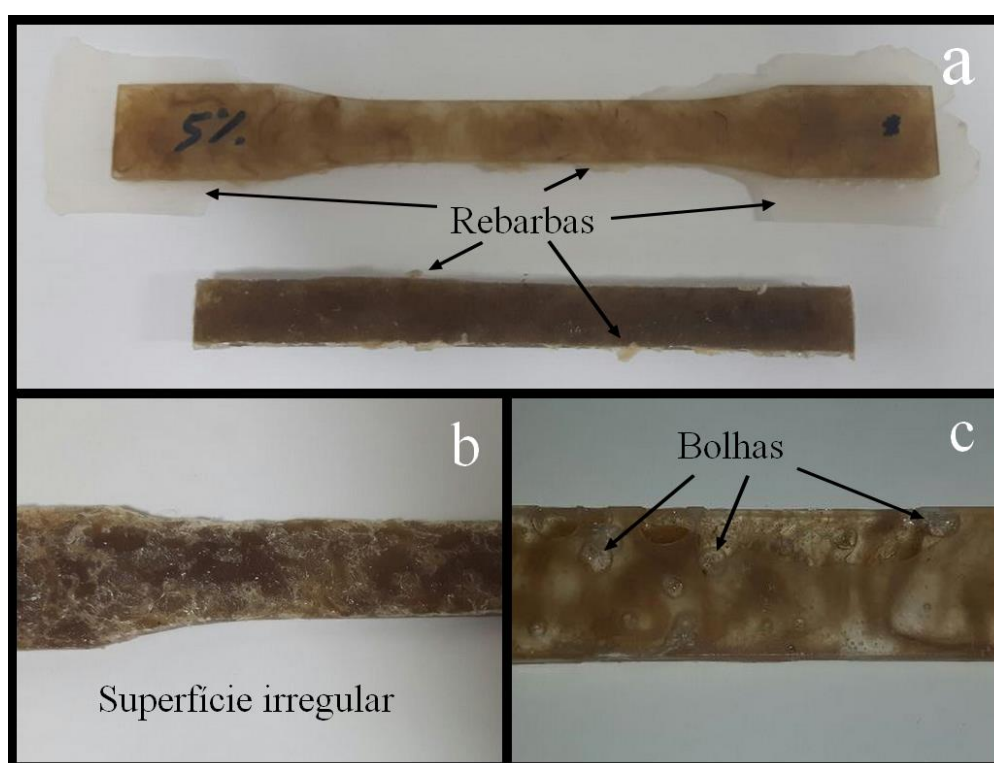
Devido a mistura manual das fibras com a resina e endurecedor, alguns corpos de prova apresentaram defeitos, dentre os quais pode-se citar o aparecimento de rebarbas, acabamento superficial insatisfatório, bolhas, cura inadequada e rechupe. Alguns destes defeitos podem ser visualizados na Figura 17. É importante ressaltar que todos os corpos de prova defeituosos, com exceção dos que possuíam rebarbas, foram descartados.

A rebarba foi um defeito comum em todos os corpos de prova confeccionados. Este defeito é um indício de que a prensagem ocorreu de forma adequada e teve como resultado o vazamento de uma pequena quantidade de resina para fora da cavidade do molde de silicone. Exemplos de rebarbas encontradas em corpos de prova de ambos os ensaios são mostrados na Figura 17a. Os corpos de prova que apresentaram este defeito tiveram suas rebarbas removidas com o uso de uma mini retífica.

O acabamento superficial insatisfatório foi um defeito comum dentre os corpos de prova de tração com fração mássica de 15%. Devido a absorção da resina pela fibra, a superfície da amostra curada muitas vezes ficava comprometida pela ausência de matriz, como pode ser observado na Figura 17b. Esta superfície irregular poderia

naturalmente atuar como ponto concentrador de tensão, o qual facilitaria a falha do material.

As bolhas foram comuns e inevitáveis em qualquer composição do compósito com fibra. Após a mistura da resina e endurecedor com as fibras, uma massa fibrosa era criada, e esta apresentava diversos vazios que não foram completamente eliminados com a prensagem aplicada, como indicado na Figura 17c. Para contornar este problema, deveria ter sido aplicada uma força maior durante a prensagem, porém não foi possível aplicar esta solução neste trabalho.



**Figura 17 - Defeitos nos corpos de prova. (a) Rebarbas; (b) Superfície irregular; (c) Bolhas**

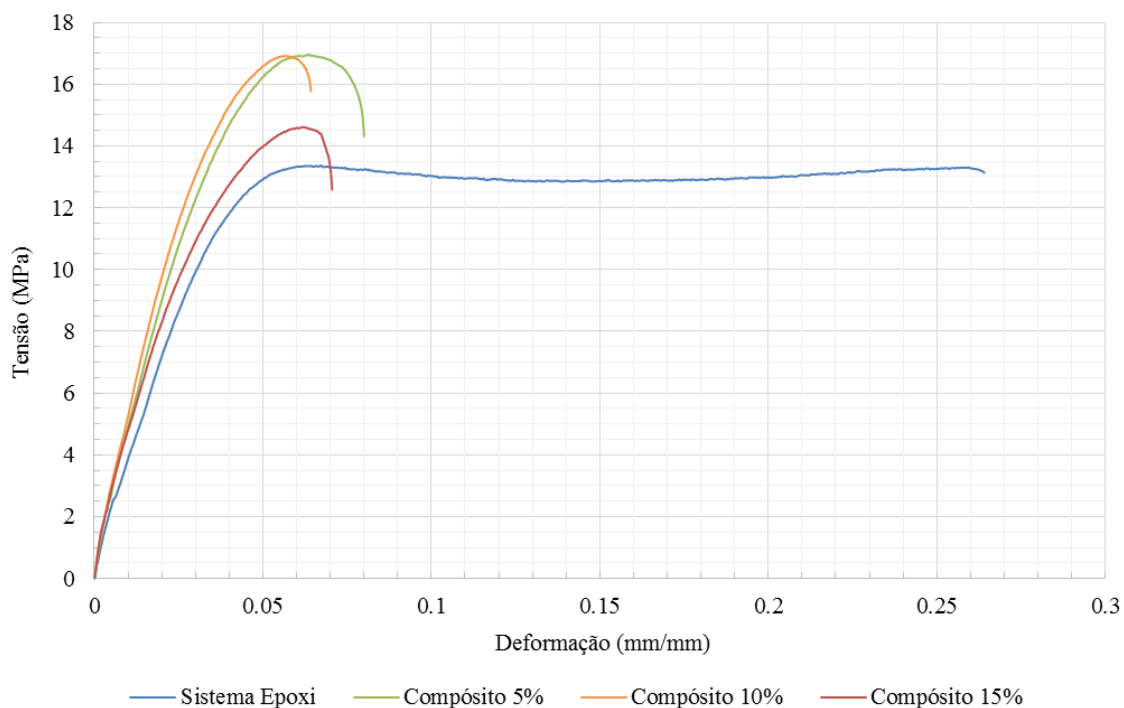
**Fonte: Autoria própria.**

A cura inadequada ocorreu devido a mistura não homogênea da resina e endurecedor em testes preliminares de como os corpos de prova seriam confeccionados. Nesta etapa inicial do trabalho, o procedimento utilizado para se confeccionar os compósitos envolvia primeiramente a mistura da resina com as fibras, tendo o endurecedor adicionado em seguida. Deste modo, o endurecedor não foi misturado homogêneamente na massa de fibra e resina, o que resultou em cura deficiente em algumas partes do corpo de prova. A solução encontrada para este problema foi a mistura da resina e endurecedor antes da adição de fibra.

O rechupe foi um defeito encontrado frequentemente nos corpos de prova de resina epóxi pura. Este defeito consiste em um vazio na superfície superior do corpo de prova e é resultado da contração volumétrica que a resina sofre após o processo de cura.

#### 6.4 ENSAIOS DE TRAÇÃO

Os comportamentos sobre tração dos corpos de prova do termorrígido puro e dos compósitos estão representados na Figura 18. As curvas são de amostras que apresentaram desempenho mediano, sendo coerente com os resultados encontrados pela média das propriedades mecânicas. Foi possível observar que as curvas de tração dos compósitos de 5, 10 e 15% apresentam pouquíssima deformação plástica em comparação com o termorrígido puro. Isto indica que os compósitos confeccionados são materiais relativamente frágeis, o que já era esperado pela literatura.



**Figura 18 - Representação gráfica dos ensaios de tração realizados em amostras medianas do compósito de matriz epóxi reforçada com fibra de rami**  
Fonte: Autoria própria.

A partir da média aritmética dos dados obtidos de cada ensaio de tração, obteve-se a Tabela 6, a qual apresenta o limite de resistência a tração, módulo de elasticidade e deformação total para cada composição.

Pode-se observar que a adição de fibra de rami na resina epoxídica aumentou as propriedades mecânicas do compósito formado, porém com perda de ductilidade. O limite de resistência à tração teve seu auge de  $16.8 \pm 0.9$  MPa, aumento de 28,2% em relação ao termorrígido puro, na porcentagem de 5% em massa de fibra, mantendo-se praticamente constante para a fração mássica de 10%, e caindo drasticamente para o teor de fibras de 15%. A principal razão desta queda é a dificuldade de fabricação dos corpos de prova com maior teor de fibra. As amostras confeccionadas apresentaram grande quantidade de bolhas, as quais atuam como pontos concentradores de tensão durante o ensaio e, conseqüentemente, reduziram a resistência à tração dos compósitos.

**Tabela 6 - Propriedades de tração de compósitos de matriz epóxi reforçada com fibras de rami em diferentes porcentagens mássicas**

Porcentagem mássica de fibra (%)	Limite de Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Deformação Total (%)
0	$13.1 \pm 0.4$	$0.30 \pm 0.04$	$31 \pm 11$
5	$16.8 \pm 0.9$	$0.43 \pm 0.05$	$8.0 \pm 0.9$
10	$16.3 \pm 1.0$	$0.53 \pm 0.09$	$6.2 \pm 0.8$
15	$13.9 \pm 3.0$	$0.40 \pm 0.08$	$7.3 \pm 0.6$

Fonte: Autoria própria.

O módulo de elasticidade dos compósitos de fibra de rami teve um aumento linear até a composição de 10%, atingindo um aumento de 76,6%, mas caindo abruptamente na fração mássica de 15%. Mesmo assim, o módulo de elasticidade dos compósitos se manteve superior à rigidez do termorrígido puro. Em compensação, a deformação até a ruptura dos corpos de prova teve um grande decréscimo de aproximadamente 76,4%. A queda na deformação dos compósitos já era prevista pela literatura, pois a rigidez da fibra e a interação matriz/fibra impedem o alongamento dos corpos de prova.

É importante ressaltar que os resultados encontrados neste trabalho diferem dos encontrados por Bevitori (2014), Margem (2013) e Oliveira (2013) por alguns



motivos. O sistema de resina epóxi e endurecedor utilizado por estes autores foi distinto do sistema utilizado neste trabalho, e isto fica claramente identificado pela diferença de resistência à tração do termorrígido puro. Outro motivo que causou a diferença de resultados foi a organização das fibras dentro do compósito. Neste trabalho foi investigado uma configuração aleatória de fibras, enquanto que nos trabalhos citados os compósitos foram confeccionados com fibras alinhadas nas posições transversal e longitudinal. Além disso, a resistência a tração e alongação do termorrígido puro se diferem dos dados apresentados na Tabela 5, do item 5.6, devido ao processamento com parâmetros diferenciados.

A Figura 19 mostra as superfícies de fratura das amostras de tração para cada composição em diferentes tipos de iluminação. Foi possível observar a natureza frágil da resina epóxi curada, a qual fraturou transversalmente a aplicação da força. A fratura para o termorrígido puro se iniciou em uma das arestas e se propagou para o centro da amostra, até reduzir suficientemente a área para a fratura por excesso de tensão, originando a região de ruptura catastrófica. Foi possível observar ainda que alguns corpos de prova foram fraturados nos defeitos de fabricação, como bolhas, as quais atuaram como pontos concentradores de tensão. Ficou visível também que algumas amostras foram fraturadas ao longo de feixes de fibras transversais, os quais pouco contribuíram para a resistência nesta posição.

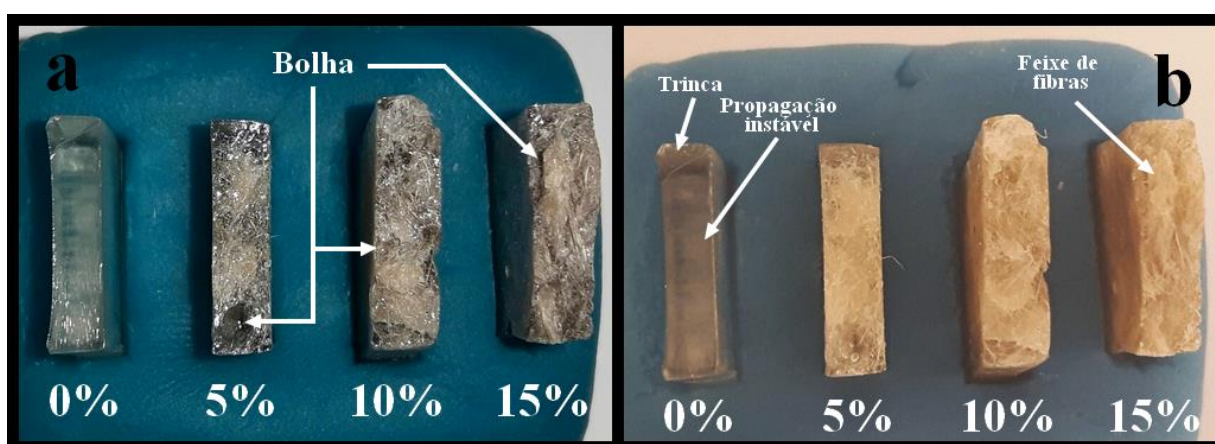
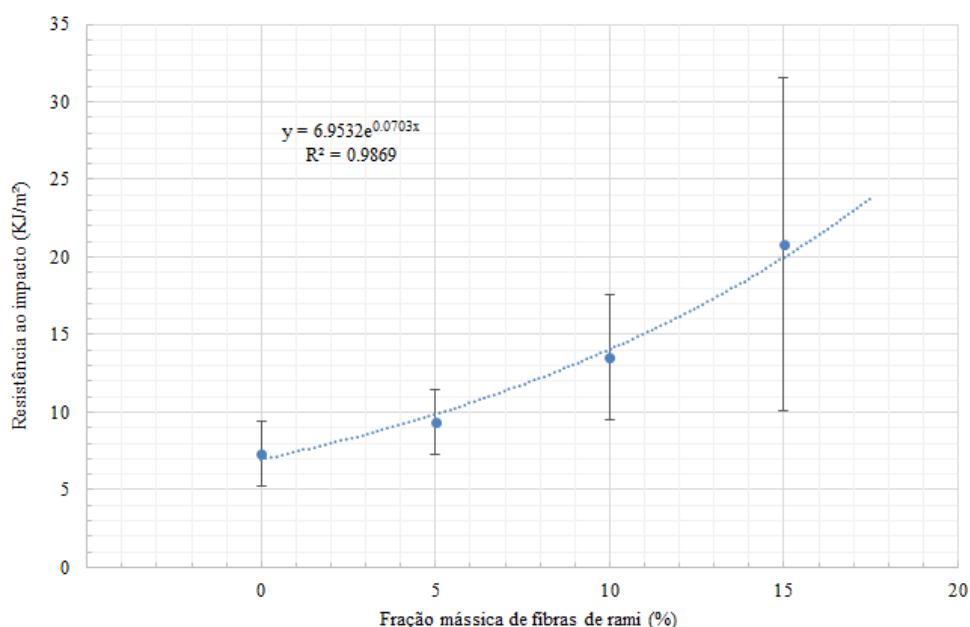


Figura 19 - Superfícies de fratura dos corpos de prova dos ensaios de tração. (a) Fonte de luz artificial; (b) Fonte de luz natural  
Fonte: Autoria própria.

## 6.5 ENSAIOS DE IMPACTO IZOD

A Figura 20 ilustra as médias aritméticas das resistências ao impacto Izod para cada composição de corpo de prova. Foi possível observar um aumento na energia de impacto Izod que os compósitos suportaram em função da adição de fibra de rami. Além disso, nota-se também que a resistência ao impacto possui uma relação exponencial com a fração mássica de fibra, assim como citado por Bevitori (2014) e Margem (2009).

O reforço com 15% em massa de fibras de rami atingiu a maior resistência ao impacto, atingindo um aumento de 185,7% em relação a resistência ao impacto Izod do termorrígido puro. Foi possível observar ainda que o desvio padrão aumenta com a quantidade de fibra introduzida na matriz. Este efeito está associado aos defeitos típicos das fibras lignocelulósicas (BEVITORI, 2014; MARGEM, 2009), além dos defeitos de processamentos, como bolhas, que foram mais comuns em frações mássicas maiores.



**Figura 20 - Variação da energia de impacto Izod de compósitos de matriz epoxídica em função da fração mássica de fibra de rami**  
Fonte: Autoria própria.

A Figura 21 mostra as superfícies de fratura das amostras de impacto Izod para cada composição em diferentes tipos de iluminação. Foi possível observar, assim como nos ensaios de tração, a natureza frágil do termorrígido puro. Pôde-se notar ainda que a quantidade de fibras presente na superfície de fratura aumenta com o aumento da fração mássica de fibras. A quantidade de fibras fraturadas está diretamente relacionada a resistência ao impacto do material, a qual foi maior para os compósitos de 15% em massa de fibra de rami.

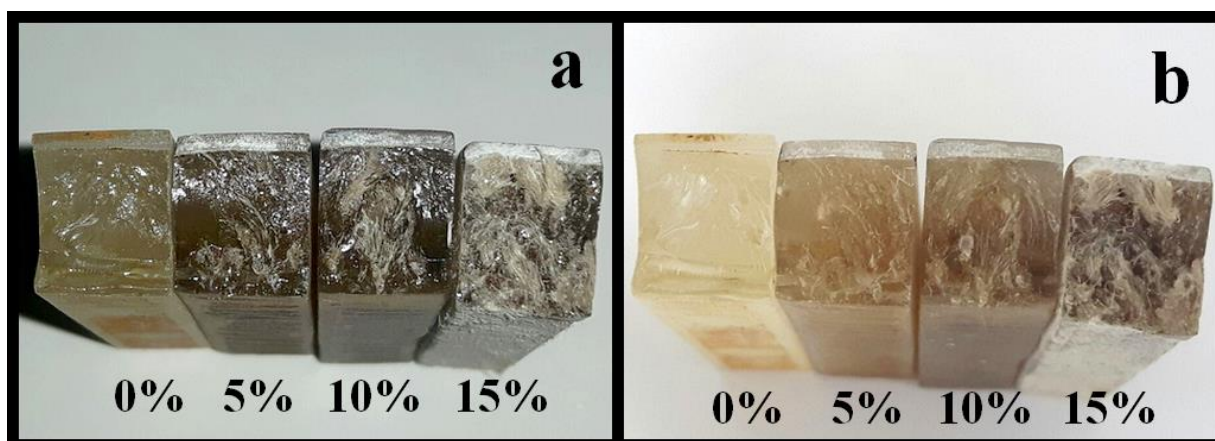


Figura 21 - Superfícies de fratura dos corpos de prova dos ensaios de impacto Izod. (a) Fonte de luz artificial; (b) Fonte de luz natural  
Fonte: Autoria própria.

## 7 CONCLUSÃO

O procedimento de confecção dos compósitos de matriz epoxídica reforçada com fibra de rami se mostrou adequado para a obtenção de uma massa fibrosa de fácil manuseio.

Confirmou-se a partir da espectroscopia de infravermelho que as amostras obtidas foram realmente de fibras de rami. O diâmetro médio para a fibra de rami foi de  $48 \pm 17 \mu\text{m}$  e para o feixe de fibras de  $1,14 \pm 0,03 \text{ mm}$ , sugerindo que as fibras utilizadas eram finas.

Identificou-se que os compósitos confeccionados apresentaram defeitos de fabricação como rebarbas, bolhas, acabamento superficial insatisfatório e rechupe. Tais defeitos afetaram negativamente as propriedades mecânicas dos compósitos.

Observou-se nos ensaios de tração dos compósitos um aumento máximo de 28,2% para limite de resistência à tração e de 76,6% para módulo de elasticidade, porém com perda significativa de ductilidade em relação ao termorrígido puro.

As propriedades mecânicas encontradas para o compósito foram diferentes das descritas na literatura em função do sistema de resina epóxi escolhido, tipo de orientação das fibras e do processamento empregado.

As imagens das fraturas por tração revelaram que alguns corpos de prova fraturaram em bolhas presentes no compósito, as quais atuaram como pontos de concentração de tensão.

Os compósitos de resina epóxi e fibras de rami apresentaram um aumento exponencial na resistência ao impacto Izod em função da fração mássica de fibra, sendo que a fração mássica de 15% obteve o maior aumento de resistência, cerca de 185,7% em relação a resistência ao impacto do termorrígido puro.

Conclui-se assim que a fibra de rami atua como um bom reforço para a resina epóxi, sendo uma boa alternativa para a fabricação de compósitos de matriz epoxídica reforçada com fibras sintéticas para aplicações menos nobres.

## REFERÊNCIAS

- ALVES, Regina E. **Caracterização de fibras lignocelulósicas pré-tratadas por meio de técnicas espectroscópicas e microscópicas ópticas de alta resolução**. 2011. 115p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.
- ARAÚJO, Joyce R. **Compósitos de polietileno de alta densidade reforçados com fibra de curauá obtido por extrusão e injeção**. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.
- ASTM D638-14. **Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- ASTM D256-10e1, **Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.
- BEVITORI, Alice. B. **Avaliação das propriedades e estrutura de fibras de rami e seus compósitos poliméricos**. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2014.
- CHAWLA, Nikhilesh; SILVA, Flavio de A.; TOLEDO FILHO, Romildo D. de; Tensile Behavior of High Performance Natural (Sisal) Fibers. **Composites Science and Technology**, p. 3438-3443, 2008.
- CHOUDHURY, Bhaswati; DASH, Suvakanta; DEVI, Dipali; KALITA, Dhanevar; KALITA, Kasturi; KALITA, Sanjeeb; KANDIMALLA, Raghuram; KOTOKY, Jibon. Fiber from Ramie Plant (*Boehmeria nivea*): A Novel Suture Biomaterial. **Materials Science and Engineering**. v. 62, p. 816 - 822, 2016.
- FAIX, O. Classification of Lignin from Different Botanical Origins by FTIR Spectroscopy. **Holzforchung, International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood**. V. 45, p. 21-28, 2009.
- FERREIRA, Fábio C. **Utilização de Resíduos Lignocelulósicos na Produção de Compósitos Poliméricos**. Tese (Doutorado em Química) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.
- GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. **Ensaio dos Materiais**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 2000.
- Grupo CIMM. **Teste Izod**. 2016. Disponível em: <[http://www.cimm.com.br/portal/material\\_didatico/6583-teste-izod#.WBeg5vkrLb0](http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6583-teste-izod#.WBeg5vkrLb0)>. Acesso em: 12 out. 2016.
- HARAGUCHI, Shirani K.; MUNIZ, Edvani C.; RUBIRA, Adley F.; SILVA, Rafael. Aplicações de fibras lignocelulósicas na química de polímeros e em compósitos. **Química Nova**. v. 32, n. 3, p. 661-671, 2009.

IEMI – INSTITUTO DE ESTUDOS E MARKETING INDUSTRIAL. **Relatório Setorial da Indústria Têxtil Brasileira: Brasil têxtil 2011**. São Paulo: IEMI, 2011.

LEVY NETO, Flaminio; PARDINI, Luiz C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. São Paulo: Blücher, 2006.

LUZ, Pedro H. C.; NOLASCO, Adriana Maria; SAVASTANO JUNIOR, Holmer. Seleção de Resíduos de alguns tipos de fibras vegetal, para reforço de componentes de construção. In: **Encontro Nacional Sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis**, 1, 1997, Rio Grande do Sul: Porto Alegre. 107-112 p.

MARGEM, Frederico M. **Análise das Características Estruturais e Propriedades de compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras de Rami**. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2009.

MONTEIRO, S. N., MARGEM, F. M., SANTOS, L. F. L. (2009). Tenacidade ao impacto Charpy de compósitos epoxídicos reforçados com fibras de rami. Em: **64º Congresso Anual da ABM**. Jul. 2009, Belo Horizonte, Brasil, p. 1-9.

MARGEM, Frederico M.; BEVITORI, Alice B.; LOIOLA, Rômulo L.; MONTEIRO, Sérgio N.; OLIVEIRA, Caroline G. de; SILVA, Isabela L. A. da (2013). Comportamento Mecânico em tração de compósitos de matriz poliéster reforçadas com fibras de rami. Em: **68º Congresso Anual da ABM**, Jul. 2013, Belo Horizonte, Brasil, p. 1-7.

OLIVEIRA, Caroline G. de.; MARGEM, Frederico M.; MONTEIRO, Sérgio N; BEVITORI, Alice B.; SILVA, Isabela L. A. da; SIMONASSI, Noan T. (2013). Tensile Behavior of Epoxy Composites reinforced with continuous and aligned ramie fibers. In: **Characterization of Minerals, Metals & Materials – TMS Conference**, Mar. 2013. San Antonio, USA, p. 1-7.

PIRES, Joyce S. C. **Fibras Naturais: Características químicas e potenciais aplicações**. 2009. 50p. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2009.

RODRIGUES, Maria R. A. **Estudo da Reação de Cura da Resina Epóxi (Araldit F) com Anidro Ftálico e Trietilamina como Iniciador**. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1992.

SCAMPERDALE. **Boehmeria nivea**. 2013. Disponível em: <[http://zipcodezoo.com/index.php/Boehmeria\\_nivea](http://zipcodezoo.com/index.php/Boehmeria_nivea)>. Acesso em: 19 ago. 2016.

SECRETARIA DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO DO ESTADO DA BAHIA (SECTI-BA). Disponível em: <<http://www.secti.ba.gov.br>> Acesso em: 18 ago. 2016.

SILAEX QUÍMICA LTDA. **SQ2004 e SQ3154 Sistema de Resina Epoxídica**. São Paulo, 2004.

SKOOG, Douglas. A.; HOLLER, F. James; CROUCH, Stanley R. **Princípios de Análise Instrumental**. 6ª ed. Bookman: São Paulo, SP, 2009. 1039p.

SOARES, Isabel M. **Produção e Caracterização de Compósitos de Matriz Epóxi Reforçada com Fibra de Rami para Fins de Reforço Estrutural**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

YOUNG, Raymond A. Utilization of Natural Fibers: characterization, modification and applications. In: LEÃO, Alcides L.; CARVALHO, Francisco X.; FROLLINI, Elisabete. **Lignocellulosic-Plastics Composites**. USP e UNESP, Brazil, 1997. p.1-21.