

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA E  
MATERIAIS  
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**AMANDA LEITE DA SILVA**

**OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPOSITOS DE PLA E  
FIBRAS DE TAQUARA-LIXA (*Merostachys skvortzovii*)**

**CURITIBA  
2019**

**AMANDA LEITE DA SILVA**

**OBTENCAO E CARACTERIZACAO DE COMPOSITOS DE PLA E  
FIBRAS DE TAQUARA-LIXA (*Merostachys skvortzovii*)**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, do PPGEM da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre – Área de Concentração: Engenharia de Materiais.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Elaine Azevedo  
Coorientadora: Dr<sup>a</sup>. Marcela Guiotoku

**CURITIBA  
2019**

---

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

---

Silva, Amanda Leite da

Obtenção e caracterização de compósitos de PLA e fibras de taquara-lixia (*Merostachys skvortzovii*) [recurso eletrônico] / Amanda Leite da Silva.-- 2019.

1 arquivo de texto (92 f.): PDF; 3,78 MB.

Modo de acesso: World Wide Web.

Título extraído da tela de título visualizado em 28 nov. 2019).

Texto em português, com resumo em inglês

Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Curitiba, 2019

1. Engenharia mecânica - Dissertações. 2. Engenharia de materiais. 3. Compósitos poliméricos. 4. Ácido láctico. 5. Fibras. 6. Biodegradação. 7. Bambu. I. Azevedo, Elaine Cristina de, orient. II. Guiotoku, Marcela, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, inst. IV. Título.

CDD: Ed. 23 -- 620.1

---

Biblioteca Ecoville da UTFPR, Câmpus Curitiba  
Bibliotecária: Lucia Ferreira Littiere - CRB 9/1271

## TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO Nº363

A Dissertação de Mestrado intitulada: **OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPOSITOS DE PLA E FIBRAS DE TAQUARA LIXA (*Merostachys skvortzovii*)**, defendida em sessão pública pela Candidata **Amanda Leite da Silva**, no dia 15 de outubro de 2019, foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração: Engenharia de Materiais, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais – PPGEM.

### BANCA EXAMINADORA:

Profa. Dr<sup>a</sup>. Elaine Cristina de Azevedo - Presidente - UTFPR

Prof. Dr. Luciano Zart Olanyk - UTFPR

Prof. Dr. Guilherme Mariz de Oliveira Barra - UFSC

A via original deste documento encontra-se arquivada na Secretaria do Programa, contendo a assinatura da Coordenação após a entrega da versão corrigida do trabalho.

Curitiba, 15 de outubro de 2019.

Aos meus pais, meu presente de Deus.

## AGRADECIMENTOS

A Deus.

A minha fonte inesgotável de inspiração, meu pai Reginaldo e minha mãe Marieta, pelo amor incondicional, apoio, confiança e por sempre caminharem comigo, não seria possível sem vocês; e ao meu irmão Guilherme por todo carinho.

A minha orientadora Prof. Dr.<sup>a</sup> Elaine Azevedo, muito obrigada por ter me acolhido e compartilhado da sua experiência, por todo cuidado e atenção, pela paciência, pelas dicas e sugestões que enriqueceram o trabalho e por sua disponibilidade dentro e fora da sala de aula (principalmente pelas tardes de sábado), com sua dedicação e comprometimento indispensável para a realização desse trabalho, sou muito grata por tudo.

A minha coorientadora Dr.<sup>a</sup> Marcela Guiotoku, gratidão, por ter acreditado em mim, todo conhecimento, incentivo, cuidado e carinho do estágio da graduação até aqui, no mestrado, foram fundamentais para essa conquista, por ter tornado todas as nossas ideias reais, por não medir esforços durante cada segundo desse trabalho e fora dele também, muito obrigada por acrescentar tanto.

Ao professor Dr. Lucas Berti pela atenção e colaboração.

A UTFPR, pela estrutura e disposição através dos programas de pós-graduação pela permissão da utilização do espaço e dos diversos equipamentos para análise dos corpos de prova, em especial ao PPGEM.

A todos os professores que fizeram parte da minha formação acadêmica, desde o Ensino Fundamental até o Mestrado.

A CNPq, Capes e Fundação Araucária pelo apoio financeiro.

A EMBRAPA Floresta, pelo acolhimento, e pela utilização dos laboratórios, equipamentos de análise, do espaço físico para a confecção dos corpos de prova e ensaio de biodegradação, além do ambiente alegre, em especial a Dr.<sup>a</sup> Maria Izabel que também me acolheu com muito carinho.

A Caroline, pela disposição e pela ajuda através de todas as dicas.

Aos familiares que torceram por mim, a minha bisavó, aos meus avós, em especial a memória da minha avó Edna, que sempre foi meu exemplo de alegria e amor, tenho certeza que está feliz por mim lá de cima; tios e tias e amigos, sou grata a cada um que passou pela minha vida e contribuíram de alguma forma para o meu crescimento pessoal, estarão sempre em meus pensamentos, obrigada.

## RESUMO

DA SILVA, Amanda Leite. **Obtenção e caracterização de compósitos de PLA e fibras de Taquara-lixia (*Merostachys skvortzovii*)**. 2019. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

Compósitos biodegradáveis são caracterizados por possuírem uma matriz polimérica biodegradável junto a um material proveniente de fonte natural. Compósitos formados por polímeros biodegradáveis e fibras naturais se degradam quando expostos a solo fértil e umidade, diminuindo, assim, sua vida útil. Desta forma podem ser utilizados na agricultura para a substituição dos tubetes utilizados para o plantio de mudas no setor florestal fabricados com PVC, que é um polímero derivado do petróleo. Dentre as matrizes poliméricas biodegradáveis existentes encontra-se o Poli (Ácido Lático) – PLA, que é um polímero biodegradável, oriundo de fonte renovável e que não possui solventes em sua composição. As fibras de Taquara-lixia são provenientes de fonte natural e renovável e possuem bom desempenho mecânico e grande disponibilidade no estado do Paraná. O objetivo desta dissertação é obter e caracterizar compósitos fabricados com PLA e fibras de Taquara-lixia *in natura* em diferentes proporções sem aglutinantes/compatibilizante, visando ao aproveitamento da matéria-prima em um produto sustentável, visto que este é proveniente de fontes renováveis. Os compósitos foram caracterizados através do teste de biodegradação, absorção de água, resistência à tração, antes e após o ensaio de biodegradação, FT-IR, análise termogravimétrica (TGA). A superfície da fratura foi avaliada por microscopia eletrônica de varredura, tendo por finalidade a obtenção de dados que contribuam para a aplicação desse material em tubetes na agricultura. Após exposição a solo simulado, junto a análise de cristalinidade, absorção de água e perda de massa observou-se que a biodegradação está ocorrendo aos 180 dias, indicando como adequado o uso da Taquara-lixia em compósitos biodegradáveis. A adição das fibras nos compósitos proporcionou aos compósitos comportamento de fratura frágil, em que quanto maior o tempo de exposição no solo simulado menor a resistência mecânica do compósito PLA/Taquara-lixia. Visando a maior sustentabilidade e menor poluição no meio ambiente, pode-se concluir que a adição de fibras de Taquara-lixia na matriz de PLA promoveu alteração na coloração do compósito e acelerou o processo de biodegradação.

**Palavras-chave:** Compósito. Poli (Ácido Lático). Fibras naturais. Taquara-lixia. Biodegradação.

## ABSTRACT

DA SILVA, Amanda Leite. **Obtaining and characterization of composites of PLA and Taquara-lixá fibers (*Merostachys skvortzovii*)**. 2019. 97f. Dissertation (Masters in Mechanical and Materials Engineering) – Federal Technological University of Paraná, Curitiba, 2019.

Biodegradable composites are characterized by having a biodegradable polymer matrix next to a material from a natural source. Composites formed from biodegradable polymers and natural fibers degrade when exposed to fertile soil and moisture, thereby shortening their useful life. In this way they can be used in agriculture to replace the tubes used for planting seedlings in the forest sector made with PVC, which is a polymer derived from petroleum. Among the existing biodegradable polymeric matrices is the Poly (Lactic Acid) - PLA, which is a biodegradable polymer, derived from a renewable source and that has no solvents in its composition. Taquara-lixá fibers come from a natural and renewable source and have good mechanical performance and high availability in the state of Paraná. The objective of this dissertation is to obtain and characterize composites made with PLA and Taquara-lixá fibers in natura in different proportions without binders / compatibilizer, aiming to use the raw material in a sustainable product, since it comes from renewable sources. The composites were characterized by the biodegradation test, water absorption, tensile strength before and after the biodegradation test, FT-IR, thermogravimetric analysis (TGA). The fracture surface was evaluated by scanning electron microscopy, with the purpose of obtaining data that contribute to the application of this material in tubes in agriculture. After exposure to simulated soil, along with analysis of crystallinity, water absorption and mass loss, biodegradation is occurring at 180 days, indicating the proper use of Taquara-lixá in biodegradable composites. The addition of fibers to the composites provided the composites with fragile fracture behavior, in which the longer the exposure time in the simulated soil, the lower the mechanical strength of the PLA / Taquara-lixá composite. Aiming at greater sustainability and less pollution in the environment, it can be concluded that the addition of Taquara-lixá fibers in the PLA matrix promoted alteration in the composite color and accelerated the biodegradation process.

**Keywords:** Composite. Poly (Lactic Acid). Natural fibers. Taquara-lixá. Biodegradation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação dos compósitos .....	12
Figura 2 – Classificação dos Polímeros biodegradáveis .....	17
Figura 3 – Grupo funcional éster .....	18
Figura 4 – Estrutura química do (a) PLA e do (b) PET .....	19
Figura 5 – Estrutura química das unidades repetitivas do PLA .....	20
Figura 6 – Isômero do Ácido Lático .....	21
Figura 7 – Absorção e digestão microbiológica do PLA .....	22
Figura 8 – Classificação das fibras vegetais .....	23
Figura 9 – Estrutura química dos carboidratos (a) hemicelulose, (b) celulose e (c) lignina .....	24
Figura 10 – Taquara-lixia - <i>Merostachys skortzovii</i> .....	25
Figura 11 – Diagrama de um equipamento para análise termogravimétrica ....	30
Figura 12 – Fluxograma do processo de obtenção do compósito .....	34
Figura 13 – Moinho de Facas .....	36
Figura 14 – Estágios de processamento da Taquara (a) bambu (b) bambu picado (c) fibra de bambu peneirada .....	36
Figura 15 – Homogeneizador modelo MH 100 .....	37
Figura 16 – Injetora Haake Minijet Pro, Thermo scientific .....	37
Figura 17 – (a) Corpo de prova segundo a norma e (b) corpo de prova produzido .....	38
Figura 18 – Solo simulado (a) mistura da areia, terra e esterco (b) solo no recipiente para o ensaio .....	39
Figura 19 – Recipiente com os corpos de prova de PLA com 0, 10, 20 e 30% de fibras de Taquara-lixia .....	40
Figura 20 – Equipamento de Termogravimetria .....	41
Figura 21 – Acessório de ATR do espectômetro .....	41
Figura 22 – Corpos de prova do PLA e PLA/Taquara-lixia com 10, 20 e 30% de fibra no ensaio de absorção de água .....	43
Figura 23 – Máquina universal de ensaios EMIC .....	43
Figura 24 – Equipamento de microscopia eletrônica de varredura. ....	44
Figura 25 – Corpo de prova de (a) PLA e dos compósitos de (b) PLA/Taquara-lixia com 10% de fibra (c) PLA/Taquara-lixia com 20% de fibra (d) PLA/Taquara-lixia com 30% de fibra .....	45
Figura 26 – Corpos de prova com 90 dias de compostagem do (a) PLA e dos compósitos de (b) PLA/Taquara-lixia com 30% de fibras .....	46
Figura 27 – Corpo de prova do compósito em 120 dias de compostagem de PLA/Taquara-lixia com 30% de fibra .....	47
Figura 28 – Corpos de prova em compostagem por 180 dias de (a) PLA e compósitos de (b) PLA/Taquara-lixia com 10% de fibra (c) PLA/Taquara-lixia com 20% de fibra e (d) PLA/Taquara-lixia com 30% de fibra .....	48
Figura 29 – (a) TGA do PLA e (b) TGA da fibra da Taquara-lixia .....	51
Figura 30 – Curva termogravimétrica dos compósitos PLA/Taquara-lixia com diferentes % de fibra em (a) 0 dias de compostagem e (b) 180 dias de compostagem .....	52

Figura 31 – Espectro do infravermelho do corpo de prova de (a) Taquara-lixia e (b) PLA sem contato com o solo simulado.....	53
Figura 32 – Espectro do Infravermelho com 0 dias de compostagem dos corpos de prova de PLA e dos compósitos de PLA/Taquara-lixia com 10, 20 e 30% de fibras.....	55
Figura 33 – Espectro do Infravermelho com 180 dias de compostagem dos corpos de prova de PLA e dos compósitos de PLA/Taquara-lixia com 10, 20 e 30% de fibras.....	56
Figura 34 – Curva de Tensão x Deformação dos corpos de prova de PLA e PLA/Taquara-lixia com 10, 20 e 30% de fibras em (a) 0 dias e (b) 180 dias em compostagem.....	61
Figura 35 – Micrografia por MEV da Taquara-lixia.....	65
Figura 36 - MEV do corpo de prova do PLA com 0 dias em solo simulado.....	66
Figura 37 – MEV dos corpos de prova de PLA/Taquara-lixia com 10% de fibras com 0 dias em solo simulado.....	67
Figura 38 – MEV dos corpos de prova de PLA/Taquara-lixia com 20% de fibras com 0 dias em solo simulado.....	68
Figura 39 – MEV dos corpos de prova de PLA/Taquara-lixia com 30% de fibras com 0 dias em solo simulado.....	69
Figura 40 – MEV dos corpos de prova (a) PLA (b) PLA/Taquara-lixia com 10% de fibras (c) PLA/Taquara-lixia com 20% de fibras (d) PLA/Taquara-lixia com 30% de fibras com 90 dias em solo simulado.....	70
Figura 41 – Imagens de MEV dos corpos de prova (a) PLA (b) PLA/Taquara-lixia com 10% de fibras (c) PLA/Taquara-lixia com 20% de fibras (d) PLA/Taquara-lixia com 30% de fibras com 180 dias de degradação em solo simulado.....	71

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química e características da taquara-lixia.....	26
Tabela 2 – Índice de cristalinidade de alguns materiais naturais.....	27
Tabela 3 – Análises químicas e suas respectivas normas.....	40
Tabela 4 – Acompanhamento da massa dos corpos de prova de PLA e PLA/Taquara-lixia com 10, 20 e 30% de fibras durante 0, 90 e 180 dias em contato como o solo.....	49
Tabela 5 – Índice de cristalinidade dos corpos de prova de PLA e PLA/Taquara-lixia com 10, 20 e 30% de fibras durante 0, 90 e 180 dias em contato como o solo.....	50
Tabela 6 – Dados dos corpos de prova em 0 dias de compostagem para ensaio de absorção de água do PLA e dos compósitos de PLA/Taquara-lixia com 10, 20 e 30% de fibra.....	57
Tabela 7 – Dados dos corpos de prova em 90 dias de compostagem para ensaio de absorção de água do PLA e dos compósitos de PLA/Taquara-lixia com 10, 20 e 30% de fibra.....	58
Tabela 8– Dados dos corpos de prova em 180 dias de compostagem para ensaio de absorção de água do PLA e dos compósitos de PLA/Taquara-lixia com 10, 20 e 30% de fibra.....	59
Tabela 9 – Tensão máxima (Mpa) dos corpos de prova de PLA e os compósitos de PLA/Taquara-lixia em 0, 90 e 180 dias de compostagem.....	62
Tabela 10 - Módulo elástico (GPa) dos corpos de prova de PLA e dos compósitos de PLA/Taquara-lixia em 0, 90 e 180 dias de compostagem.....	63
Tabela 11 – Dados comparativos de resistência a tração, elasticidade e temperatura de fusão de alguns polímeros.....	64
Tabela 12 – Dados comparativos entre o compósito de PLA e PLA/Taquara-lixia.....	73

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FTIR	Infravermelho com transformada de Fourier
IARC	<i>International Agency for Research on Cancer</i>
LAPOC	Laboratório de Polímeros e Compósitos
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
DSC	Calorimetria Diferencial Exploratória
PLA	Poli (Ácido Lático)
PE	Poliestireno
PP	Polipropileno
PPGEM	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais
TGA	Análise termogravimétrica
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
®	Marca registrada
T <sub>g</sub>	Transição Vítreas
T <sub>c</sub>	Temperatura de Cristalização
T <sub>m</sub>	Temperatura de Fusão
US EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>10</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>12</b>
2.1 COMPÓSITOS.....	12
<b>2.1.1 Compósitos poliméricos biodegradáveis.....</b>	<b>13</b>
2.2 POLÍMEROS.....	15
<b>2.2.1 Polímeros biodegradáveis.....</b>	<b>16</b>
<b>2.2.2 Poli (ácido láctico) – PLA.....</b>	<b>19</b>
<b>2.2.3 Biodegradação do PLA.....</b>	<b>21</b>
2.3 FIBRAS NATURAIS.....	23
<b>2.3.1 Fibras de Taquara-lixia.....</b>	<b>25</b>
2.4 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO.....	28
<b>2.4.1 Ensaio de biodegradação por compostagem.....</b>	<b>28</b>
<b>2.4.2 Análise termogravimétrica – TGA.....</b>	<b>29</b>
<b>2.4.3 Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV.....</b>	<b>30</b>
<b>2.4.4 Espectroscopia de infravermelho com transformada de fourier – FTIR.....</b>	<b>30</b>
<b>2.4.5 Absorção de água.....</b>	<b>31</b>
<b>2.4.6 Caracterização mecânica.....</b>	<b>32</b>
2.5 Considerações finais.....	32
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>33</b>
3.1 MATERIAIS.....	34
3.2. MÉTODO DE PREPARAÇÃO DAS FIBRAS DE TAQUARA-LIXA.....	35
3.2.1 Confeção dos compósitos.....	37
3.3 ENSAIO DE BIODEGRADAÇÃO POR COMPOSTAGEM.....	39
3.4 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DAS FIBRAS.....	40
3.5 TGA.....	41
3.6 FTIR.....	41
3.7 CRISTALINIDADE.....	42
3.8 ABSORÇÃO DE ÁGUA.....	42
3.9 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA.....	43
3.10 MEV.....	44
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>45</b>
4.1 ENSAIO DE BIODEGRADAÇÃO POR COMPOSTAGEM.....	45
4.2 ANÁLISES TÉRMICAS.....	50
4.3 FTIR.....	54
4.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA.....	58
4.5 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA.....	59
4.6 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.....	65

4.7MICROSCOPIA DOS CORPOS DE PROVA APÓS ENSAIO DE BIODEGRADAÇÃO EM SOLO SIMULADO.....	69
4.8 Considerações finais.....	72
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>74</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>76</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Materiais poliméricos derivados de petróleo (uma matéria-prima não renovável), possuem compostos orgânicos voláteis em sua composição que podem causar danos ao meio ambiente e à saúde humana (TSENG *et al.*, 2002; SCHIRMER e QUADROS, 2002; BELEM, 2008). Além disso, são cancerígenos e mutagênicos (EPA, 1999; REGO *et al.*, 2002; IARC, 2004; NATIONAL TOXICOLOGY PROGRAM, 2010; HONG *et al.*, 2016) e possuem uma vida útil curta, comparado ao longo período de degradação (HUDA *et al.*, 2008; TAO *et al.*, 2009; NAMPOOTHIRI *et al.*, 2010).

Produtos provenientes de fontes renováveis, ou seja, que possam ser biocompostados, tais como os compósitos com fibras naturais (CARVALHO, 2011; ARRAKHIZ *et al.*, 2013; RAMESH *et al.*, 2013; OLIVEIRA, 2016) e materiais poliméricos biodegradáveis, podem ser uma opção na substituição de produtos de biodegradação lenta.

O Poli (Ácido Lático) - PLA, é um polímero biodegradável (JAHNO, 2005) que tem sido aplicado na biomedicina, não causa impacto ambiental devido à sua biodegradação (CHEN, 2003). O ciclo de produção deste material é sustentável, não utiliza compostos orgânicos voláteis e o produto final pode ter seu tempo de degradação acelerado pela ação de umidade, micro-organismos do solo, temperatura e luminosidade, acarretando uma diminuição das propriedades mecânicas e seu tempo de vida útil. É um polímero termoplástico obtido através de matéria-prima renovável, à base de açúcar segundo a BASF, podendo ser uma alternativa ao uso de polímeros não biodegradáveis, ou polímeros com uma degradação a longo prazo como polietilenos – PE e polipropilenos – PP (TAO *et al.*, 2009; NAMPOOTHIRI *et al.*, 2010). Estes são empregados em utensílios agrícolas, como galões e em tubetes utilizados no plantio de mudas, e ficam anos no meio ambiente até se degradarem.

A adição de fibras naturais ao PLA pode colaborar para diminuição dos custos ambientais e da manufatura, acelerar o processo de biodegradação, melhorar as propriedades mecânicas e minimizar a poluição ambiental (YANG *et al.*, 2004). Quando comparadas às fibras sintéticas, em uma matriz de polímero termoplástico, as fibras naturais são biodegradáveis e menos abrasivas (CABRAL *et al.*, 2005).

Fibras naturais podem ser obtidas de diversas espécies vegetais, como espécies de bambu, sisal, juta, côco, dentre outras, apresentando biodegradabilidade sem liberação de componentes tóxicos ao meio ambiente (BORMAUD, 2012). Dentre

estas se encontram as fibras da Taquara-lixá (*Merostachys Skortzovii*), pertencente à família dos bambus. A Taquara-lixá é uma gramínea encontrada ao longo de grandes extensões territoriais, principalmente na região da Floresta Ombrófila Mista (Floresta com Araucária) (LIEBSCH, 2009). Ela une elevada rigidez, resistência, baixa densidade e tempo de crescimento inferior ao pinus e ao eucalipto (GHAVAMI, 2005).

Uma das dificuldades na obtenção de compósitos é a interação entre duas fases distintas, sem a utilização de um aglutinante ou compatibilizante que induza os diferentes materiais, a terem uma boa interação. O uso das fibras sem qualquer tratamento químico, também interfere na interface matriz/fibra, porém influencia positivamente na produção, para que esta seja o mais natural possível, livre de resíduos químicos indesejados, garantindo assim um processo mais sustentável e livre de agentes tóxicos.

O objetivo desta dissertação é obter e caracterizar compósitos fabricados com PLA e fibras de Taquara-lixá *in natura* em diferentes proporções sem aglutinantes/compatibilizante, visando ao aproveitamento da matéria-prima em um produto sustentável, visto que este é proveniente de fontes renováveis. As características desejáveis dos compósitos são ter uma biodegradação lenta durante o processo de compostagem, possuir baixo módulo elástico, visando a possível aplicação em tubetes para plantio de mudas, onde as raízes das plantas podem romper a parede do tubetes durante a permanência no solo, portanto a fratura frágil se torna interessante nesse caso, além de uma resistência mecânica proporcionando autosustentabilidade dos tubetes.

Os compósitos de PLA/Taquara-lixá serão avaliados por técnicas de análise térmica, biodegradabilidade, tração e análise da fratura por MEV.

O capítulo 2 é constituído pela revisão bibliográfica, que abrange compósitos, compósitos poliméricos biodegradáveis, polímeros, polímeros biodegradáveis, fibras como material de reforço, fibras naturais. Serão abordadas as técnicas para a caracterização dos compósitos. Os materiais e métodos usados para a obtenção e caracterização do compósito estão descritos no capítulo 3. No capítulo 4 são apresentados os resultados e discussões e o capítulo 5 as conclusões.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados conceitos relacionados a compósitos, polímeros biodegradáveis, fibras de Taquara-lixia, biocompósitos e técnicas de caracterização usadas no compósito estudado.

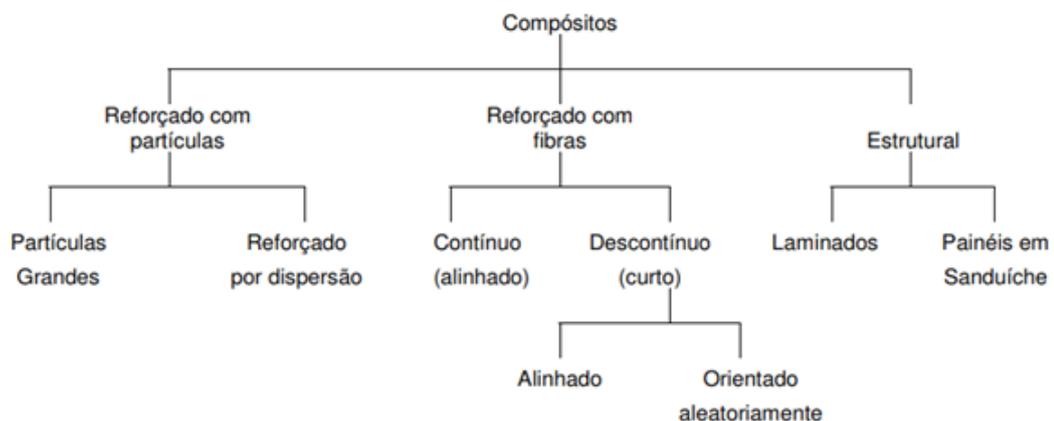
### 2.1 COMPÓSITOS

Segundo a *American Society for Testing and Materials* (ASTM D3878 – 07), compósito é uma substância constituída de dois ou mais materiais, insolúveis entre si, combinados para formar um material com propriedades que não se encontram nos materiais de forma isolada.

Um compósito é composto por duas fases, o reforço e a matriz. A matriz pode ser cerâmica, metálica ou polimérica, e é responsável por envolver a outra fase e transferir esforços entre os componentes (NETO, 2006).

Matrizes cerâmicas são as que possuem resistência térmica mais elevada e maior fragilidade, resultando na perda de tenacidade se comparada às matrizes poliméricas. As matrizes metálicas possuem boa condutividade térmica e elétrica, são dúcteis, porém são densas. Já as matrizes poliméricas oferecem baixa densidade, fácil modelagem, são resistentes quimicamente e possuem baixo custo (SILVESTRE, 2001; CAVALCANTI, 2006). Na Figura 1 é apresentada a classificação dos compósitos segundo Callister (2002).

Figura 1 – Classificação dos compósitos



Fonte: Callister (2002).

Callister (2002) afirma que nos compósitos reforçados com partículas, a matriz suporta a maior parte das cargas aplicadas e as partículas evitam ou dificultam os movimentos de discordâncias na matriz. Por outro lado, os compósitos com partículas grandes possuem fase particulada mais rígida e dura do que a matriz.

A utilização das fibras descontínuas e distribuídas de forma aleatória em compósitos oferece facilidade, rapidez e baixo custo de produção, porém apresenta menor eficiência mecânica quando comparada aos compósitos de fibras contínuas. Quando se utiliza fibras naturais como segunda fase em materiais compósitos tem-se uma opção ecologicamente viável devido à sua biodegradabilidade (NAIR *et al.*, 1996; CORRADINI *et al.*, 2009; MACHADO *et al.*, 2010), combinando estabilidade dimensional e propriedades mecânicas compatíveis com a sua utilização (BOURMAUD, 2007), além da baixa geração de impacto ambiental na sua produção (GARCIA *et al.*, 2008).

De acordo com Ventura (2009), os fatores como forma, comprimento, orientação e composição da fibra podem interferir no desempenho do compósito. Fibras contínuas são alinhadas e as descontínuas podem ser dispostas de forma aleatória (CALLISTER, 2002).

Os compósitos estruturais laminados, que possuem como característica várias camadas coladas em diferentes direções, proporcionam um produto final com alta resistência em todas as direções. Já os painéis em sanduíche são compostos por duas folhas externas, responsáveis por suportar as cargas e as tensões de flexão transversal, e um recheio composto por um material menos denso, que é responsável por resistir às deformações perpendiculares à face, proporcionando rigidez contra o cisalhamento (CALLISTER, 2002).

### **2.1.1 Compósitos poliméricos biodegradáveis**

Segundo Mitra (2014), compósitos biodegradáveis são constituídos por fibras naturais e matrizes poliméricas que podem ser renováveis ou não, tendo como condição, a um de seus componentes ser caracterizado como biodegradável. Podem ser classificados como compósito biodegradável:

- Compósitos de fibras naturais reforçadas com matrizes poliméricas não renováveis.
- Compósitos de fibras sintéticas com matrizes renováveis.

- Compósitos de fibras naturais com matrizes renováveis.

O compósito biodegradável, derivado de fontes renováveis, ao sofrer biodegradação e/ou compostagem, denomina-se biocomposto (MOHANTY *et al.*, 2000). Como é constituído por fibras naturais, é degradável no solo ou em compostagem, livre da liberação de componentes nocivos, na sua utilização e em seu descarte (KUNG SU, 2010).

A incorporação de fibras vegetais em compósitos, tende a melhorar as propriedades mecânicas dos polímeros, provenientes de recursos renováveis e reduzir o custo de produção (MACEDO, 2010), porém, os polímeros de fontes renováveis têm como limitação de aplicação por serem mais duros e quebradiços (MORAIS, 2015). Entretanto, segundo Vilaplana *et al.* (2010), suas propriedades de rigidez e resistência mecânica podem ser melhoradas com a incorporação de reforços, como as fibras e os resíduos lignocelulósicos.

Estudos realizados por Corradine *et al.* (2008) sobre as propriedades mecânicas do compósito de amido/glúten de milho/glicerol reforçado com fibras de sisal, obtiveram como resultado um aumento no módulo de elasticidade e de tensão de ruptura, para o material com 30% de fibra comparado às outras porcentagens analisadas.

Oliveira (2016) realizou em seu estudo uma análise comportamento mecânico, térmico e morfológico dos compósitos obtidos da incorporação da fibra de Curauá na matriz de PLA visando o não acúmulo de materiais poliméricos em aterros e lixões.

O processamento é outro fator importante no desempenho físico do compósito, especialmente o processo de fibrilação, que pode ocorrer durante a extrusão ou homogeneização, fazendo, assim, com que haja uma maior área de contato e interação entre a matriz e a fibra (ALVAREZ *et al.*, 2005).

Materiais lignocelulósicos apresentam grupos polares, como hidroxilas, na sua superfície (TRINDADE *et al.*, 2008), este caráter hidrofílico é geralmente, incompatível com matrizes poliméricas, que, por sua vez, são hidrofóbicas (NAIR, 2003). A busca por soluções para melhorar a interface entre polímeros e fibras, como uso de tratamentos químicos e/ou físicos nas fibras ou utilizar agentes de acoplamento para melhorar a interação dos materiais, é de relevante importância na melhora da compatibilidade entre as fases e, conseqüentemente, para o desempenho mecânico dos compósitos (TRINDADE *et al.*, 2008).

Os tratamentos químicos atuam tanto na superfície da fibra quanto em camadas mais internas (BARBOSA, 2011), sendo que, dentre os vários tratamentos existentes o mais utilizado para modificar as fibras, é o alcalino (NETA *et al.*, 2015; BELTRAMI, 2014).

Os tratamentos físicos, como a técnica de plasma, são os que modificam as propriedades superficiais e estruturais da fibra e não alteram suas propriedades químicas (BLEDZKI *et al.*, 1999; BARRA *et al.*, 2015).

Polímeros biodegradáveis são materiais que se degradam por meio da ação de microrganismos (algas, bactérias e/ou fungos) em um curto período de tempo (média de um ano, dependendo das características do polímero) (SILVA, 2003). A incorporação de fibras vegetais em termoplásticos, apresenta um aumento na resistência mecânica e no módulo de elasticidade do material. Além disso, reduz o peso do produto final e, conseqüentemente, altera as características de degradação (COUTINHO, 1999).

Essa degradação é constatada por meio da alteração nas propriedades mecânicas e químicas, além dos aspectos superficiais (SINGH, 2008). De Paoli (2008) cita que a biodegradação só ocorrerá em condições específicas de pH, umidade e concentração de oxigênio, que possibilita o crescimento dos micro-organismos a partir do uso dos nutrientes do material a ser degradado. Como resultado enzimas serão produzidas, auxiliarão na quebra das ligações químicas do polímero, dando origem às várias reações, inclusive a perda de massa molecular e transformações químicas (RABELLO, 2000; SINGH, 2008). Isto não ocorre apenas individualmente, mas também na interação entre a fibra e a matriz (JOSEPH *et al.*, 2002a).

## 2.2 POLÍMEROS

Polímeros são macromoléculas constituídas por várias unidades de repetição, denominadas meros, ligadas por ligações covalentes (MANO e MENDES, 2004; CALLISTER, 2002; CALVACANTI, 2006), podendo ainda, ser classificados como naturais ou sintéticos (LUCAS *et al.*, 2001). Aqueles encontrados na natureza são denominados polímeros naturais e possuem, na sua grande maioria, estruturas químicas mais complexas que os polímeros sintéticos. Geralmente são derivados de plantas e animais como a celulose, o amido, as proteínas e enzimas. Os polímeros

obtidos industrialmente, são denominados sintéticos e são obtidos a partir de reações de polimerização de monômeros de baixa massa molar (NAVARRO, 2001).

Os materiais poliméricos sólidos a temperatura ambiente são subdivididos em termoplásticos e termorrígidos (MANO, 1985; CANEVAROLO, 2006):

- Os polímeros termoplásticos: São capazes de fundirem por aquecimento e solidificarem por resfriamento, podendo ser recicláveis, pois são formados por cadeias lineares ou ramificadas, o que facilita sua remoldagem.

- Os polímeros termorrígidos: São insolúveis e infusíveis devido à sua estrutura reticulada tridimensional, com ligações cruzadas.

Mano (2004) cita que os polímeros podem ser classificados sob vários aspectos:

- Quanto ao tipo de reação de polimerização (poliadição, policondensação).
- Quanto à sua estrutura química (linear, ramificado, reticulado).
- Quanto à heterogeneidade da cadeia (homopolímero ou heteropolímero).
- Quanto ao seu comportamento mecânico (plásticos, elastômeros e fibras).

A ampla utilização de polímeros obtidos de matérias-primas não renováveis gera problemas de impacto ambiental, tais como: tempo longo de degradação no meio ambiente, esgotamento das reservas naturais e danos à saúde humana (BRITO, 2011).

Os solventes presentes na composição de polímeros são substâncias voláteis à temperatura ambiente e prejudiciais à saúde (COELHO, 2014; BRUCKNER *et al.*, 2001). Este é o principal meio de exposição à inalação ou a ocorrência pela absorção cutânea (DICKER *et al.*, 2014). Pequenas concentrações de solventes podem causar sintomas passageiros como dor de cabeça, vertigem, náusea e irritação nos olhos (BAELUM *et al.*, 1982; RAYMOND *et al.*, 1992), enquanto que um aumento da concentração, podem causar problemas cardiovasculares e doenças nas vias respiratórias (MOEN, 2000), podendo originar diversos tipos de câncer e mutagênese (RAYMOND *et al.*, 1992; REDE CÂNCER, 2012; CHAGAS, 2013).

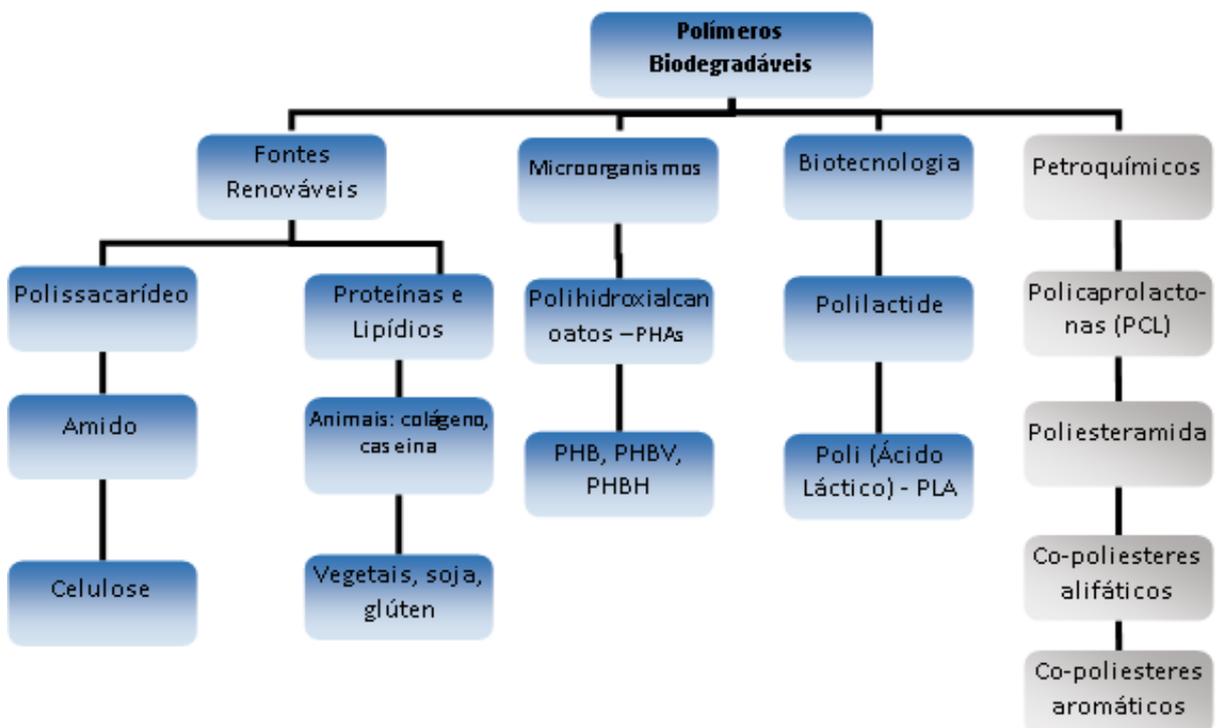
### **2.2.1 Polímeros biodegradáveis**

Segundo a Norma ASTM D883-99, polímeros biodegradáveis são aqueles que podem ser convertidos (quando em presença de micro-organismos de origem natural tais como bactérias, fungos e algas) em gás carbônico, metano e componentes

celulares microbianos. Formolo *et al.* (2003) afirmam que esses polímeros são projetados para degradarem no solo, pela ação de organismos vivos em poucos meses e que, segundo a norma ASTM D6400-12, não devem deixar resíduos visualmente distinguíveis ou tóxicos.

Avérous e Boquillon (2004) classificaram os polímeros biodegradáveis em quatro grupos, sendo eles: de fonte renovável, de microrganismos, da biotecnologia e os petroquímicos, como apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Classificação dos Polímeros biodegradáveis

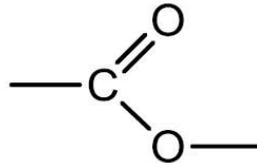


Fonte: Adaptado de Avérous e Boquillon (2004).

Dentre os polímeros biodegradáveis de fontes renováveis, estão os polissacarídeos obtidos a partir de biomassa (pectina, amido e celulose). No grupo de derivados de micro-organismos têm-se os poliésteres obtidos por fermentação de biomassa ou de plantas geneticamente modificadas (como os polihidroxicanoatos – PHAs); no grupo da biotecnologia, há os polímeros sintetizados por monômeros obtidos de biomassa, como o poli (ácido láctico) – PLA; e no grupo dos petroquímicos estão os compostos por poliésteres sintetizados por processos petroquímicos (AVEROUS, 2004).

O PLA é um polímero que contém em sua estrutura o grupo funcional éster (Figura 3), que possui em sua estrutura o carbono com uma ligação dupla e uma ligação simples com o oxigênio, que apresenta esta estrutura facilita o ataque de fungos que favorece a hidrólise (SMITH, 2005).

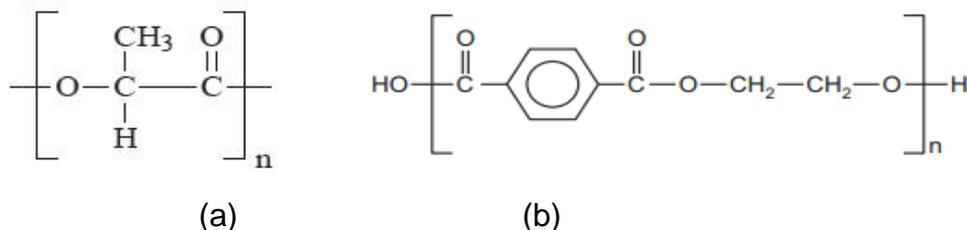
Figura 3 – Grupo funcional éster



Fonte: Química Geral (2006).

Os poliésteres são divididos em dois grandes grupos: os poliésteres alifáticos e os aromáticos. Os poliésteres alifáticos possuem aplicações restritas, pois apresentam propriedades mecânicas limitadas, sendo em sua maioria, biodegradáveis (PELICANO, 2008). Estas possuem cadeia estrutural mais aberta, como os Polihidroxicanoatos (PHA) e o PLA. Os poliésteres aromáticos, como o politereftalato de etileno (PET), possuem propriedades mecânicas superior à do PLA, são resistentes ao ataque de micro-organismos e possuem lenta decomposição quando descartados no meio ambiente ou em aterros. Esta característica se deve à presença do anel aromático em sua cadeia macromolecular, que proporciona a este polímero, resistência à hidrólise e a agentes químicos, dificultando o processo de biodegradação (BARBOSA, 2012). Figura 4 tem-se a estrutura química do PLA e do PET.

Figura 4 – Estrutura química do (a) PLA e (b) PET



Fonte: (a) Saboya (2013); (b) Adaptado de [www.abipet.org.br](http://www.abipet.org.br) (2018).

Segundo Bohlman (2005, *apud* MARIANI, 2010), a biodegradação dos poliésteres ocorre em duas etapas: a primeira consiste na quebra hidrolítica aleatória das ligações ésteres; e a segunda inicia quando a massa molecular média do polímero é reduzida ao ponto de produzir um oligômero pequeno o suficiente para se difundir pelo polímero devido à quebra das ligações. Assim, conforme a massa molecular média aproxima-se de 10.000g, os microrganismos<sup>1</sup> passam a digerir os monômeros em ambiente aeróbio, produzindo dióxido de carbono e água.

Existem vários fatores que contribuem para a taxa de degradação de poliésteres alifáticos. De acordo com Tokiwa (2007), as estruturas altamente ordenadas podem influenciar na hidrólise dos poliésteres e em suas propriedades físicas, como a estrutura do cristal, cristalinidade, orientação molecular e temperatura. Essa cristalinidade em materiais semicristalinos pode vir a dificultar a acessibilidade das enzimas nas regiões ordenadas.

Dessa forma, a atividade catalítica inicia, de forma preferencial, nas regiões amorfas, onde se tem a ocorrência mais rápida da degradação, devido à mobilidade das cadeias. Logo, quanto maior a cristalinidade menor a taxa de degradação (MARIANI, 2010; SANTOS, 2011).

### **2.2.2 Poli (ácido láctico) – PLA**

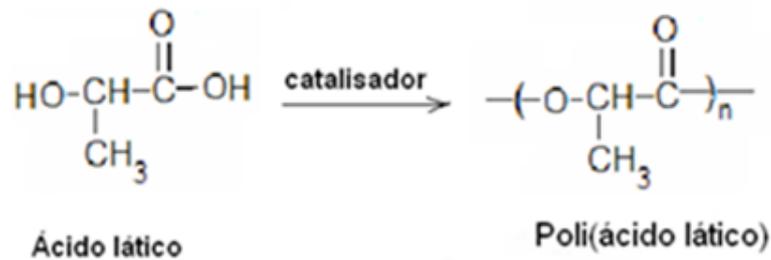
O poli (ácido láctico), ou polilactato, produzido a partir do ácido láctico, é um polímero que possui como principal característica, a sua biodegradabilidade. É considerado um biopolímero, cujas aplicações vão desde embalagens de produtos comerciais à utilização na área biomédica, como suturas e implantes (JAHNO *et al.*, 2005; AVÉROUS, 2008).

Sua estrutura é constituída por uma molécula bifuncional, ou seja, possui propriedades de dois diferentes tipos de grupos funcionais, sendo eles a Carboxila (–COOH) e a Hidroxila (–OH), que são reativos entre si (Figura 5).

---

<sup>1</sup> A escrita da palavra microrganismo e micro-organismo aparece no texto de acordo com a forma utilizada por cada autor.

Figura 5 – Estrutura química das unidades repetitivas do PLA



Fonte: Saboya (2013).

O PLA é uma molécula quiral, pois contém um carbono com quatro ligantes diferentes e está presente no metabolismo de muitos seres vivos. É obtido por meio da fermentação bacteriana da glicose, cuja principal fonte é o milho e a cana-de-açúcar, sendo que sua utilização preponderante está na indústria alimentícia como acidulante e, mais recentemente, na indústria polimérica (HENTON *et al.*, 2005; JAHNO *et al.*, 2006; AVÉROUS, 2008; CASARANO, 2009).

Como é um polímero termoplástico, pode ser fundido e reprocessado. Suas propriedades físicas variam de acordo com a temperatura, massa molar e densidade, características estas que vão determinar a sua utilização comercial (HENTON *et al.*, 2005).

A cristalinidade se dá pela formação do polímero estereorregular, podendo ser isômeros L (levógiro), e que há desvio de luz polarizada para a esquerda, ou D (destrógiro), em desvio da luz polarizada para a direita, conforme Figura 6. O L-ácido láctico é obtido por processos convencionais de fermentação de carboidratos, porém, dependendo da cepa de bactérias utilizadas, torna-se possível a obtenção do D-ácido láctico (GHAFAR *et al.*, 2014).

Figura 6 – Isômero do Ácido Láctico



Fonte: Peleias Junior (2017).

Sua Transição Vítreia ( $T_g$ ) é em torno de 60 °C (HENTON *et al.*, 2005; JAHNO, 2005), e sua densidade se encontra entre 1,25 g/cm<sup>3</sup> no estado amorfo, e 1,37 a 1,49 g/cm<sup>3</sup> no estado cristalino (HENTON *et al.*, 2005). Sua temperatura de fusão ( $T_m$ ) pode variar de 130 a 180 °C, podendo ser processado em molde, moldagem por sopro e por extrusão (AURAS, 2003).

A cristalinidade do PLA varia de 0 a 40%, sendo que os distintos percentuais influenciam no tempo de sua degradação após ser exposto a diferentes meios (GARLOTTA, 2002; GUPTA *et al.*, 2007; LIM *et al.*, 2008).

No estudo de Oliveira (2016), compósitos com teor de fibra de 20% de PLA/Curauá *in natura* apresentaram um aumento de 30% no módulo de elasticidade em relação ao PLA sem reforço.

Em compósitos de PLA com fibras naturais de Buriti, com variação de 0 a 50% em massa, observou-se que os melhores resultados de propriedades mecânicas foram obtidos nos compósitos com 30% em massa de fibra (ARAÚJO *et al.*, 2008; BLEDZKI *et al.*, 2009; MANSOR *et al.*, 2011; BLEDZKI, 2010). Para a melhoria da adesão entre matriz polimérica (hidrofóbica) e fibra natural (hidrofílica), utilizou-se agentes de acoplamento que podem ser a base de anidrido maleico (HILLIG *et al.*, 2011), copolímero de etileno com acetato de vinila (GOMES *et al.*, 2013) ou triacetin ou triacetato de glicerina (BRAMBILLA, 2013).

### 2.2.3 Biodegradação do PLA

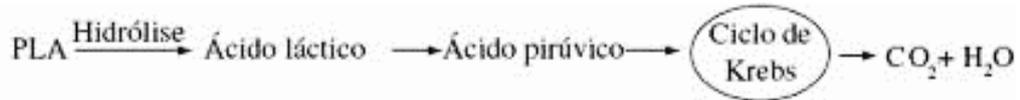
A alteração das propriedades de um polímero resulta de reações químicas intra ou intermoleculares, como os processos de despolimerização, oxidação, reticulação ou, ainda, quebra de ligações químicas causada por diferentes eventos, dependendo do material e de sua utilização, além da forma de processamento (DE PAOLI, 2009).

No PLA, acontece a reação de hidrólise, onde o mecanismo de degradação hidrolítica ocorre com a difusão da água até o interior do polímero, proporcionando a quebra de ligações de éster. Os grupos funcionais ésteres em sua estrutura são facilmente atacados por fungos através de hidrólise (ROSA, 2003).

A biodegradação ocorre com a presença de água, por meio da hidrólise do PLA, na qual oligômeros do ácido lático e o próprio ácido lático são absorvidos pelos microrganismos presentes no solo, que o digerem em seu ciclo metabólico,

produzindo CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O durante o ciclo do Ácido Cítrico (Ciclo de Krebs) (SANTOS, 2007) (Figura 7).

Figura 7 – Absorção e digestão microbiológica do PLA



Fonte: Santos Jr. (2007).

Com o aumento da temperatura, a degradação do PLA a ácido láctico também se torna mais eficiente (JAHNO, 2005).

Segundo Rudnik (2011), o PLA pode ser facilmente degradado em ambiente de compostagem onde se tem a presença de microrganismos que possam quebrar e sintetizar as ligações do polímero e, conseqüentemente, dos outros materiais envolvidos. Essa ocorrência se dá em condições de pH neutro, com umidade de aproximadamente 30% e oxigênio (RABELLO, 2000).

Após a hidrólise a região amorfa, que possui menor interação e energia entre as moléculas, é atacada por micro-organismos que afetam também a região cristalina; portanto, quanto maior for o grau de cristalinidade do polímero, maior a dificuldade de degradação do material (WEIR *et al.*, 2004; SOLARSKI; FERREIRA, 2005).

Teramoto *et al.* (2004) avaliaram a biodegradabilidade em solo de um compósito com PLA e 10% em massa de fibra de abacá sem tratamento químico. O estudo mostrou uma perda de 10% da massa do compósito de PLA/fibra de abacá após 60 dias, indicando a decomposição das fibras e mostrando a biodegradabilidade mais lenta da matriz de PLA.

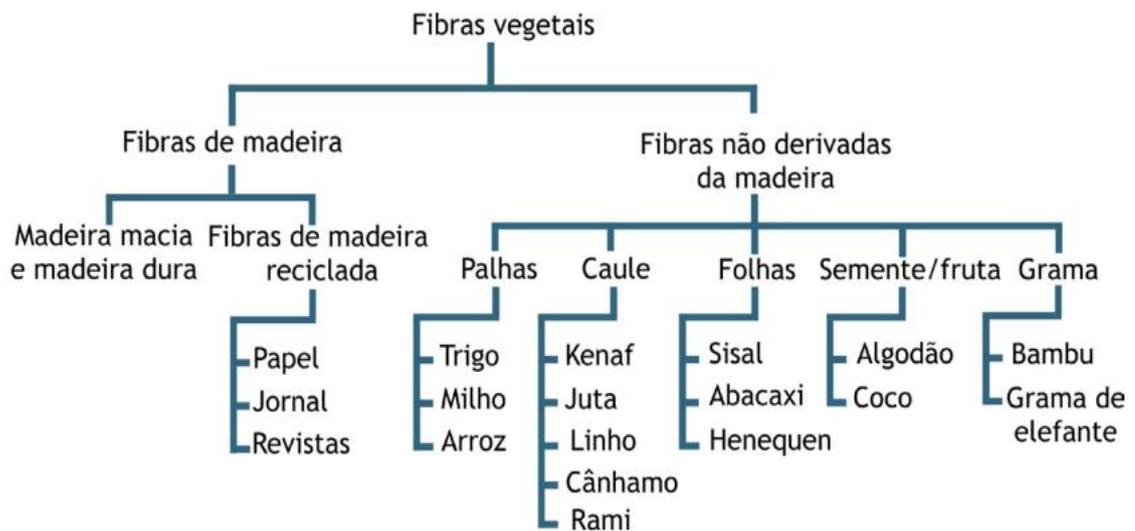
### 2.3 FIBRAS NATURAIS

As fibras naturais são fibras retiradas da natureza. Segundo Komuraiah (2014), a utilização das fibras naturais, tem como vantagem o seu peso, baixo custo e capacidade de renovação. De acordo com Gurunathan *et al.* (2015), as fibras naturais podem ser classificadas baseadas em sua origem, que pode ser vegetal, animal ou mineral. Mohanty *et al.* (2005) classificam as fibras vegetais em fibras de madeira e não derivadas da madeira (Figura 8). As fibras de madeira podem ser extraídas de

madeiras macias ou duras, e quando não derivadas de madeira, podem ser extraídas de diversas partes das plantas, como no caso das fibras extraídas de espécies de bambu.

Segundo Rowell *et al.* (1997), as fibras vegetais mais utilizadas como material de reforço em compósitos poliméricos são: fibras de côco, juta e sisal, assim como as fibras de madeira, do bagaço da cana-de-açúcar e de espécies de bambu. Conforme Machado *et al.* (2010), devido à alta biodiversidade no Brasil, existe uma ampla variedade de fibras vegetais que podem ser utilizadas nas mais diversas aplicações.

Figura 8 – Classificação das fibras vegetais



Fonte: Mohanty *et al.* (2005).

Lee e Wang (2006), Cheng *et al.* (2009) e Yu *et al.* (2010) observam que a utilização de cargas de reforço de origem natural ou de fontes renováveis na produção de compósitos pode se aliar ao fato destes reforços estarem presentes de forma ilimitada na natureza, além de possibilitar melhoria nas propriedades dos polímeros biodegradáveis.

Scandola (2011) afirma que a variabilidade nas propriedades mecânicas das fibras vegetais é consequência da variação da idade da planta, da área geográfica, das condições climáticas e dos métodos de colheita.

A composição química desse tipo de material depende dessas variações, no entanto, todas as paredes celulares das plantas são constituídas por três componentes principais: os carboidratos chamados de celulose, hemicelulose e

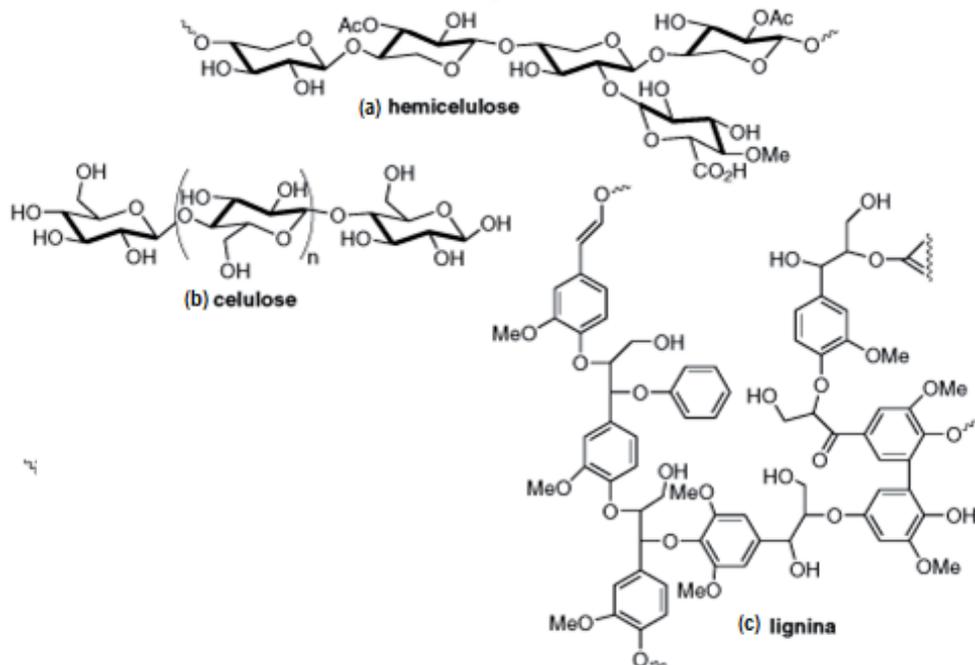
lignina (KOMURIAH *et al.*, 2014). Na Figura 9 estão presentes as estruturas desses constituintes.

A hemicelulose consiste em vários monossacarídeos polimerizados que ocorrem normalmente associados à celulose em paredes celulares (GABRIELI *et al.*, 2002).

A celulose é um polímero linear composto de unidades glucopiránósicas envoltas por lignina e hemicelulose. É considerada um polissacarídeo estrutural (composto por carbono, hidrogênio e oxigênio). Durante seu processo de biodegradação as reações no meio tornam o carbono disponível para o crescimento dos micro-organismos (DENG; TABATAI, 1994).

A lignina é uma macromolécula amorfa encontrada em vegetais associada à celulose e sua função é conceder rigidez, impermeabilidade e resistência a ataques biológicos dos tecidos vegetais (CARVALHO *et al.*, 2010). O teor de lignina em plantas jovens muitas vezes é menor que 5% e em adultas chega a conter até 15%. Segundo Wagner e Wolf (1999), a taxa de decomposição da lignina é considerada mais lenta que a da celulose e hemicelulose.

Figura 9 – Estrutura química dos carboidratos (a) hemicelulose, (b) celulose e (c) lignina



Fonte: Adaptado de Ferreira *et al.* (2009).

Materiais lignocelulósicos possuem associação da lignina à hemicelulose e à celulose em sua composição. A lignina é um material hidrofóbico com estrutura tridimensional e com grande quantidade de ramificações, com domínio das ligações éteres e com grande número de interligações.

Existe, porém, uma grande dificuldade na demonstração da estrutura química da lignina por não haver um método bem estabelecido para isolar a lignina em sua forma pura (JOHN *et al.*, 2008). Sua função é conferir rigidez, impermeabilidade e resistência a ataques microbiológicos e mecânicos aos tecidos dos vegetais.

No caso dos bambus, segundo Youselfian (2015), o módulo e elevada tensão máxima na ruptura das fibras de bambu podem ser comparadas ao aço, perante as ligações de hidrogênio nas moléculas de celulose, hemicelulose e lignina.

### 2.3.1 Fibras de Taquara-lixá

No território brasileiro são encontrados 18 gêneros e 155 espécies de bambus, sendo 83% de espécies endêmicas, tornando o país neotropical com a maior diversidade neste grupo (FILGUEIRAS, 2004). O gênero *Merostachys*, com 53 espécies, é distribuído desde a América Central até a Argentina. Porém o centro da diversidade está no Brasil (SODERSTROM *et al.*, 1988; SENDULSKY, 1995). Na Figura 10 tem-se a imagem da Taquara-lixá.

Figura 10 – Taquara-lixá - *Merostachys*



Fonte: Compêndio Online Gerson Luiz Lopes [s.d.].

No sul do Brasil o gênero *Merostachys* está entre os mais representativos, junto ao *Guadua* e *Chusquea* (VASCONCELLOS, 2008). Devido à efetiva ocupação do sub-bosque, as taquaras podem influenciar negativamente na regeneração natural de espécies arbóreas (OLIVEIRA FILHO *et al.*, 1994).

Este material apresenta densidade na faixa de 0,88 a 1,10 g/cm<sup>3</sup> (OSÓRIO *et al.*, 2011) e são constituídos por lignina, celulose, extrativos, umidade e materiais inorgânicos.

A Tabela 1 apresenta a composição química da Taquara-lixia.

Os constituintes menores, como os extrativos totais, são classificados como compostos que podem ser extraídos com diversos tipos de solventes ou sem solventes. Trata-se de proteínas e polissacarídeos que estão presentes nas plantas em geral.

Tabela 1 – Composição química e características da Taquara-lixia

<b>Taquara-lixia</b>	<b>(%)</b>
Umidade	5,65 ± 0,10
Solubilidade em água fria	4,41 ± 0,03
Solubilidade em água quente	5,62 ± 0,04
Lignina insolúvel	27,47 ± 1,31
Cinzas	0,78 ± 0,02
Holocelulose	65,07 ± 1,42
pH 1h	4,43 ± 0,16
pH 24h	4,53 ± 0,16
Extrativos totais	6,67 ± 0,10

Fonte: Adaptado de Neto (2014).

Segundo Sendulsky (2009), a *Merostachys skvortzovii* é uma planta perene, lenhosa, formando densas touceiras. Seu colmo apresenta listras verde-escuro, nó subpiloso, com comprimento entre 4–6 m e o diâmetro de 2–3 cm.

Análises térmicas dessa gramínea mostram eventos térmicos entre 250 a 380 °C, onde ocorre a degradação da hemicelulose e da celulose no intervalo entre 250 a 800 °C, ocorre a degradação da lignina (BROWNING, 2003; SATYANARAYANA *et al.*, 2013).

A estabilidade térmica da Taquara-lixo pode estar relacionada ao alto índice de cristalinidade (59%) e ao teor de lignina da fibra (22,3 a 27,5%), valores encontrados na madeira de Pinus e do bagaço de cana (ANNUNCIADO *et al.*, 2005). Alguns teores de cristalinidade são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Índice de cristalinidade de alguns materiais naturais

<b>Índice de cristalinidade (%)</b>	<b>Material</b>
59,0	Taquara-lixo não tratada
60,0	Taquara-lixo tratada com NaOH
55,0	Pita
70,0	Resíduo de Agave azul cozido
48,0	Bagaço de cana
66,3	Curauá
39,0	Folhas de banana
59,0	Bucha vegetal
47,8	Fibra de coco seco
72,2	Sisal

Fonte: Adaptado de Sydenstricker *et al.* (2003), Tanobe *et al.* (2005), Tomczak *et al.* (2007) Guimarães *et al.* (2009), Ramirez (2011), Satyanarayana *et al.* (2013) e Satyanarayana *et al.* (2014).

A resistência média à ruptura dessas fibras varia de 391 a 713 MPa (OSÓRIO *et al.*, 2011), enquanto que o sisal, o curauá e as fibras de côco apresentam tensão na ruptura de respectivamente  $324,2 \pm 173,9$  MPa, 87–310 MPa e 50–275 MPa, respectivamente (SYDENSTRICKER *et al.*, 2003; TOMCZAK *et al.*, 2007).

É importante ressaltar que as fibras de curauá e sisal são consideradas mecanicamente resistentes, mas que a Taquara-lixo tem propriedades ainda superiores, sendo, além disso, um material abundante e de baixo custo. Pode-se atribuir a dificuldade de processamento dos caules da Taquara-lixo não somente ao seu alto teor de lignina, mas também à alta resistência deste material.

Alves (2012) pesquisou a utilização de Taquara-lixo na forma de gravetos em matriz de poliéster, obtendo módulos de elasticidade da ordem de 19,9 GPa e tensão máxima à flexão em torno de 175,5 MPa, sugerindo em seu trabalho a possibilidade

de utilização deste material compósito, em substituição aos dormentes feitos de eucalipto.

Reis (2013) utilizou um teor de fibras de Taquara-lixia de 75% m/m com resina epóxi e concluiu que a tensão à flexão variava entre 207,3 e 216,6 MPa e o módulo de elasticidade variava entre 23,0 e 24,2 GPa.

## 2.4 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO

A realização de análises termogravimétricas, infravermelho, MEV, ensaios de absorção de água, ensaio de biodegradação e resistência à tração tornam-se indispensáveis para caracterizar os compósitos visando às suas possíveis utilizações.

### 2.4.1 Ensaio de biodegradação por compostagem

Neste ensaio os corpos de prova são enterrados, em um solo simulado com terra, esterco e areia, ou seja, um ambiente próprio para a presença de micro-organismos.

O solo necessita de um período de maturação de 3 (três) meses antes de ser utilizado. Nesse período é realizado o controle de pH e umidade. Após a maturação, os corpos de prova são enterrados com espaçamento mínimo entre eles e espessura de solo ao redor de 2,5 cm.

Os corpos de prova são pesados, medidos e analisados visualmente desde o início até o fim do ensaio, em intervalos de 30 dias, com duração de 150 dias no mínimo, para se ter o controle de como está ocorrendo o processo de biodegradação.

Para que produtos/embalagens plásticas sejam consideradas degradáveis e/ou de fontes renováveis, estas necessitam de requisitos e métodos de ensaio para biodegradação e compostagem, sejam eles através da ABNT NBR 15448-2 ou ASTM G 160-03.

É imprescindível a realização desse ensaio nos materiais, pois, através deles, é possível observar como é seu comportamento no solo e, quanto tempo permanecem sem modificações estruturais. É ainda mais relevante, quando se estuda aplicações de uso direto no solo, como no caso de tubetes para plantio, que permanecem em contato direto com umidade, solo e sol.

Brambilla (2013) mostra, com os resultados do ensaio de biodegradação a viabilidade de compósitos de PLA com fibras de buriti, em substituição a polímeros inertes à degradação, em que as fibras aceleram a degradação do PLA que já é biodegradável, para menores tempos, pós-uso. Neste estudo também é citada a importância do nitrogênio e fósforo para os microrganismos, que devem ser consumidos no decorrer do experimento, para que as colônias se desenvolvam.

Com relação às condições do solo, a norma ASTM G160-03 indica um pH entre 6,5 a 7,5, pois é um parâmetro importante para a sobrevivência dos microrganismos, sendo os fungos os mais seletivos com relação ao pH (OLIVEIRA *et al.*, 2008).

#### **2.4.2 Análise Termogravimétrica – TGA**

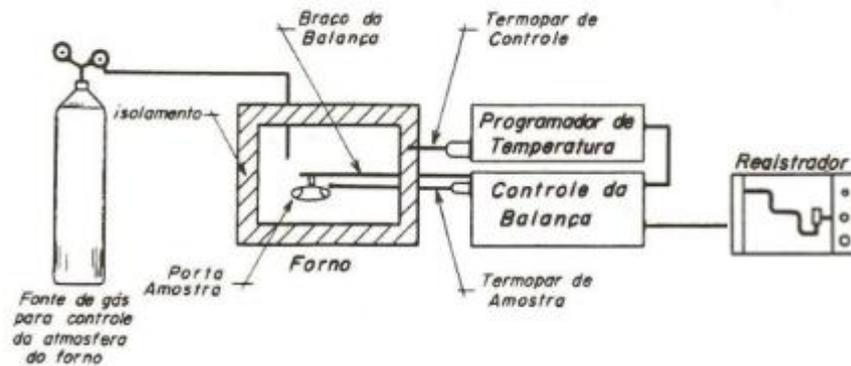
Segundo Denari *et al.* (2012), a TGA é “a técnica termoanalítica que acompanha a variação da massa da amostra em função da programação de temperatura”. O equipamento é composto por uma termobalança, que é o instrumento que permite a pesagem de forma contínua da amostra em função da temperatura.

Nesta análise tem-se o fornecimento de informações do comportamento térmico do compósito em suas diferentes proporções e sua respectiva perda de massa durante o aquecimento.

Oliveira (2016) utilizou a caracterização térmica por TGA para avaliar como a fibra de curauá interfere nas características térmicas do PLA e ressaltou que quanto maior o teor de estruturas cristalinas maior a estabilidade térmica da amostra. Assim, quanto maior os teores de lignina e hemicelulose menor a estabilidade térmica do compósito.

Na Figura 11, é representado um diagrama de um equipamento de TGA de forma genérica, apresentando os principais componentes, como a balança registradora, forno, sensor de temperatura, programador de temperatura do forno, suporte de amostra e a fonte de gás.

Figura 11 – Diagrama de um equipamento para análise termogravimétrica



Fonte: Denari & Cavalheiro (2012).

### 2.4.3 Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV

O microscópio eletrônico de varredura é um aparelho capaz de fornecer informações referentes à morfologia e identificar elementos químicos de uma amostra sólida, com aplicabilidade na farmácia, engenharia, física, química, odontologia, metalurgia, medicina e geologia (DEDAVID, 2007).

O MEV tem como princípio, a utilização de um feixe de elétrons de pequeno diâmetro que varrem de forma sincronizada, cujo objetivo é explorar a superfície da amostra e transmitir o sinal do detector a uma tela catódica, resultando na imagem, que é derivada dessa interação do feixe com a superfície da amostra.

No estudo de Oliveira (2016) a maioria das fibras de curauá presentes na região micrografada – após um ensaio de tração – se rompeu juntamente com a matriz de PLA. Foi observado, um grande descolamento das fibras da matriz, o que demonstra que ela não conseguiu transferir os esforços para as fibras.

### 2.4.4 Espectroscopia de Infravermelho com transformada de Fourier - FTIR

Essa análise estuda a interação das frequências relacionadas à vibração dos átomos e moléculas (CHANG, 2010), sendo que a região média mais utilizada é de  $400\text{ cm}^{-1}$  a  $4000\text{ cm}^{-1}$ . Seus objetivos são identificar grupos funcionais, estudar a conformação e estrutura da molécula e obter seu espectro vibracional (CANEVAROLO, 2003).

Trata-se de um equipamento composto por uma fonte de radiação, um interferômetro, que é constituído de um divisor de feixe, um espelho móvel e um fixo, onde incidem os feixes, um detector de infravermelho e um compartimento de

amostra. Após a divisão e transmissão dos feixes, há a sua passagem pelo compartimento de amostra e pelo espelho, chegando ao detector, que irá analisar o feixe, gerando o interferograma (CANEVAROLO, 2003).

Para os polímeros, a interpretação espectral é feita por meio da análise e comparação entre as frequências vibracionais da amostra com as dos grupos funcionais característicos e já tabelados (CANEVAROLO, 2003).

Essa técnica permite verificar o efeito do aumento da proporção de fibras nas estruturas químicas dos compósitos, bem como acompanhar a evolução das ligações carboxila e hidroxila reativas no PLA.

O aumento da cristalinidade do compósito PLA/Buriti é atribuído à hidrólise e ao ataque dos microrganismos nas regiões amorfas do corpo de prova. Isso ocorre pela susceptibilidade de penetração da água e oxigênio nestas regiões.

Através de espectros no FTIR, coletados após à exposição em diferentes períodos (0 a 180 dias) analisados dos corpos de prova em contato com o solo simulado, foram constatadas alterações na região de comprimento de onda de  $3500\text{ cm}^{-1}$ , indicando aumento de umidade na amostra e hidrólise e alargamento da banda  $1748\text{ cm}^{-1}$  (referente à carbonila), indicando a degradação biológica (BRAMBILLA, 2013).

#### **2.4.5 Absorção de água**

Este ensaio apresenta um controle da uniformidade do produto (VIOLA, 2012) e define o tipo de ambiente em que o compósito pode ser usado em decorrência de sua estabilidade dimensional quando em contato com a água (SILVA *et al.*, 2005).

Um dos aspectos importantes dessa análise é avaliar a influência da fibra no processo de absorção de água e o tempo suportado em contato com a umidade.

Em compósitos lignocelulósicos, com matrizes termofixas fenólicas reforçadas com fibras de bagaço de cana-de-açúcar, observou-se que a introdução das fibras aumenta a porcentagem de água absorvida (FROLLIN *et al.*, 2002).

Pinheiro (2008) verificou que a redução de vazios em compósitos lignocelulósicos com matriz polimérica proporciona uma redução na absorção de água pelo compósito. Alexandre (2005), em estudos de compósitos de poliéster/tecidos tramados vegetal, verificou que a absorção de água é maior no início do ensaio e que,

conforme ocorre a passagem de tempo, esta capacidade de absorção diminui até entrar em equilíbrio.

#### **2.4.6 Caracterização mecânica**

No caso de compósitos com fibras naturais, a caracterização mecânica é importante para se observar a influência da porcentagem de fibras na resistência aos esforços mecânicos.

O ensaio de tração determina valores de resistência ao alongamento, à ruptura, ao módulo de elasticidade e à resistência à tração propriamente dita, onde se tem a aplicação de uma carga gradual através de duas garras presas ao material de ensaio que se afastam, promovendo o rompimento do corpo de prova (MORASSI, 2013).

Essa técnica produz informações básicas do comportamento elástico do material e quanto ele, teoricamente, suportaria se sofresse algum esforço físico nas diferentes proporções.

Com essa técnica, Brambilla (2013) demonstrou a deterioração das propriedades mecânicas com o aumento do tempo de exposição dos compósitos em solo simulado.

Além disso, verificou-se a combinação da resistência à tração e ao módulo de elasticidade, em que o compósito com maior quantidade de fibras apresentou melhor desempenho. Oliveira (2013) também constatou, através da técnica, que o aumento do teor do reforço de fibras no compósito proporcionou aumento no limite de resistência à tração do mesmo.

### **2.5 Considerações finais**

A falta de consciência ambiental e o consumismo exorbitante da sociedade constituem fatores atuantes na produção exagerada de lixo, que, conseqüentemente, causa um acúmulo de resíduos não degradáveis.

A combinação de fibras naturais, sem nenhum tratamento químico e sem uso de agentes compatibilizantes, torna-se ecologicamente correta e sustentável com polímeros biodegradáveis (JOHN *et al.*, 2008).

Até o presente momento não foram encontrados trabalhos na literatura que utilizaram a fibra *in natura* da espécie da Taquara-lixá em um compósito com PLA. O

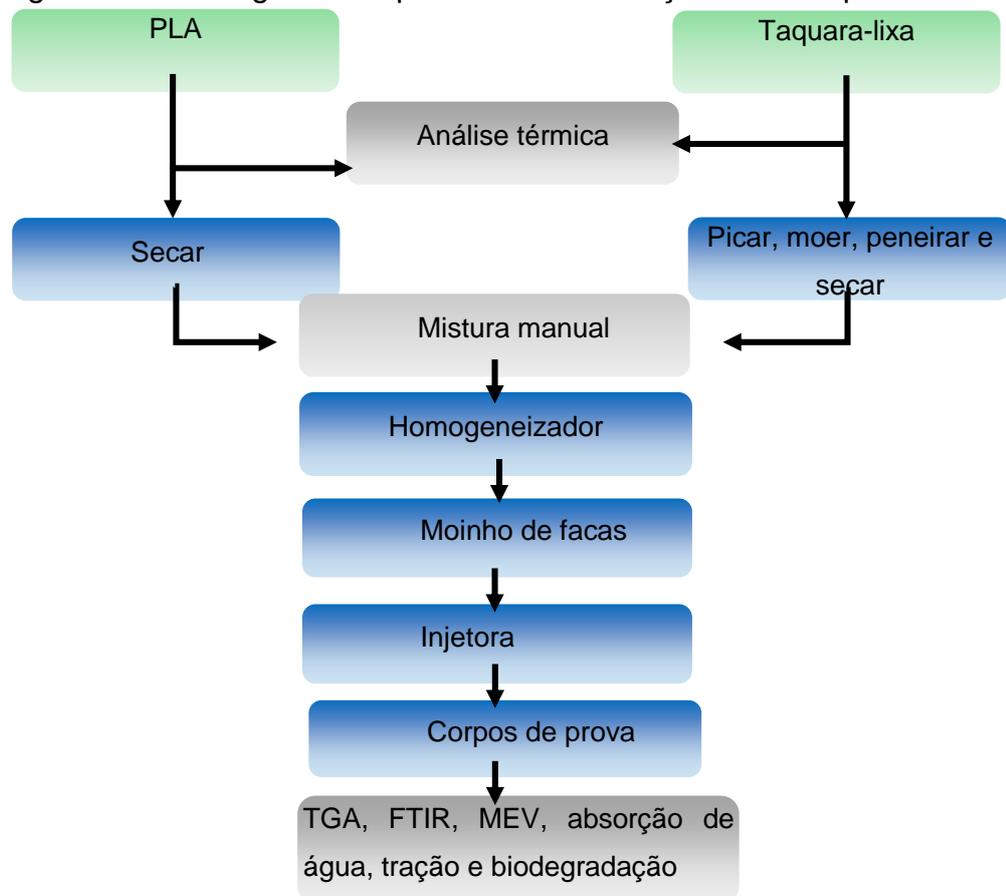
estudo das propriedades térmicas, mecânicas, morfológicas e a avaliação do comportamento da adição das fibras e sua influência no processo de biodegradação do compósito contribuirá sobremaneira como subsídio para futuras aplicações deste material como tubetes e, assim, na diminuição de um passivo ambiental que gera grande volume de descarte pelo setor agrícola brasileiro.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados para o desenvolvimento deste trabalho e os métodos empregados tanto na preparação das amostras quanto na análise dos materiais se encontram descritos nesta seção.

Os processos de homogeneização de materiais poliméricos e fibras naturais comumente encontrados na literatura utilizam extrusora com dupla rosca com o propósito de garantir maior homogeneidade no compósito, porém não se obteve sucesso ao utilizar este método com o PLA e as fibras da taquara. Portanto, a mistura se deu através de um homogeneizador mecânico, para, posteriormente, vir a ser moldado por meio de uma injetora. Esse método foi escolhido após ensaios preliminares. O processo de obtenção dos compósitos é apresentado no fluxograma da Figura 12.

Figura 12 – Fluxograma do processo de obtenção dos compósitos



Fonte: Autoria própria.

### 3.1 MATERIAIS

- Polímero Poli (Ácido Lático) – PLA da empresa Oeko, Florianópolis-SC, adquirido em pellets armazenados em recipiente vedado sem contato com umidade a fim de evitar alterações em sua estrutura.

- Taquara-lixá (*Merostachys skvortzovii*), coletado na estação experimental da EMBRAPA em Caçador-SC.

- Terra retirada do sítio da EMBRAPA de Colombo-PR, areia e esterco, que foram misturados com a finalidade de produzir um solo simulado para a realização do ensaio de biodegradação dos compósitos.

- Areia de construção, adquirida em casa de materiais de construção na cidade de Itapeva-SP.

- Esterco coletado junto ao Regimento de Polícia Montada Coronel Dulcídio, da Polícia Militar da cidade de Curitiba-PR.

### 3.2 MÉTODO DE PREPARAÇÃO DAS FIBRAS DA TAQUARA-LIXA

As amostras de Taquara-lixá foram coletadas na estação experimental da Embrapa. Estas são nativas da região e não possuem controle das fases de crescimento. Desse modo, foram coletadas com a finalidade de análise e caracterizações.

As amostras de Taquara-lixá após a coleta, foram secas em estufa por 96 horas, com circulação de ar a 60 °C até atingir massa constante. Posteriormente foram cortadas em pedaços menores (nos colmos) de forma manual, e secas novamente. Após estarem secas e com massa constante, a Taquara-lixá foi moída no moinho de facas tipo *Willey* (Figura 13) para obtenção das fibras que foram utilizadas na produção dos compósitos junto ao PLA.

Posteriormente as amostras foram peneiradas, de forma manual, em peneiras de 45 e 60 *mesh*. As fibras utilizadas nos compósitos foram as fibras retidas entre estas duas granulometrias.

Figura 13 – Moinho de Facas



Fonte: Autoria própria

Na Figura 14 observa-se os estágios para a obtenção das fibras da Taquara-lixá.

Figura 14 – Estágios de processamento da Taquara (a) Taquara-lixá (b) Taquara-lixá picada (c) fibra de Taquara-lixá moída e peneirada



Fonte: Autoria própria

### 3.2.1 Confeção dos compósitos

As fibras foram secas em estufa MedClave modelo 1 a  $100\pm 5$  °C por 24 horas (FERNANDES e FORNARI, 2011) e o polímero, em pellets, a  $60\pm 5$  °C por 2 horas na Embrapa Florestas em Colombo-PR, antes da produção dos compósitos. As fibras foram previamente misturadas ao polímero de forma manual, em três diferentes proporções: 10, 20 e 30% m/m de fibra, sendo estas inseridas no homogeneizador localizado na Embrapa Florestas, do modelo MH 100 série 6069 da MH equipamentos

(Figura 15), a uma temperatura de 90 °C com rotação de 3600 rpm durante 15 segundos. As porcentagens e parâmetros de processamentos foram determinados por testes preliminares.

Figura 15 (a) Homogeneizador modelo MH 100 (b) reservatório para mistura



Fonte: Autoria própria

Após o material ser fundido, misturado e solidificado, este foi triturado no moinho de facas e injetado através de uma injetora Haake Minijet Pro –Thermo scientific da Embrapa Florestas (Figura 16).

Figura 16 – Injetora Haake Minijet Pro, Thermo scientific

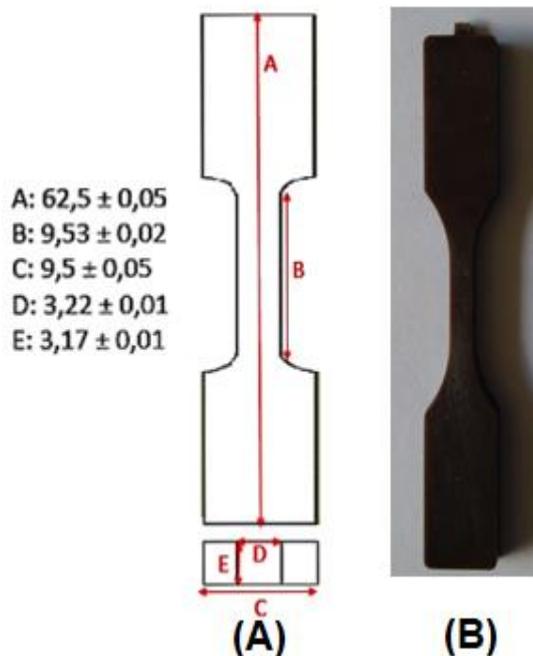


Fonte: Autoria própria

A pressão utilizada na confecção dos corpos de prova foi de 700 bar durante 25 segundos e com pressão de recalque de 450 bar por 5 segundos, sendo as temperaturas do cilindro e do molde de 180 °C e 35 °C, respectivamente (Figura 16). Foram produzidos corpos de prova em molde fechado do tipo IV, conforme as normas ASTM D638, para cada porcentagem de fibra testada.

Após a produção dos corpos de prova estes foram armazenados em recipientes fechados antes do período dos ensaios.

Figura 17– (a) Corpo de prova segundo a norma e (b) corpo de prova produzido



Fonte: (a) ASTM D638 (b) Autoria própria.

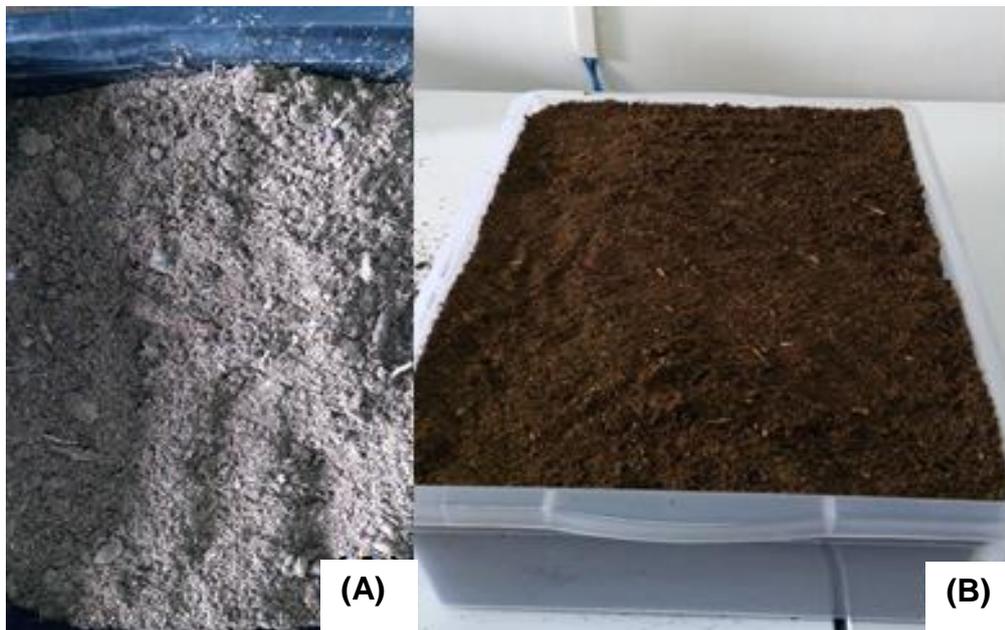
### 3.3 ENSAIO DE BIODEGRADAÇÃO POR COMPOSTAGEM

O ensaio de biodegradação foi realizado em solo simulado em um período de 180 dias na Embrapa Florestas, seguindo a adaptação da norma ASTM G 160-03, com monitoramento da massa e dimensão dos corpos de prova a cada 30 dias e análises térmica, absorção de água, FTIR e tração a cada 90 dias. O procedimento teve início no mês de janeiro/2018 e foi finalizado no mês de junho/2018.

O solo simulado foi confeccionado com esterco de cavalo seco durante 15 dias, terra com baixo teor de argila e areia grossa. Estes componentes foram misturados de forma manual e mantidos em processo de maturação por 3 (três) meses em

recipiente fechado e sem luz. Posteriormente, iniciou-se o ensaio de biodegradação, os corpos de prova foram enterrados de forma separada, com relação a porcentagem de fibra presente nos corpos de prova de PLA puro e PLA com 10, 20 e 30% e monitorados de forma visual e por mensuração da sua dimensão em comprimento e espessura e controle de massa após 0, 30, 60, 90, 120, 150 e 180 dias de contato com o solo.

Figura 18 – Solo simulado (a) mistura da areia, terra e esterco (b) solo no recipiente para o ensaio



Fonte: Autoria própria

Na Figura 19 constam os recipientes com o solo simulado onde os corpos de prova dos compósitos de PLA/fibras de Taquara-lixá, com porcentagem de 0, 10, 20 e 30% de fibra, foram enterrados e sinalizados com plaquinhas, para monitoramento durante o processo de compostagem, descrito no item 3.3, pelo período de 180 dias de análise.

Figura 19 – Recipiente com os corpos de prova de PLA com 0, 10, 20 e 30% de fibras de Taquara-lixia



Fonte: Autoria própria

### 3.4 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DAS FIBRAS

As análises químicas foram realizadas no Laboratório de Tecnologia da Madeira da EMBRAPA Florestas em Colombo-PR. Para todas as análises químicas realizaram-se três repetições. As propriedades determinadas estão descritas na Tabela 3.

Tabela 3 – Análises químicas e suas respectivas normas

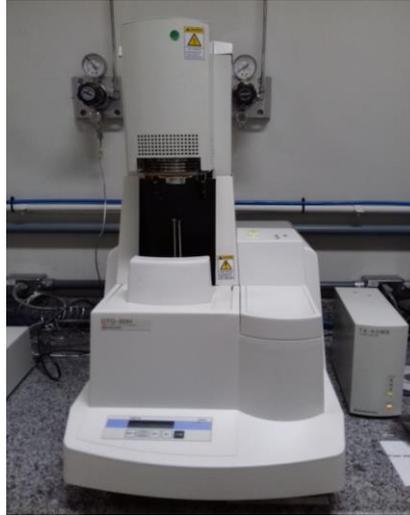
Análises químicas	Norma
Teor de Extrativos em etanol-tolueno	TAPPI 208
Teor de Lignina	TAPPI 222
Teor de Holocelulose (Celulose e Hemicelulose)	TAPPI T19m-54

### 3.5 TGA

Utilizou-se o equipamento DTG-60H da Shimadzu (Figura 20) do Laboratório da UTFPR Londrina-PR, com atmosfera de Nitrogênio, fluxo de  $50 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ , taxa de

aquecimento de  $20\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ , com faixa de temperatura de 25 a  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  e utilizando amostras de aproximadamente 10 mg.

Figura 20 – Equipamento de Termogravimetria



Fonte: Autoria própria

### 3.6 FT-IR

Utilizou-se espectrômetro de infravermelho, modelo Varian 640-R, pela técnica de refletância total atenuada (ATR) do Laboratório Multiusuário de Análises Químicas – LAMAQ da UTFPR, campus Curitiba (Figura 21).

Figura 21 – Acessório de ATR do Espectrômetro



Fonte: Autoria própria

### 3.7 CRISTALINIDADE

As cristalinidades dos compósitos foram calculadas com base na área abaixo da curva do DRX, através da equação:

$$A_t - A_a = A_c$$

Onde:

$A_t$  é a área total,  $A_a$  é a área amorfa e  $A_c$  é a área cristalina. Em seguida foi realizada a conversão para porcentagem.

Essa análise da difração de raios X (DRX) foi conduzida em aparelho XRD-6000 Shimadzu, utilizando radiação  $K\alpha$  do cobre, tensão de 40KV, corrente de 30 mA, varredura entre  $2\theta$  de  $2^\circ$  a  $30^\circ$  e velocidade de varredura de  $2^\circ/\text{min}$ .

### 3.8 ABSORÇÃO DE ÁGUA

Os ensaios de absorção e inchamento em espessura foram realizados de acordo com a norma ASTM D 570-90, em triplicatas. As medidas foram feitas com os equipamentos no laboratório da Embrapa, por meio da utilização de uma balança digital, um paquímetro metálico e um recipiente com água.

No ensaio é determinada a absorção de água em compósitos quando submergidos. A Equação 1 é utilizada para calcular a porcentagem de água absorvida durante o período que analisado:

Equação 1: 
$$X_a = \frac{m_f - m_i}{m_i} \times 100$$

Onde  $X_a$  (%) é a absorção de água,  $m_i$  (g) é a massa do corpo de prova seco,  $m_f$  (g) é a massa do corpo de prova saturado.

Na Figura 22 tem-se os corpos de prova no ensaio de absorção de água.

Figura 22 – Corpos de prova do PLA e PLA/Taquara-lixá com 10, 20 e 30% de fibra no ensaio de absorção de água



Fonte: Autoria própria

### 3.9 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

Os ensaios de resistência à tração dos compósitos foram realizados conforme a norma ASTM D 638-10, em máquina universal de ensaios modelo EMIC DL10000 (Figura 23) do DAMEC da UTFPR Curitiba, com velocidade de ensaio de 5mm/min e célula de carga de 5kN.

Figura 23 – Máquina universal de ensaios EMIC



Fonte: Autoria própria

### 3.10 MEV

Utilizou-se o equipamento da marca Zeiss, modelo EVO MA15 (Figura 24), do Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais da UTFPR campus Curitiba. Os corpos de prova utilizados foram os fraturados no ensaio de resistência à tração.

Figura 24 – Equipamento de Microscopia Eletrônica de Varredura



Fonte: <http://www.utfpr.edu.br/curitiba>.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

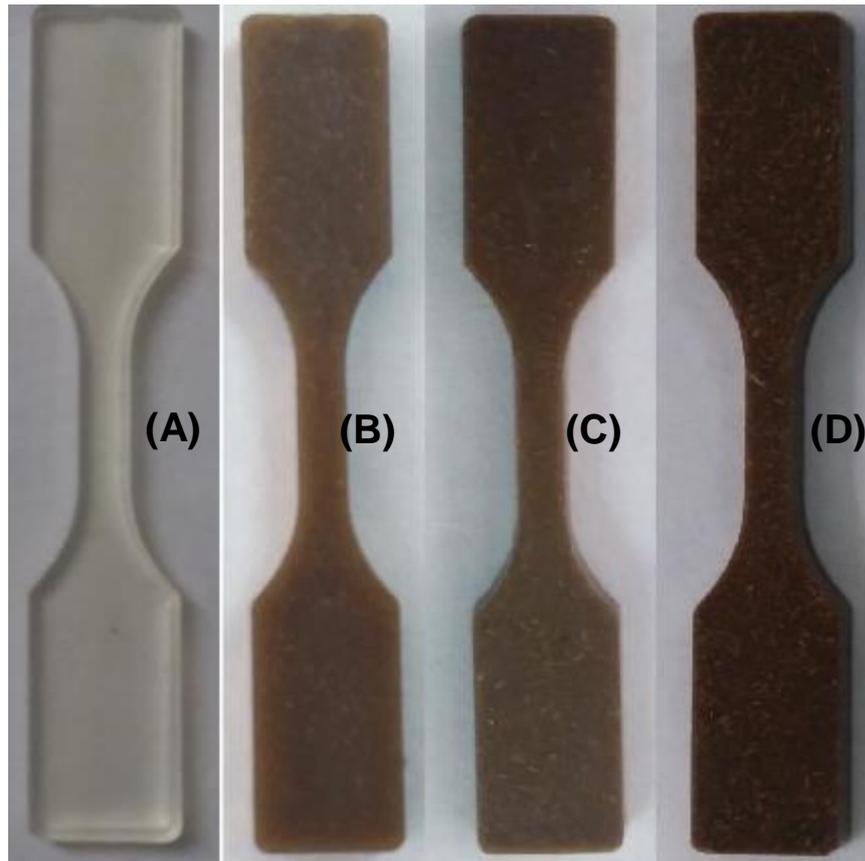
Nesse item são apresentados e discutidos os resultados obtidos através das análises térmicas, de infravermelho e ensaios de biodegradação e mecânico realizadas no PLA e nos compósitos PLA/Taquara-lixia.

### 4.1 ENSAIO DE BIODEGRADAÇÃO POR COMPOSTAGEM

O ensaio de biodegradação foi realizado com solo simulado, como descrito no item 3.3, sendo feita a observação da evolução por meio visual e através de mensuração de cristalinidade por DRX.

Na Figura 25 estão apresentados os corpos de prova de PLA e dos compósitos de PLA/Taquara-lixá, obtidos conforme descrito no item 3.2.1, com 0 dias de contato com o solo simulado para compostagem.

Figura 25 – Corpo de prova de (a) PLA e dos compósitos de (b) PLA/Taquara-lixá com 10% de fibra (c) PLA/Taquara-lixá com 20% de fibra (d) PLA/Taquara-lixá com 30% de fibra

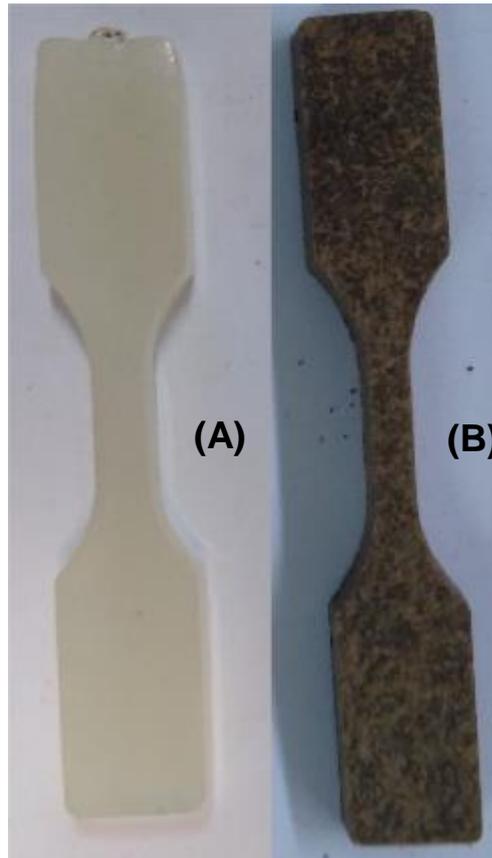


Fonte: Autoria própria

Na Figura 25 podem ser observados os corpos de prova utilizados no ensaio de biodegradação: o corpo de prova de PLA é transparente, e os corpos de prova dos compósitos com 10, 20 e 30% de fibra de Taquara-lixá apresentam coloração mais escura, proporcionada pela presença das fibras, conforme aumenta a sua proporção com distribuição homogênea através do processamento. Pode-se observar também um brilho superficial nos corpos de prova, além de uma superfície lisa quando tocamos os mesmos.

São apresentados na Figura 26 corpos de prova de PLA e do compósito de PLA/Taquara-lixá com 30% de fibra e 90 dias de contato com o solo simulado para compostagem.

Figura 26 – Corpos de prova com 90 dias de compostagem do (a) PLA e dos compósitos de (b) PLA/Taquara-lixá com 30% de fibras



Fonte: Autoria própria.

Verifica-se, na Figura 26a, que o corpo de prova de PLA apresenta superfície com opacidade e o corpo de prova do compósito de PLA/Taquara-lixá, com 30% de fibra, é mostrado na Figura 26b. Este apresentou superfície sem brilho, tendo coloração mais clara e opaca e com fibras mais visíveis. Isto não foi observado na Figura 24d, indicando que ocorreu biodegradação na superfície do corpo de prova.

Segundo Fukushima (2009), a alteração da cor transparente para branco do corpo de prova do PLA exposto à biodegradação significa absorção de umidade desse polímero. O compósito de PLA/Taquara-lixá com 30% de fibra apresentou mudanças visuais significativas, principalmente com relação à sua coloração.

Na Figura 27 tem-se o corpo de prova PLA/Taquara-lixá com 30% de fibra e 120 dias em solo simulado para compostagem.

Figura 27 – Corpo de prova do compósito em 120 dias de compostagem de PLA/Taquara-lixá com 30% de fibra



Fonte: Autoria própria.

É possível observar uma angulação no centro do corpo de prova e fibras visíveis. Pode-se atribuir esse fato à biodegradação do PLA, que deixa exposta a fibra de Taquara-lixá que, ao absorver água, pode ocasionar inchamento das fibras e tensionamento no corpo de prova, assim como observado por Brambilla (2013). Essa angulação não foi observada nos demais corpos de prova.

A Figura 28 diz respeito aos corpos de prova com 180 dias de compostagem de PLA e dos compósitos de PLA/Taquara-lixá com 10, 20 e 30% em massa de fibra.

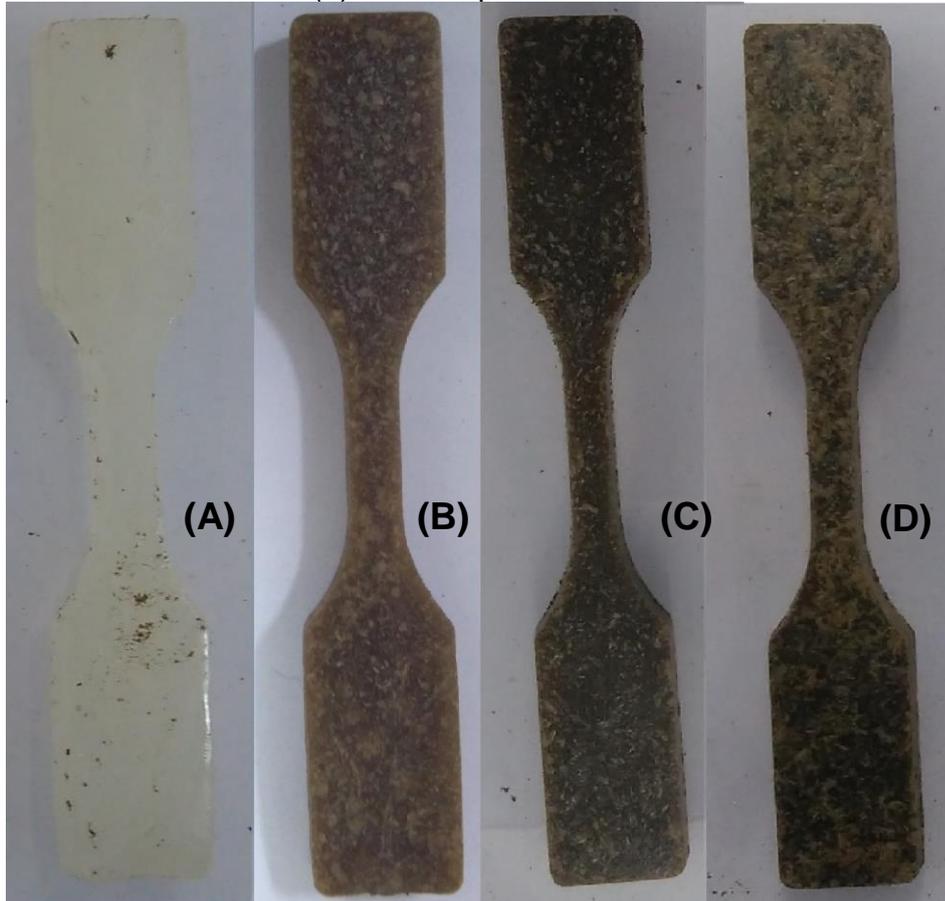
Observa-se, na Figura 28a, que o corpo de prova de PLA apresentou opacidade, diferentemente do brilho que a amostra possuía após seu processamento na Figura 25a. Nota-se partículas do solo incrustadas na superfície do corpo de prova do PLA mesmo após a limpeza do mesmo, indicando saliências na superfície decorrentes do processo de biodegradação. Os corpos de prova dos compósitos de PLA/Taquara-lixá apresentaram opacidade e as fibras ficaram mais visíveis e salientes em relação ao estado inicial (Figura 25).

Pode-se afirmar que a biodegradação do PLA ocorre inicialmente na superfície, deixando as fibras de Taquara-lixá expostas ao solo simulado. A coloração dos corpos de prova também se modificou: com 30% de fibra tem-se uma coloração mais escura, característica da fibra.

Segundo Gu (2003), a consolidação de microrganismos na superfície do polímero, através de uma degradação microbiana, favorece o ataque de enzimas ou radicais de origem biológica ao polímero. Isto ocasiona a perda de estabilidade

mecânica, aumento do acúmulo de água que penetra o polímero e provoca o seu intumescimento (FLEMMING, 1997; GU, 2008).

Figura 28 – Corpos de prova em compostagem por 180 dias de (a) PLA e compósitos de (b) PLA/Taquara-lixã com 10% de fibra (c) PLA/Taquara-lixã com 20% de fibra e (d) PLA/Taquara-lixã com 30% de fibra



Fonte: Autoria própria.

Além da caracterização visual, foi realizada a mensuração dos corpos de prova com um paquímetro, e antes de cada medição os corpos de prova foram limpos e fotografados para as caracterizações e comparações durante o período de biodegradação. Na Tabela 4 é apresentado os dados de massa coletados durante o processo de compostagem dos corpos de prova.

Tabela 4 – Acompanhamento da massa dos corpos de prova de PLA e PLA/Taquara-lixo com 10, 20 e 30% de fibras durante 0, 90 e 180 dias em contato como o solo

	<b>PLA</b>	<b>10% fibra</b>	<b>20% fibra</b>	<b>30% fibra</b>
<b>0 dias</b>	0,44±0,02 Ad	1,55±0,03 ABc	2,76±0,02 Db	4,33±0,06 Ca
<b>90 dias</b>	0,12±0,02 Cd	1,32±0,01 Dc	2,58±0,04 Eb	4,08±0,09 Da
<b>180 dias</b>	0,27±0,02 Bd	1,59±0,04 Ac	3,15±0,04 Ab	4,60±0,07 Aa

Letras maiúsculas, variam estatisticamente na coluna e; Letras minúsculas: variam estatisticamente na linha; Teste de Tukey a 95% de confiabilidade.

Fonte: Autoria própria.

Tem-se a variação estatística do corpo de prova do PLA de 0 a 180 dias, assim como o corpo de prova de PLA/Taquara-lixo com 30% de fibras. Também houve variação estatística de corpo de prova do PLA comparado ao compósito com PLA/Taquara-lixo com 30% de fibra.

A diminuição da massa durante os 90 dias, pode estar relacionada a degradação do material e o aumento da massa aos 180 dias, pode estar relacionada a maior absorção de água devido a exposição das fibras com a degradação do PLA, quanto mais fibras expostas mais água é absorvida

Constatou-se um aumento de cristalinidade até 90 dias de exposição que, segundo Weir (2004), Solarski (2005), Campos (2010) e Brambilla (2013), é decorrente da absorção de água, hidrólise e conseqüente ataque de microrganismos nas regiões amorfas do material, aumentando, assim, a cristalinidade de PLA após o período de degradação.

Após 90 dias de exposição em solo simulado, a cristalinidade diminuiu, possivelmente pela hidrólise ser o mecanismo predominante e pela movimentação/dimensão das cadeias não possibilitarem o rearranjo das cadeias poliméricas (BRAMBILLA, 2013).

Os dados de cristalinidade dos corpos de prova de PLA e dos compósitos de PLA/Taquara-lixo com 10, 20 e 30% de fibra são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Índice de cristalinidade dos corpos de prova de PLA e PLA/Taquara-lixo com 10, 20 e 30% de fibras durante 0, 90 e 180 dias em contato com o solo

	<b>PLA</b>	<b>10%</b>	<b>20%</b>	<b>30%</b>
<b>0 dias</b>	11,01	12,38	12,89	11,57
<b>90 dias</b>	11,94	10,24	13,07	15,77
<b>180 dias</b>	10,52	10,98	9,37	14,58

Fonte: Autoria própria.

Nota-se que o corpo de prova com PLA/Taquara-lixo com 30% de fibra apresentou aumento da cristalinidade com o aumento do tempo de exposição ao solo simulado, ocorrendo provavelmente pela influência da cristalinidade da fibra em maior quantidade no compósito, diferentemente dos outros corpos de prova, em que a cristalinidade diminuiu com o tempo de exposição, também apresentado por Brambilla (2013). A degradação dos corpos de prova pode ser evidenciada pela diminuição do grau de cristalinidade (LEMOS, 2014) e a baixa cristalinidade conferida ao PLA responde ao ataque a região amorfa.

A adição de 30% de fibras no compósito provocou um aumento do grau de cristalinidade, diferente do encontrado por Mofokeng (2011) e Silveira, Howart e Molinari (2014), onde a adição de fibras de sisal gerou uma redução significativa neste parâmetro.

#### 4.2 ANÁLISES TÉRMICAS

As análises termogravimétricas das amostras de PLA e dos compósitos de PLA/Taguara lixa foram realizadas com objetivo de analisar a estabilidade térmica do compósito e das fibras e do PLA. Isto porque, a temperatura do processamento precisa ser inferior às temperaturas de degradação das fibras vegetais e do polímero, evitando, assim, a alteração das propriedades mecânicas do produto final.

Na Figura 29a há o termograma do PLA, que apresentou um único evento de perda de massa entre 315 °C e 378 °C, sendo a perda de 97,6% em massa. Isto evidencia que esse polímero de fonte natural é livre de solventes, sendo este evento também observado nos estudos de Zhao (2010) e Brambilla (2013). De acordo com Palsikowski (2015), o PLA apresenta uma única etapa de degradação térmica, com o

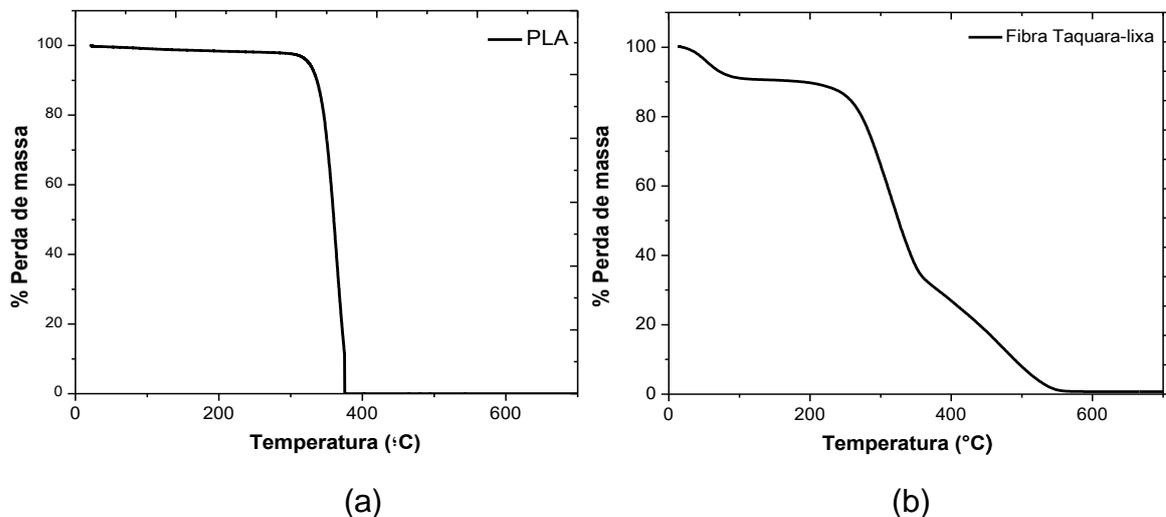
pico de máxima degradação em torno de 360 °C; outros resultados semelhantes foram obtidos por Kumar *et al.* (2010) e Kuchnier (2014).

No termograma da fibra (Figura 29b) foi verificada a presença de quatro eventos térmicos. O primeiro evento, entre 22 e 80 °C, é caracterizado pela perda da água que apresentou estruturas de baixa massa molar na fibra.

O segundo evento em 223 °C é atribuído ao início da degradação da hemicelulose juntamente com lignina. No terceiro evento tem-se a decomposição da celulose com temperatura em 347 °C e também dos resíduos formados do segundo evento de degradação.

Um quarto evento com temperatura de degradação a 435 °C correspondente à decomposição térmica da lignina. A perda de massa total para essa amostra foi de 94,3%. Estes resultados estão de acordo com os estudos de Santos *et al.* (2010) e Brambilla (2013).

Figura 29 – (a) TGA do PLA e (b) TGA da fibra da Taquara-lixá



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 30a estão as curvas termogravimétricas de compósitos PLA/Taquara-lixá para as diferentes proporções de fibra em 0 dias de contato com o solo simulado para compostagem. A temperatura inicial de perda de massa do corpo de prova do PLA variou de 315 °C com 0 dias de contato com o solo simulado para aproximadamente 291 °C aos 180 dias do processo de biodegradação.

Já os corpos de prova de PLA/Taquara-lixá com 30% de fibra em 0 dias de contato com o solo simulado teve uma temperatura inicial de perda de massa a 270°C

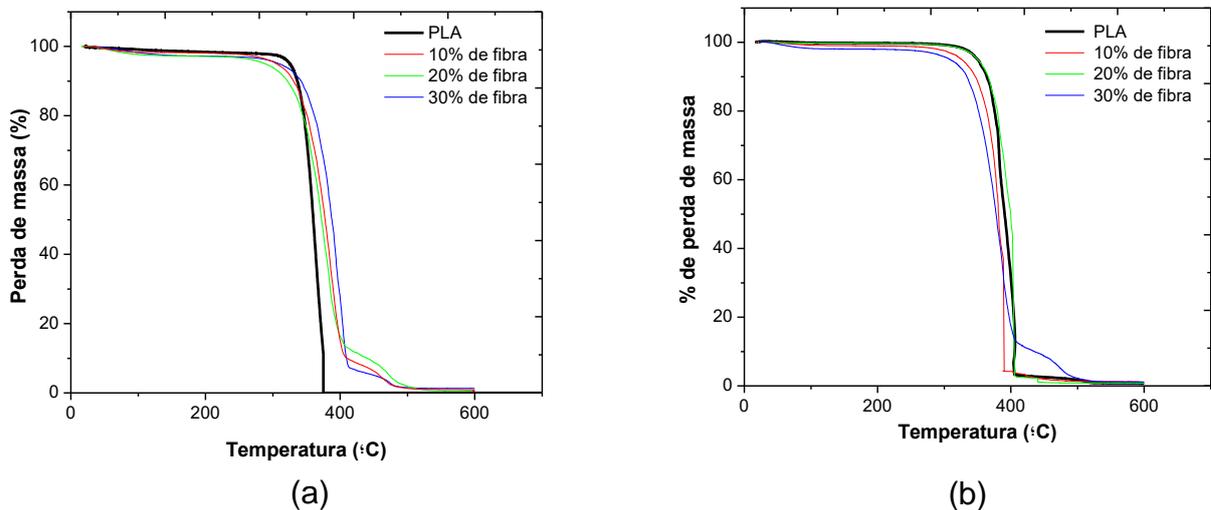
para 264°C aos 180 dias. Segundo Santos (2010), isso se deve à decomposição térmica dos componentes da fibra natural, que ocorre em temperaturas superiores às do polímero puro, conferindo ao compósito propriedades intermediárias entre a fibra e o polímero aumentando a temperatura de início de perda de massa dos compósitos com fibras.

Lee e Wang (2006) verificaram que a adição de fibras de bambu na matriz PLA sem agente de acoplamento diminuiu a temperatura de degradação do compósito, assim como verificado neste trabalho.

Observa-se que todos os compósitos apresentam temperatura de início de perda de massa inferior a do PLA devido a combinação da temperatura entre o PLA e a da fibra *in natura*. Os corpos de prova de PLA com fibras de Taquara-lixá com 180 dias (Figura 30b) de compostagem apresentam temperatura de início de perda de massa inferior a de 0 dias (Figura 30a).

Essa redução de início de temperatura de perda de massa pode ser atribuída a biodegradação do PLA, deixando as fibras mais expostas visto que, as fibras possuem temperatura de início de perda de massa inferior a do PLA.

Figura 30 – Curva termogravimétrica dos compósitos PLA/Taquara-lixá com diferentes % de fibra em (a) 0 dias de compostagem e (b) 180 dias de compostagem



Fonte: Autoria própria.

Nota-se que o compósito com 30% de fibra apresentou a temperatura de degradação inferior em relação aos outros compósitos, inclusive comparado a análise realizada com 0 dias em contato com o solo simulado. Este fato se deve ao processo

de biodegradação, onde observa-se que a fibra induz a diminuição da temperatura de início de perda de massa.

Lee (2006) também encontrou resultados semelhantes, nos quais a fibra influenciou na temperatura de perda de massa do compósito de PLA com fibras de bambu.

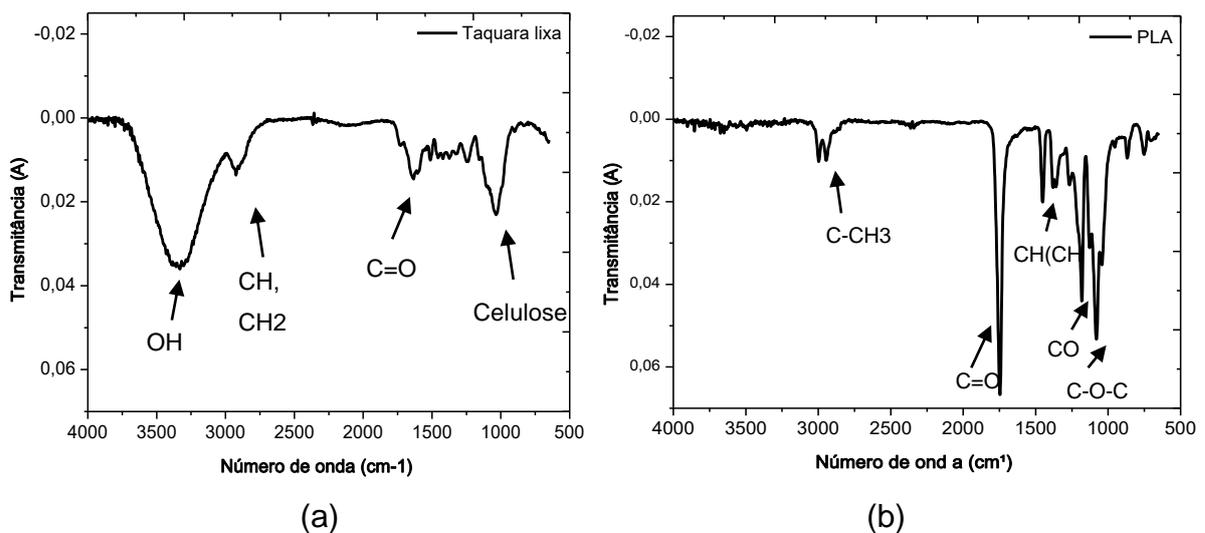
Silvestrin (2018) também cita que as amostras contendo fibras vegetais iniciam a decomposição da hemicelulose em 224 °C, da celulose em 300 °C e da lignina em aproximadamente 400 °C, assim como verificado no estudo de Verheyen *et al.* (2004).

### 4.3 FTIR

As análises espectroscópicas no infravermelho (FT-IR) foram realizadas para identificar os grupos funcionais químicos característicos do PLA e sua variação, nos compósitos PLA/Taquara-lixá.

As fibras de Taquara-lixá não foram submetidas a tratamentos químicos, o que resultou em espectros de FT-IR similares entre si e picos no mesmo intervalo de número de ondas, bem como similares a outras fibras vegetais (MARTINS, 2004; CORRÊA, 2010; TEIXEIRA, 2012).

Figura 31 – Espectro do infravermelho do corpo de prova de (a) Taquara-lixá e (b) PLA sem contato com o solo simulado



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 31a, na região de 3400 cm<sup>-1</sup>, aparece uma banda alargada, característica do estiramento de grupos hidroxílicos (OH) de celulose e da presença

de água. A banda em  $2900\text{ cm}^{-1}$  é atribuída ao estiramento do C-H e  $\text{CH}_2$ , ambos característicos de materiais orgânicos (SGRICCIA, 2008; CORRÊA, 2010).

A banda em  $1750\text{ cm}^{-1}$  corresponde aos grupos acetil e ligações C=O, característicos da hemicelulose. A celulose foi evidenciada por pico na região de  $1050\text{ cm}^{-1}$  (CORRÊA, 2010; SOUZA Jr., 2010; CARDOSO, 2013).

Na Figura 31b são observadas fortes bandas características do PLA, referentes à banda do estiramento do C=O, próximo a  $1700\text{ cm}^{-1}$ , e as bandas devidas ao estiramento assimétrico do CO, em  $1200\text{ cm}^{-1}$ .

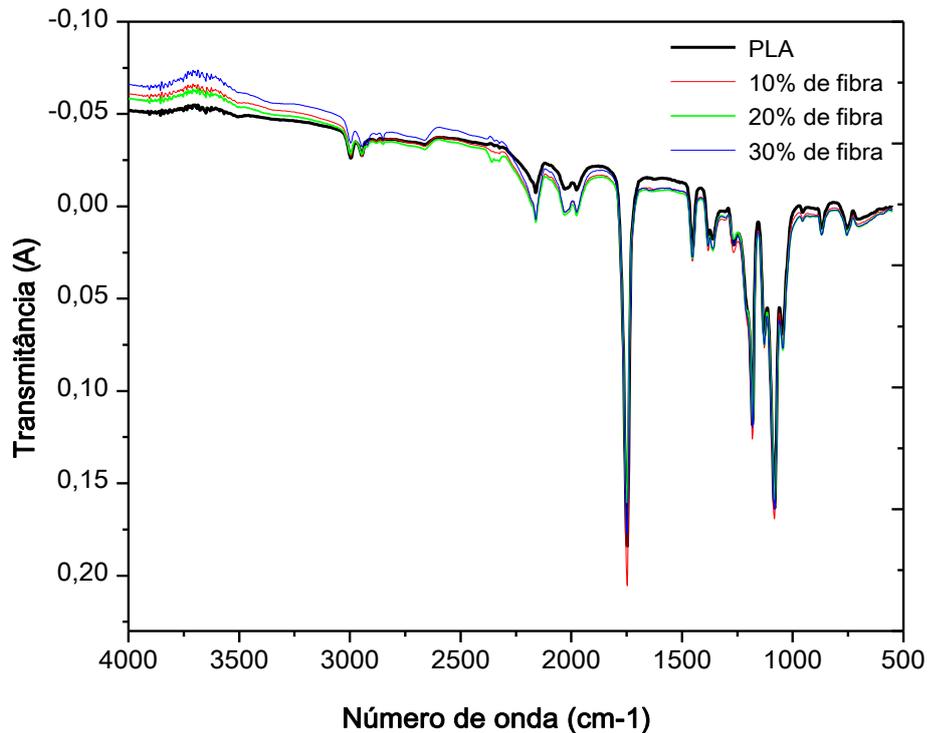
Nota-se que as bandas características do PLA são  $2995\text{--}2945\text{ cm}^{-1}$  referentes ao grupamento C- $\text{CH}_3$  em  $1453\text{ cm}^{-1}$  atinente à vibração  $\text{CH}(\text{CH}_3)$ ; em  $1181\text{ cm}^{-1}$  referente ao estiramento simétrico do CO, e três picos em  $1128$ ,  $1082$  e  $1043\text{ cm}^{-1}$  relativos ao estiramento simétrico COC, assim como nos estudos de Drumond (2004) e Quin (2010). A ausência de uma banda intensa na região  $3000\text{ cm}^{-1}$  (estiramento do grupamento O-H) é um indicativo de ausência de subprodutos de hidrólise do PLA.

Na Figura 32 é apresentado o infravermelho dos corpos de prova do PLA e dos compósitos de PLA/Taquara-lixá, com 10, 20 e 30% de fibra, com 0 dias de compostagem.

Houve uma redução na quantidade de espectros, sendo que os dados de cada amostra geraram um espectro médio. Bandas características dos dois materiais são apresentadas no FT-IR, onde se observa, na região de  $3000$  a  $3500\text{ cm}^{-1}$ , a banda para as fibras naturais, característica do estiramento de grupos hidroxílicos (OH) de celulose e da presença de água com intensidade diminuída.

Isto também foi observado no estudo de Mulyani *et al.* (2013), cujo tema foi a aplicação de fibras de madeira Meranti e de bambu Betung em matriz de PLA.

Figura 32 – Espectro do Infravermelho com 0 dias de compostagem dos corpos de prova de PLA e dos compósitos de PLA/Taquara-lixá com 10, 20 e 30% de fibras



Fonte: Autoria própria.

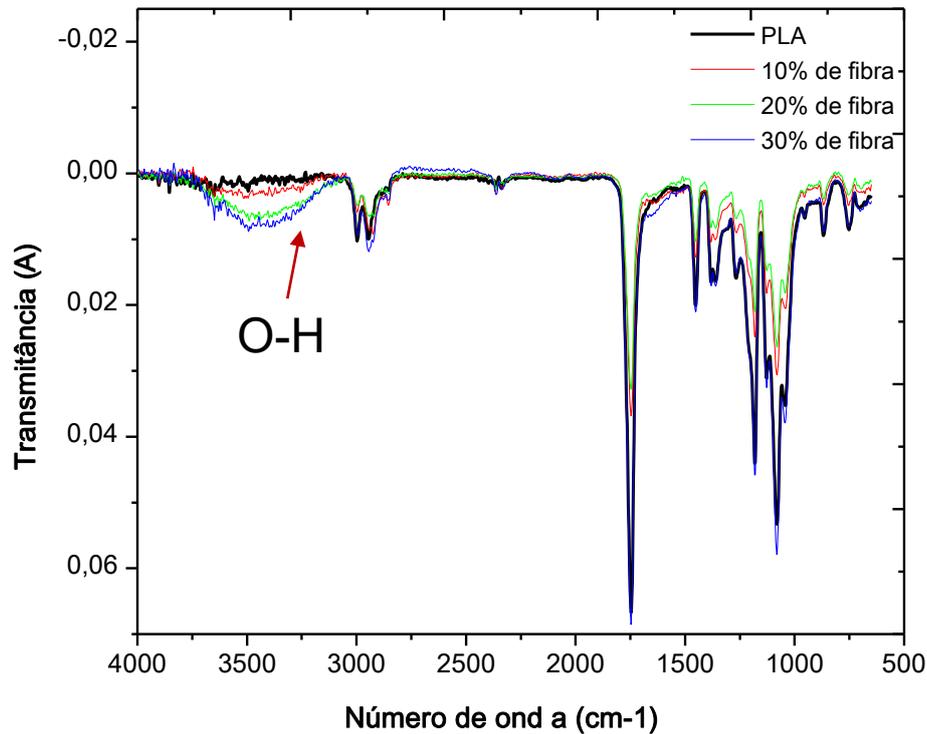
As bandas características dos dois materiais também foram encontradas nos estudos de Quian (2016) com biocompósitos de Bambu Char e PLA, reforçando os picos de vibração de alongamento de carbonila em  $1758\text{ cm}^{-1}$  e flexão de hidroxila ( $1046\text{ cm}^{-1}$ ) fortalecidos através da ligação química entre eles.

Na Figura 33 tem-se o infravermelho dos corpos de prova de PLA e os compósitos de PLA/Taquara-lixá de 10, 20 e 30% de fibra com 180 dias em solo simulado.

Comparado ao corpo de prova do PLA, nos compósitos com fibras tem-se a formação de uma banda de maior intensidade na região próxima a  $3500\text{ cm}^{-1}$ , que ocorre pela presença da fibra e por ligações preferenciais da fibra/polímero na região OH (QUIN, 2010).

A movimentação de uma banda na região  $3000\text{ cm}^{-1}$  indica estiramento do grupamento O-H, que é indicativo de subprodutos de hidrólise do PLA, proporcionado no processo de compostagem pela biodegradação através de quebra de ligações.

Figura 33 – Espectro do Infravermelho com 180 dias de compostagem dos corpos de prova de PLA e dos compósitos de PLA/Taquara-lixá com 10, 20 e 30% de fibras



Fonte: Autoria própria.

As fibras naturais presentes no compósito influenciam nas bandas próximo a  $1700\text{ cm}^{-1}$ , referentes ao estiramento dos grupos carboxílicos  $\text{C}=\text{O}$  presentes na hemicelulose e lignina. Assim como as bandas na região de  $1000\text{ cm}^{-1}$ , que são referentes ao estiramento das ligações  $\text{C}-\text{O}-\text{C}$  presentes na celulose, hemicelulose e na lignina (MANO, 2004; CARDOSO, 2013).

Observa-se também que as bandas características das fibras da Taquara-lixá se sobressaíram às do PLA após 180 dias no processo de biodegradação nas bandas entre  $3250$  e  $3750\text{ cm}^{-1}$ , indicando o processo de biodegradação do PLA. Como a biodegradação do PLA ocorre através do processo de hidrólise, tem-se o estiramento do grupamento  $\text{O}-\text{H}$ , que é um subproduto desse processo, como referenciado por Drumond (2004).

#### 4.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA

Andreopoulos e Tarantili (1998) e Marcovich (1999) mostram que a absorção de água em compósitos depende de vários fatores, tais como: temperatura, orientação das fibras, fração volumétrica da fibra, natureza da fibra (permeável ou não), área de

superfície exposta, difusão e proteção superficial. Observa-se ainda que a absorção de água é rápida nos estágios iniciais (nas primeiras 50 horas), tendendo a diminuir para tempos de exposição longos até atingir o equilíbrio (SILVA, 2014).

Na Tabela 6 são apresentados os resultados do ensaio de absorção de água dos corpos de prova de PLA e PLA/Taquara-lixia, com 10, 20 e 30% de fibra, com 0 dias em contato com o solo simulado para biodegradação.

Tabela 6 – Dados dos corpos de prova em 0 dias de compostagem para ensaio de absorção de água do PLA e dos compósitos de PLA/Taquara-lixia com 10, 20 e 30% de fibra

CP	% em 24h	% em 48h	% em 72h
<b>PLA</b>	0,39 ± 0,03 Cc	0,50 ± 0,01 Bb	0,57 ± 0,01Ca
<b>10% fibra</b>	0,56 ± 0,02 BCc	0,77 ± 0,02 Bb	0,91 ± 0,02 Ba
<b>20% fibra</b>	0,64 ± 0,12 Ba	0,89 ± 0,18 Aba	1,03 ± 0,22 Ba
<b>30% fibra</b>	0,99 ± 0,04 Ab	1,42 ± 0,40 Aab	1,65 ± 0,07 Aa

Letras maiúsculas, variam estatisticamente na coluna; Letras minúsculas: variam estatisticamente na linha; Teste de Tukey a 95% de confiabilidade.

Fonte: Autoria própria.

Verificou-se, na Tabela 6, que compósitos com maior porcentagem de fibras tiveram maior absorção de água, o que pode ser explicado pelo caráter hidrofílico das fibras, como indicado por Carashi (2002) e Gomes (2007).

Os corpos de prova do PLA, comparados ao compósito com 30% de fibra, diferem entre si estatisticamente durante as 72 horas de absorção de água.

Com o aumento do percentual de fibras nos compósitos, mais regiões hidrofílicas ficam suscetíveis à absorção de água em comparação aos compósitos com menores quantidades destas, o que provoca o inchamento das fibras e promove o aumento da absorção de água dos compósitos (MULINARI, 2009; CORRADINI, 2009 e BRITO, 2013). Logo, a água passa a ocupar os espaços livres entre os feixes de fibras e muda as dimensões do compósito (DAS, 2000). Qian (2016) também observou a maior absorção de água nos biocompósitos com maior porcentagem de fibras de bambu no PLA.

Na Tabela 7 têm-se os dados do ensaio de absorção de água dos corpos de prova do PLA e dos compósitos de PLA/Taquara-lixia com 10, 20 e 30% de fibra em 90 dias de compostagem.

Tabela 7 – Dados dos corpos de prova em 90 dias de compostagem para ensaio de absorção de água do PLA e dos compósitos de PLA/Taquara-lixia com 10, 20 e 30% de fibra

CP	% em 24h	% em 48h	% em 72h
<b>PLA</b>	0,37±0,01 Cc	0,50±0,01 Cb	0,58±0,02 Ca
<b>10% fibra</b>	0,37±0,09 Cb	0,57±0,02 Ca	0,65±0,01 Ca
<b>20% fibra</b>	0,64±0,07 Bb	0,85±0,08 Ba	0,97±0,08 Ba
<b>30% fibra</b>	1,13±0,07 Ac	1,42±0,06 Ab	1,75±0,08 Aa

Letras maiúsculas, variam estatisticamente na coluna e; Letras minúsculas: variam estatisticamente na linha; Teste de Tukey a 95% de confiabilidade.

Fonte: Autoria própria.

Após 90 dias de contato com o solo, os corpos de prova mostraram-se com uma exposição visível das fibras. Com essa exposição, proporcionou-se uma tendência em absorver água, principalmente no compósito com 30% de fibra. Estatisticamente, os corpos de prova de PLA e os compósitos com 10% de fibra diferiram dos compósitos com 20 e 30% de fibra no período de 72 horas de absorção.

Como o PLA é degradado por hidrólise, a absorção de água durante o processamento pode prejudicar o desempenho dos corpos de prova (PERES, 2016), visto que a absorção de água variou durante 24, 48 e 72 horas.

A degradação hidrolítica do PLA em meio aquoso ocorre mais rapidamente no centro da amostra do que na superfície, sugerindo que os produtos de hidrólise formados perto da superfície são dissolvidos no meio do composto, enquanto que na parte interna há uma alta concentração de grupos finais carboxílicos capazes de catalisar a hidrólise de ésteres (FUKUSHIMA, 2009).

Na Tabela 8 são apresentados os resultados do ensaio de absorção de água dos corpos de prova do PLA e nos compósitos de PLA/Taquara-lixia com 10, 20 e 30% de fibra com 180 dias em compostagem.

Os corpos de prova analisados após 180 dias apresentam maior absorção de água do que o obtido com os corpos de prova que não tiveram contato com o solo simulado. Este comportamento era esperado devido à exposição das fibras, que garantiram maior contato com os microrganismos e com o solo, que por sua vez tem presença de umidade. E como as fibras são *in natura*, ou seja, não receberam nenhum tipo de tratamento, a absorção de água é facilitada (PAULA, 2011).

Tabela 8 – Dados dos corpos de prova em 180 dias de compostagem para ensaio de absorção de água do PLA e dos compósitos de PLA/Taquara-lixia com 10, 20 e 30% de fibra

CP	% em 24h	% em 48h	% em 72h
<b>PLA</b>	0,37±0,01 Dc	0,49±0,02 Db	0,58±0,01 Da
<b>10% fibra</b>	0,61±0,03 Cc	0,81±0,03 Cb	0,94±0,03 Ca
<b>20% fibra</b>	0,96±0,05 Bc	1,25±0,03 Bb	1,44±0,03 Ba
<b>30% fibra</b>	1,85±0,14 Ab	2,22±0,11 Aab	2,45±0,09 Aa

Letras maiúsculas, maior absorção por tempo; Letras minúsculas, maior absorção por porcentagem de fibra; Teste de Tukey a 95% de confiabilidade.

Fonte: Autoria própria.

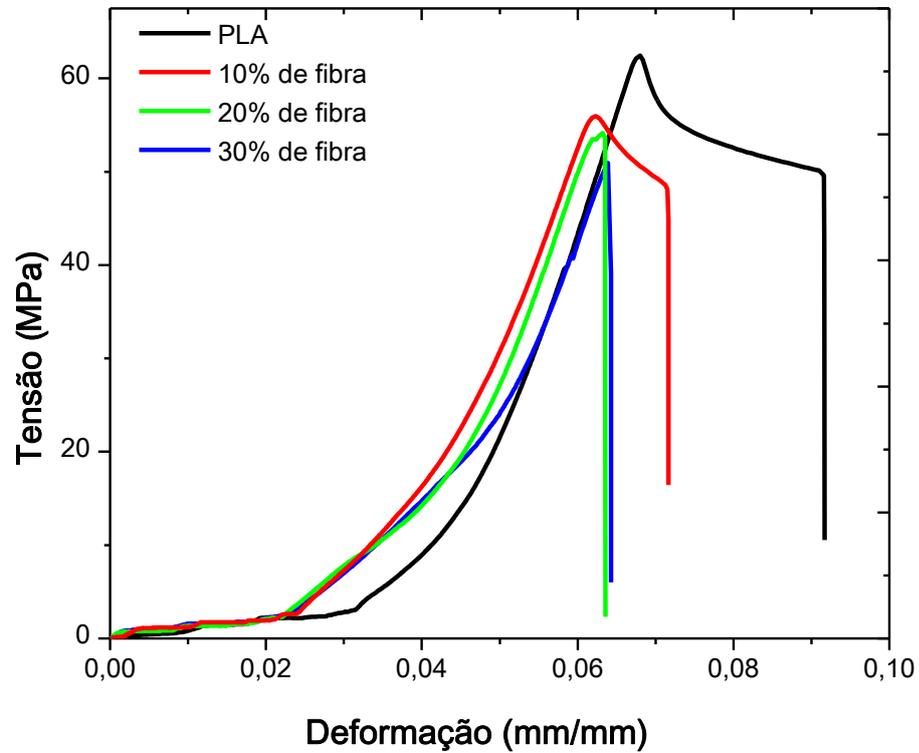
O compósito de PLA com fibras de bambu no estudo de Lee (2006) também teve um aumento na absorção de água afetado pela presença das fibras. No estudo de Kim (2006) foi apresentada a porcentagem de água absorvida em relação ao tempo para as amostras envelhecidas. Observou-se, a partir do resultado, que os compósitos de PLA com fibra de bambu apresentam maior absorção de água que os compósitos Polipropileno (PP) com fibra de bambu, em 70 horas de análise, ocasionada pelo caráter hidrofílico de fibras naturais.

#### 4.5 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

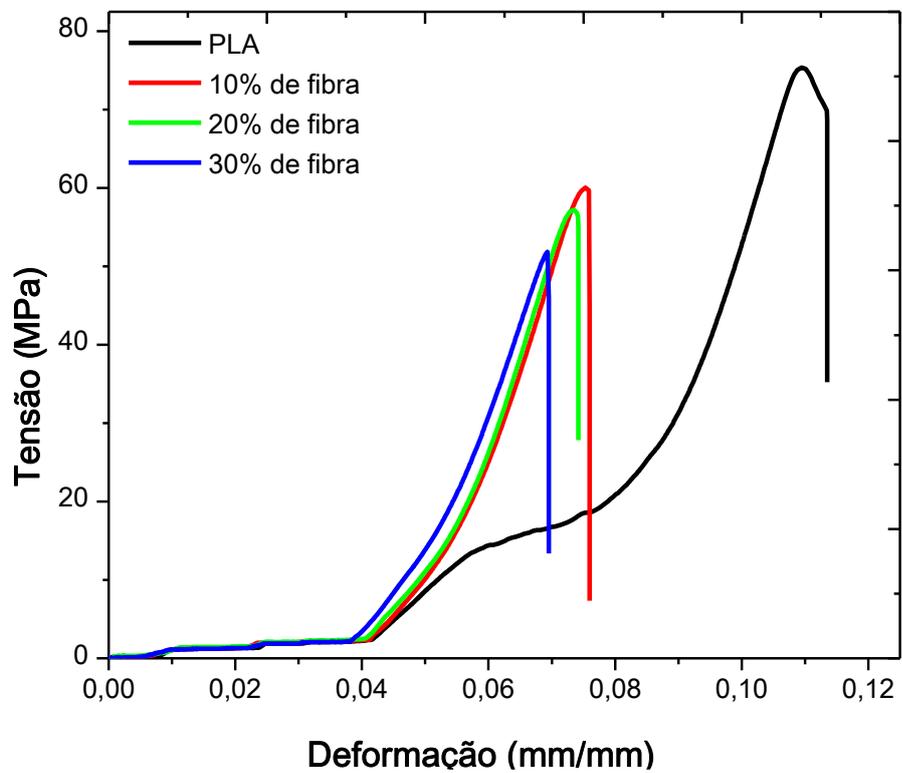
Os compósitos para ensaio de tração foram produzidos de acordo com o descrito no item 3.2.1 e ensaiadas conforme descrito no item 3.9.

Na Figura 34 observa-se as curvas de tensão x deformação dos corpos de prova do PLA e dos compósitos de PLA/Taquara-lixia com 10, 20 e 30% de fibras de 0 dias e 180 dias de compostagem. As propriedades mecânicas obtidas para o PLA puro estão de acordo com o descrito por Farah, Anderson e Langer (2016) e Murariu e Dubois (2016).

Figura 34 – Curva de Tensão x Deformação dos corpos de prova de PLA e PLA/Taquara-lixá com 10, 20 e 30% de fibras em (a) 0 dias e (b) 180 dias em compostagem



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria.

É possível verificar na Figura 34a uma mudança de comportamento entre as curvas do corpo de prova do PLA e do compósito de PLA/Taquara-lixá com 10, 20 e 30% de fibra.

As duas primeiras representam o rompimento com uma fratura dúctil, onde o corpo de prova sofreu deformação plástica antes de romper, e as duas últimas são características de fratura frágil, notada devido à queda abrupta da curva.

A mudança de comportamento no modo de fratura também ocorreu no estudo de Silveira, Howart e Molinari (2014), onde a adição de 10% de hidroxiapatita no PLA provocou a ruptura frágil neste biocompósito. Ramirez (2013) verificou o mesmo efeito no estudo com fibras de bambu (*Guadua angustifoliakunth*) em matriz PLA.

Qian (2016) também apresentou o módulo de tensão e o alongamento na ruptura relativamente menores do que aqueles de PLA puro quando o bambu foi adicionado ao PLA. Chinh (2015) reforçou a baixa resistência com relação à falta de ligação interfacial entre o polímero e a fibra.

A melhoria das propriedades mecânicas pode ocorrer com a adição de agentes de acoplamento, como no estudo de Lee e Wang (2006), onde as fibras de bambu aderiram melhor na matriz de PLA com a adição de LDI (diisocianato à base de lisina).

O tamanho e forma de obtenção das fibras também influenciaram no comportamento mecânico do compósito. Okubo, Fujii e Thostenson (2009) observaram comportamento plástico em compósitos com fibras de bambu, em matriz PLA, obtidos por polpação química. Diferentemente do observado no presente trabalho, onde as fibras obtidas por processamento mecânico apresentaram comportamento frágil no compósito.

Os resultados mostraram que, com o aumento do teor de fibras de 10 até 30% em massa, há uma progressiva redução da resistência do compósito à tração, enquanto o módulo elástico se mantém praticamente inalterado para o teor de até 10% de fibras no compósito, sendo seu resultado semelhante ao do polímero puro.

Na Figura 34b têm-se os corpos de prova do PLA e dos compósitos de PLA/Taquara-lixá com diferentes proporções de fibras após os 180 dias de compostagem.

Apresentaram fratura frágil os compósitos de PLA/Taquara-lixá com 10, 20 e 30% de fibra, e o PLA fratura dúctil, como apresentado no gráfico seu estado plástico. Essa diferença pode estar associada à fragilidade adquirida durante o processo de biodegradação onde ligações químicas são rompidas.

Em uma análise geral dos resultados obtidos com os ensaios de tração, constatou-se que o PLA apresenta, entre 0 e 180 dias, propriedade mecânica superior à dos compósitos com 10, 20 e 30% de fibra de Taquara-lixia.

A tensão máxima sob tração, obtida a partir dos ensaios mecânicos realizados para o PLA puro e o PLA junto às diferentes porcentagens de fibra da Taquara-lixia dos corpos de prova com 0, 90 e 180 dias de contato com o solo simulado são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Tensão máxima (MPa) dos corpos de prova de PLA e os compósitos de PLA/Taquara-lixia em 0, 90 e 180 dias de compostagem

CP	$\sigma$ - MPa		
	0 dias	90 dias	180 dias
PLA	56,68 ± 1,72 Aa	51,63 ± 1,36 Ab	60,07 ± 3,81 Aa
10% de fibra	53,62 ± 2,63 Aa	47,36 ± 2,11 ABb	49,6 ± 1,71 Bab
20% de fibra	54,12 ± 1,89 Aa	45,61 ± 3,78 ABb	46,4 ± 2,47 Bb
30% de fibra	54,24 ± 0,98 Aa	38,92 ± 2,19 Bb	36,87 ± 3,28 Cb

Letras maiúsculas, variam estatisticamente na coluna e; Letras minúsculas: variam estatisticamente na linha; Teste de Tukey a 95% de confiabilidade.

Fonte: Autoria própria.

Pode-se atribuir os resultados à fraca interação da matriz-fibra pela ausência de agentes de acoplamento e pelo tipo de processamento aplicado, pois durante a fabricação tanto na homogeneização quanto na moagem, reduziu-se o comprimento inicial da fibra, semelhante aos estudos de Bengtsson (2007), Bledzki (2009) e Brambilla (2013). Observa-se que a tensão máxima de ruptura do corpo de prova do PLA de 0 a 180 dias não variou estatisticamente, portanto a elevação da  $\sigma$  aos 180 dias pode ser relevada.

A tensão máxima do compósito de PLA/Taquara-lixia com 30% de fibra em 0 dias diferiu estatisticamente do mesmo compósito com 180 dias de compostagem em solo simulado.

Evidencia-se, nesse contexto, que o contato com o solo e o processo de biodegradação permitiram a diminuição da resistência mecânica dos compósitos de PLA/Taquara-lixia, visto que o valor de tensão máxima não variou estatisticamente no tempo 0 para o PLA e os compósitos com 10, 20 e 30% de fibra.

Resultados semelhantes também foram encontrados nos estudos de Lee e Wang (2006), onde a tensão máxima dos corpos de prova não difere estatisticamente em 0 dias de exposição. O PLA diferiu estatisticamente do compósito de PLA com 30% e fibra em 180 dias de exposição no solo.

Em estudos com PLA e 30% em massa de fibra de bambu, Lee (2006) constatou as propriedades mecânicas, sendo a resistência à tração de 29 MPa, valor inferior ao encontrado no presente trabalho.

Na Tabela 10 são apresentados os resultados de Módulo elástico (GPa) dos corpos de prova de PLA e dos compósitos de PLA/Taquara-lixo em 0, 90 e 180 dias de compostagem.

Tabela 10 – Módulo elástico (E) em GPa dos corpos de prova de PLA e dos compósitos de PLA/Taquara-lixo em 0, 90 e 180 dias de compostagem

CP	E - GPa		
	0 dias	90 dias	180 dias
PLA	3,20 ± 0,43 Aa	2,47 ± 0,50 Aa	2,51 ± 0,22 Aa
10% de fibra	2,94 ± 0,29 ABa	1,78 ± 0,32 ABb	1,84 ± 0,19 Bb
20% de fibra	1,94 ± 0,29 Ca	1,26 ± 0,12 Bb	2,02 ± 0,14 Ba
30% de fibra	2,25 ± 0,47 BCa	2,01 ± 0,20 Aab	1,58 ± 0,28 Bb

Letras maiúsculas, variam estatisticamente na coluna e; Letras minúsculas: variam estatisticamente na linha; Teste de Tukey a 95% de confiabilidade

Fonte: Autoria própria.

O contato das amostras com o solo, após 180 dias, resultou em uma diminuição dos módulos, sendo que o módulo do PLA chegou a 2,51 GPa, e do compósito com 30% de fibra a 1,58 GPa, variando estatisticamente.

Um parâmetro que influencia diretamente no módulo de elasticidade do polímero é seu grau de cristalinidade: quanto maior for o grau de cristalinidade, maior será o módulo de elasticidade do polímero.

Os ensaios de resistência à tração do compósito de PLA/Taquara-lixo apresentaram similaridade em relação aos resultados de PLA/Buriti, como determinado por Lemos e Martins (2014), que utilizaram 10 e 20% em massa de fibra. Zhao *et al.* (2011) também evidenciaram um acentuado aumento dessa resistência, quando adicionados 30% em massa de fibra de madeira em relação à blenda polimérica padrão sem adição de fibra. A adição de fibras naturais ao PLA proporciona

diminuição na resistência mecânica dos compósitos, quando comparados ao PLA puro.

A presença das fibras na matriz polimérica produz descontinuidades, dificultando a distribuição e transferência do esforço aplicado, reduzindo a tensão máxima suportada pelos compósitos, também observado por Paoli (2010), Barreto (2010) e Lemos e Martins (2014).

O desempenho mecânico diminuiu com a exposição em solo simulado. A fibra de Taquara-lixia absorve umidade, além de influenciar para que a degradação biológica do PLA ocorra em tempos inferiores, quando este é exposto ao solo simulado. As fibras nos compósitos também antecipam o início da degradação para temperaturas inferiores, na análise termogravimétrica, independente do aumento do índice de cristalinidade constatado nos compósitos. Na Tabela 11 constam os dados comparativos de resistência à tração de outros polímeros e do PLA, onde observa-se a proximidade dos dados de polímeros populares com o PLA e com os obtidos no presente trabalho, proporcionando incentivo ao uso do polímero de fonte natural.

Tabela 11 – Dados comparativos de resistência a tração, elasticidade e temperatura de fusão de alguns polímeros

<b>Polímero</b>	<b>E (GPa)</b>	<b>Tensão (MPa)</b>	<b>Tm (°C)</b>	<b>Referências</b>
Polietileno baixa densidade	0,2-0,3	8,3-31,4	120	Brydson, J. A (1999)
Polietileno alta densidade	1,1	22,1-31,0	137	Brydson, J. A (1999)
Polipropileno	1,0-1,6	25-34	175	Brydson, J. A (1999)
Fenol-formaldeído	2,8-4,8	34-58	NA	Brydson, J. A (1999)
Poliamida 6.6 (Nylon 6.6)	3	80	264	Brydson, J. A (1999)
Poli (tereftalato de etileno) PET	2,8-4,1	52,9 - 71,5	256	Brydson, J. A (1999)
Poli(acidolático) PLA	1,2 - 3,0	28-50	175	Engeberg, I; Kohn, J. (1991)
Poli(hidroxi-butilato) PHB	2,5	36	171	Engeberg, I; Kohn, J. (1991)
Poli(caprolactona)	0,4	16	57	Engeberg, I; Kohn, J. (1991)

Fonte: Adaptado de Brydson, J. A (1999) e Engeberg, I; Kohn, J. (1991)

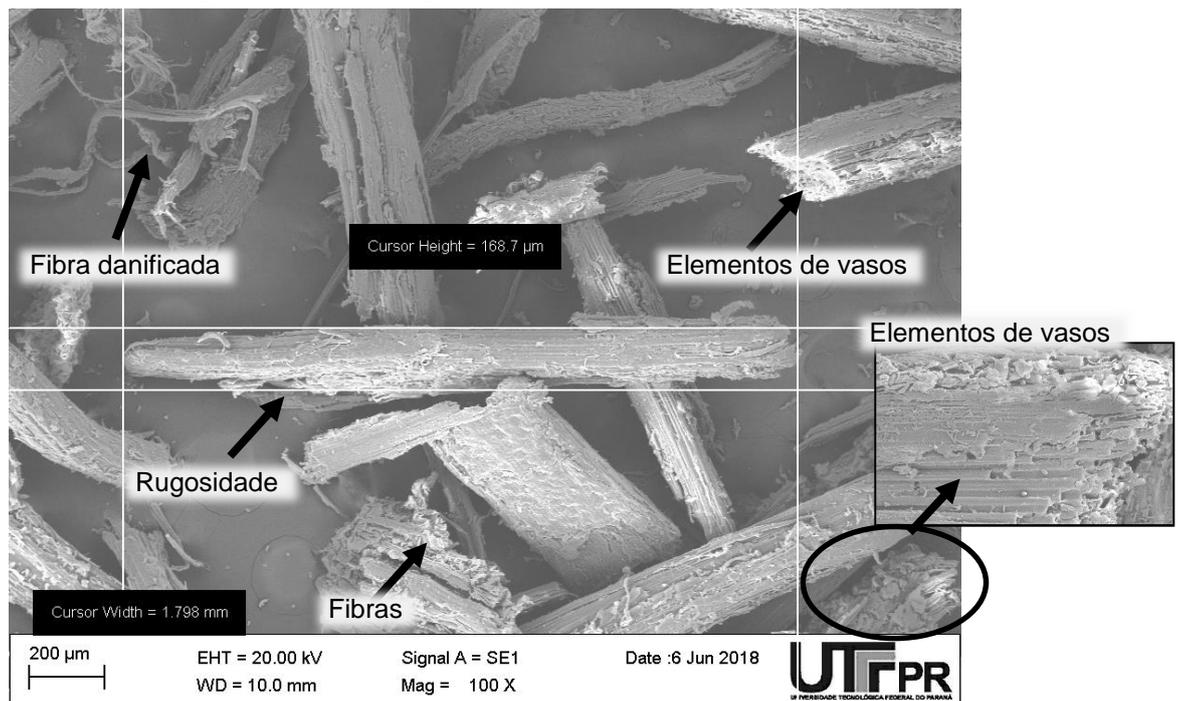
#### 4.6 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

As propriedades mecânicas do compósito polimérico são fortemente influenciadas pela morfologia e a microscopia eletrônica de varredura – MEV foi realizada no intuito de analisar a morfologia do PLA e dos compósitos obtidos de PLA/Taquara-lixia, com diferentes proporções de fibras, após o ensaio de tração.

É possível observar na Figura 35 a micrografia feita por MEV da Taquara-lixia processada, descrito no item 3.2.1. Pode-se notar fibras individualizadas, danificadas pela ação mecânica, presença de tecido vegetal, e vasos aderidos à superfície das paredes das fibras.

Como são de fonte natural, as seções transversais das fibras apresentaram variações e não sofreram nenhum tipo de tratamento. As variações ao longo do comprimento se mantiveram na média de 168,7  $\mu\text{m}$ . Foram observadas fibras torcidas e fletidas, o que indica que podem suportar deformações mecânicas do fluxo do processo, assim como observado por Da Silva (2014). Monteiro (2010) também verificou em seu estudo elementos de vasos e estruturais das fibras de bambu, assim como vazios e microcavidades igualmente visualizadas por Costa (2011). As fibras da Taquara-lixia podem ser observadas na Figura 35.

Figura 35 – Micrografia por MEV da Taquara-lixia

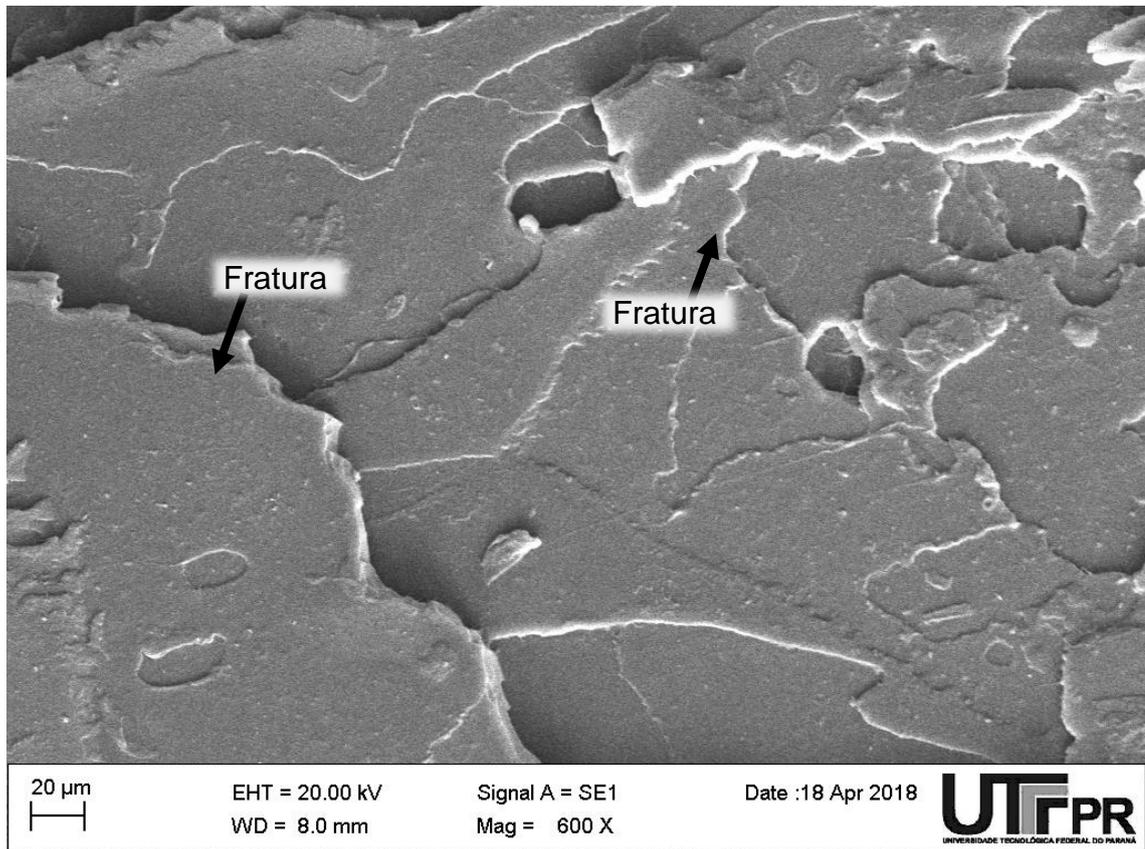


Fonte: Autoria própria.

Na Figura 36 tem-se a micrografia do corpo de prova do PLA. Esta apresenta superposição de camadas na superfície de fratura, a qual exibe aspecto de fratura frágil, sem deformação plástica aparente, assim como observado por Brito *et al.* (2011).

O PLA apresentou uma morfologia com uma superfície de alto relevo da fratura posterior ao ensaio de tração, antes da adição de fibras na composição e para o processo de biodegradação. Ao inserir porcentagens em massa de fibras de Taquara-lixá há uma tendência de mudança na direção da fratura, já que a fratura tende a seguir a direção da fibra, comportamento este associado com relação de interface entre a fibra natural e o PLA.

Figura 36– MEV do corpo de prova do PLA com 0 dias em solo simulado



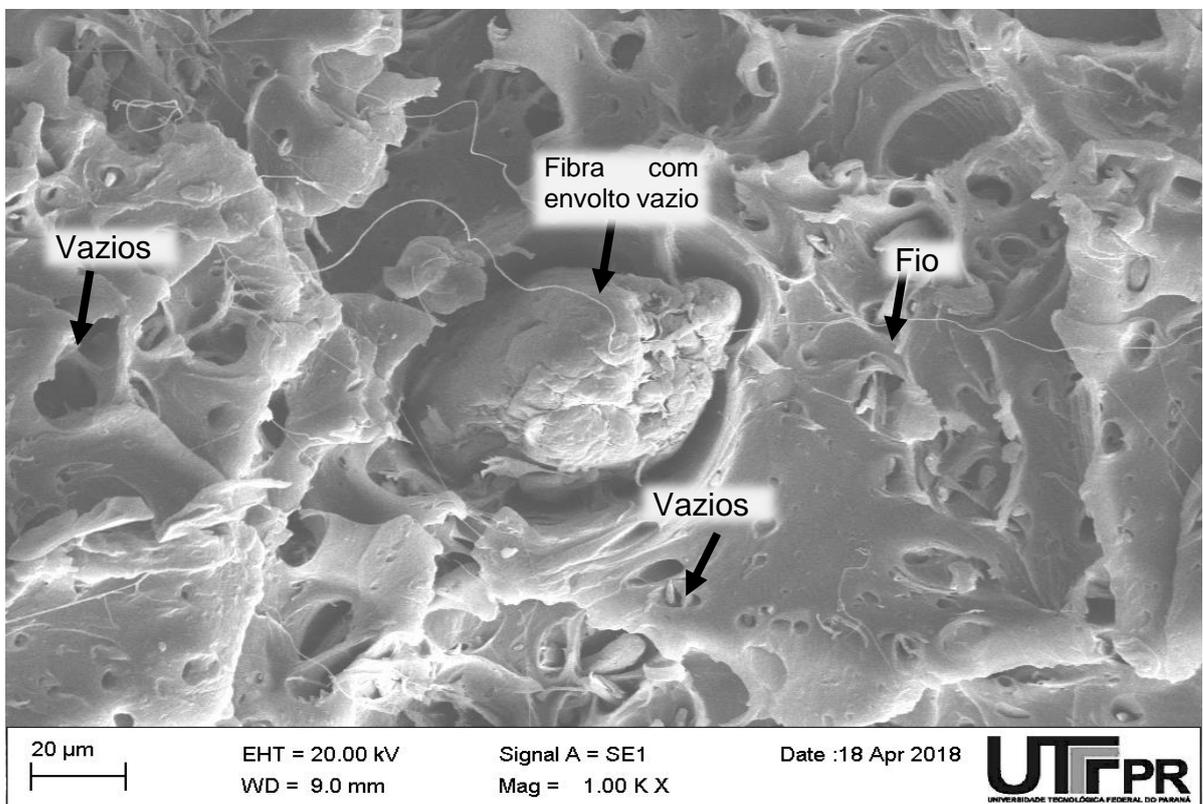
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 37 tem-se a micrografia do compósito PLA/Taquara-lixá com 10% de fibra. As fibras da Taquara-lixá se encontram envolvidas pelo polímero e a maioria se rompeu em conjunto com o polímero ao invés de ser retirada da matriz, que em geral leva a formação de buracos ou “pits”.

Apesar de a maioria das fibras se quebrar junto com o compósito, algumas foram arrancadas durante o ensaio de tração. Isto fica evidente com a presença de alguns orifícios. Verifica-se, além disso, a presença de um espaço na interface fibra-polímero, indicando perda de adesão.

Costa (2011) também observou o desfibramento e rompimentos das fibras, em que uma menor porcentagem de fibras aderidas à matriz de PLA, gerou melhor aderência, significando uma melhor propriedade mecânica (ZHANG, 2012).

Figura 37 – MEV dos corpos de prova de PLA/Taquara-lixá com 10% de fibras com 0 dias em solo simulado



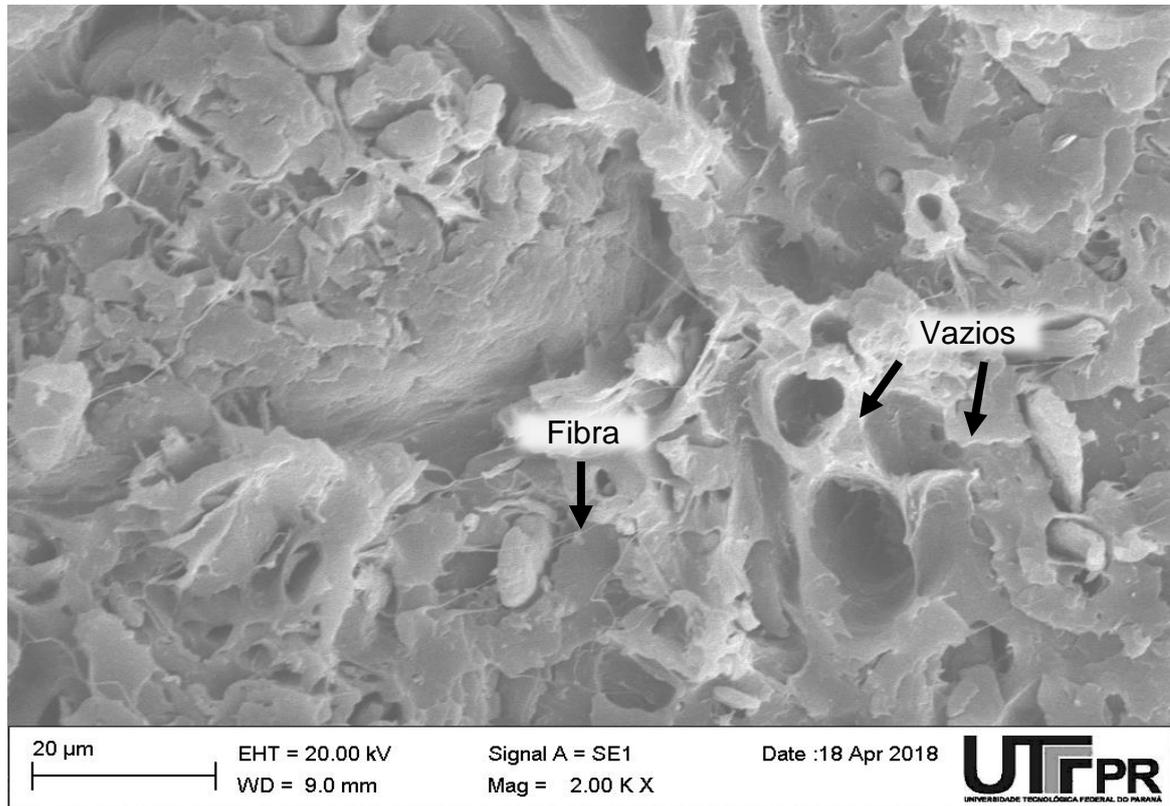
Fonte: Autoria própria.

Para o compósito de PLA/Taquara-lixá com 20% de fibra, apresentado na Figura 38, observou-se que as fibras foram arrancadas da matriz. Isto pode indicar que a proporção de 20% de fibra de Taquara-lixá dificultou ou não permitiu a homogeneização da fibra de tal forma que o polímero aderisse na mesma.

Costa (2011) evidenciou que a fibra de bambu no compósito possibilitou o aparecimento de vazios na estrutura do compósito, acarretando defeitos ou

concentração de tensões, ocasionando a redução do desempenho mecânico do compósito.

Figura 38 – MEV dos corpos de prova de PLA/Taquara-lixia com 20% de fibras com 0 dias em solo simulado

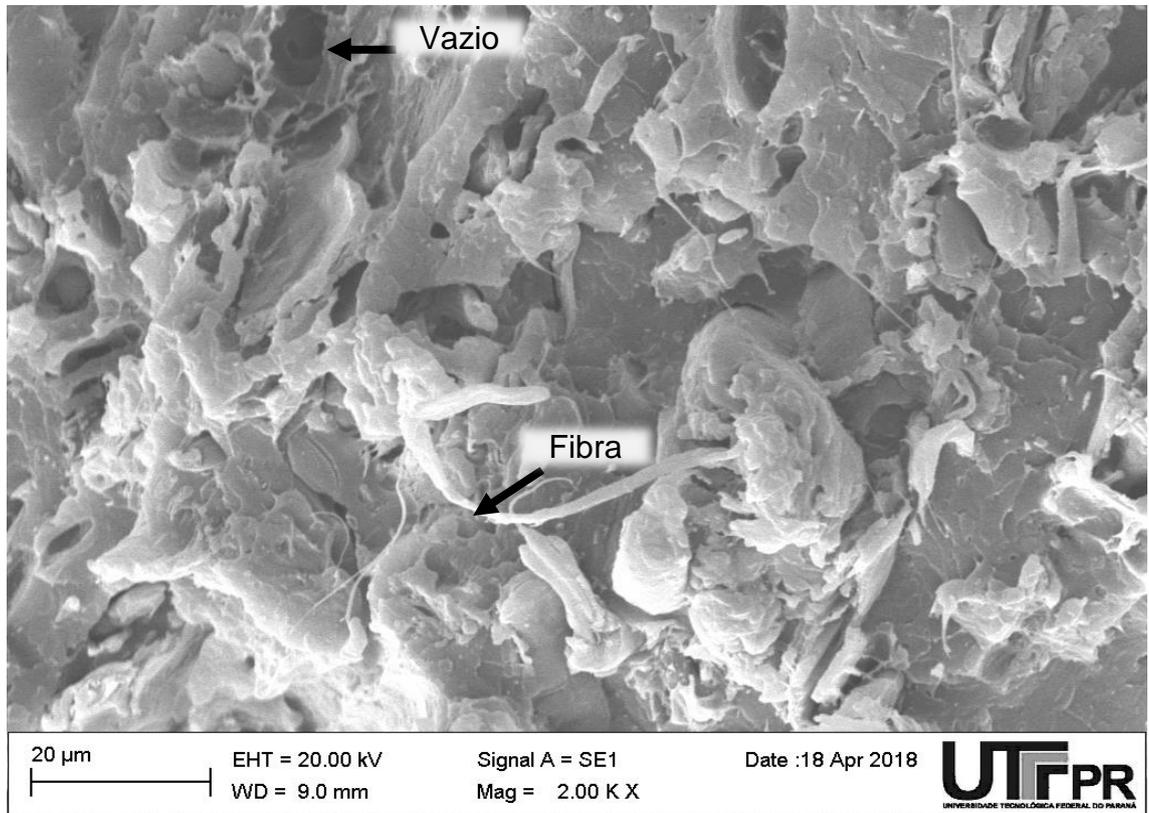


Fonte: Autoria própria.

Para o compósito de PLA/Taquara-lixia com 30% de fibra, apresentado na Figura 39, observa-se ampla faixa da presença das fibras da fase dispersa. Provavelmente o acréscimo da concentração de fibras gerou a coalescência das mesmas junto à matriz. Por consequência da maior concentração de fibras, a matriz polimérica pode não estar conseguindo envolver adequadamente as fibras, o que explicaria a elevada quantidade de fibras removidas.

Foi observado que a fibra foi preferencialmente arrancada da matriz pelos vazios presentes e pelo espaço existente entre matriz/fibra, indicando que a adesão da fibra com a matriz é fraca (SOLARSKI *et al.*, 2005). Isto também foi observado no estudo de Tokoro (2008), onde fibras de bambu foram arrancadas da matriz de PLA, especialmente as de longo comprimento, em testes de impacto no compósito.

Figura 39 – MEV dos corpos de prova de PLA/Taquara-lixá com 30% de fibras com 0 dias em solo simulado



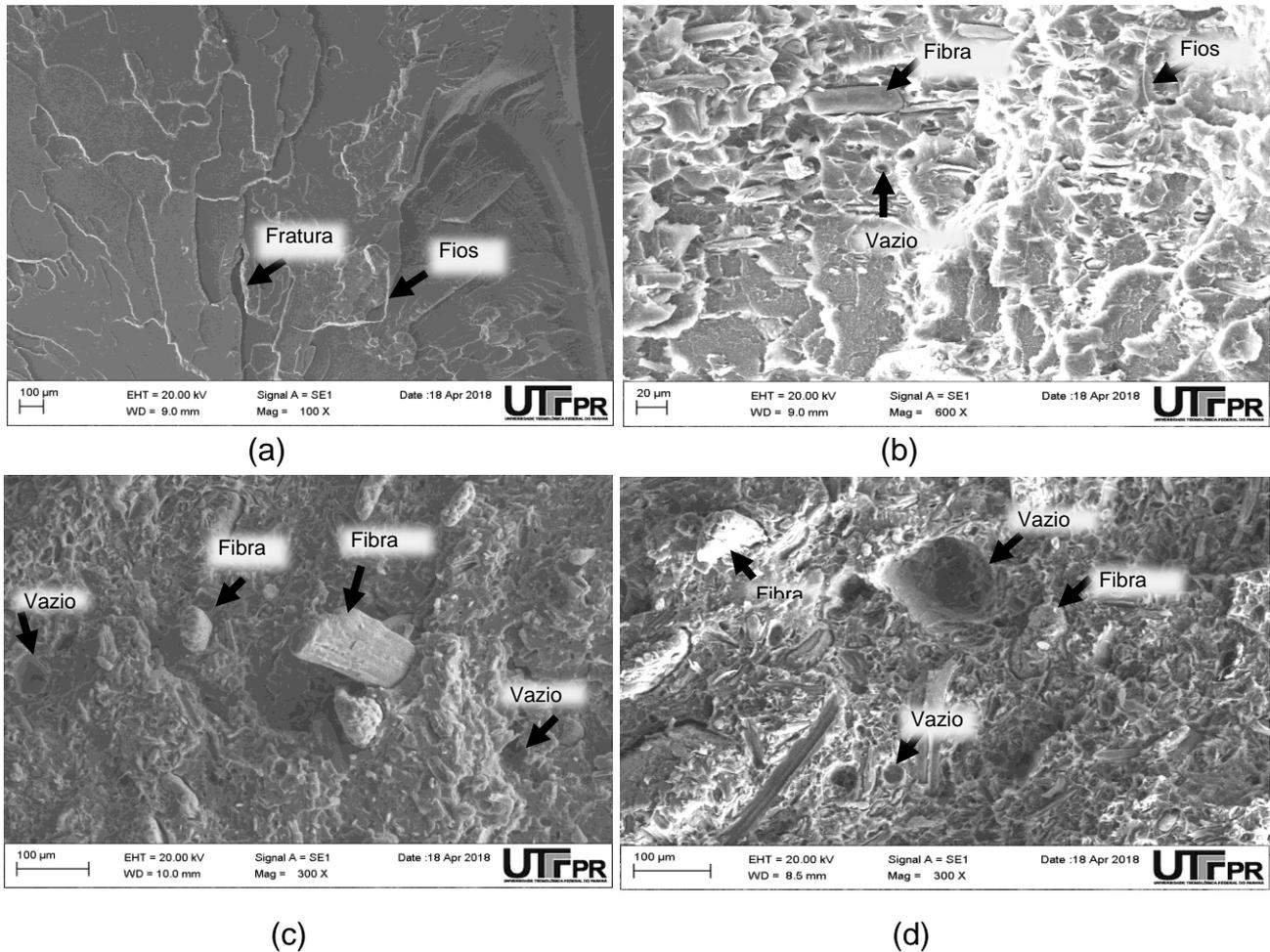
Fonte: Autoria própria.

Costa (2011) também mostrou nos compósitos de PLA com fibra de bambu uma dificuldade de acomodação ou disposição das fibras no molde, devido a um aumento da aglomeração com predominância de fibras com maior número de extremidades que acarretou depreciação das propriedades mecânicas de tração do compósito, assim como no presente trabalho.

#### 4.7 MICROSCOPIA DOS CORPOS DE PROVA APÓS ENSAIO DE BIODEGRADAÇÃO EM SOLO SIMULADO

Nas Figuras 40a,40b, 40c, 40d e 41a, 41b, 41c, 41d estão apresentadas as micrografias dos corpos de prova do PLA e dos compósitos de PLA/Taquara-lixá com 90 e 180 dias de degradação em solo simulado para compostagem.

Figura 40 – MEV dos corpos de prova (a) PLA (b) PLA/Taquara-lixo com 10% de fibras (c) PLA/Taquara-lixo com 20% de fibras (d) PLA/Taquara-lixo com 30% de fibras com 90 dias em solo simulado



Fonte: Autoria própria.

Após 90 dias em solo simulado para compostagem o PLA apresentava uma superfície relativamente uniforme, porém já se observa a formação de pequenas rachaduras e fragmentações.

Nos primeiros 90 dias notou-se uma formação mais irregular, revelando que diversas fibras perderam sua cobertura de polímero ou um espaço grande entre a fibra, mostrando a adesão sendo reduzida. Com 180 dias de degradação, observou-se diversas cavidades formadas. As fibras já apresentavam um grande afastamento da interface com o polímero. Ademais, ocorre a formação dos filamentos.

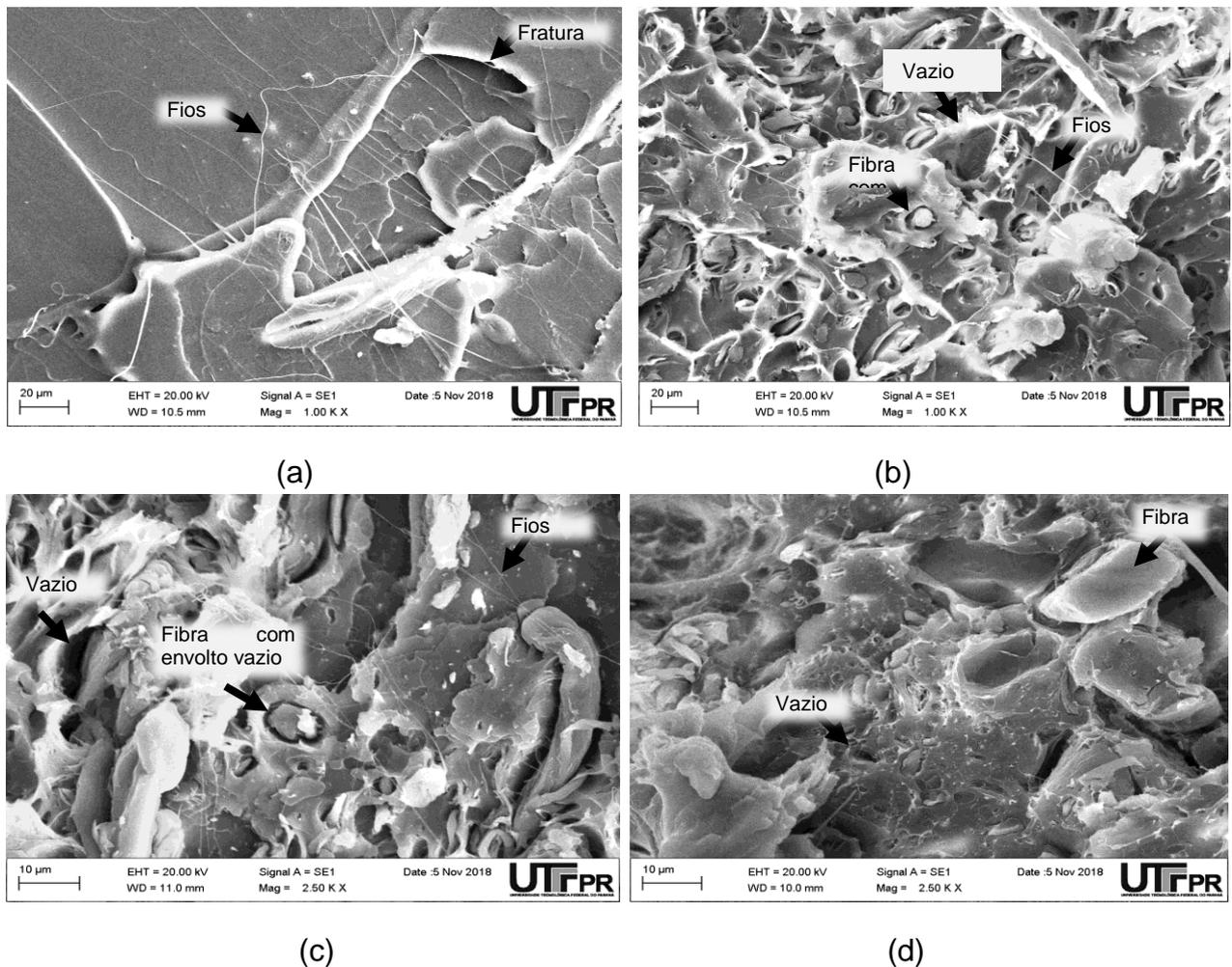
Os corpos de prova com PLA/Taquara-lixo com 20% de fibra, em termos gerais, tiveram um comportamento semelhante às amostras com 10% de fibra. Os corpos de prova de PLA/Taquara-lixo com 30% de fibra apresentaram uma degradação mais acentuada que os demais compósitos, o número de cavidade e irregularidade

bastante elevado e a formação dos filamentos decorrentes da degradação. Ou seja, a degradação do PLA/Taquara-lixo com 30% de fibra de Taquara-Lixo parece ter sido acelerada devido à quantidade elevada de fibra.

Algumas hipóteses para esse fenômeno podem ser apontadas, como a rugosidade causada pela mistura fibra polímero, que tende a aumentar a área superficial do compósito. Uma área superficial maior favorece tanto a degradação química quanto biológica, o que é excelente em termos de biodegradabilidade. Entretanto, esta degradação não pode ser descartada, ainda mais porque fica claro que uma maior quantidade de fibra acelera o processo de degradação do polímero.

Na Figura 41 têm-se as imagens de MEV dos corpos de prova de PLA e PLA/Taquara-lixo com 180 dias de contato com o solo simulado para degradação.

Figura 41 – Imagens de MEV dos corpos de prova (a) PLA (b) PLA/Taquara-lixo com 10% de fibras (c) PLA/Taquara-lixo com 20% de fibras (d) PLA/Taquara-lixo com 30% de fibras com 180 dias de degradação em solo simulado



Fonte: Autoria própria.

Com 180 dias de degradação apresenta-se uma amostra com várias fraturas e com formação de cavidades, mostrando claramente a fragilização da amostra.

Observa-se também que, após a degradação por 180 dias, o PLA apresenta a formação de filamentos (como fios) que atravessam toda a amostra. Pode-se sugerir que esses filamentos são oriundos da formação de colônias de microrganismos que estão usando o PLA em seu ciclo metabólico; ou ainda se trate de um produto de degradação natural do PLA. De qualquer forma, esses filamentos estão associados à degradação do material.

A amostra contendo PLA/Taquara-lixá com 10% de fibras na composição apresenta uma superfície aparentemente rugosa, provavelmente causada pela presença das fibras e pelo processo de mistura PLA/Taquara-lixá.

Na análise do corpo de prova de PLA/Taquara-lixá, temos pontos em que a fibra pode agir como um agente de separação na interface fibra/matriz, causando pontos de vazios na superfície do compósito. Isto foi verificado nas imagens, e pode ter provocado falhas no compósito, devido ao aparecimento de trincas na matriz ou mesmo o descolamento da fibra (*debonding*) (RAZERA, 2006), tendo maior incidência nos corpos de prova com maior porcentagem de fibras.

#### **4.8 Considerações finais**

Pela microscopia eletrônica de varredura foi observada a presença de espaços vazios entre a fibra Taquara-Lixa e o PLA, caracterizando a fraca adesão interfacial entre as mesmas.

Os dados termogravimétricos mostraram que a fibra foi degradada em temperaturas inferiores ao PLA, reduzindo a estabilidade térmica dos compósitos.

O índice de cristalinidade para os compósitos, com diferentes teores de fibra, é superior ao corpo de prova de PLA, especialmente o compósito com 30% de fibra, em massa. O aumento da cristalinidade é atribuído à hidrólise e ao ataque dos microrganismos nas regiões amorfas, pela susceptibilidade de penetração da água e oxigênio nestas regiões.

A partir dos espectros no FTIR, após exposição em diferentes períodos de solo simulado, foram constatadas alterações na região de comprimento de onda de  $3000\text{ cm}^{-1}$ , o que pode indicar aumento de umidade na amostra e hidrólise, e alargamento

da banda  $1748\text{ cm}^{-1}$ , referente à carbonila, confirmando a hipótese de degradação biológica.

Os resultados de resistência à tração dos compósitos de PLA/Taquara-lixá, com 10, 20 e 30% em massa de fibra, foram inferiores aos do PLA puro. Combinando a resistência à tração e o módulo de elasticidade, o compósito PLA/Taquara-lixá com 30% de fibra foi o que apresentou melhor desempenho dentre as 3 proporções de fibras utilizadas. Após os 180 dias em contato com o solo simulado para degradação, a resistência à tração foi menor para maiores quantidades de fibras no compósito.

Diante desses resultados, é viável a utilização das fibras vegetais, partindo da vertente ecológica, visando à substituição de materiais que são adquiridos de fontes não renováveis, além de constituir alternativas viáveis a fim de reduzir os impactos ambientais, visto que as fibras naturais são uma matéria-prima de fontes abundante.

O compósito com 30% de fibra foi o mais adequado, através da observação da maior cristalinidade devido ao fato da biodegradação atacando a região amorfa do polímero, proporcionando a maior presença de fibra; maior massa do corpo de prova com 30% de fibra que, devido a biodegradação do PLA proporcionou a maior absorção de água pelas fibras que ficaram expostas, e essa maior absorção de água, influenciou no processo de biodegradação e na resistência mecânica do compósito (caracterizado com fratura frágil). Visando a utilização em tubetes, tem-se características interessantes com relação a fragilidade do compósito, em que possibilitaria as raízes das plantas se desenvolver e romper a estrutura do compósito.

Assim como pode ser observado o comparativo na Tabela 12.

Tabela 12 – Dados comparativos entre o compósito de PLA e PLA/Taquara-lixá com 30% de fibra.

<b>180 dias de compostagem</b>	<b>PLA</b>	<b>PLA/Taquara lixa 30%</b>
Cristalinidade	10,52 %	14,58%
Massa	0,27g	4,60g
Absorção de água	0,58%	2,45%
Tensão máxima - $\sigma$	60,07MPa	36,87MPa
Módulo Elástico – E	2,51 GPa	1,58 GPa

Fonte: Autoria própria

## 5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos pôde-se concluir que, a adição de fibras na obtenção dos compósitos PLA/Taquara-lixia, modifica as propriedades e a coloração do compósito desde 0 a 180 dias de compostagem onde os ensaios de cristalinidade, absorção de água e a perda de massa indicam que está ocorrendo biodegradação por compostagem de solo simulado aos 180 dias.

Após testes em solo simulado foi verificada a perda de brilho do material pela deterioração da superfície, e, conseqüentemente, a exposição das fibras na superfície do compósito, permitindo a maior absorção de água e facilitando a biodegradação do material. As propriedades mecânicas e as análises por meio do MEV dessas amostras demonstraram também que houve a degradação das fibras e sua separação da matriz de PLA.

O processo de mistura foi eficiente, não sendo o processo usual de termoplásticos.

Através da análise termogravimétrica observou-se que o início de perda de massa dos compósitos ocorre em temperaturas inferiores que a do PLA.

Através do ensaio de tração, observou-se que a fratura do PLA em 0 e 180 dias foi dúctil já o compósito de PLA/Taquara-lixia com 30% de fibra teve fratura frágil e quanto maior o tempo de compostagem, menor a resistência mecânica dos compósitos de PLA/Taquara lixia, sendo a porcentagem de fibra mais adequado para o uso pretendido.

A presença da fibra confere ao compósito maior cristalinidade, maior massa, maior absorção de água e menor resistência mecânica. Porém, o compósito com 30% de fibra foi o mais adequado, visto que possui maior cristalinidade, massa e maior absorção de água, influenciando no processo de biodegradação. Características importantes para a utilização em tubetes para o plantio de mudas florestais, apresentando características interessantes com relação a fragilidade do compósito, em que possibilitaria as raízes das plantas se desenvolverem e romper os tubetes.

Segundo esses resultados, visamos ao aprofundamento das caracterizações a fim de estudar as possibilidades de aplicações do compósito no meio florestal, como em tubetes para plantio de mudas, possibilitando a substituição de tubetes produzidos com PVC, que têm sua matéria-prima advinda de fontes não renováveis e com um longo período de tempo para decomposição no meio ambiente. Para estudos futuros,

sugere-se moldar o material no formato adequado e teste no plantio de mudas, analisar os microorganismos presentes no solo para compostagem, além de realizar o ensaio de biodegradação num período maior que 180 dias, além de realizar uma análise de DSC, permitindo ver a temperatura de transição vítrea do compósito com início de temperaturas mais baixas, e o DMA, permitindo a análise dinâmico mecânico, observando o módulo elástico com a variação da temperatura.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM D 3878 – 95. **Standard terminology of high - modulus reinforcing fibers and their composites**, 1995.

ASTM D 3878-07. **Standard Terminology for composite materials**, 2007.

ASTM D 570-98. **Standard Test Method for Water Absorption of Plastics**, 1998.

ASTM D 883-99. **Standard Terminology Relating to Plastics**, 1999.

ASTM G 160 – 03. **Standard Practice for Evaluating Microbial Susceptibility of Nonmetallic Materials by Laboratory Soil Burial**, 2003.

ALEXANDRE, M. E. O. **Compósitos de Matriz Poliéster Reforçados com Fibra da Folha do Abacaxi**: Propriedades Mecânicas e de Absorção da Água. 2005. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2005.

ALVAREZ, V.; IANNONI, A.; KENNY, J. M.; VAZQUEZ, A. Influence of twin-screw processing conditions on the mechanical properties of biocomposites. **Journal of Composite Materials**, n. 39, p. 2023-2040, 2005.

ALVES JUNIOR, C. A. **Desenvolvimento e caracterização mecânica de compósitos de matriz poliéster com gravetos ou fibras de taquara (*Merostachys sp.*)**. 2012. 92f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Setor de Tecnologia, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2012.

ASTM. American Society for Testing and Materials. **ASTM D6400-12**: Standard specification for labeling of plastics designed to be aerobically composted in municipal or industrial facilities, 2012.

ANNUNCIADO, T. R.; SYDENSTRICKER, T. H. D.; AMICO, S. C. Experimental investigation of various vegetable fibers as sorbent materials for oil spills. **Marine Pollution Bulletin**, v. 50, p. 1340-1346, 2005.

ARAUJO, J. R.; WALDMAN, W. R.; DE PAOLI, M. A. Thermal properties of high density polyethylene composites with natural fiber: Coupling agent effect. **Polymer Degradation and Stability**, n. 93, p. 1770-1775, 2008.

ARRAKHIZ, F. Z.; EL ACHABY, M.; MALHA, M.; BENSALAH, M. O.; FASSI-FEHRI, O.; BOUHFID, R.; BENMOUSSA, K.; QAISS, A. Mechanical and thermal properties of natural fibers reinforced polymer composites: Doum/low density polyethylene. **Materials & Design**, v. 43, p. 200-205, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: informação e documentação: referências: elaboração. Rio de Janeiro, 2002.

AURAS, R. A. *et al.* Mechanical, physical, and barrier properties of poly (lactide) films. **Journal of Plastic Film & Sheeting**, v. 19, p. 123-135, 2003.

AVÉROUS, L.; BOQUILLON, N. Biocomposites based on plastificized starch: thermal and mechanical behaviours. **Carbohydrate Polymers**, v. 52, p. 111-122, 2004.

BAELUM, J.; ANDERSEN, I.; MOLHAVE, L. Acute and subacute symptoms among workers in the printing industry. **Occupational and Environmental Medicine**, v. 39, n. 1, p. 70-75, 1982.

BARBOSA, A. de P. **Características estruturais e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de buriti**. 2011. 159f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, 2011.

BARBOSA, J. D. V. **Obtenção de Bionanocompósitos de Blendas PLA/PBAT com Argila Organofílica**. 2012. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.

BARRA, B. N.; SANTOS, S. F.; BERGO, P. V. A.; ALVES JUNIOR, C.; GHAVAMI, K.; SAVASTANO JUNIOR, H. Residual sisal fibers treated by methane cold plasma discharge for potential application in cement based material. **Industrial Crops and Products**, v. 77, p. 691-702, 2015.

BARRETO, A. C. H.; COSTA, M. M.; SOMBRA, A. S. B.; ROSA, D. S.; NASCIMENTO, R. F.; MAZZETTO, S. E. & FECHINE, P. B. A. **Polymers Environment**, n. 18, p. 523. 2010. <http://dx.doi.org/10.1007/s10924-010-0216-x>.

BARRETO, A. C. H.; Costa, M. M.; SOMBRA, A. S. B.; ROSA, D. S.; NASCIMENTO, R. F.; MAZZETTO, S. E.; FECHINE, P. B. A. **Polymers Environment**, n. 18, p. 523, 2010. <http://dx.doi.org/10.1007/s10924-010-0216-x>

BELEM, C. P.; VARGAS, R. M. F. Redução da emissão de VOCs durante carga e descarga de hidrocarbonetos líquidos e indústrias petroquímicas. **Revista da Graduação**, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, v. 1, n. 2, p. 10, 2008.

BELTRAMI, L. V. R.; SCIENZA, L. C.; ZATTERA, A. J. Efeito do tratamento alcalino de fibras de Curauá sobre as propriedades de compósitos de matriz biodegradável. **Polímeros**, v. 24, n. 3, p. 388-394, 2014.

BENGTSSON, M.; LE BAILLIF, M.; OKSMAN, K. Extrusion and mechanical properties of highly filled cellulose fiber-polypropylene composites. **Composites: Part A**, n. 38, p. 1922-1931, 2007.

BENINI, K. C. C. C. **Desenvolvimento e caracterização de compósitos poliméricos reforçados com fibras lignocelulósicas: HIPS/fibra da casca do coco verde e bagaço de cana de açúcar**. 2011. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Guaratingueta, 2011.

BLEDZKI, A. K.; GASSAN, J. Composites reinforced with cellulose based fibres. **Progress in Polymer Science**, v. 24, n. 2, p. 221-274, 1999.

BLEDZKI, A. K.; JASZKIEWICZ, A. Mechanical performance of biocomposites based on PLA and PHBV reinforced with natural fibers – A comparative study to PP. **Composites Science and Technology**, n. 70, p. 1687-1697, 2010.

BLEDZKI, A. K.; JASZKIEWICZ, A.; SCHERZER, D. Mechanical properties of PLA composites with man-made cellulose and abaca fibers. **Composites: Part A**, n. 40, p. 404-412, 2009.

BOITT, A. P. W.; BARCELLOS, I. O.; ALBERTI, L. D.; BUCCI, D. Z. Evaluation of the influence of the use of waste from the processing of rice in physicochemical properties and biodegradability of PHB in composites. **Polímeros**, FapUNIFESP, v. 24, n. 6, p. 640-645, dez. 2014. FapUNIFESP. <http://dx.doi.org/10.1590/0104-1428.1593>.

BOURMAUD, A.; BALEY, C. Investigations on the recycling of hemp and sisal fibre reinforced polypropylene composites. **Polymer: Degradation and Stability**, n. 92, 2007.

BOURMAUD, A.; BALEY, C.; Nanoindentation contribution to mechanical characterization of vegetal fibers. **Composites: Part B**, n. 90, 2012.

BRAMBILLA, V. C. **Avaliação das propriedades mecânicas, térmicas, morfológicas e degradação de compósitos de poli(ácido láctico)/buriti**. 2013. Dissertação (Mestrado) –Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos e Tecnologia, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2013.

BRITO, A. D. **Caracterização Química de Resíduo de Café (Borra) e Seu Efeito em Cafeeiro Orgânico Adensado e em Plântulas Decafeeiro e Tomateiro**. 2013. 141p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de Brasília, Brasília. 2013.

BRITO, G. F. *et al.* Tenacificação do poli(ácido láctico) pela adição do terpolímero (etileno/acrilato de metila/metacrilato de glicidila). **Polímeros**, 2001.

BRITO, G. F.; AGRAWAL, P.; ARAÚJO, E. M.; MÉLO, T. J. A. Biopolímeros, Polímeros Biodegradáveis e Polímeros Verdes. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 6, n. 2, p. 127-139, 2011.

BROWNING, B. L. The Chemistry of Wood. **Interscience**, New York, n. 689, 2003.

BRUCKNER, J. V.; WARREN, A. D. Toxic effects of solvents and vapors. In: KLAASSEN, Curtis D.; WATKINS III, John B. **Casarett and Doull's toxicology: The basic science of poisons**. New York: McGraw-Hill, 2001. p. 869-916.

CABRAL, H.; CISNEIROS, M.; KENNY, J. M.; VAZQUEZ, A.; BERNAL, C. Structure-properties relationship of short jutefiber-reinforced polypropylene composites. **Journal of composite Material**, n. 39, p. 51, 2005.

CALLISTER Jr., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2007.

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. 5. ed. Rio Janeiro: LTC, 2002. p. 589.

CAMPOS, Adriana de *et al.* Biodegradação de filmes PP/PCL em solo e solo com chorume. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 20, n. 4, p. 295-300, 2010.

CANEVAROLO Jr., S. V. **Ciência dos polímeros**: Um texto básico para tecnólogos e engenheiros. 2. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2006.

CANEVAROLO JÚNIOR, S. V. **Técnicas de Caracterização de Polímeros**. São Paulo: Artliber Editora, 2003.

CARVALHO, A. M.; DANTAS, R. de A.; COELHO, M. C.; LIMA, W. M.; SOUZA, J. P. S. P.; FONSCECA, O. P.; GUIMARÃES, R. J. Teores de Hemiceluloses, celulose e lignina em plantas de cobertura com potencial para sistema plantio direto no cerrado. **Boletim de pesquisa e desenvolvimento**. Embrapa Cerrados, 2010.

CARVALHO, L. F. M. **Tratamentos de fibras de carnaúba [coperniciaprunífera (miller) H. E. moore] para o desenvolvimento de compósito biodegradável com matriz de polihidroxibutirato**. 2011. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

CASARANO, R. **Copolímeros biodegradáveis com potencial uso como biomateriais**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – USP, São Paulo, 2009.

CAVALCANTI, W. S. **Compósitos poliéster/tecidos tramados vegetal-vidro: caracterização mecânica e simulação da sorção de água**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2006.

CHAGAS, C. C.; GUIMARÃES, R. M.; BOCCOLINI, P. M. M. Câncer relacionado ao trabalho: uma revisão sistemática. **Cadernos de Saúde Coletiva**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 2, p. 209-23, 2013.

CHALLA, G. *Polymer Chemistry – An Introduction*. London: Ellis Horwood, 1993.

CHANG, R. **Físico-Química**: Para as Ciências Químicas e Biológicas. v. 2, 3. ed. São Paulo: AMGH Editora, 2010.

CHEN, C. C. *et al.* Preparation and characterization of biodegradable PLA polymeric blends. **Biomaterials**, v. 24, p. 1167-1173, 2003.

CHENG, S.; LAU, K.-T.; LIU, T.; ZHAO, Y.; LAM, P.-M.; YIN, Y. Mechanical and thermal properties of chicken feather fiber/PLA Green composites. **Composites**: Part B, n. 40, p. 650-654, 2009.

- COELHO, P. I. C. **Exposição aos Compósitos orgânicos voláteis: trabalhadores em cozinhas escolares.** 2014. 64f. Dissertação (Mestrado em Segurança e Higiene do trabalho) – Instituto Politécnico de Lisboa, Lisboa, 2014.
- CORRADINE, H.; AGNELLI, J. A. M.; MORAIS, L. C.; MATTOSO, L. H. C. Estudo das Propriedades de Compósitos Biodegradáveis de Amido/ Glúten de milho/ Glicerol Reforçados com Fibras de Sisal. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 18, n. 4, p. 353-358, 2008.
- CORRADINI, E. *et al.* Composição Química, Propriedades Mecânicas e Térmicas da Fibra de Frutos de Cultivares de Coco Verde. **Rev. Brazilian Frutic**, Jaboticabal, v. 31, n. 3, p. 837-846, 2009.
- CORRADINI, E.; ITO, E. N.; MARCONCINI, J. M.; RIOS, C. T.; AGNELLI, J. A. M.; MATTOSO, L. H. C. Interfacial behavior of composites of recycled poly(ethylene terephthalate) and sugarcane bagasse fiber. **Polymer Testing**, n. 28, p. 183-187, 2009.
- CORRÊA, A. C. **Preparação de nanofibras de celulose a partir de fibras de curauá para desenvolvimento de nanocompósitos poliméricos com EVA.** 2010. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010.
- CORREA, C. A. **Obtenção e caracterização de PLA reforçado com nanocelulose.** 2015. Dissertação (Mestrado) – USP, São Paulo, 2015.
- COSTA, D. S. da; GUIMARÃES, José J. M. F.; SANTOS, I. P. dos; FUJIYAMA, R. T. Metodologia para caracterização das fibras de bambu e compósitos de bambu. **Cobenge**, 2011.
- COUTINHO, F. M. B.; COSTA T. H. S. Performance of polypropylene-wood fiber composites. **Polymer Testing**, v. 18, p. 581-587, 1999.
- DAS S, SAHA A. K.; CHOUDHURY, P.H.; BASAK R. K.; MITRA, B. C.; TODD, T.; LANG, S.; ROWELL, R. M. Effect of steam pretreatment of jute fiber on dimensional stability of jute composite. **Appl. Polym. Sci**, 2000.
- DE PAOLI, M. A. **Degradação e Estabilização de Polímeros.** São Paulo: Artliber Publishers, 2009.
- DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura: Aplicações e preparação de amostras.** Materiais poliméricos, metálicos e semicondutores. Porto Alegre: EdDIPUCRS, 2007.
- DENARI, G. B.; CAVALHEIRO, É. T. G. **Princípios e aplicações de análise térmica.** Material de Apoio – Curso teórico-prático. USP, São Carlos, julho/agosto 2012.
- DENG, S. P.; TABATABAI, M. A. Cellulase activity of soil. **Saoil biology Biochemistry**, v. 26, p. 1347-1354, 1994.

- DICKER, M. P. M.; DUCKWORTH, P. F.; BAKER, A. B.; FRANCOIS, G.; HAZZARD, M. K.; WEAVER, P. M. Green composites: A review of material attributes and complementary applications. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 56, p. 280-289, Jan. 2014.
- DRUMOND, W. S.; WANG, S. H. & MOTHÉ, C. G. Síntese e caracterização do copolímero poli (ácido láctico-b-glicol etilênico). **Polímeros**, v. 14, n. 2, p. 74-79, 2004. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1590/S0104-14282004000200009>
- ENGELBERG, I.; KOHN, J. Physico-mechanical properties of degradable polymers used in medical applications: a comparative study. **Biomaterials**, v. 12, n. 3, p. 292-304, 1991. ISSN 0142-9612.
- FALCONE, D. M. B. **Influência da incorporação do Poli (ácido láctico) – PLA, de pó de madeira e outros aditivos no comportamento físico-mecânico do Poli(hidroxibutirato)-PHB**. 2004. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004.
- FARAH, S.; ANDERSON, D. G.; LANGER, R. Physical and mechanical properties of PLA and their functions in widespread applications – A comprehensive review. **Advanced Drug Delivery Reviews**, v. 107, p. 367-392, dez. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.addr.2016.06.012>
- FERNANDES, B. S.; F. Jr.; CELSO, C. M. Comportamento de reabsorção do mesocarpo do coco imerso em água após secagem em estufa com circulação de ar. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 13, n. 3, p. 243-250, 2011.
- FERREIRA, V. F.; ROCHA, D. R. da; SILVA, F. de C. da. Potencialidades e oportunidades na química da sacarose e outros açúcares. Departamento de Química Orgânica, Universidade Federal Fluminense, Campus do Valonguinho, Niterói - RJ, Brasil. **Química Nova**, v. 32, n. 3, p. 623-638, 2009.
- FILGUEIRAS, T. S.; GONÇALVES, A. P. S. A checklist of the basal grasses and bamboos in Brazil (POACEAE). **The Journal of the American Bamboo Society**, n. 1, v. 18, p. 7-18. 2004.
- FORMOLO, M. C. *et al.* Polihidroxialcanoatos: biopoliésteres produzidos a partir de fontes renováveis. **Revista Saúde e Ambiente**, Joinville, v. 4, p. 14-21, 2003.
- FROLLIN, E.; PAIVA, J. M. F. de; SANDRA, P. S. T. 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.
- FUKUSHIMA, K.; ABBATE, C.; TABUANI, D.; GENNARI, M.; CAMINO, G. Biodegradation of poly (lactic acid) and its nanocomposites. **Polymer Degradation and stability**, v. 94, p. 1646- 1655, 2009.

GABRIELI, I.; GATENHOLM, P.; GLASSER, W. G.; JAIN, R. K.; KENNE, L. Separation, characterization and hydrogel-formation of hemicellulose from aspen wood. **Carbohydrate Polymers**, v. 43, n. 4, p. 367-374, 2000.

GARCIA, M.; GARMENDIA, I.; GARCIA, J. Influence of natural fiber type in eco-composites. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 107, p. 2994-3004, 2008.

GARLOTTA, D. A literature review of poly(lactic acid). **Journal Polymers Environment**, v. 9, n. 2, p. 63-84, 2002.

GARSIDE, P.; WYETH, P. Identification of cellulosic fibres by FTIR spectroscopy-thread and single fibre analysis by attenuated total reflectance. **Studies in conservation**, v. 48, n. 4, p. 269-275, 2003. ISSN 0039-3630.

GHAVAMI, K.; MARINHO, A. B. Propriedades físicas e mecânicas do colmo inteiro do bambu da espécie *Guadua angustifolia*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 2005.

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

GOMES, T. S.; VISCONTE, L. L. Y.; PACHECO, E. B. A. V. Substituição da fibra de vidro por fibra de bananeira em compósitos de polietileno de alta densidade: parte 1. Avaliação mecânica e térmica. **Polímeros**, v. 23, n. 2, p. 206-211, 2013.

GUIMARÃES, J. L.; FROLLINI, E.; SILVA, C. G.; WYPYCH, F.; SATYANARAYANA, K. G. Characterization of banana, sugarcane bagasse and sponge gourds fibers of Brazil. **Industrial Crops and Products**, v. 30, p. 407-415, 2009.

GUPTA, B.; REVAGADE, N.; HILBORN, J. Poly(lactic acid) fiber: an overview. **Progress in Polymer Science**, n. 32, p. 455-482, 2007.

GURUNATHAN, T.; MOHANTY, S.; NAYAK, S. K. A review of the recent developments in biocomposites based on natural fibres and their application perspectives. **Composites: Part A**, n. 77, p. 1-25, 2015.

HENTON, D. E.; GRUBER, P.; LUNT, J.; RANDALL, J. Polylactic acid technology. In: MOHANTY, A. K.; MISRA, M.; DRZAL, I. T. **Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites**. Boca Raton: Taylor & Francis, 2005.

HILLIG, É.; IWAKIRI, S.; HASELEIN, C. R.; BIANCHI, O.; HILLIG, D. M. Caracterização de compósitos produzidos com polietileno de alta densidade (HDPE) e serragem da indústria moveleira – parte ii – extrusão em dupla-rosca. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 2, p. 335-347, abr.-jun. 2011.

HONG, J. Y.; YU, S. Y.; AHN, J. J.; KIM, S. Y.; KIM, G. W.; KIM, Y.; SON, S. W.; HWANG, S. Y. Environmental risk assessment of toxicity exposure: High-throughput expression profiling. **BioChip Journal**, v. 10, n. 1, p. 74-80, maio 2016.

HUDA, M. S.; DRZAL, L. T.; MOHANTY, A.K.; MISRA, M. Effect of fiber surface-treatments on the properties of laminated biocomposites from poly(lactic acid) (PLA) and kenaf fibers. **Composites Science and Technology**, n. 68, p. 424-432, 2008.

INSTITUTO NACIONAL DE CÂNCER JOSÉ ALENCAR GOMES DA SILVA. As profissões e o câncer. **Rede Câncer**, Rio de Janeiro, n. 17, 2012.

INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER – IARC. **Classifiles Formaldehyde as Carcinogenic to Humans**. Press release 153, 2004.

JAHNO, V. D. **Síntese e Caracterização do Poli (L-ácido láctico) para uso como biomaterial**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

JOHN, M. J.; THOMAS, S. Biofibres and biocomposites. **Carbohydrate polymers**, v. 71, n. 3, p. 343-364, 2008.

JOSEPH, P. V.; RABELLO, M. S.; MATTOSO, L. H. C.; JOSEPH, K.; THOMAS, S. Environmental effects on the degradation behaviour of sisal fibre reinforced polypropylene composites. **Composites Science and Technology**, v. 62, p. 1357-1372, 2002.

KIM, H. J. *et al.* Tensile properties and water absorption behavior of bamboo fiber in forced composites. In: **Key Engineering Materials**. Trans Tech Publications, 2006. p. 417-422.

KOMURAIHAH, A.; KUMAR, N. S.; PRASAD, B. D. Chemical Composition of Natural Fibers and its Influence on their Mechanical Properties. **MechCompos Mater**, n. 76, p. 359, 2014.

KUCHNIER, C. N. **Estudo do efeito de aditivo extensor de cadeia multifuncional em blendas de PLA/PBAT**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP, Campinas, 2014.

KUMAR, M.; MOHANTY, S.; NAYAK, S. K.; PARVAIZ, M. R. Effect of glycidyl methacrylate (GMA) on the thermal, mechanical and morphological property of biodegradable PLA/PBAT blend and its nanocomposites. **Bioresource Technology**, v. 101, p. 8406-8415, 2010.

KUNG SU, S.; WU C. S. The Processing and Characterization of Polyester/Natural Fiber Composites. **Polymer-Plastics Technology and Engineering**, v. 49, p. 1022-1029, 2010.

LEE, S. H.; WANG, S. Biodegradable polymers/bamboo fiber biocomposite with bio-based coupling agent. **Composites Part A: applied science and manufacturing**, v. 74 n. 37, p. 80-91, 2006.

LEMOS, A. L.; BOCKORNY, G. A.; SANTANA, R. M. C. **Estudo da biodegradabilidade de blendas contendo PCL, PLA e PHB**. 21º CBECIMAT, 09 a 13 de novembro de 2014, Cuiabá, MT, Brasil.

LEMOS, A. L.; MARTINS, R. M. Desenvolvimento e Caracterização de Compósitos Poliméricos à Base de Poli(Ácido Lático) e Fibras Naturais. **Polímeros**, v. 24, n. 2, p. 190-197, 2014.

LIEBSCH, D.; REGINATO, M. Florescimento e frutificação de *Merostachys skvortzovii* Sendulsky (taquara-lixia) no estado do Paraná. **Iheringia**, Porto Alegre, v. 64, n. 1, p. 53-56, jan./jun. 2009. (Série Botânica)

LIM, L. T.; AURAS, R.; RUBINO, M. Processing Technologies for poly (lactic acid). **Progress in Polymer Science**, v. 33. n. 8, p. 820-852, 2008.

LUCAS, E. F.; SOARES, B. G.; MONTEIRO, E. **Caracterização de polímeros: Determinação de peso molecular e análise térmica**. Rio de Janeiro: E-papers, 2001.

MACEDO, J. de S. **Desenvolvimento de biocompósitos à base de polihidroxitirato e resíduos do processamento de fibras de casca de coco**. 2010. Dissertação ( Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

MACHADO, M. L. C. *et al.* Estudo das Propriedades Mecânicas e Térmicas do Polímero Poli- 3-Hidroxitirato (PHB) e de Compósitos PHB/Pó de Madeira. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 20, n. 1, p. 65-71, 2010.

MANO, B.; ARAÚJO, J. R.; SPINACÉ, M. A. S.; DE PAOLI, M. A. Polyolefin composites with curaua fibers: Effect of the processing conditions on mechanical properties, morphology and fibers dimensions. **Composites Science and Technology**, n. 70, p. 29-35, 2010.

MANO, E. B. **Introdução a polímeros**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1985.

MANO, E. B.; MENDES, Luís C. **Introdução à polímeros**. 2.ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2004.

MANSOR, M. K. L.; IBRAHIM, N. A.; YUNUS, W. M. D. Z. W.; RATNAM, C. T. Effect Of Triacetin On The Mechanical Properties, Morphology and Water Absorption Of Poly(Lactic Acid)/Tapioca Starch Composites. **Malaysian Polymer Journal**, v. 6, n. 2, p. 165-175, 2011.

MARIANI, P. D. S. C. **Estudo da Biodegradacao da Blenda Poli (E-Caprolactona)/ Amido Modificado/Proteina Isolada em Soja em Diferentes Solos: Caracterizacao dos Produtos Formados e Avaliação da Toxicidade**. 2010. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

MARTINS, M. A.; KIOHARA, P. K.; JOEKES, I. Scanning electron microscopy study of raw and chemically modified sisal fibers. **Journal of applied polymer Science**, v. 94, n. 6, p. 2333-2340, 2004. ISSN 1097-4628.

MITRA, B. C. Environment Friendly Composite Materials: Biocomposites and Green Composites. **Defence Science Journal**, v. 64, n. 3, p. 244-261, 2014.

MOEN, B. E.; HOLLUND, B. E. Exposure to organic solvents among car painters in Bergen. **Annals of Occupational Hygiene** v. 44, p. 85-189, 2000.

MOFOKENG, J. P.; LUYT, A. S.; TÁBI, T.; KOVÁCS, J. Comparison of injection moulded, natural fibre-reinforced composites with PP and PLA as matrices. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, v. 25, n. 8, p. 927-948, 2 nov. 2011. <http://dx.doi.org/10.1177/0892705711423291>.

MOHANTY, A. K. *et al.* **Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites: An Introduction**. Taylor & Francis, 2005.

MOHANTY, A. K.; MISRA, M.; HINRICHSEN, G. Biofibres, biodegradable polymer and composites: an overview. **Macromolecular Materials and Engineering**, p. 1-24, 2000.

MORAIS, G. A. C.; CARASCHI, J. C. **Compósitos de polihidroxitirato (PHB) reforçado com resíduos agroindustriais**. Disponível em: <[www.anacuper.com](http://www.anacuper.com)>. Acesso em: 02 nov. 2017.

MORASSI, O. J. **Polímeros termoplásticos, termofixos e elastômeros**. São Paulo: SBS, 2000. 112p. Disponível em: <[http://www.crq4.org.br/sms/files/apostila\\_pol%C3%ADmeros\\_0910082013\\_site.pdf](http://www.crq4.org.br/sms/files/apostila_pol%C3%ADmeros_0910082013_site.pdf)>. Acesso em: 07 nov. 2017.

MOTHÉ, C. G.; ARAUJO, C. R.; WANG, S. H. Thermal and mechanical characteristics of Polyurethane/curaua fiber composites. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 95, p. 181-185, 2009.

MULINARI, D. R. **Comportamento Térmico, Mecânico e Morfológico dos Compósitos de Polietileno de Alta Densidade Reforçados com Fibras de Celulose do Bagaço de Cana de Açúcar**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica na Área de Materiais) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2009.

MULYANI, R.; LISMAN; KUSUMAH, H.; RAHAYU. Wood and Bamboo Fiber Combination in the Production of Poly Lactic Acid (PLA) composite. **Iosr Journal of Applied Chemistry**, v. 5, n. 6, nov. 2013.

MURARIU, M.; DUBOIS, P. PLA composites: From production to properties. **Advanced Drug Delivery Reviews**, v. 107, p. 17-46, dez. 2016. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1016/j.addr.2016.04.003>>.

NAIR, K. C. M.; KUMAR, R. P.; THOMAS, S.; SCHIT, S. C.; RAMAMURTHY, K. Rheological behavior of short sisal fiber-reinforced polystyrene composites. **Composites**: Part A, n. 31, p. 1231-1240, 2000.

NAIR, K. C. M.; THOMAS, S. Effect of interface modification on the mechanical properties of polystyrene-sisal fiber composites. **Polymer Composite**, v. 24, n. 3, p. 332-342, 2003.

NAMPOOTHIRI, K. M.; NAIR, N. R.; JOHN, R. P. An overview of the recent developments in polylactide (PLA) research. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 22, 2010.

NATIONAL TOXICOLOGY PROGRAM. **Final report on carcinogens. Background document for formaldehyde**. Washington: U.S. Department of Health and Human Services, 2010.

NAVARRO, R. F. **Materiais e ambiente**. João Pessoa: Ed.UFPB, 2001.

NETA, L. S. L.; COSTELLA, Â. M. S.; MELO FILHO, J. A.; GIACON, V. M. Caracterização físico-química de fibras de curauá e sua aplicação em compósitos poliméricos. **Scientia Amazonia**, v. 4, n. 1, p. 21-27, 2015.

NETO, L. F.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais**: ciência e tecnologia. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.

OKUBO, K.; FUJII, T.; THOSTENSON, E. T. Multi-scale hybrid biocomposite: Processing and mechanical characterization of bamboo fiber reinforced PLA with microfibrillated cellulose. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 40, n. 4, p. 469-475, abr. 2009. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.01.012>>.

OLIVEIRA FILHO, A. T.; VILELA, E. A.; GAVILANES, M. L.; CARVALHO, D. A. Effect of flooding regime and understory bamboos on the physiognomy and tree species composition of a tropical semideciduous forest in Southeastern Brazil. **Vegetation**, n. 113, p. 99-124, 1994.

OLIVEIRA, E. C. A.; SARTORI, R. H.; GARCEZ, T. B. **Compostagem**. 2008. Tese (Doutorado) –Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

OLIVEIRA, J. M. **Obtenção e caracterização de compósitos biodegradáveis de poliácido láctico (PLA) reforçados com fibras de curauá**. 2016. Dissertação (Mestrado em Integridade de Materiais da Integridade da Engenharia) – UnB, Universidade de Brasília, DF, 2016.

OSORIO, L.; TRUJILLO, E.; VAN VUURE, A. W.; VERPOEST, I. Morphological aspects and mechanical properties of single bamboo fibers and flexural characterization of bamboo/epoxy composites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 30, n. 5, p. 396-408, 2011.

PALSIKOWSKI, Paula Alessandra. **Estudo do comportamento da biodegradação em solo de blendas compatibilizadas de PLA/PBAT e seus efeitos genotóxicos e mutagênicos**. 2015. Dissertação (Mestrado) – Unicamp, Campinas, 2015.

PAOLI, M. A. Compósitos de Polímeros com Fibras Vegetais. In: **1 Workshop sobre Fibras Naturais**, São Paulo, 2010.

PAULA, P. G. **Formulação e caracterização de compósitos com fibras vegetais e matriz termoplástica**. 2011. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais do Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2011.

PELEIAS JÚNIOR, F. S. **Desenvolvimento da metodologia de síntese e purificação dos dímeros L-lactídeo e glicolídeo para produção do poli(ácido láctico-co-ácido glicólico) para utilização na produção de fontes radioativas**. 2017. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP, São Paulo, 2017.

PELLICANO, M. **Desenvolvimento e caracterização de blendas PHBV/Ecoflex e suas modificações com amido**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2008.

PERES, R. V. **Caracterização e processamentos do poli (ácido láctico) 70/30 para impressão 3D**. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2016.

PINHEIRO, M. F. C. A. **Compósitos Avançados Reforçados com Fibras Naturais (Faia e Pinho) para Construção**. 2008. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2008.

QIAN, Shaoping *et al.* Poly (lacticacid) biocompósitos reinforced with ultrafinebamboo-char: Morphology, mechanical, thermal, and water absorption properties. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 133, n. 20, 2016.

RABELLO, M. **Aditivação de polímeros**. São Paulo: Artliber, 2000. 242p.

RAMESH, M.; PALANIKUMAR, K.; REDDY, K. H. Mechanical property evaluation of sisal-jute-glass fiber reinforced polyester composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 48, p. 1-9, 2013.

RAMIREZ, F.; GONZALEZ, M.; BARRERA, N.; CASTELLANOS, S. Mechanical characterization of pla-bamboo fibers green composite. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPOSITE MATERIALS, 19., 2013, Montreal. **Proceedings...** Montreal: JEC, 2013.

RAMÍREZ, M. G. L. **Caracterização de biocompósitos de amido termoplástico reforçado com fibra de coco verde**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

RAYMOND, F.; WEGMAN, T. R. T. **Handbook of adhesive bonded structural repair**. New Jersey: Adhesion Associates Ledgewood, 1992.

RAZERA, I. A. T. **Fibras Lignocelulósicas como Agente de Reforço de Compósitos de Matriz Fenólica e Lignofenólica**. 2006. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

REGO, M. A.; SOUSA, C. S.; KATO, M.; DE CARVALHO, A. B.; LOOMIS, D.; CARVALHO, F. M. Non-Hodgkin's lymphomas and organicsolvents. **Journal Occupational Environ. Med.**, v. 44, p. 874-881, 2002.

REIS, E. G. **Compósitos de fibras de taquara (*Merostachys sp.*) e matriz de poliéster e epóxi**. 2013. 105f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia dos Materiais) – Setor de Tecnologia, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2013.

ROSA, D. S.; PANTANO FILHO, R. **Biodegradação um ensaio com polímeros** Bragança Paulista: Editora Moara, 2003.

ROWELL, R. M. *et al.* Utilization of natural fibers in plastic composites: Problems and Opportunities. **Lignocellulosic – Plastics Composites**, São Paulo, p. 23–51, 1997.

RUDNIK, E.; BRIASSOULIS, D. Degradation behaviour of poly (lactic acid) films and fibres in soil under Mediterranean field conditions and laboratory simulations testing. **Industrial Crops and Products**, v. 33, n. 3, p. 648-658, 2011.

SABOYA, D. **Visão geral sobre polímeros biodegradáveis**. Notas de aula - 7ª SEMANA DE POLÍMEROS DO INSTITUTO DE MACROMOLÉCULAS PROFESSORA ELOISA MANO IMA – UFRJ, 2013. Disponível em: <<http://www.ima.ufrj.br/wp-content/uploads/2013/11/30-13.45-Pol%C3%ADmerosbiodegrad%C3%A1veis.pdf>>. Acesso em: 20 abr. 2018.

SANTOS Jr., A. R.; WADA, M. L. F. Polímeros biorreabsorvíveis como substrato para cultura de células e engenharia tecidual. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 17, nº.4, p. 308-317, 2007.

SANTOS, E. B.; PASSADOR, F. R.; MONTAGNA, L. S. **Caracterização de compósitos poliméricos à base de PLA, fibra de coco e borra de café**. 23º CBECiMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. 2018, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.

SANTOS, M. L.; LIMA, O. J.; NASSAR, E. J.; CIUFFI, K. J.; CALEFI, C. F. Estudo das condições de estocagem do bagaço de cana-de-açúcar por Análise Térmica. **Química Nova**, v. 34, n. 3, p. 507-511, 2011.

SATYANARAYANA, K. G.; FLORES-SAHAGUN, T. H. S.; MAZZARO, I.; SUKUMARAN, K.; GUPALAKRISHNA, P.; RAVIKUMAR, K. K. Characterization of Aechmea Magdalena eleafyarns. **Journal of Biobased Materials and Bionergy**, v. 8, p. 1-8, 2014.

SATYANARAYANA, K. G.; FLORES-SAHAGUN, T. H. S.; SANTOS, L. P. D.; SANTOS, J. D.; MAZZARO, I.; MIKOWSKI, A. Characterization of blue agave bagasse fibers of Mexico. **Composites: Part A**, v. 45, p. 153-161, 2013.

SCANDOLA, E. Z. M. Green Composites: An Overview. **Polymer Composites**, p. 1906 -1915, 2011.

SCHIRMER, W. N.; QUADROS, M. E. Compostos orgânicos voláteis biogênicos emitidos a partir de vegetação e seu papel no Ozônio troposférico urbano. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, Piracicaba, v. 5, n. 1, p. 25-42, 2010.

SENA NETO, A. R. de. **Estudo de fibras de folhas de abacaxis (gênero Ananas) e sua utilização em compósitos biodegradáveis com matriz de poli(ácido láctico) (PLA)**. 2014. Tese de Doutorado) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014.

SENDULSKY, T. *Merostachys multiramea* (Poaceae: Bambusoideae: Bambuseae) and similar species from Brazil. **Novon**, n. 5, p. 76-96, 1995.

SENDULSKY, T. Twelve new species of merostachys (Poaceae: Bambusoideae: Bambuseae) from Brasil. **Novon**, n. 7, p. 285-307, 1997.

SGRICCIA, N.; HAWLEY, M.; MISRA, M. Characterization of natural fiber surfaces and natural fiber composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 39, n. 10, p. 1632-1637, 2008. ISSN 1359-835X

SILVA, A. L. B. B.; SILVA, E. O. **Conhecendo materiais poliméricos**. Cuiabá: Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Ciências exatas e da terra, 2003. Disponível em: [www.dominiopublico.gov.br](http://www.dominiopublico.gov.br). Acesso em: 05 abr. 2018.

SILVA, G. C.; LATORRACA, J. V. F.; TEIXEIRA, D. E.; BORTOLETTO FILHO, G. Produção do compósito madeira e casca de *Eucalyptusurophylla* S. T. Blake e cimento Portland. **Scientia Forestalis**, n. 68, p. 59-67, 2005.

SILVEIRA, B. C.; HOWART, J. L. L.; MOLINARI, É. J. Desenvolvimento de monofilamento de pla/hidroxiapatita para construção de *scaffolds* através do processo de modelagem por fusão e deposição. In: CBECIMAT – CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 21., 2014, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: Metallum, 2014. p. 2179-2186.

SILVESTRE FILHO, G. D. **Comportamento mecânico do poliuretano derivado do óleo de mamona reforçado com fibra de carbono**: Contribuição para o projeto de hastes de implante de quadril. 2001. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2001.

SILVESTRIN, RAFAEL G. **Desenvolvimento de compósito biodegradável com matriz de poli ácido láctico reforçado com fibra vegetal de alta resistência da**

**árvore embira**. 2018. Trabalho (Conclusão de Curso) – Graduação em Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

SINGH, B.; SHARMA, N. Review article. Mechanistic implications of plastic degradation. **Polymer Degradation and Stability**, n. 93, p. 561-584, 2008.

SMITH, R. **Biodegradable polymers for industrial applications**. New York: CRC Press, 2005.

SODERSTROM, T. R.; JUDZIEWICZ, E. J.; CLARK, L. G. Distribution patterns of neotropical bamboos. In: VANZOLINI, P.E.; HEYER, W. R. (Ed.). **Proceedings of a workshop on neotropical distribution patterns**. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 1988. p. 121-157.

SOLARSKI, S.; FERREIRA, M.; DEVAUX, E. Characterization of the thermal properties of PLA fibers by modulated differential scanning calorimetry. **Polymer Communication**, v. 46, p. 11187-12032, 2005.

SPINACÉ, M. A. S.; FERMOSELI, K. K. G.; DE PAOLI, M. A. Recycled polypropylene reinforced with curaua fibers by extrusion. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 112, p. 3686-3694, 2009.

STUART, B. **Infrared spectroscopy**. Wiley Online Library, 2004. ISBN 0471238961.

SYDENSTRICKER, T. H. D.; MOCHNAZ, S.; AMICO, S. C. Pull-out and other evaluations in sisal-reinforced polyester biocomposites. **Polymer Testing**, v. 22, p. 375-380, 2003.

TANOBE, V. O. A.; SYDENSTRICKER, T. H. D.; MUNARO, M.; AMICO, S. C. A comprehensive characterization of chemically treated Brazilian sponge-gourds (*Luffa cylindrica*). **Polymer Testing**, v. 24, p. 474-482, 2005.

TAO, Y.; YAN, L.; JIE, R. Preparation and properties of short natural fiber reinforced poly(lactic acid) composites. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, n. 19, p. 651-655, 2009.

TEIXEIRA, E. D. M.; CURVELO, A. A.; CORREA, A. C.; MARCONCINI, J. M.; GLENN, G. M.; MATTOSO, L. H. Properties of thermoplastic starch from cassava bagasse and cassava starch and their blends with poly (lactic acid). **Industrial Crops and Products**, v. 37, n. 1, p. 61-68, 2012. ISSN 0926-6690

TERAMOTO, N.; URATA, K.; OZAWA, K.; SHIBATA, M. Biodegradation of aliphatic polyester composites reinforced by abaca fiber. **Polymer Degradation and Stability**, n. 86, p. 401-409, 2004.

TOKIWA, Y.; CALABIA, B. P. Biodegradability and biodegradation of polyesters. **Journal of polymers and the environment**, v. 15, p. 259-267, 2007.

TOKORO, R.; VU, D. M.; OKUBO, K.; TANAKA, T.; FUJII, T.; FUJIURA, T. How to improve mechanical properties of polylactic acid with bamboo fibers. **Journal of Materials Science**, n. 43, p. 775-787, 2008.

TOMCZAK, F.; SYDENSTRICKER, T. H. D.; SATYANARAYANA, K. G. Studies on lignocellulosic fibers of Brazil: Part III: Morphology and Properties of Brazilian Curauá Fibers. **Composites: Part A**, v. 38, p. 2227-2236, 2007.

TOMCZAK, F.; SYDENSTRICKER, T. H. D.; SATYANARAYANA, K. G. Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part II: Morphology and Properties of Brazilian Coconut Fibers. **Composites: Part A**, v. 38, p. 1710-1721, 2007.

TRINDADE, W. G.; DE PAIVA, J. M. F.; LEÃO, A. L.; FROLLINI, E. Ionized-air-treated curaua fibers as reinforcement for phenolic matrices. **Macromolecular Materials Engineering**, n. 293, p. 521-528, 2008.

TSENG, T. K.; CHU, H. The Catalytic Incineration of Styrene over an Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Catalyst. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 52, n. 10, p. 1153-1160, 2002.

U.S. Environmental Protection Agency – EPA. **Proposed Guidelines for Carcinogen Risk Assessment**, 1999. Disponível em: <https://cfpub.epa.gov>. Acesso em: 02 abr. 2018.

USBERCO, J.; SALVADOR, E. **Química Geral**. 12. ed. São Paulo: Saraiva, 2006.

VASCONCELLOS, R. M. **Info Bambu**. Disponível em: <http://www.bambubrasileiro.com>. Acesso em: 09 abr. 2018.

VENTURA, A. M. F. M. Os compósitos e a sua aplicação na reabilitação de estruturas metálicas. **Ciência e Tecnologia dos Materiais**, v. 21, n. 3/4, p. 10-19, 2009.

VILAPLANA, F.; STRÖMBERG, E.; KARLSSON, S. Environmental and resource aspects of sustainable biocomposites. **Polymer: Degradation and Stability**, v. 95, p. 2147-2161, 2010.

VIOLA, N. M. **Produção e caracterização física e mecânica de compósito plástico-madeira**. 2012. 139f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Bauru, 2012.

WAGNER, G. H.; WOLF, D. C. Carbon transformations and soil organic matter formation. In: SYLVIA, D. M.; FUHRMANN, J. J.; HARTEL, P. G.; ZUBERER, D. A. **Principles and applications of soil microbiology**. New Jersey: Prentice Hall, 1999. p. 218-256.

WEIR, N. A.; BUCHANAN, F. J.; ORR, J. F.; FARRAR, D. F.; BOYD, A. Processing, annealing and sterilization of poly-L-lactide. **Biomaterials**, v. 25, p. 3939-3949, 2004.

YANG, H. S.; KIM, H. J.; SON, J. G.; PARK, H. J.; HWANG, T. S. Rice-husk flour filled polypropylene composites; mechanical and morphological study. **Composites Structures**, v. 63, n. 3-4, p. 305-312, 2004.

YOUSSEFIAN, S. Molecular Origin of Strength and Stiffness in Bamboo Fibrils. **Scientific Reports**, 2015.

YU, T.; REN, J.; LI, S.; YUAN, H.; LI, Y. Effect of fiber surface-treatments on the properties of poly (lactic acid)/ramie composites. **Composites: Part A**, n. 41, p. 499-505, 2010.

ZHANG, K.; WANG, F.; LIANG, W.; WANG, Z.; DUAN, Z.; YANG, B. Thermal and Mechanical Properties of Bamboo Fiber Reinforced Epoxy Composites. **Polymers**, v. 10, n. 6, p. 608-625, 3 jun. 2018. MDPI AG. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.3390/polym10060608>>.

ZHAO, Y.; QIU, J.; FENG, H.; ZHANG, M.; LEI, L. & WU, X. **Chem. Eng. J.**, n. 173, p. 659, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2011.07.076>>.