

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CAMPUS SOROCABA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS

CRISTIANE CARLA MACIEL

**MOLDAGEM E COMPARAÇÃO DE PROPRIEDADES DE COMPÓSITOS  
DE POLI(BUTILENO ADIPATO-CO-TEREFTALATO) REFORÇADOS COM  
TECIDOS DE FIBRAS VEGETAIS**

Sorocaba  
2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CAMPUS SOROCABA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS

CRISTIANE CARLA MACIEL

**MOLDAGEM E COMPARAÇÃO DE PROPRIEDADES DE COMPÓSITOS  
DE POLI(BUTILENO ADIPATO-CO-TEREFTALATO) REFORÇADOS COM  
TECIDOS DE FIBRAS VEGETAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais, para futura obtenção do título de Mestre em Ciência dos Materiais.

Orientação: Prof. Dra. Jane Maria Faulstich de Paiva

Sorocaba  
2019

Maciel, Cristiane Carla

MOLDAGEM E COMPARAÇÃO DE PROPRIEDADES DE  
COMPÓSITOS DE POLI(BUTILENO ADIPATO-CO-TEREFTALATO)  
REFORÇADOS COM TECIDOS DE FIBRAS VEGETAIS / Cristiane Carla  
Maciel. -- 2019.

90 f. : 30 cm.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal de São Carlos, campus  
Sorocaba, Sorocaba

Orientador: Jane Maria Faulstich de Paiva

Banca examinadora: Sandro Donnini Mancini, Vagner Roberto Botaro

Bibliografia

1. PBAT. 2. Tecido de fibras de juta. 3. Compósitos. I. Orientador. II.  
Universidade Federal de São Carlos. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada pelo Programa de Geração Automática da Secretaria Geral de Informática (SIn).

DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)

Bibliotecário(a) Responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano – CRB/8 6979



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências e Tecnologias Para a Sustentabilidade  
Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais

---

Folha de Aprovação

---

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado da candidata Cristiane Carla Maciel, realizada em 25/03/2019:



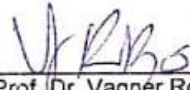
---

Profa. Dra. Jane Maria Faulstich de Paiva  
UFSCar



---

Prof. Dr. Sandro Donnini Mancini  
UNESP



---

Prof. Dr. Vagner Roberto Botaro  
UFSCar



## **AGRADECIMENTOS**

*Em primeiro lugar agradeço a Deus por me dar saúde, sabedoria e a oportunidade para eu alcançar meu objetivo, além de me amparar em todos os momentos dessa jornada.*

*A minha família, meus pais Antonio e Andréia por todo amor e confiança, meu noivo Romerito por acreditar no meu sonho junto comigo e todo o restante da família linda que eu tenho e que me apóia.*

*A minha orientadora Profa. Dra. Jane Maria Faulstich de Paiva que concedeu todo seu conhecimento e carisma para que eu pudesse concretizar o meu objetivo, além depositar sua confiança em mim.*

*Aos colaboradores da Sinctronics pelo auxílio na utilização do equipamento de ensaio de impacto, contribuindo com alguns resultados obtidos.*

*Ao Prof. Dr. Vagner R. Botaro por permitir a utilização do equipamento de DMTA e à Karina Palmizani pelo auxílio na execução das análises.*

*Aos meus amigos que conquistei nesse período do mestrado Jéssica, Amanda Q, Amanda M, Tamires, Thiago, Karina, por todos os momentos de conversas, aprendizagem e apoio.*

*Á CAPES pela concessão da bolsa de estudo.*

## RESUMO

MACIEL, Cristiane Carla. **Moldagem e Comparação De Propriedades De Compósito de Poli (Butileno Adipato-Co-Teraftalato) Reforçado com Tecidos de Fibras Vegetais.** 2019. 90f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2018.

Nos últimos anos, o crescente volume de produção e uso de materiais poliméricos têm gerado problemas ambientais causados pelo descarte pós-consumo, os quais se tornam enormes quantidades de resíduos devido à dificuldade de reciclagem ou de biodegradação da maioria deles. Assim, o presente trabalho buscou o desenvolvimento de compósitos poliméricos com utilização de uma matriz polimérica termoplástica e biodegradável (PBAT). Para a moldagem dos compósitos foram utilizadas fibras vegetais de juta, que são de fonte renovável, de fácil obtenção e de baixo custo. No caso, foram utilizados três diferentes tipos comerciais de tecidos de fibras: juta (F9), juta e algodão (I33) e juta 2X2 com gramaturas de 382 g/m<sup>2</sup>, 361 g/m<sup>2</sup> e 438 g/m<sup>2</sup> respectivamente. As moldagens dos materiais foram realizadas em molde metálico acoplado a uma prensa hidráulica, utilizando o método de compressão a quente, seguido de resfriamento em temperatura ambiente, obtendo placas tipo sanduíche (polímero, fibras, polímero). Após as moldagens, os materiais foram cortados para a realização de análise de espectroscopia na região do infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), análise térmica por Termogravimetria (TG/DTG), análise térmica dinâmico-mecânica (DMTA), ensaios mecânicos (tração e impacto), análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV), cristalinidade (difração de Raio-X - DRX) e ângulo de contato. A análise de FTIR permitiu caracterizar tanto as fibras como o polímero com suas respectivas bandas características. Em relação à análise por TG/DTG foi observada que a inserção do reforço na matriz ocasionou diminuição em torno de 3 a 4% na estabilidade térmica dos compósitos em relação ao PBAT. A partir dos resultados dos ensaios mecânicos de tração e impacto foi possível observar melhoras de até 208% na resistência máxima em tração e 142% na resistência ao impacto com inserção dos tecidos de fibras. De acordo com as imagens de MEV foi observada interação fibras/matriz polimérica, revelando adesão interfacial. A porcentagem de fase cristalina do PBAT (17,79%) foi obtida pelo difratograma de DRX. Na análise de ângulo de contato, o polímero PBAT e os compósitos apresentaram características hidrofóbicas nas respectivas superfícies. Portanto, a partir do conjunto de análises realizadas neste trabalho foi possível caracterizar e comparar os compósitos reforçados com três diferentes tipos de tecidos de fibras de juta com o polímero PBAT. Adicionalmente, foi possível verificar que os compósitos apresentaram propriedades mecânicas superiores comparadas ao polímero PBAT sem reforço.

Palavras-chave: PBAT. Tecido de fibras de juta. Compósitos.

## ABSTRACT

In recent years, the increasing volume of polymer resin production and use has generated environmental problems caused by the post-consumption disposal of these materials, which become huge amounts of waste due to the difficulty of biodegradation and also the low use in recycling processes. Thus, the present work sought the development of polymeric composites with the use of a thermoplastic and biodegradable polymer matrix (PBAT). For the molding of the composites were used jute vegetable fibers, which are of renewable source, easy to obtain and low cost. In the case, three different commercial types of fiber fabric were used: jute (F9), jute and cotton (I33) and jute 2X2 with weights of 382 g / m<sup>2</sup>, 361 g / m<sup>2</sup> and 438 g / m<sup>2</sup> respectively. The moldings of the materials were made in metal mold coupled in a hydraulic press, using the hot compression method, followed by cooling at room temperature. After the moldings, the materials were cut for the analysis of spectroscopy in the infrared region by Fourier transform (FTIR), thermal properties by thermogravimetric analysis (TGA/DTG), dynamic-mechanical thermal analysis (DMTA), mechanical tests (tensile and impact), scanning electronic microscopy (SEM) analysis, crystallinity (XRD) and contact angle. FTIR analysis revealed only O-H bands present in the composite samples due to the presence of the fibers. Regarding the TGA/DTG analysis, it was observed that the insertion of the reinforcement in the matrix caused a decrease of 3 to 4% in the thermal stability of the composites in relation to the PBAT. From the results of the mechanical tests of traction and impact it was possible to observe improvements of up to 208% in the maximum tensile strength and 142% in the impact resistance. According to the SEM images, fibers / polymer matrix interaction was observed, revealing a certain interfacial adhesion. The percent crystalline phase of PBAT (17.79%) was obtained by the XRD diffractogram. In the contact angle analysis, the PBAT polymer and the composites presented hydrophobic characteristics on the respective surfaces. Therefore from the set of analyzes performed in this work it was possible to characterize and compare the three different types of jute fiber fabrics reinforced composites with the PBAT polymer. In addition, it was possible to verify that the composites presented superior mechanical properties compared to PBAT polymer without reinforcement.

Keywords: PBAT. Jute fiber fabric. Composites.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ciclo de vida ideal dos polímeros biodegradáveis provenientes de fontes petrolíferas.....	16
Figura 2: Fluxograma de classificação de polímeros biodegradáveis a partir de fontes distintas.....	17
Figura 3: Representação da unidade estrutural do mero do polímero PBAT.....	18
Figura 4: Representação dos elementos das fibras lignocelulósicas. ....	23
Figura 5: Etapas de processamento da juta: plantação (a); imersão (b); secagem (c) e fabricação do tecido de fibras de juta (d). ....	27
Figura 6: Polímero comercial PBAT (Ecoflex) Basf S.A. ....	29
Figura 7: Tecidos de fibra de Juta: F9 (a), I33 (b) e 2x2 (c). ....	30
Figura 8: Processo de Moldagem para obtenção dos corpos de prova.....	32
Figura 9: Tipos de comportamento hidrofílico e hidrofóbico da superfície de materiais. ....	33
Figura 10: Representação gráfica do método de separação simples de área para cálculo de cristalinidade.....	36
Figura 11: Fotografia de alguns corpos de prova cortados para os ensaios de tração: PBAT (a), PBAT/Juta F9 (b), PBAT/Juta e Algodão I33 (c) e PBAT/Juta 2x2 (d). ....	37
Figura 12: Fotografias dos corpos de prova com entalhe para os ensaios de impacto do tipo Izod: PBAT (a), PBAT/Juta F9 (b), PBAT/Juta e Algodão I33 (c) e PBAT/Juta 2x2 (d). ....	38
Figura 13: Amostras para análise morfológica do: PBAT (a), PBAT/Juta F9 (b), PBAT/Juta e Algodão I33 (c) e PBAT/Juta 2x2 (d). ....	39
Figura 14: Resultado da moldagem dos compósitos: PBAT/Juta F9 (a), PBAT/Juta I33 (b) e PBAT/Juta 2x2 (c).....	40
Figura 15: Espectro de infravermelho dos tecidos de fibras de juta: F9 (a), I33 (b) e 2X2 (c). ....	41
Figura 16: Espectro de FTIR do polímero PBAT e os compósitos com tecido de fibras de juta dividido em duas partes (A e B) para melhor visualização das bandas.....	45
Figura 17: Curvas TG dos tecidos de fibras de juta (a), do polímero PBAT e dos compósitos com os 3 tipos de tecidos de fibras de juta (b) .....	48
Figura 18: Curva DTG dos tecidos de fibras de juta (a), do polímero PBAT e dos compósitos com os 3 tipos de tecidos de fibras de juta (b).....	49
Figura 19: Curvas do módulo de armazenamento (E') do polímero PBAT e seus respectivos compósitos.....	55



Figura 20: Curvas do módulo de perda ( $E''$ ) do polímero PBAT e seus respectivos compósitos. .....	57
Figura 21: Curvas Tan Delta do polímero PBAT e seus respectivos compósitos.....	58
Figura 22: Difratoograma da base polimérica PBAT.....	60
Figura 23: Difratoograma das amostras de PBAT e de seus compósitos reforçados com tecido de fibras de juta.....	61
Figura 24: Amostras após ensaio de tração: PBAT (a), PBAT/Juta F9 (b), PBAT/Juta I33 (c) e PBAT/Juta 2X2 (d).....	63
Figura 25: Apresentação gráfica dos resultados de: Resistência Máxima (a) e Módulo de Elasticidade (b). ....	65
Figura 26: Fotografias das amostras após ensaio de impacto do tipo Izod: PBAT (a), PBAT/Juta F9 (b), PBAT/Juta I33 (c) e PBAT/Juta 2X2 (d).....	67
Figura 27: Apresentação gráfica dos resultados de: Energia Absorvida (a) e Energia de Impacto em duas unidades de medidas (b).....	68
Figura 28: MEV do tecido de fibras de Juta F9 com aumentos de 15x (a) e 60x (b).....	70
Figura 29: MEV do tecido de fibras de Juta e Algodão (I33) com aumentos de 15x (a) e 60x (b). ....	71
Figura 30: MEV do tecido de fibras de Juta 2x2 com aumentos de 15x (a) e 60x (b).....	71
Figura 31: Micrografias dos corpos de prova do ensaio de impacto, interface fibra/matriz do compósito de PBAT_JUTA_F9 com ampliações de: 50X (a), 80X (b), 500X (c) e 1000X (d). .....	73
Figura 32: Micrografias dos corpos de prova do ensaio de impacto, interface fibra/matriz do compósito de PBAT_JUTA_I33 com ampliações de: 50X (a), 80X (b), 500X (c) e 1000X (d). .....	74
Figura 33: Micrografias dos corpos de prova do ensaio de impacto, interface fibra/matriz do compósito de PBAT_JUTA_2X2 com ampliações de: 50X (a), 80X (b), 500X (c) e 1000X (d). ....	75

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais propriedades do PBAT. ....	18
Tabela 2: Valores das propriedades de algumas fibras vegetais e sintéticas. ....	25
Tabela 3: Composição química das fibras de juta e algodão. ....	28
Tabela 4: Descrição do tipo de tecido de juta e suas respectivas gramaturas. ....	29
Tabela 5: Composição dos compósitos de PBAT com os diferentes tipos de tecidos de fibras de juta ....	30
Tabela 6: Tabela de bandas de absorção para espectros de infravermelho de fibras de juta. ....	42
Tabela 7: Tabela com os valores de comprimento de onda obtidos nos espectro de FTIR para a amostra de PBAT e seus respectivos compósitos. ....	45
Tabela 8: Valores de ângulos de contato para o PBAT e os compósitos. ....	47
Tabela 9: Estágio de degradação das curvas de TGA e DTG, apresentando temperatura inicial ( $T_i$ ) e final ( $T_f$ ), perda de massa (%), temperatura máxima de perda de massa ( $T_{máx}$ ) e porcentagem residual (R). ....	50
Tabela 10: Valores de módulo de armazenamento ( $E'$ ) em determinadas temperaturas para o PBAT e seus respectivos compósitos. ....	55
Tabela 11: Valores de módulo de perda ( $E''$ ) em determinadas temperaturas para o PBAT e seus respectivos compósitos ....	57
Tabela 12: Temperaturas médias de transição vítrea por Tan Delta para o polímero PBAT e seus compósitos. ....	59
Tabela 13: Valores do ângulo $2\theta$ obtidos para as amostras de PBAT e seus respectivos compósitos. ....	62
Tabela 14: Valores de Intensidades obtidos para as amostras de PBAT e seus respectivos compósitos. ....	62
Tabela 15: Valores médios e seus respectivos desvios padrão para o ensaio de propriedades mecânicas de tração baseados em 10 corpos de prova para cada tipo de amostra. ....	64
Tabela 16: Propriedades mecânicas de fibras naturais de juta e algodão. ....	66
Tabela 17: Valores médios e seus respectivos desvios padrão para o ensaio de propriedades mecânicas de impacto, baseados em 5 corpos de prova para cada tipo de amostra. ....	68

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PBAT	Poli (adipato-co-teraftalato de butileno)
DRX	Difração de Raios-X
DTG	Derivada de Termogravimetria
FTIR	Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier
ATR	<i>Attenuated Total Reflection</i> - Refletância Total Atenuada
DMTA	Análise Térmica Dinâmico-Mecânica
TG	Termogravimetria
T <sub>i</sub>	Temperatura inicial
T <sub>f</sub>	Temperatura final
T <sub>g</sub>	T <sub>glass</sub> : Temperatura de transição vítrea
T <sub>m</sub>	T <sub>melt</sub> : Temperatura de fusão cristalina
E'	Módulo de armazenamento
E''	Módulo de perda
CET	Cromatografia por Exclusão de Tamanho

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	11
2	OBJETIVOS.....	14
2.1	Objetivos Gerais .....	14
2.2	Objetivos Específicos .....	14
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	15
3.1	Polímeros .....	15
3.1.1	Definição .....	15
3.1.2	Polímeros Biodegradáveis .....	15
3.1.3	Poli (adipato-co-teraftalato de butileno) PBAT.....	17
3.2	Materiais Compósitos .....	19
3.2.1	Compósito Polimérico Reforçado com Fibras Naturais .....	20
3.3	Fibras Naturais .....	21
3.3.1	Juta.....	25
4	METODOLOGIA .....	29
4.1	Materiais .....	29
4.2	Métodos .....	30
4.2.1	Preparação para a moldagem .....	30
4.2.2	Processo de Moldagem.....	31
4.3	Caracterização.....	32
4.3.1	Espectroscopia na Região do Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) 32	
4.3.2	Ângulo de Contato.....	33
4.3.3	Análises de Termogravimetria (TG) e Termogravimetria Derivada (DTG) .....	34
4.3.4	Análise Térmica Dinâmico-Mecânica (DMTA).....	34
4.3.5	Difração de Raios-X (DR-X).....	35
4.3.6	Ensaio de Tração .....	37
4.3.7	Ensaio de Impacto .....	38
4.3.8	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) .....	39
4.3.9	Análise Estatística .....	39
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	40
5.1	Moldagem .....	40
5.2	Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR).....	40

5.3	Ângulo de Contato .....	46
5.4	Termogravimetria (TG) e Termogravimetria Derivada (DTG) .....	47
5.5	Análise Térmica Dinâmico-Mecânica (DMTA) .....	53
5.6	Difração de Raios-X (DR-X) .....	59
5.7	Ensaio de Tração .....	62
5.8	Ensaio de Impacto .....	67
5.9	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) .....	70
5.9.1	Tecidos de Fibras de Juta .....	70
5.9.2	Compósitos .....	72
6	CONCLUSÕES .....	76
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	77
8	REFERÊNCIAS .....	78
	Apêndice A .....	88

## 1 INTRODUÇÃO

A história dos materiais poliméricos teve início em 1920, quando Hermann Staudinger descobriu que os polímeros eram originados a partir da repetição de pequenas moléculas monoméricas, as quais se agrupam e formam moléculas de alta massa molar, tal descoberta lhe rendeu o prêmio Nobel de Química em 1953 (MÚLHAUPT, 2013; VIEIRA, 2016). Desde então, o uso crescente desses materiais foi ganhando espaço na sociedade por todo o mundo, tornando-se destaque no mercado mundial.

O grande consumo desses materiais deu-se pelo fato de serem materiais com boas propriedades mecânicas e térmicas para determinadas aplicações, tornando-se um excelente material para áreas como: medicina, tecnologia, aeronáutica, alimentícia, entre outras (ZEHETMEYER, 2016; DIAS, 2016). Com o passar dos anos os polímeros foram se tornando cada vez mais importantes no nosso cotidiano, pois atualmente é quase impossível imaginar nossas vidas sem qualquer tipo de artefato que não seja de plástico ou borracha. Esta crescente evolução dos materiais poliméricos trouxe para a sociedade praticidade e comodidade (GU & OZBAKKALOGLU, 2016; AL-SALEM et al., 2017).

A representação em número da crescente utilização de plásticos no mundo revela que o total produzido atualmente excede o valor de 280 milhões de toneladas, onde a China responde por 29% de toda a produção mundial, seguida pela Europa (União Européia, Suíça e Noruega), responsável por 19%, e em terceiro lugar fica o bloco econômico NAFTA (composto por EUA, Canadá e México), com 18% (ZEHETMEYER, 2016; ABIPLAST, 2017). A representação brasileira no cenário de produção de resinas termoplásticas apresenta em torno de 6,5 milhões de toneladas, o que significa aproximadamente 2,3% da produção global e é a mais significativa da América Latina (LI, 2015; ZEHETMEYER, 2016; ABIPLAST, 2017).

Com o crescente consumo de materiais poliméricos, surgiu a preocupação em relação ao descarte desses materiais no meio ambiente, já que a maioria apresenta vida útil alta e resistência ao ataque de microorganismos; conseqüentemente os polímeros podem levar dezenas de anos ou até séculos para se degradarem (DIAS, 2016). De acordo com ABRELPE (2016), 14% do lixo sólido descartado no Brasil são plásticos (SALEEM et. al., 2018; DIAS, 2016), o que gera diversos problemas ambientais, como a presença desses resíduos em oceanos, afetando vidas marinhas, poluição de rios, além de outros danos ambientais (FALCÃO et. al., 2017; LI et. al., 2016).

Devido à problemática de descarte, por exemplo, que os plásticos geraram ao longo dos anos e ainda geram, pesquisas vêm sendo desenvolvidas com intuito de substituir o uso de alguns polímeros convencionais por polímeros biodegradáveis, que podem ser classificados conforme sua fonte de obtenção como: polímeros comerciais biodegradáveis (HOSOKAWA, et. al., 2016; GIRDTHEP, et. al., 2018; LUCHESE, et al., 2018) ou polímeros provenientes de fontes naturais (milho, cana-de-açúcar, juta, coco, sisal, entre outros) (FALCÃO et. al., 2017; LUCHESE, et al., 2018).

No intuito de contribuir com as pesquisas que buscam materiais que tenham menor tempo de vida útil após o descarte, mas que sejam suficientemente resistentes quando em uso em determinadas aplicações em peças ou componentes, temos a classe de materiais compósitos (SIMONASSI, 2017; LI et. al., 2016) com utilização de matriz polimérica biodegradável.

Os compósitos são constituídos por duas fases distintas definidas como contínua (matriz polimérica) e dispersa (reforço), com a finalidade de se obter materiais com propriedades superiores comparados com um material atuando sozinho (FALCÃO et. al., 2017). De modo geral, muitas pesquisas vêm sendo realizadas para estudar o comportamento da diversidade que os compósitos podem gerar como, por exemplo, o aumento de propriedades mecânicas (GIRDTHEP, et. al., 2018; OTONI, et al., 2018). A busca para se obter materiais compósitos com boas propriedades e propriedades que atendam os requisitos desejados dependerá do tipo de material escolhido para sua produção (ZEHETMEYER, 2016). Portanto, uma alternativa para substituição de alguns polímeros convencionais é produzir compósitos a partir de polímeros biodegradáveis reforçados com fibras naturais (FALCÃO et. al., 2017; SIMONASSI, 2017).

Dentre tantos tipos de polímeros existentes, há a classe de polímero biodegradável comercial, proveniente de fonte petrolífera e obtido a partir de reações de polimerização, que são sensíveis à degradação por mecanismo de fotodegradação, hidrólise, oxidação térmica, entre outros, e que irão gerar danos irreversíveis no material. O processo de degradação pode ser ativado também por uma síntese enzimática ocasionada por microorganismos como fungos, bactérias e algas, os quais usam o material como alimento transformando-o em dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), água (H<sub>2</sub>O), energia e até mesmo em resíduos de biomassa (TOUCHALEAUME et al., 2016).

No final da década de 90, a empresa alemã BASF S.A lançou o material comercial Ecoflex, que é um polímero denominado poli(adipato-co-tereftalato de butileno) (PBAT) (BASF, 2018).

O PBAT é considerado o primeiro plástico de fonte fóssil 100% biodegradável, obtido a partir da reação de policondensação do ácido adípico, 1,4-butanodiol e ácido tereftálico (MOUSTAFA et al., 2017). Foi desenvolvido com a intenção de combinar as propriedades de biodegradação, mecânicas, térmicas, com as de processabilidade, despertando interesse das áreas acadêmicas e industriais (alimentícias, automotivas, médicas, entre outras) (TOUCHALEAUME et al., 2016; MOUSTAFA et al., 2017; REN et. al., 2017).

Para compor a outra fase (dispersa) do compósito, conhecida também como reforço ou carga, há uma infinidade de materiais, que são divididos em naturais e sintéticos (PAPPU et. al., 2015; SIMONASSI, 2017). As fibras naturais vegetais como juta, rami, coco, sisal, entre outras têm sido bastante utilizadas, pois possuem propriedades como baixo custo, biodegradabilidade, provém de fonte renovável e ainda possibilita vantagens para sociedade que faz o seu cultivo, agregando aumento na economia local (LORANDI et. al., 2016). O uso de fibras vegetais pode possibilitar aumentos nas propriedades mecânicas dos compósitos, além da vantagem de não causar impactos ambientais significativos quando comparadas às fibras sintéticas (SIMONASSI, 2017; LORANDI et. al., 2016).

Em meio a variedades de fibras vegetais, a fibra de juta tem sido destaque em pesquisas acadêmicas, pois tem se mostrado um ótimo reforço para matrizes poliméricas, os quais podem ser aplicados em diversas áreas, contribuindo para redução de peso de peças automotivas, por exemplo, assim também como posterior descarte ou reciclabilidade (LORANDI et. al., 2016; ROY et. al., 2018). As plantas de juta são consideradas de fibras longas (3 a 4 metros) e, geralmente, são cultivadas em áreas de inundação ou em regiões ribeirinhas por cerca de quatro meses, não ocasionando desmatamento (HOSOKAWA, 2017; ROY et. al., 2018). No Brasil, o estado do Amazonas é o maior produtor de fibras de juta, com mais de sete mil produtores diretos (FAO, 2018).

Assim, o desafio em pesquisar materiais que apresentem boas propriedades mecânicas e que atendam a necessidade de contribuir com meio ambiente é de grande interesse acadêmico e tecnológico.

Dentro deste contexto, o presente trabalho envolveu o desenvolvimento de compósito polimérico com utilização de um polímero biodegradável comercial, o PBAT, juntamente com tecidos de fibras de juta, escolhidos por suas propriedades mecânicas e características de biodegradabilidade, com o intuito de contribuir no futuro com a fabricação de produtos que não cause problemas ambientais e, consequentemente, à sociedade.



## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivos Gerais**

O presente trabalho tem como finalidade desenvolver compósitos reforçados utilizando três tipos de tecido de fibras de juta em matriz polimérica biodegradável de poli(adipato-co-teraftalato de butileno) (PBAT), e comparar propriedades mecânicas e térmicas com o PBAT sem reforço.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Estabelecer condições adequadas de moldagens do PBAT e dos compósitos pelo método de compressão a quente;
- Realizar análises qualitativas como a espectroscopia na região do Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) e difratograma de Raios-X (DRX) para avaliar regiões cristalinas presentes no PBAT;
- Realizar análises térmicas por termogravimetria (TG), análises térmicas dinâmico-mecânicas (DMTA) e ensaios mecânicos (tração e impacto) com intuito de comparar as diferenças nas propriedades quando as fibras são introduzidas na matriz polimérica;
- Verificar através de análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) a interação fibras/matriz.

### **3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

#### **3.1 Polímeros**

##### **3.1.1 Definição**

O termo polímero vem do grego que se refere a “muitas partes”, são macromoléculas formadas por monômeros que se repetem ao longo da cadeia polimérica (VIEIRA, 2016; CALLISTER JR. e RETHWISCH, 2014). Os monômeros são os protagonistas na formação dos polímeros, são eles que estabelecem ligações entre si que decorrem das interações entre segmentos de uma mesma macromolécula (interação intramolecular) ou com outras (interação intermolecular) e, a partir de condições específicas de pressão e temperatura, com o auxílio de um catalisador, dão origem aos meros ou, partes integrantes de uma grande cadeia de polímeros (CALLISTER JR. e RETHWISCH, 2014).

A obtenção do polímero acontece a partir de reação química por adição ou por condensação do monômero, o qual representa o composto químico que irá reagir para formar o polímero; já o termo “mero” significa a unidade de repetição na cadeia polimérica (VIEIRA, 2016). Os polímeros podem ser encontrados facilmente na natureza como, por exemplo, celulose e proteínas ou podem ser obtidos sinteticamente, como os polímeros de poliamida (nylon), poliestireno, entre muitos outros (TOUCHALEAUME, et. al., 2016).

Para que ocorra a formação da cadeia polimérica é indispensável que ocorra a ligação química dos monômeros entre si, por ligações covalentes. Posteriormente, a reação química de um monômero reativo desencadeia a junção com os outros envolvidos no meio permitindo a formação do polímero, e tal processo é denominado polimerização (CALLISTER JR. e RETHWISCH, 2014; SUO, et al., 2018).

O grau de polimerização de uma cadeia polimérica vai depender do número de meros que ela apresenta, como no caso de cadeias que possuem apenas um tipo de mero e são conhecidas como homopolímeros (PIVA, 2014; SUO, et al., 2018).

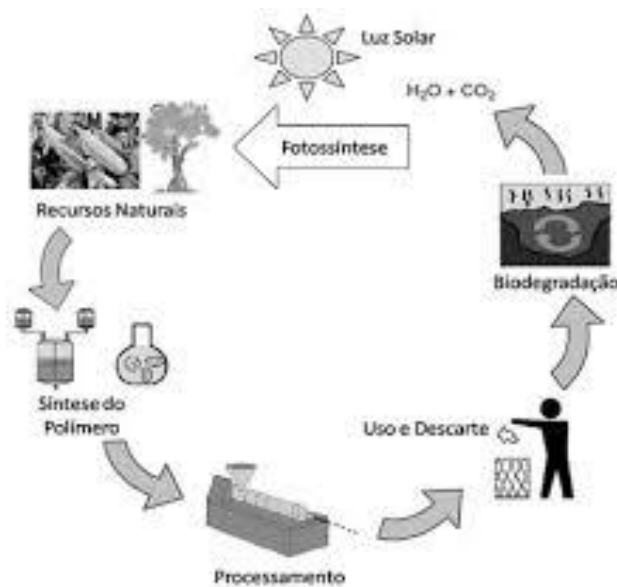
##### **3.1.2 Polímeros Biodegradáveis**

Nas últimas décadas as pesquisas na área de materiais poliméricos vêm crescendo e resultando no desenvolvimento de materiais versáteis que possuam adequadas propriedades mecânicas, determinada durabilidade conforme a aplicação, reciclabilidade, biodegradabilidade e/ou que não causem grandes impactos ambientais (ZEHETMEYER, 2016).

Os polímeros biodegradáveis comerciais são originados de fontes petrolíferas, os mais conhecidos são as policaprolactonas (PCL), as poliésteramidas, os copoliésteres aromáticos e os copoliésteres alifáticos (AVÉROUS & POLLET, 2012; GUO et. al., 2015).

A utilização desse tipo de polímero tem conquistado espaço nas pesquisas e indústrias, pois possui propriedades como resistência mecânica quando submetido a ensaios de tração, por exemplo, além de estabilidade térmica, boa processabilidade e biodegradabilidade (ZEHETMEYER, 2016).

Alguns polímeros comerciais são classificados como biodegradáveis por sofrerem degradação quando atacados por algum tipo de microorganismo (WEI, D. et. al., 2016; SEVERINO et. al, 2011). A biodegradação desses materiais poliméricos pode ocorrer através da ação enzimática, quando seus resíduos são usados como nutriente para um determinado conjunto de microorganismos, os quais podem ser bactérias, algas e fungos (WITT. U. et. al., 2016). O processo de biodegradação ocorre quando esses microorganismos são capazes de romper algumas ligações químicas da cadeia principal do material, sendo necessárias ainda condições favoráveis de temperatura, pH e umidade (WITT. U. et. al., 2016; ZEHETMEYER, 2016). A Figura 1 apresenta a ilustração de um ciclo de vida fechado a partir da compostagem desses materiais biodegradáveis.

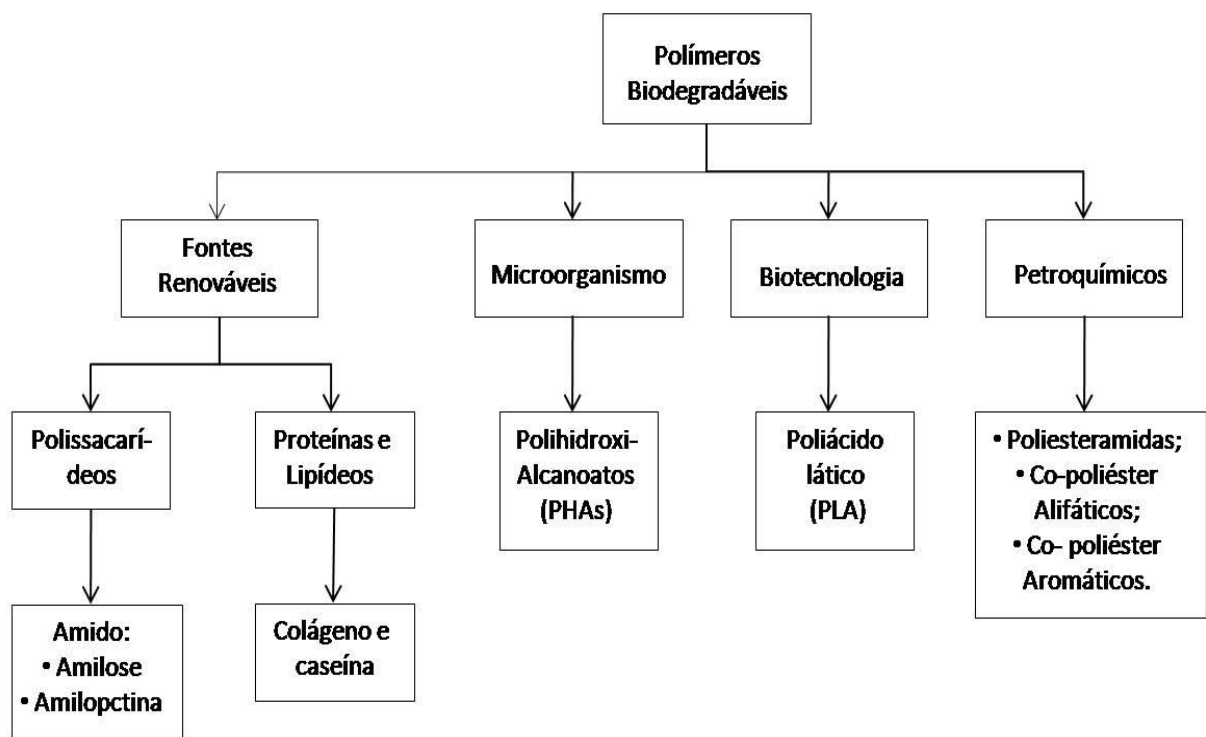


**Figura 1:** Ciclo de vida ideal dos polímeros biodegradáveis provenientes de fontes petrolíferas.

**Fonte:** BRITO, 2011; MOHANTY, 2005.

O conceito de polímeros biodegradáveis está relacionado ao sentido de que esses materiais possuem um tempo bem menor de degradação quando comparados aos polímeros

“não biodegradáveis” (ZEHETMEYER, 2016; DING, 2018). Na Figura 2 estão apresentados os tipos de fontes das quais os polímeros biodegradáveis podem ser gerados e exemplos de polímeros dos quais são obtidos. Alguns polímeros podem ser decompostos por microorganismos em alguns meses, diferentemente dos polímeros convencionais que levam centenas de anos para serem degradados (ZEHETMEYER, 2016). Um dos principais fatores da pesquisa em relação aos polímeros biodegradáveis é poder sugerir um descarte final com opções de reciclagem, reutilização e até mesmo compostagem em ambientes que favorecem o seu processo de biodegradação (DING, 2018).



**Figura 2:** Fluxograma de classificação de polímeros biodegradáveis a partir de fontes distintas.

**Fonte:** Adaptado de AVÉROUS & POLLET, 2012.

### 3.1.3 Poli (adipato-co-tereftalato de butileno) PBAT

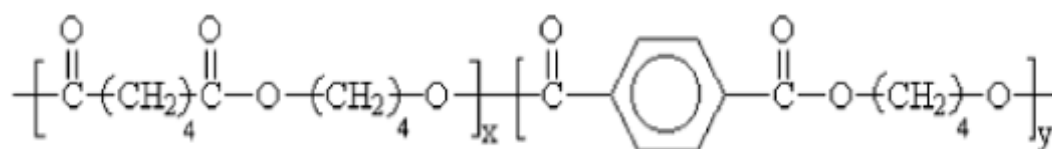
O poli (adipato-co-tereftalato de butileno) (PBAT) é um copoliéster que combina em sua cadeia linear partes alifáticas e aromáticas (Figura 3). Possui nome comercial de Ecoflex, o qual é produzido pela empresa alemã BASF (BASF, 2018; GIRDTHEP, 2018).

O PBAT provém da composição química de monômeros sintéticos derivados do petróleo, onde a sintetização ocorre a partir da reação do 1,4-butanodiol, ácido adípico e ácido tereftálico (SILVA, 2016). Sua propriedade de ser flexível e biodegradável está ligada ao

grupo adipato de butileno (BA) que ocupa 57% da sua composição, e sua estabilidade térmica e propriedades mecânicas provêm do grupo teraftalato de butileno (BT), presente no restante da estrutura (TAVARES, 2018; SILVA, 2016).

Este polímero possui características similares ao polietileno de baixa densidade (PEBD), com boas propriedades mecânicas e térmicas (TAVARES, 2018; GIRDTHEP, 2018). É um polímero com baixa permeabilidade ao vapor de água, e que apresenta elevado alongamento na ruptura (em alguns casos resulta em valores acima de 600%) e, ainda, apresenta baixas temperaturas de processamento, entre 110-150°C (MUTHURAJ, 2015; ZEHETMEYER, 2016). Por possuir características semelhantes a alguns termoplásticos convencionais, seu processamento se torna mais fácil, uma vez que não é necessário investimento em equipamentos com novas tecnologias (NOFAR, 2017; SUO, et al., 2018).

Em relação à cristalinidade, o PBAT possui a característica de polímero semicristalino, onde a unidade butileno teraftalato (BT – unidade aromática) é responsável pela parte cristalina e a unidade butileno adipato (BA – unidade alifática) é relacionada à parte amorfa. A Tabela 1 apresenta as principais características do PBAT (SILVA, 2016; ZEHETMEYER, 2016; BASF, 2018).



**Figura 3:** Representação da unidade estrutural do mero do polímero PBAT.

**Fonte:** FUKUSHIMA et. al., 2012.

**Tabela 1:** Propriedades gerais do PBAT e do PBAT comercial Ecoflex (BASF).

Propriedade	Unidade	Valores	Método/Norma
Massa Molar (SILVA, 2016)	g/mol	118.000	CET
Densidade	g/cm <sup>3</sup>	1,25 – 1,27	ISO 1183
Índice de Fluidez (190°C – 2016 kg)	g/10min	2,7 – 4,9	ISO 1183
Temperatura de Fusão	°C	110 – 120	DSC
Vicat VST A/50	°C	90	ISO 306
Permeabilidade à O <sub>2</sub>	cm <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> .d.Bar)	1400	DIN 53380
Permeabilidade ao Vapor d'água	g/ (m <sup>2</sup> .d)	170	DIN 53380

**Fonte:** BASF, 2018.

O copoliéster PBAT é um polímero biodegradável, pois apresenta processo de degradação acelerado quando em contato com enzimas encontradas no meio ambiente, o que pode gerar em seu processo final: água, dióxido de carbono e biomassa (WANG et. al., 2016; ZEHETMEYER, 2016). Está totalmente livre de metais pesados e não apresenta toxicidade, sendo autorizado pela Food and Drug Administration (FDA) para aplicações em embalagens alimentícias (REN, et al. 2017; MUROI, et. al., 2017).

O PBAT possui ainda certificações européias (European Standard DIN EM 13432) e norte-americanas (ASTM D-6400), além da norma japonesa GreenPLA Standard, que comprovam sua biodegradabilidade e compostabilidade (ZEHETMEYER, 2016; MUROI, et. al., 2017).

O PBAT pode ser usado em blendas com outros tipos de polímeros comerciais ou até mesmo de origem natural como o amido. Também, pode ser utilizado na obtenção de compósitos com fibras naturais, pois apresenta alto grau de compatibilidade, além de ser reciclável e biodegradável, apresentando assim um produto final com características para diversos tipos de aplicação (WANG et. al., 2016; ZEHETMEYER, 2016). Adicionalmente, o PBAT pode ser transparente ou translúcido (dependendo da espessura do filme) e apresenta estabilidade térmica por volta de 230°C (BASF, 2016).

### **3.2 Materiais Compósitos**

A história de materiais compósitos começou nos primórdios da humanidade, quando as pessoas buscavam melhorar suas condições de sobrevivência. Assim, um dos fatos ocorridos foi quando misturaram barro com palha para construir blocos de adobe, sendo esse talvez o primeiro material compósito produzido (IDOWU et. al., 2018; PETRECHEN, 2017). Desde então o crescimento da evolução humana passou a ser associado com desenvolvimento de materiais que atendessem níveis de exigências cada vez mais complexas. Técnicas e aperfeiçoamento com a produção de novos materiais ajudaram a consolidar e melhorar condições de vida, proporcionando as primeiras formas de civilização (IDOWU et. al., 2018).

Com a crescente exigência humana na busca de novas tecnologias, tornou-se importante o estudo para desenvolver materiais com propriedades incomuns e que não são obtidas unicamente por um material convencional sozinho; esse fator tornou-se necessário para aplicações de transporte, aeronáutica e subaquática (CHAPPLE & ANANDJIWALA, 2010 PETRECHEN, 2017). A partir disso, os materiais compósitos vêm sendo

constantemente estudados para se tornarem materiais de engenharia com combinações e propriedades adequadas para determinadas finalidades (CHAPPLE & ANANDJIWALA, 2010).

O termo compósito descreve um material que combina dois ou mais tipos de componentes com propriedades físicas e químicas distintas entre si, com o objetivo de desenvolver um material com propriedades superiores comparadas às de um dos componentes atuando isoladamente, além de poder ter fins específicos de aplicação (SHANKAR e RHIM, 2016; MILEO, 2015). Esses materiais são constituídos por pelo menos duas fases, que são originados da mistura dos dois componentes distintos, as fases são conhecidas como contínua e dispersa (SHANKAR e RHIM, 2016). A fase contínua é denominada matriz e atua como base para sustentar o reforço que será inserido; já a fase dispersa é denominada carga ou reforço do compósito, sendo responsável por proporcionar melhoras nas propriedades do material, principalmente, propriedades mecânicas (PEREIRA, 2017).

A região interfacial entre essas duas fases tem um papel fundamental no desempenho final do compósito, pois a partir dessa interface que ocorrerá a transferência de esforços da matriz para o reforço (PEREIRA, 2017). Os fatores que influenciam para se obter um compósito com boas propriedades dependem de como os componentes utilizados reagirão ou interagirão na região interfacial, nas proporções utilizadas de cada componente e na morfologia do sistema (YU et. al. 2017; LIMA, 2009).

### **3.2.1 Compósito Polimérico Reforçado com Fibras Naturais**

Nos últimos anos o desenvolvimento de materiais poliméricos com fibras naturais obteve crescimento acelerado devido às possibilidades de aplicações em diversos setores industriais como automobilístico, civil, embalagens, etc (MILÉO, 2015; YU et. al. 2017; PEREIRA, 2017). Do ponto de vista ambiental, as fibras naturais apresentam características interessantes, pois são renováveis, podem ser incineradas e geram menor impacto ambiental quando comparadas com fibras sintéticas. Outro fator relevante é o fato de que este tipo de reforço natural reduz consideravelmente o peso final do componente, além de poder ser feito o reaproveitamento do material após o ciclo de vida do produto (YU et. al., 2017; PEREIRA, 2017).

As fibras naturais quando comparadas com as fibras sintéticas não se sobressaem somente por questões ambientais, mas também por apresentarem uma combinação de características físicas e químicas, e possuírem baixo custo comparado com fibras sintéticas,

por exemplo, (KALIA, 2011). Adicionalmente, também envolvem questões socioeconômicas, pois as fibras naturais são produzidas em diversos países em desenvolvimento e subdesenvolvidos, gerando aumento na economia local (YU et. al., 2017).

A matriz polimérica em um compósito pode ser termoplástica ou termorrígida, onde a principal diferença entre elas é o comportamento térmico (PEREIRA, 2017). O polímero termoplástico se caracteriza por ser capaz de ser moldado várias vezes, pois funde sob ação do aumento da temperatura, e com a diminuição da temperatura volta a se solidificar (PEREIRA, 2017; SUO, et al., 2018). Quanto aos polímeros termorrígidos, esse comportamento não existe, pois eles não apresentam temperatura de fusão, atingindo a temperatura de degradação com o aumento progressivo da temperatura (CALLISTER JR. e RETHWISCH, 2014). Esse é o fator principal que caracteriza o termorrígido, e tal processo ocorre devido à presença de ligações denominadas cruzadas ou entrecruzadas (*crosslinking*) (CALLISTER JR. e RETHWISCH, 2014; PEREIRA, 2017).

Alguns desafios ainda estão sendo enfrentados ao trabalhar com as fibras naturais, um dos motivos é a característica das fibras naturais possuírem baixa estabilidade térmica comparadas com as fibras sintéticas, decorrente dos vários estágios de degradação causados por seus componentes como água, hemicelulose, celulose e lignina (FORTINI & MAZZANTI, 2018). Esse fator também gera comumente a utilização de termoplásticos para a produção de compósitos com fibras naturais, pois a maioria dos termoplásticos tem a característica de amolecerem e/ou fundirem em temperaturas abaixo de 200°C (FORTINI & MAZZANTI, 2018). Além disso, vários trabalhos têm utilizado matriz polimérica pós-consumo (polímeros reciclados), no intuito de agregar a questão da reciclagem e reuso desses materiais. Por exemplo, HOSOKAWA (2017) que estudou a avaliação de propriedades do copolímero ABS reciclado reforçado com fibras de juta, e MORENO et. al., (2018) que analisou o comportamento do compósito de polietileno de baixa densidade reciclado com resíduo de madeira de pinho.

### **3.3 Fibras Naturais**

Há alguns anos é de extremo interesse nas pesquisas científicas e também nas indústrias como têxtil, automobilística, civil e etc, o uso de matérias-primas que se originam de fontes renováveis para substituição de produtos sintéticos (MARINELLI, A. L. et al, 2008). Há uma variedade enorme de fibras naturais encontradas na natureza como: juta,

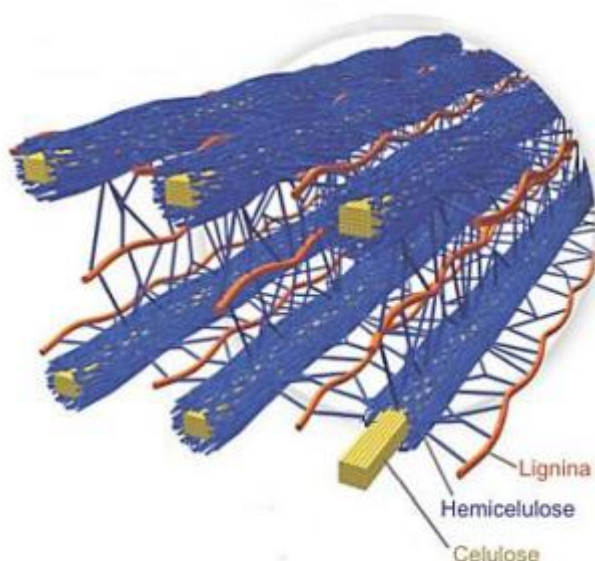


abacaxi, sisal rami, coco, curauá, entre outras; e o uso dessa fonte renovável como reforço para compósitos poliméricos vem crescendo muito nos últimos anos (MOTHÉ, 2016; CHIENG, et al. 2017). Tal crescimento está associado ao fato de que as fibras naturais apresentam baixo custo, são biodegradáveis, são atóxicas e podem ser incineradas (PETRECHEN, 2017).

As fibras naturais se dividem em três grupos: vegetal, animal e mineral (MARINELLI, A. L. et. AL; MOTHÉ, 2016). As fibras vegetais podem ser classificadas conforme a sua origem, onde possuem estruturas de comprimento alongado, secção transversal vazada e arredondada e podem estar distribuídas por todo o vegetal. São classificadas conforme sua origem anatômica (adaptado de CÉLINO et. al., 2014; PETRECHEN, 2017):

- Fibras de talo: fica situado no floema que fica na entrecasca do talo (rami, piaçava, linho, algodão e juta);
- Fibras de folha: retiradas a partir das folhas dos vegetais (abacaxi, sisal, palma, curauá, e banana);
- Fibras de lenho: extraídas do lenho (bagaço de cana-de-açúcar e bambu);
- Fibras de superfície: são as que formam uma camada protetora de caules, folhas, frutos e semente de plantas (fibra de coco, algodão e açaí).

As fibras naturais que também são conhecidas como fibras lignocelulósicas, possuem composição química resumida basicamente em três elementos: celulose, hemicelulose e lignina. A proporção desses componentes varia de acordo com o tipo de fibra vegetal. Existe outra porcentagem bem pequena da composição química dessas fibras, que estão relacionadas às cinzas, quantidade de água, hidrocarbonetos cíclicos e extrativos (CÉLINO et al., 2014). Podemos fazer uma analogia das fibras lignocelulósicas com materiais compósitos: a fase contínua é representada pela matriz amorfa de hemicelulose-lignina e a fase dispersa representam as microfibrilas de celulose atuando como reforço (CÉLINO et al., 2014; RAFSANJANI et al., 2014; WAN et al., 2010). A Figura 4 apresenta o esquema da estrutura das fibras lignocelulósicas.



**Figura 4:** Representação dos elementos das fibras lignocelulósicas.  
**Fonte:** Adaptado de SANTOS et. al., 2012.

A partir da Figura 4 é possível observar que cada componente possui um papel fundamental para a estrutura da planta, deste modo é importante entender como cada um desses elementos atua na estrutura da fibra.

- **Celulose**

A principal estrutura química que constitui uma fibra vegetal é a celulose, que é considerada um polímero linear composto por unidades de D-glicose, unidas por ligações  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 4)-glicosídicas, onde a unidade repetitiva é denominada de celobiose (CÉLINO et al., 2014; SILVA, 2014; SANTOS, 2015).

Classificada como um polissacarídeo, a celulose é constituída por aproximadamente 1500 unidades de glicose que estão em configuração alternada por toda sua cadeia polimérica, permitindo que sejam paralelamente organizadas, formando alinhadamente as microfibrilas (GIBSON, 2012; GONZALES, 2013). A formação das ligações de hidrogênio inter e intramoleculares ocorrem porque existem grupos hidroxilas livres na cadeia de celulose, proporcionando a região cristalina contida na estrutura da celulose, e fornecendo boas propriedades mecânicas para as fibras naturais (CÉLINO et al., 2014; SANTOS, 2015). No entanto, a celulose é considerada um polímero semicristalino, que está intercalado por uma região altamente cristalina responsável pela estabilidade química, e por regiões amorfas que

são características dos polissacarídeos não celulósicos (CÉLINO et al., 2014; OCHOA-VILLARREAL et al., 2012; GIBSON, 2012).

- **Hemicelulose**

Definida como um polissacarídeo não celulósico, a hemicelulose contém diversas moléculas complexas e amorfas, que variam conforme o tipo ou espécie do vegetal. Assim, a hemicelulose é composta principalmente por unidades de  $\beta$ -D-xilose,  $\beta$ -D-manose,  $\beta$ -D-glicose,  $\alpha$ -L-arabinose,  $\alpha$ -D-galactose, ácido  $\beta$ -D-glicurônico ou ácido  $\alpha$ -D-4, O-metilglicurônico.

Essas unidades estão localizadas na parede celular da fibra, onde se mantêm intercaladas entre os limites de região amorfa da celulose, e associadas com a lignina. São facilmente hidrolisadas em ácidos e solúveis em soluções alcalinas. (BELGACEM e GANDINI, 2008; SCHELLER e ULVSKOV, 2010; SANTOS, 2015; BEVITORI, 2010).

- **Lignina**

A lignina é considerada um dos principais componentes das fibras lignocelulósicas, e apresenta uma estrutura macromolecular complexa composta por um sistema aromático. Possui característica totalmente amorfa, estrutura altamente reticulada (tridimensional em rede) com alta massa molar (WATKINS et al., 2015; LAURICHESSE e AVÉROUS, 2014).

A lignina é originada a partir da reação de polimerização nos vegetais, ocasionada por três tipos de alcoóis aromáticos: álcool p-cumarílico, álcool coniferílico, álcool sinapílico, que são unidades ligadas por ligações do tipo éter e carbono-carbono (WATKINS et al., 2015; LAURICHESSE e AVÉROUS, 2014; KUBO e KADLA, 2005).

Atualmente existe o interesse em se utilizar uma grande variedade de fibras vegetais, as quais possuem diferentes propriedades físicas, químicas e mecânicas (FORTINI & MAZZANTI, 2018). Mesmo possuindo algumas desvantagens, as fibras vegetais têm sido alvo de pesquisas acadêmicas e da indústria, pois sua introdução em compósitos tende a reduzir consideravelmente o peso do produto final, além de contar com as vantagens de pós-consumo, como a biodegradação (LORANDI et. al., 2016; ROY et. al., 2018). A Tabela 2 apresenta principais diferenças como propriedades mecânicas, por exemplo, de alguns tipos

de fibras vegetais e sintéticas, para melhor compreensão de escolha ou substituição de uma fibra sintética para a produção de um determinado material.

**Tabela 2:** Valores das propriedades de algumas fibras vegetais e sintéticas.

Propriedades	Fibras Vegetais			Fibras Sintéticas		
	Sisal	Coco	Juta	Vidro-E*	Aramida (“Kevlar”)	Carbono
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,3-1,5	1,2	1,3-1,5	2,5	1,4	1,4
Alongamento (%)	2,0-2,5	30,0	1,5-1,8	2,5	3,3-3,7	1,4-1,8
Resistência à Tração (MPa)	511-635	175,0	393-773	2000-3500	3000-3150	4000
Módulo de Young (MPa)	9,4-22	4,0-6,0	26,6	70,0	63-67	230-2400

\* Fibra de vidro de baixo custo e mais utilizada na indústria eletroeletrônica.

**Fonte:** BLEDZKI & GASSAN, 1999; MARINELLI et al., 2008; PICKERING et al., 2016.

### 3.3.1 Juta

A juta é originária da Índia, provém da família das tiliáceas e possui nome científico de “*Corchorus Capsularis*” (FAO, 2016; ROSA, 2009). É cultivada em climas úmidos e tropicais em áreas de inundação ou nas margens de grandes rios, podem crescer de 3 a 4 metros de altura com talos de aproximadamente de 20 milímetros (LIMA, 2009; CASTANHAL, 2018). Trata-se de uma fibra vegetal muito resistente com propriedades elevadas de módulo e resistência específica, sendo umas das fibras naturais de menor custo, e cultivada em vários países (FAO, 2016).

O ciclo de plantio da fibra de juta leva aproximadamente quatro meses, pois seu período de crescimento coincide com os períodos de cheia e vazante dos rios, possuindo ainda a vantagem de não provocar desmatamento de terrenos no meio da floresta, pois são plantações de regiões ribeiras ou alagadas (FAO, 2016; SANTOS, 2015). O seu processo de comercialização começa com corte da fibra rente ao solo, onde posteriormente as folhas são removidas e as hastas são aglomeradas para imersão na própria água do rio para iniciar o processo de maceração. Esse processo permite que ocorra facilmente a extração da casca, posteriormente as fibras obtidas são estendidas para que ocorra a secagem, e todo o processo pode durar de 5 a 30 dias para ser concluído (SANTOS, 2015). Na Figura 5 está apresentada

resumidamente a sequência do processo do cultivo e obtenção das fibras de juta até chegar ao produto final, no caso, o tecido.

(a)

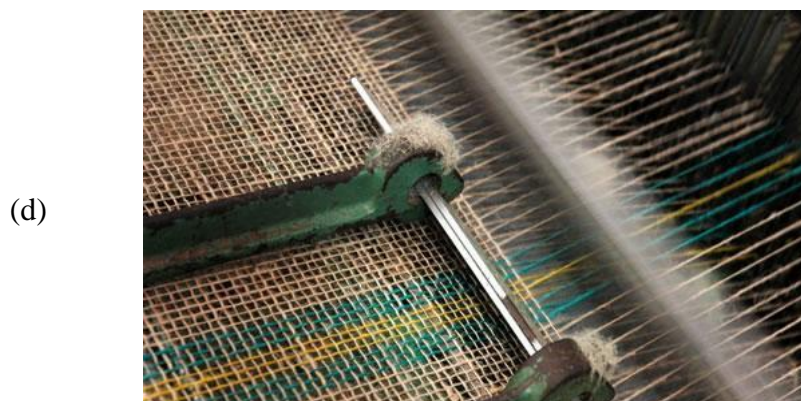


(b)



(c)





**Figura 5:** Etapas de processamento da juta: plantação (a); imersão (b); secagem (c) e fabricação do tecido de fibras de juta (d).

**Fonte:** Disponível em < <http://www.pesquisador.net.br> >.

O plantio da juta no Brasil teve início na década de 30, cultivada na região amazônica pelo japonês Ryota Oyama. Posteriormente, a produção dessa fibra vegetal se tornou uma das principais atividades econômicas da região ribeirinha da Amazônia, contribuindo para o crescimento socioeconômico de famílias que dependiam da agronomia local. Atualmente, Bangladesh e Índia são os principais produtores da planta, responsáveis por 60 a 30% da produção mundial; já no Brasil a Amazônia é a líder nacional na produção da juta, com cerca de 7 mil produtores (FAO, 2016; CASTANHAL, 2018).

As fibras de juta são materiais lignocelulósicos, com boas propriedades mecânicas como tração quando comparadas com fibras de algodão, por exemplo. São muito indicadas para uso como reforço para compósitos com matrizes poliméricas, por serem biodegradáveis, de baixo custo e não abrasivas (HASAN et. al., 2018; DITTENBER & GANGARAO, 2012). As características das fibras vegetais podem variar de acordo com as espécies, condições climáticas, tipo de solo, dentre outros fatores (GUIMARÃES, 2014). Portanto, as composições químicas das fibras vegetais se diferem, principalmente, pelas porcentagens de celulose, hemicelulose, lignina e pequenas porcentagens de outros componentes (GUIMARÃES, 2014). A Tabela 3 apresenta a composição química das fibras de juta e também da fibra de algodão para auxílio em análises posteriores.

**Tabela 3:** Composição química das fibras de juta e algodão

<b>Fibra Vegetal</b>	<b>Celulose</b>	<b>Hemicelulose</b>	<b>Lignina</b>	<b>Umidade</b>	<b>Ceras</b>	<b>Cinzas</b>
	<b>(%)</b>					
Juta	61-73	13-20	12-13	12	0,5	1,2
Algodão	79-87	3-10	4-6	10	0,6	1,2

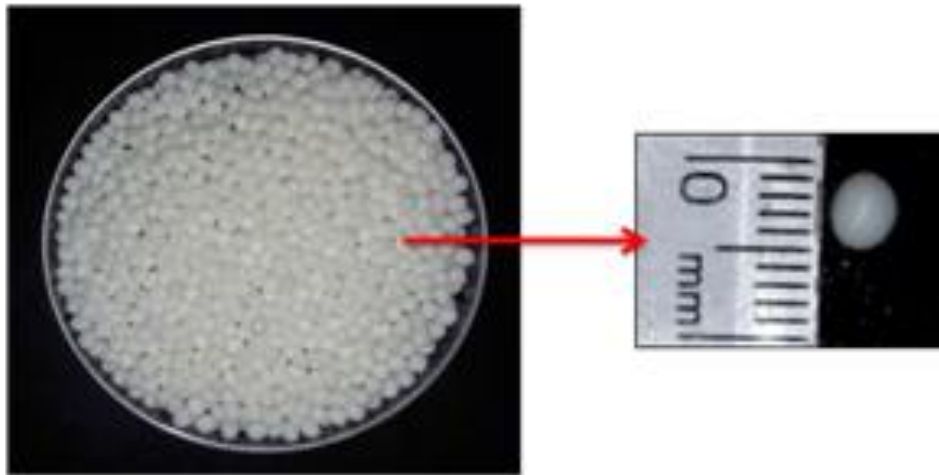
**Fonte:** MANNAN & TALUKDER, 1997; JONH et. al., 2007; SILVA, 2003.

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Materiais

#### 4.1.1 Matriz Polimérica: PBAT

A matriz polimérica utilizada neste trabalho foi o poli(butileno adipato co-tereftalato) (PBAT), fornecido pela empresa BASF, com nome comercial de Ecoflex® F. O material possui densidade em torno de 1.25 a 1.27 g/cm<sup>3</sup>, apresenta cor branca e está disponível na forma de *pellets* (grânulos), com tamanho aproximado de 5 mm (Figura 6).



**Figura 6:** Polímero comercial PBAT (Ecoflex) Basf S.A.

**Fonte:** Autor

#### 4.1.2 Fibra Vegetal: Juta

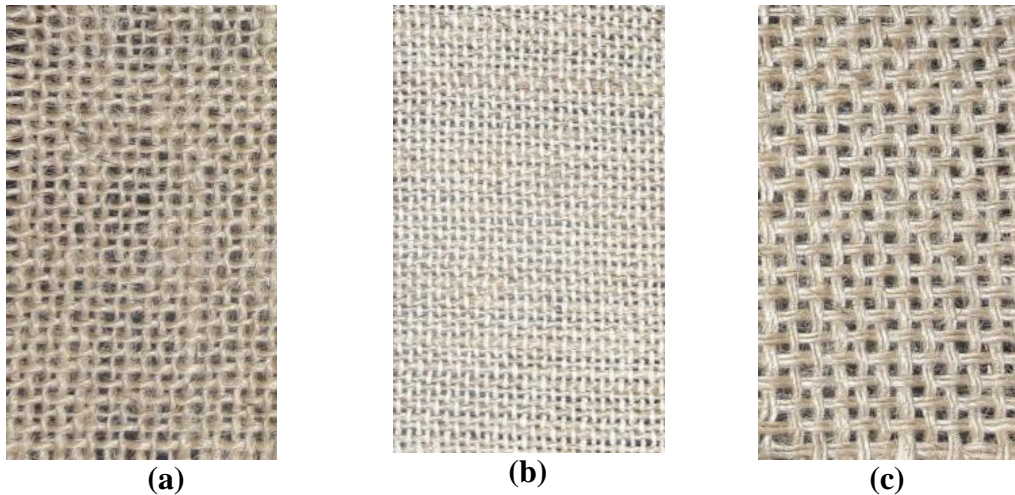
Foram utilizados como reforços três tipos comerciais de tecidos de fibra de juta, onde cada compósito foi moldado com uma camada de cada tecido descrito na Tabela 4. A Figura 7 apresenta, respectivamente, os tipos e gramaturas dos tecidos de fibras de juta utilizados, todos com arranjo de trama lisa (*plain weave*).

**Tabela 4:** Descrição do tipo de tecido de juta e suas respectivas gramaturas.

<b>Amostra (Tecido)</b>	<b>Gramatura (g/m<sup>2</sup>)</b>
Juta F9	382,0
Juta e Algodão I33	361,0
Juta 2x2	438,0

**Fonte:** Autor





**Figura 7:** Tecidos de fibras de Juta: F9 (a), I33 (b) e 2x2 (c).

**Fonte:** Autor

## 4.2 Métodos

### 4.2.1 Preparação para a moldagem

Para a moldagem das placas dos compósitos, os *pellets* de PBAT foram pesados conforme o volume do molde de 110,18 cm<sup>3</sup>, o qual equivale aproximadamente 140g em massa total (fibra e matriz) de material e os tecidos cortados conforme as dimensões do molde (260x130x3 mm).

Após o corte dos tecidos de fibra de juta, os mesmos foram pesados para descontar a quantidade de massa polimérica que foi inserida no molde, conforme descrito na Tabela 5. Tanto a matriz polimérica quanto os tecidos de fibras de juta não receberam qualquer tipo de pré-tratamento, nem mesmo secagem dos tecidos de fibras de juta para remoção da umidade, evitando assim qualquer etapa adicional no processo.

**Tabela 5:** Composição dos compósitos de PBAT com os diferentes tipos de tecidos de fibras de juta

<b>Compósito</b>	<b>Matriz (%)*</b>	<b>Fibra (%)**</b>
PBAT/Juta F9	91,43	8,57
PBAT/Juta e Algodão I33	91,50	8,50
PBAT/Juta 2x2	90,0	10,0

\* % mássica / \*\* fibra úmida

**Fonte:** Autor

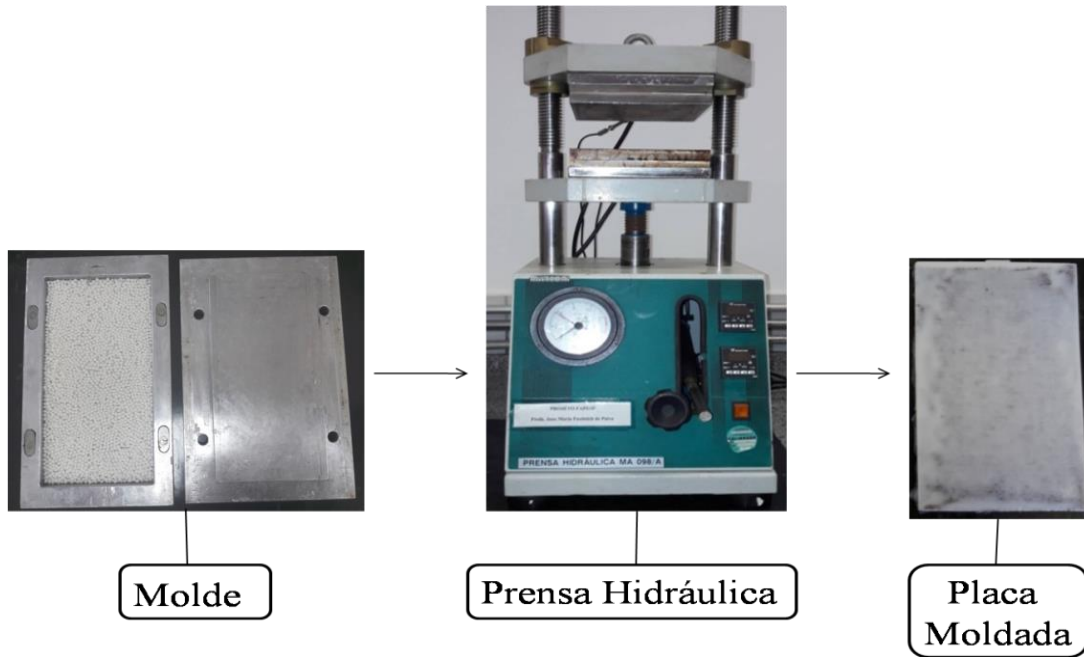
#### 4.2.2 Processo de Moldagem

As moldagens dos materiais foram realizadas em uma prensa hidráulica da marca Marconi, modelo MA 098/A, utilizando o método de compressão a quente. As placas foram moldadas em um molde de liga de alumínio, fechado, com dimensões internas de 260x130x3 mm (Figura 8) para, posteriormente, obter corpos de provas específicos para realização dos ensaios proposto neste trabalho.

Para a utilização adequada do molde, primeiramente, foi feita a limpeza, utilizando acetona para remoção de sujeiras. Depois foram aplicadas duas camadas de desmoldante (marca Polinox) contendo cera carnaúba para evitar que o material aderisse ao molde.

Após a secagem do desmoldante, foi despejado no molde metade da quantidade em massa da matriz polimérica, dispondo os *pellets* da melhor maneira para evitar falha posterior na placa. Em seguida foi colocado em cima da quantidade correspondente a 50% em massa dos *pellets* de PBAT, o respectivo tecido de fibras de juta e, por fim, a outra metade em massa da matriz polimérica. Desta maneira, foram moldados compósitos do tipo sanduíche onde os tecidos de fibras de juta ficaram posicionados no meio das placas moldadas. Anteriormente, foram realizados seis testes de moldagem para encontrar os parâmetros adequados para obtenção dos materiais poliméricos adequadamente fundidos e sem bolhas.

Após a determinação dos parâmetros, iniciou-se o processo de moldagem das placas, onde o molde foi fechado e colocado na prensa para iniciar a moldagem. O processo começou com uma força constante de 5 toneladas (t), em temperatura ambiente, e assim que a prensa atingiu a temperatura de 160°C, o processo foi mantido por 20 minutos. Na realidade, a temperatura de fusão do PBAT está em torno de 120 °C (BASF, 2018), porém, devido à considerável perda de calor do conjunto de moldagem (placa de aquecimento da prensa e molde) para o ambiente foi necessário estabelecer a temperatura de 160°C, regulada no leitor da prensa, para proporcionar a efetiva fusão da matriz polimérica de PBAT. Na sequência, a força de moldagem foi aumentada para 8 t e mantida por 10 minutos, garantindo que o molde fosse completamente fechado. Ao todo, o processo teve duração de 30 minutos, porém foi realizado em duas etapas, com forças de moldagem progressivas, para garantir que os voláteis saíssem, evitando bolhas nas placas moldadas.



**Figura 8:** Processo de Moldagem para obtenção dos corpos de prova.

**Fonte:** Autor

### 4.3 Caracterização

#### 4.3.1 Espectroscopia na Região do Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

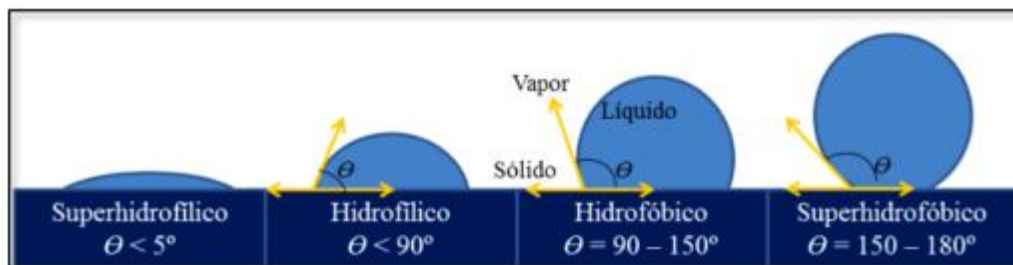
O FTIR é uma poderosa ferramenta capaz de caracterizar e identificar um composto ou investigar a composição de uma amostra por técnicas de absorção, reflexão ou transmitância em determinados comprimentos de onda (SILVA, 2014; MILÉO, 2015).

Para realização da análise de espectroscopia na região do infravermelho foi utilizado o espectrofotômetro modelo Perkin Elmer Spectrum 400 FT-IR Spectrum 400FT Mid-IR, com varredura na faixa de 400 a 4000  $\text{cm}^{-1}$ , equipado com um acessório de reflectância total atenuada (ATR). A análise foi realizada no laboratório de Biomateriais da PUC-SP, campus Sorocaba. Foram analisadas amostras cortadas com serra fita nas dimensões de 63x12,7x3 mm das placas dos polímeros e compósitos moldados.

### 4.3.2 Ângulo de Contato

Essa técnica é utilizada para mostrar a interação na superfície de uma amostra com um determinado líquido, ou seja, a relação que existe entre as forças adesivas entre o líquido e o sólido e as forças coesivas do líquido. A determinação dessa característica é realizada quando a gota de um determinado líquido é depositada na superfície de um sólido, conseqüentemente podem ocorrer dois comportamentos diferentes: a gota pode molhar completamente ou parcialmente o sólido, neste caso teremos a interface sólido-líquido que é conhecida como molhabilidade (WANKE, 2012).

Para a superfície ser hidrofílica o valor do ângulo de contato precisa ser entre 0 e 90°, para ser hidrofóbica entre 90 e 150°, e se o ângulo passar de 150° o material é caracterizado como superhidrofóbico, mas o comportamento também irá depender do tipo de líquido utilizado, polar ou apolar, o qual poderá gerar comportamento diferente na superfície da amostra (NURAJE et. al., 2013; VIEIRA, 2016). A Figura 9 apresenta os tipos de comportamento que o líquido pode ter quando colocado numa superfície sólida (WANKE, 2012; NURAJE et. al., 2013).



**Figura 9:** Tipos de comportamento hidrofílico e hidrofóbico da superfície de materiais.

**Fonte:** NURAJE et. al., 2013; WANKE, 2012.

A análise de ângulo de contato foi realizada para tentar avaliar se houve mudança no comportamento de hidrofilicidade dos compósitos. Porém não foi possível realizar o teste na lateral dos corpos de prova, onde está mais facilmente disposta a região interfacial da matriz polimérica e as fibras, devido a uma dificuldade intrínseca de execução do tipo de técnica.

A análise foi realizada no Laboratório de Física UFSCar, campus Sorocaba, com o goniômetro da marca Ramé Hart, modelo 250 Standart, utilizando água destilada como solvente.

### 4.3.3 Análises de Termogravimetria (TG) e Termogravimetria Derivada (DTG)

A caracterização por termogravimetria é de grande importância para determinar a estabilidade térmica e as temperaturas de degradação dos materiais, para poder definir possíveis aplicações. Essa análise foi utilizada para determinar as propriedades térmicas do polímero PBAT e seus respectivos compósitos com três tipos diferentes de tecidos de fibra de juta.

A análise térmica de termogravimetria (TG) tem por objetivo medir a perda de massa em função do tempo ou temperatura, onde a variação da massa da amostra é detectada por um programa de aquecimento pré-determinado. Os ensaios podem ser conduzidos em atmosfera oxidante ou inerte para evitar que os voláteis retornem e se condensem no interior do equipamento (SILVA, 2014; VIEIRA, 2016).

A análise foi conduzida em um equipamento Shimadzu, modelo TGA-50, com razão de aquecimento de 10°C/min, em atmosfera inerte de nitrogênio, no intervalo de temperatura de 25 até 800°C. A razão de liberação de nitrogênio foi mantida constante em 50 mL/min e foram utilizadas, aproximadamente, 8 miligramas de cada amostra analisada (WENG et. al., 2013). As análises foram realizadas no IQSC (Instituto de Química de São Carlos) da USP/São Carlos.

### 4.3.4 Análise Térmica Dinâmico-Mecânica (DMTA)

Uma das técnicas para caracterização de materiais poliméricos mais utilizadas é a análise térmica dinâmico-mecânica (DMTA). A partir dela é possível detectar processos de relaxação (macroscópico ou molecular), pois possui sensibilidade superior quando comparada com outras técnicas de análises térmicas convencionais como DSC, por exemplo, (CANEVAROLO, 2007; TAVARES et. al., 2018).

A análise permite obter informações provenientes da aplicação dinâmica da tensão em fase com a deformação o qual é denominado módulo de armazenamento ( $E'$ ) de energia (Equação 1). O módulo de dissipação de energia proveniente da componente viscosa do material é denominado módulo de perda ( $E''$ ) (Equação 2) e o amortecimento mecânico ou atrito interno ( $\tan \delta$ ) é a razão entre  $E''$  e  $E'$  (Equação 3) (LORANDI et. al., 2016; TAVARES et. al., 2018). A utilização mais comum da técnica de DMTA é a determinação de temperatura vítrea ( $T_g$ ) dos materiais poliméricos, a qual é encontrada facilmente pelo pico

máximo de *tan delta*, além de correlacionar propriedades como tenacidade, tempo de vida sob fadiga, entre outros (CANEVAROLO, 2007).

A expressão e relação entre as variáveis são representadas pelas seguintes equações (CANEVAROLO, 2007; LORANDI et. al., 2016):

$$E' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cos \delta = E^* \cos \delta \quad (\text{Equação 1})$$

$$E'' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \sen \delta = E^* \sen \delta \quad (\text{Equação 2})$$

$$\tan(\delta) = \frac{E'}{E''} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

$\sigma_0$  é a tensão máxima

$\varepsilon_0$  é a amplitude da deformação resultante

$\delta$  é o ângulo de fase ou defasagem entre essas amplitudes

Para a caracterização termomecânica do polímero PBAT e seus compósitos com tecidos de fibras de juta, as amostras foram cortadas nas dimensões de 63x12,7x3 mm. O ensaio de DMTA ocorreu no equipamento modelo DMA Q800 da marca TA Instruments, no modo flexão, com garra “dual cantiveler”, em frequência de 1Hz e rampa de temperatura de -40°C até 60°C, com uma razão de aquecimento de 5°C/min e amplitude de 10µm.

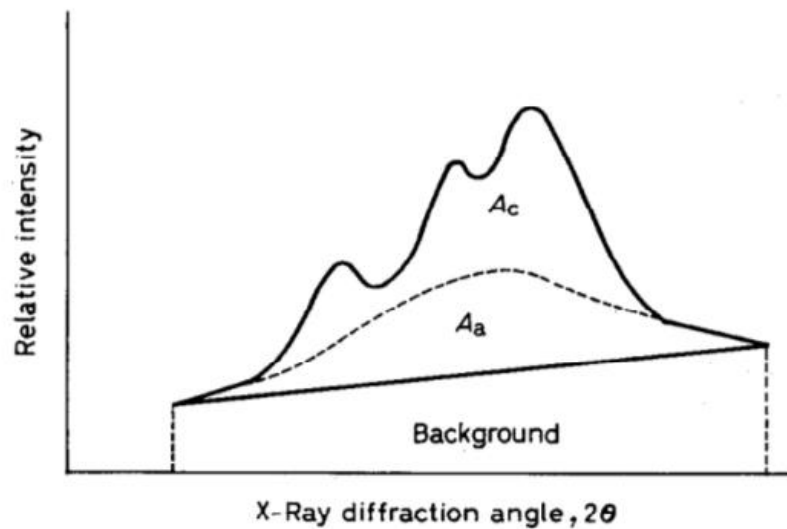
O equipamento de DMTA está instalado no Laboratório de pesquisa de Materiais (FINEP 2), da UFSCar *campus* Sorocaba.

#### 4.3.5 Difração de Raios-X (DR-X)

A técnica por difração de raios-X é uma das principais técnicas de caracterização microestrutural de materiais cristalinos e semicristalinos, onde é possível verificar a identificação do material através das posições angulares e intensidades relativas dos feixes difratados. Essa técnica também pode ser usada para aplicação na determinação do grau de cristalinidade de polímero (os quais são caracterizados como materiais semicristalinos). O difratograma pode ser dividido e ajustado matematicamente em duas partes: uma amorfa e a

outra cristalina. A quantificação destas áreas permite avaliar o grau de cristalinidade de um polímero. (HALASA et. al, 1991; ALMEIDA, 2010; CORTES, 2015).

Foi utilizado o método de separação simples de área, onde o método consiste em separar as intensidades integradas cristalinas e não cristalina em um intervalo de difração medido em  $2\theta$ . A representação da separação de áreas (Figura 10) e a equação para calcular a porcentagem cristalina do material são dadas por (YOUNG & LOVELL, 2011; CAROLINO, 2017):



**Figura 10:** Representação gráfica do método de separação simples de área para cálculo de cristalinidade (YOUNG & LOVELL, 2011; CAROLINO, 2017):

$$\%Cr = 100 * \frac{A_c}{A_c + A_a} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

$Cr$  é o percentual de cristalinidade

$A_c$  é a área cristalina

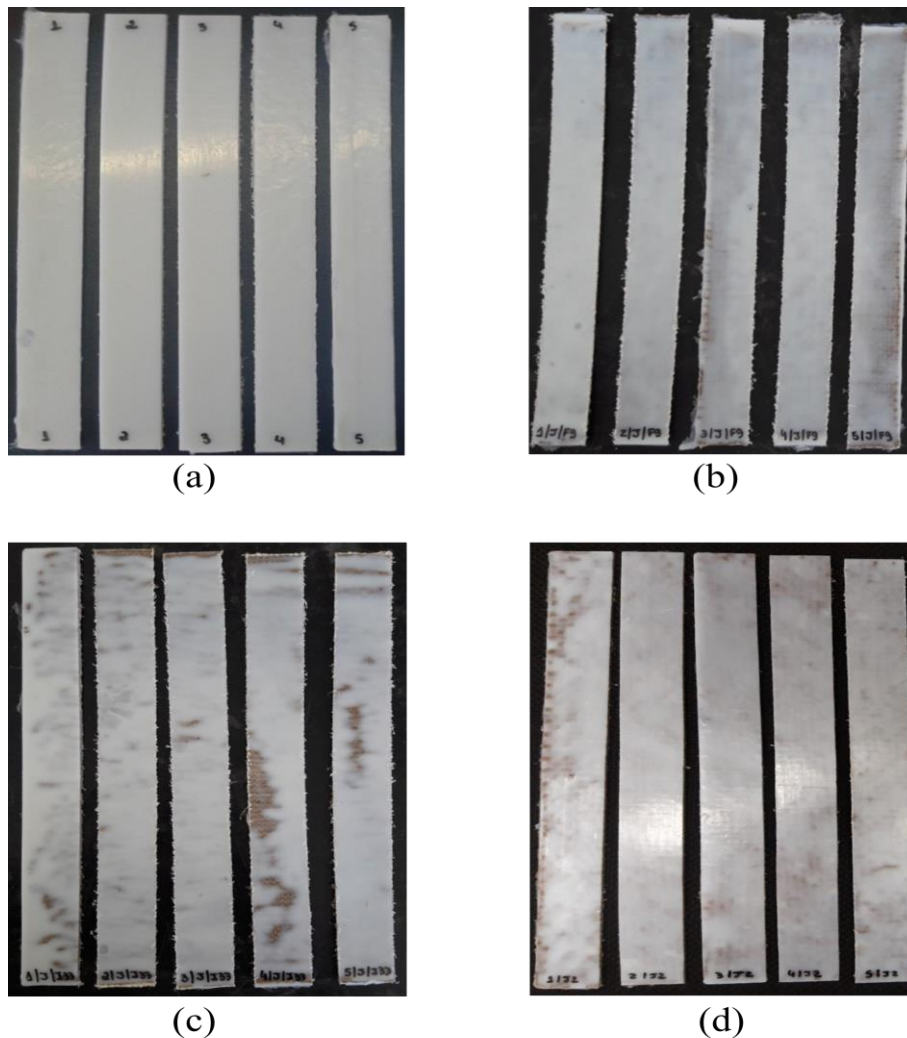
$A_a$  é a área amorfa

A análise de difração de Raios-X foi realizada em um equipamento da marca Shimadzu, modelo XRD 6100, disponível no Laboratório de Física da UFSCar *campus* Sorocaba. Os parâmetros para a análise foram de radiação  $\text{CuK}\alpha$  ( $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$ ) com tensão de 30 kV e corrente de 15 mA, varredura angular de  $0^\circ$  a  $40^\circ$  (ângulo de Bragg -  $2\theta$ ) e passo angular de 0,02 por segundo.

As amostras foram cortadas em pequenos retângulos (2x4 cm), e foram inseridas no interior do equipamento, sem qualquer tipo de suporte, sob aplicação de vácuo, permitindo que ficassem seguras para realização das análises.

#### 4.3.6 Ensaio de Tração

Os ensaios de tração foram conduzidos em uma máquina universal de ensaios mecânicos, localizada no Laboratório LECMat da UFSCar *campus* Sorocaba. O equipamento é da marca EMIC, modelo DL 10000, o ensaio foi realizado em temperatura ambiente e foi conduzido com velocidade de 50 mm/min, célula de carga de 2000 Kgf, em corpos de prova cortados nas dimensões 250x25x3 mm (Figura 11), conforme a norma ASTM D3039.



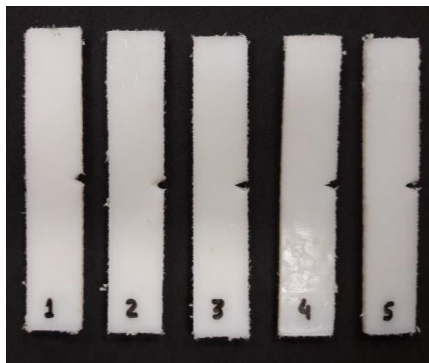
**Figura 11:** Fotografia de alguns corpos de prova cortados para os ensaios de tração: PBAT (a), PBAT/Juta F9 (b), PBAT/Juta e Algodão I33 (c) e PBAT/Juta 2x2 (d).

**Fonte:** Autor

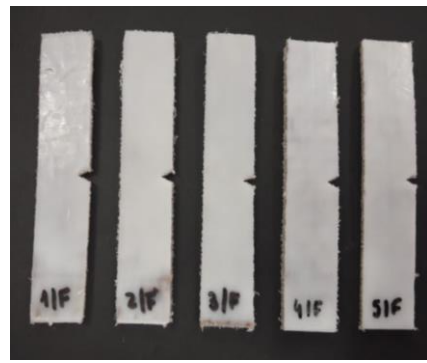


#### 4.3.7 Ensaio de Impacto

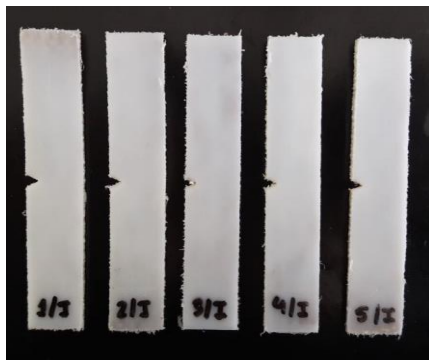
Para a realização dos ensaios de impacto, os moldados foram cortados em 5 corpos de prova, nas dimensões de 63x12,7x3 mm, com entalhe de 2,4 mm (Figura 12), conforme especificação da norma ASTM D256. Os ensaios foram conduzidos em um equipamento de impacto do tipo pêndulo da marca Instron, modelo CEAST 9050 (pertencente à empresa Sintronics), utilizando o método Izod.



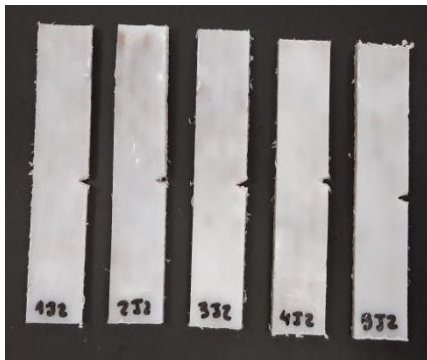
(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura 12:** Fotografias dos corpos de prova com entalhe para os ensaios de impacto do tipo Izod: PBAT (a), PBAT/Juta F9 (b), PBAT/Juta e Algodão I33 (c) e PBAT/Juta 2x2 (d).

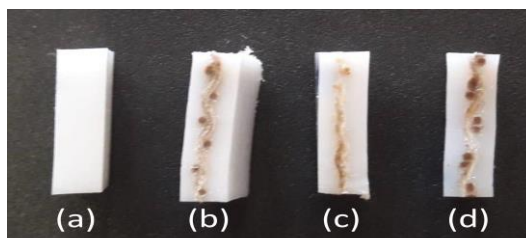
**Fonte:** Autor

#### 4.3.8 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Numa escala micrométrica, a análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) permite caracterizar materiais heterogêneos orgânicos e inorgânicos.

Para realização da análise, as amostras de PBAT e dos compósitos de PBAT (Figura 13) com os diferentes tipos de tecido de juta foram secos a 100°C, por 4 horas em estufa, para remoção de umidade nas amostras. Não foi possível realizar o processo de metalização (recobrimento com ouro) das amostras, e todas foram analisadas na região de um corte transversal proposital, pois não houve rompimento dos compósitos nos ensaios mecânicos.

O equipamento utilizado é da marca HITACHI, modelo TM3000 e foi operado em modo Analy, com elétrons secundários, utilizando aumentos de 50, 80, 500 e 1000x. O equipamento de MEV está instalado no Laboratório de pesquisa de Materiais (FINEP 2) - UFSCar *campus* Sorocaba.



**Figura 13:** Amostras para análise morfológica do: PBAT (a), PBAT/Juta F9 (b), PBAT/Juta e Algodão I33 (c) e PBAT/Juta 2x2 (d).

**Fonte:** Autor

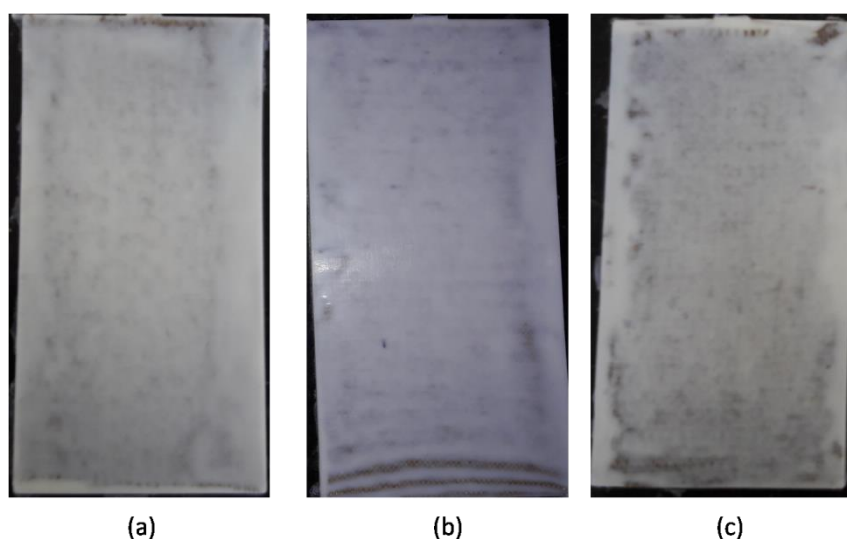
#### 4.3.9 Análise Estatística

Os resultados obtidos nos ensaios mecânicos e na análise de ângulo de contato foram submetidos à análise de variância (ANOVA), com método *Tukey*, utilizando o software Minitab 18. O nível de significância adotado foi de 5%.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Moldagem

Após alguns testes de moldagem, foi possível encontrar parâmetros adequados para a obtenção das placas, onde ocorreu a completa fusão dos pellets e sem defeitos como, por exemplo, bolhas. Nos compósitos houve ótimo recobrimento das fibras, ou seja, na moldagem o polímero PBAT escoou corretamente entre as tramas dos tecidos de fibra de juta possibilitando a obtenção de boas amostras que posteriormente resultou em bons resultados, os quais serão descritos nas próximas seções. A figura 14 apresenta o resultado das moldagens.

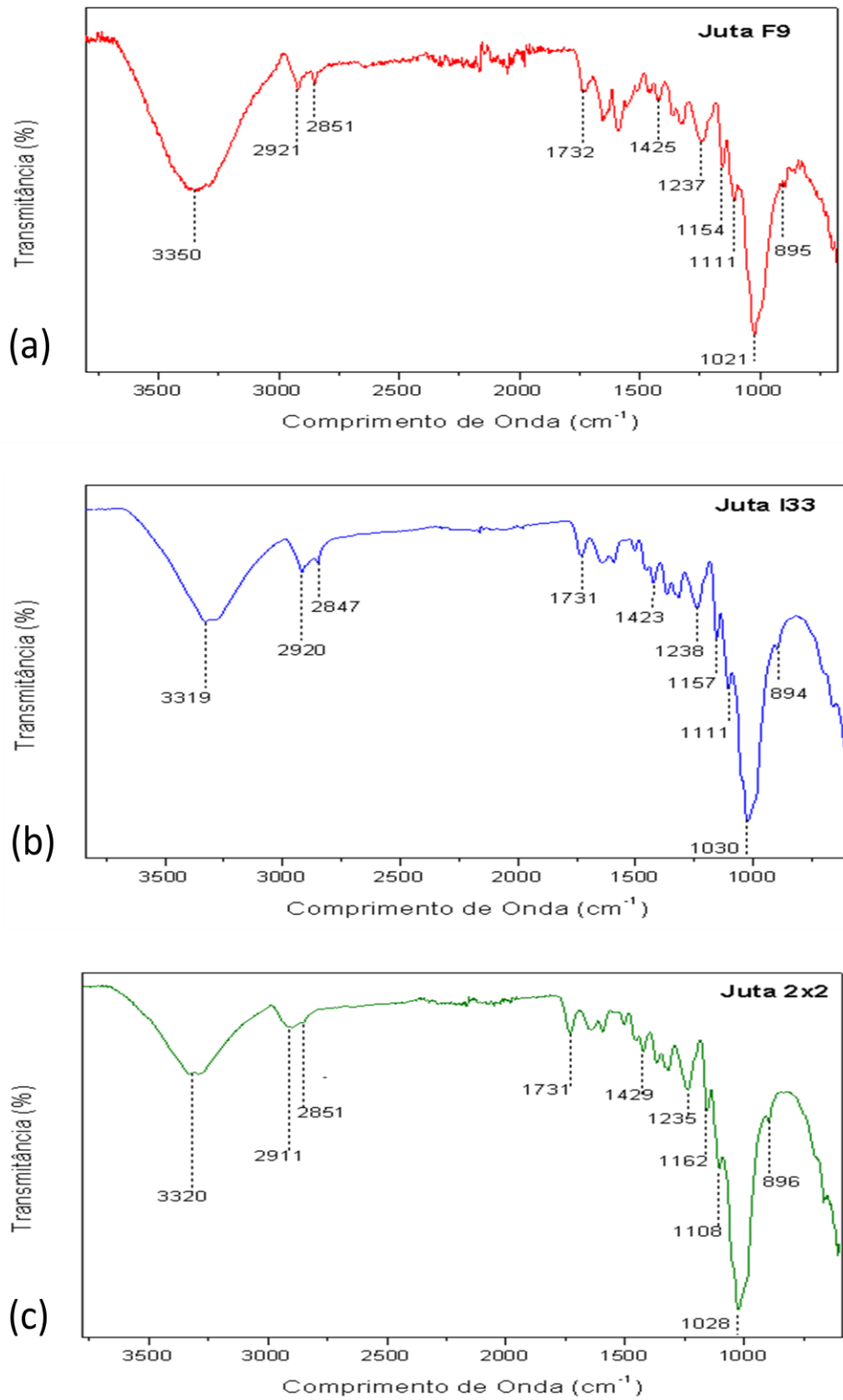


**Figura 14:** Resultado da moldagem dos compósitos: PBAT/Juta F9 (a), PBAT/Juta I33 (b) e PBAT/Juta 2x2 (c).

### 5.2 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

De acordo da Figura 15 é possível avaliar os espectros obtidos a partir da análise de FTIR, a qual permite identificar os grupos funcionais contidos nas amostras de tecido de fibra de juta para, posteriormente, verificar se ocorreu alguma mudança quando os tecidos de fibras de juta foram inseridos na matriz polimérica.

A Tabela 6 apresenta atribuições das bandas dos espectros de FTIR com base em vários trabalhos realizados para caracterização de fibras de juta (XU et al., 2013; SILLS e GOSSETT, 2012; TEJADO et al., 2007; KUBO E KADLA, 2005; SCHWANNINGER et al., 2004; SANTOS, 2015).



**Figura 15:** Espectro de infravermelho dos tecidos de fibras de juta: F9 (a), I33 (b) e 2X2 (c).

**Fonte:** Autor

**Tabela 6:** Tabela de bandas de absorção para espectros de infravermelho de fibras de juta.

Banda (cm <sup>-1</sup> )	Atribuições	Polímero Natural
~ 3330	est. O-H	Celulose, Hemicelulose, Lignina
~ 2920	est. C-H	Celulose, Hemicelulose, Lignina
2850	Deformação de C-H alifático	Celulose, Hemicelulose
~ 1730	est. C=O (cetonas, aldeídos, ésteres, ácidos)	Hemicelulose
~ 1649	est. C=O (em aril cetonas conjugadas p-substituído)	Lignina
~ 1597	est. C-C esqueleto aromático + est. C=O	Lignina
~ 1504	est. C-C esqueleto aromático	Lignina
~ 1460	$\delta_{\text{assimétrica}}$ C-H	Lignina
~ 1430	est. C-C esqueleto aromático + $\delta_{\text{np}}$ CH <sub>2</sub>	Lignina, Celulose
~ 137	Deformação C-H // est. C-H alifático em CH <sub>3</sub>	Celulose, Hemicelulose, Lignina
~ 1318	est. de anel siringílico	Lignina
~ 1240	est. de anel guaiacílico	Lignina
~ 1160	est. assimétrico C-O-C	Celulose, Hemicelulose
~ 1114	$\delta_{\text{np}}$ C-H aromático de anel siringílico // est. C-C e C-O	Celulose, Hemicelulose, Lignina
~ 1030	$\delta_{\text{np}}$ C-H aromático	Lignina
~ 898	Vibração do anel aromático fora do plano <sub>p</sub>	Lignina
~ 667	$\delta_{\text{fp}}$ C-OH	Celulose

est.: estiramento;  $\delta_{\text{np}}$ : deformação no plano;  $\delta_{\text{fp}}$ : deformação fora do plano

**Fonte:** Adaptado de: XU et al., 2013; SILLS e GOSSETT, 2012; TEJADO et al., 2007; KUBO E KADLA, 2005; SCHWANNINGER et al., 2004; SANTOS, 2015.

A partir dos resultados obtidos na análise de FTIR para as amostras de tecido de fibras de juta é possível verificar que os picos estão bem próximos dos valores encontrados na literatura, e ainda não houve diferenças significativas entre as bandas de um tecido para o outro, mostrando que os tecidos não sofreram qualquer tipo de tratamento antes de serem utilizados.

Os picos encontrados nesta análise foram: em aproximadamente 3330 cm<sup>-1</sup> há uma banda larga, que está associada aos grupos hidroxilas (O-H). Também se verifica dois picos pequenos na região de aproximadamente 2920 e 2850 para as três amostras de tecidos de fibras de juta, os quais estão relacionados à vibração de estiramento C-H que normalmente é atribuído aos grupos metila ou metileno e a deformação de C-H alifáticos de celulose e hemicelulose respectivamente.

As vibrações de estiramento C=O (carbonilas) podem ser vistas em ~ 1730 cm<sup>-1</sup> para hemicelulose e em ~ 1649 cm<sup>-1</sup> para a lignina, sendo que essas bandas mostram também o comportamento das fibras com relação a sua umidade. As bandas de ~ 1592 e 1503 cm<sup>-1</sup> estão associadas ao esqueleto aromático da lignina, a qual apresenta também deformação assimétrica com os grupos C-H, -CH<sub>2</sub> e -CH<sub>3</sub> em bandas de aproximadamente 1460 cm<sup>-1</sup>, a

caracterização da lignina ainda deu-se pelos picos de  $\sim 1318$  e  $\sim 1240$   $\text{cm}^{-1}$  que correspondem ao estiramento do anel siringílico e guaiacílico respectivamente. A celulose e a lignina apresentam em  $\sim 1430$   $\text{cm}^{-1}$  o estiramento da ligação C-C do esqueleto aromático da lignina e a deformação no plano com o grupo de  $-\text{CH}_2$  da celulose, respectivamente.

Outros picos característicos da celulose, hemicelulose e lignina foram:  $\sim 1369$   $\text{cm}^{-1}$  que corresponde à deformação C-H e estiramento de C-H alifático em  $\text{CH}_3$ ; em  $\sim 1160$   $\text{cm}^{-1}$  estiramento assimétrico do grupo éter (C-O-C); para  $\sim 1114$   $\text{cm}^{-1}$  há deformação no plano com o grupo C-H aromático de anel siringílico e estiramento C-C e C-O; em  $\sim 1030$  um pico intenso e médio corresponde à deformação no plano do grupo C-H aromático de anel guaiacílico; e em  $\sim 892$  com um pico pequeno e fino temos a vibração do anel fora do plano.

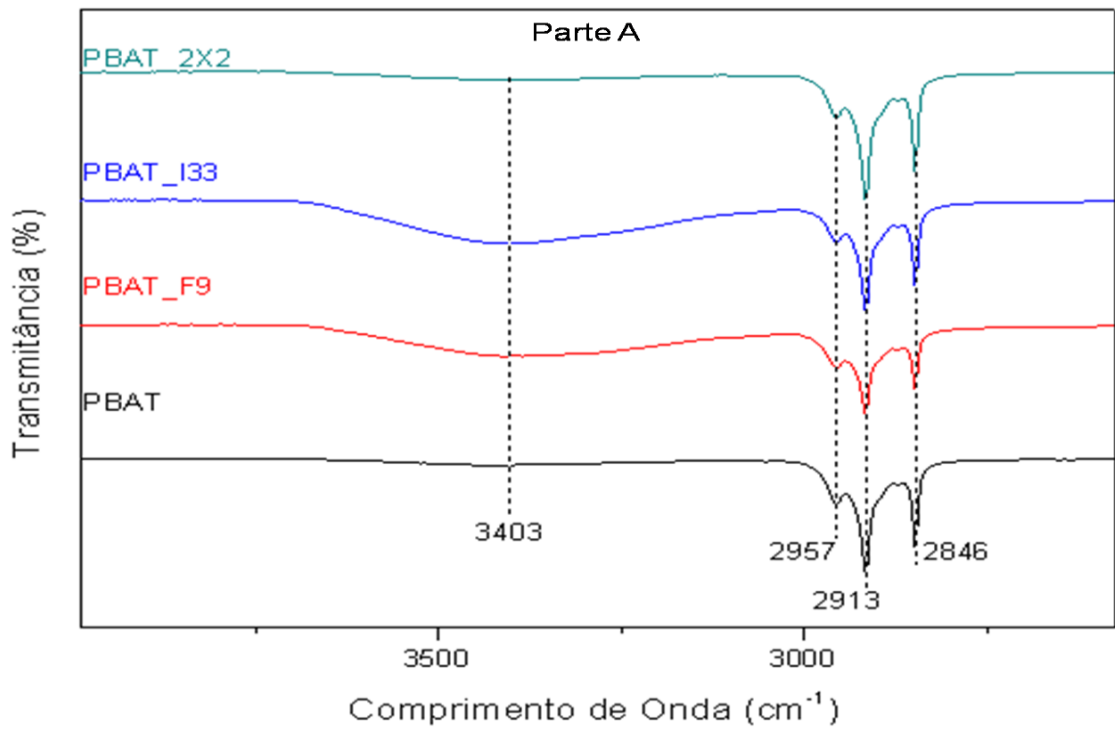
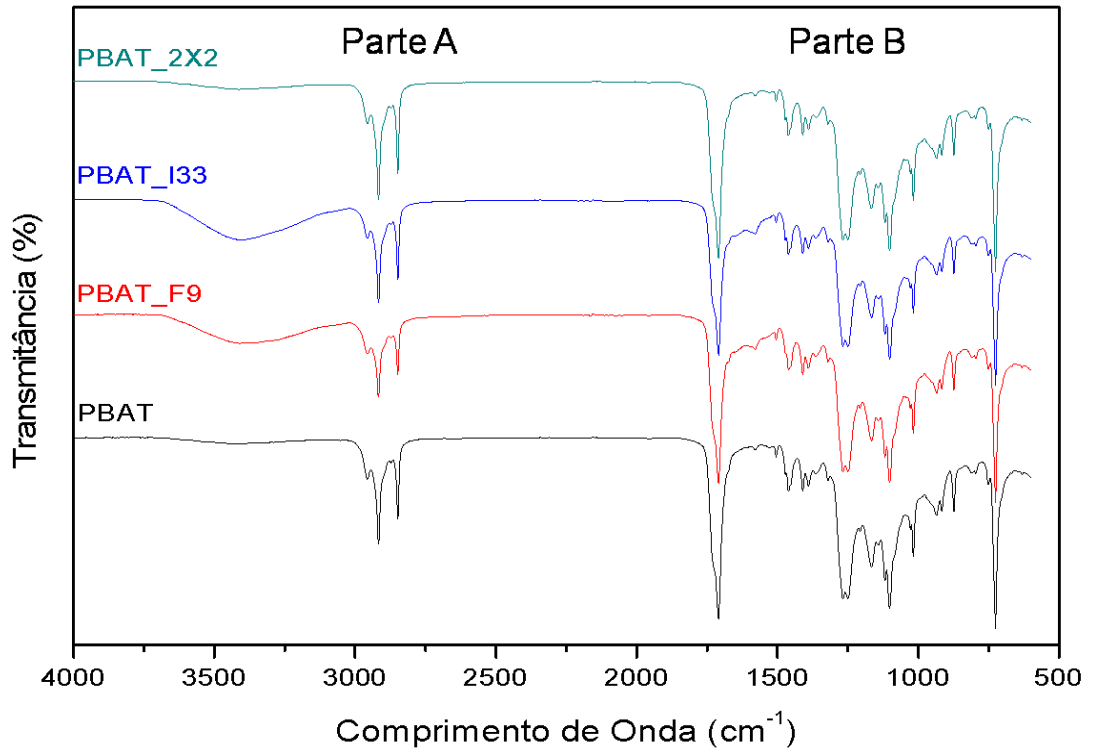
Dentro do espectro o último pico pequeno e estreito em  $\sim 667$   $\text{cm}^{-1}$  tem a deformação fora do plano do grupo C-OH que corresponde à característica da celulose.

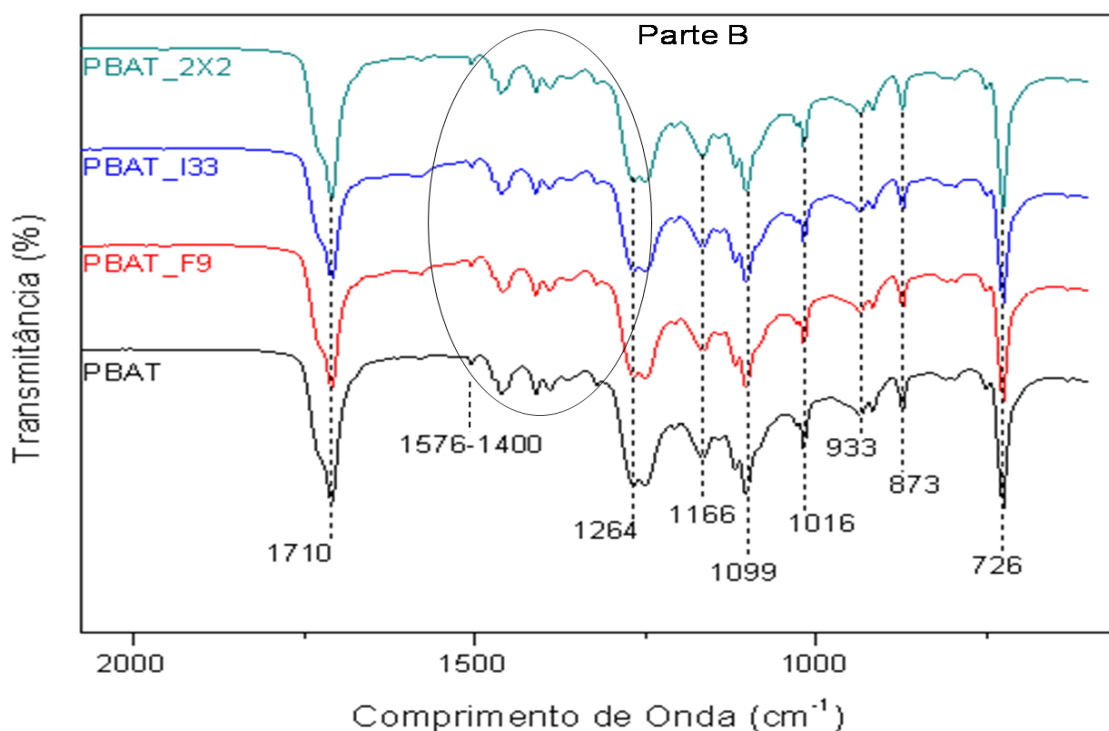
POLETTO et al., 2014 e LE TROEDEC et al., 2008 verificaram que a cristalinidade relativa da celulose pode ser vista no espectro de infravermelho, pois esta análise tem a sensibilidade na região da cristalinidade de alguns componentes, como no caso da celulose. Esse fato pode ser observado no espectro (Figura 15), a característica da região cristalina e amorfa da celulose, onde temos o pico em aproximadamente  $1424$   $\text{cm}^{-1}$ , que está associado à região cristalina e em torno de  $667$   $\text{cm}^{-1}$  que está atribuída à região amorfa da celulose (SANTOS, 2015).

ROY et. al. (2018) realizaram a análise de FTIR para fibras curtas de juta e encontraram valores que corroboram com os picos encontrados neste trabalho. Nesse trabalho da literatura foi observado um pico forte e largo por volta de  $3320$ - $3331$   $\text{cm}^{-1}$  no espectro de FTIR de juta não modificada, correspondente ao grupo hidroxila das fibras.

Samal (2017) estudou o comportamento de compósito a base de resina epóxi reforçadas com tecidos de fibra de juta. Como parte da caracterização do compósito realizou análise de FTIR para verificar possíveis diferenças de comportamento químico entre o compósito e as fibras de juta. Partindo dos espectros de fibras de juta obtidos na análise de FTIR por Samal (2017) é possível verificar que os espectros obtidos neste trabalho estão de acordo com os resultados obtidos na literatura.

A Figura 16 apresenta os espectros de PBAT puro e seus respectivos compósitos, o qual foi dividido em duas partes (a e b) para melhor visualização das bandas.





**Figura 16:** Espectro de FTIR do polímero PBAT e os compostos com tecido de fibras de juta dividido em duas partes (A e B) para melhor visualização das bandas.

**Fonte:** Autor

**Tabela 7:** Tabela com os valores de comprimento de onda obtidos nos espectro de FTIR para a amostra de PBAT e seus respectivos compostos.

Banda (cm <sup>-1</sup> )	Atribuições	Componente
~ 3403	O-H (associado)	Fibras de Juta
~ 2957	Estiramento C-H das frações aromáticas	PBAT
~ 2913	Estiramento C-H das frações alifáticas	PBAT
~ 2846	C-H axial assimétrica	PBAT
~ 1710	C=O (carbonilas) de éster	PBAT
~ 1578-1400	Vibrações de esqueleto, axial (C=C) de aromáticos	PBAT
~ 1264	Estiramento C-O da ligação éster	PBAT
~ 1166	Estiramento de ésteres alifáticos	PBAT
~ 1099	C-O de ligação ésteres	PBAT
~ 1016	Anel benzênico substituído	PBAT
~ 933	C-H de aromático	PBAT
~ 873	Anel benzênico substituído	PBAT
~ 726	Vibrações dos grupos metilenos adjacentes (-CH <sub>2</sub> -)	PBAT

**Fonte:** SILVERSTEIN & WEBSTER, 1998; ZEHETMEYE, 2016; LI, 2018.



A Tabela 7 apresenta todas as atribuições referentes a cada pico característico do polímero PBAT (encontrados também por: AL-ITRY et al., 2012; WENG et al., 2013; KUCHNIER, 2014) e os compósitos com tecido de fibras de juta no espectro de infravermelho. De acordo com a literatura (BASF, 2018), mais especificamente com a estrutura do polímero PBAT é possível verificar que os picos obtidos nesta análise corroboram com a literatura, uma vez que foi possível caracterizar o anel aromático ( $\sim 873 \text{ cm}^{-1}$ ), o C-H alifático e aromático ( $\sim 3000 \text{ cm}^{-1}$ ), e também o grupo éster ( $\sim 1710 \text{ cm}^{-1}$  de C=O e  $\sim 1264 \text{ cm}^{-1}$  de C-O) e grupos metilenos adjacentes ( $\sim 726 \text{ cm}^{-1}$ ).

De acordo com ZEHETMEYE (2016) e LI (2018) os picos encontrados na análise de FTIR para o PBAT estão coerentes, pois seus trabalhos caracterizaram picos com valores de transmitância bem próximos aos que foram obtidos neste trabalho.

Há uma banda larga em aproximadamente  $3400 \text{ cm}^{-1}$  que aparece com evidência nos compósitos de PBAT/Juta F9, PBAT/Juta e Algodão I33 e PBAT/Juta 2x2 e que não é característica de polímeros como o PBAT, que são hidrofóbicos. Esse evento está associado aos grupos hidroxilas (O-H) presentes em fibras vegetais, como a juta, que apresentam propriedade hidrofílica. Apesar da evidência dessa banda característica de materiais que retém umidade, os FTIRs das amostras mostram espectros idênticos. Portanto, pode ser verificado que houve um recobrimento adequado das fibras pela matriz polimérica de PBAT.

### 5.3 Ângulo de Contato

A partir da Tabela 8 é possível analisar os valores médios de ângulo de contato e seus respectivos desvios padrão. Os ângulos obtidos tanto para a superfície do PBAT quanto para a superfície dos compósitos foram maiores que  $90^\circ$ , indicando que todas as amostras estão bem próximas de características hidrofóbicas. Esta propriedade na superfície indica a possibilidade de utilização destes materiais para moldar peças ou componentes que serão aplicados em locais ou ambientes úmidos, pois não absorverão com facilidade moléculas de água na superfície.

**Tabela 8:** Valores de ângulos de contato para o PBAT e os compósitos, utilizando água como solvente.

<b>Amostras</b>	<b>Ângulo de Contato</b>
PBAT	93,08±0,36 ab
PBAT_F9	92,32±1,02 b
PBAT_I33	94,06±2,57 a
PBAT_2X2	93,25±2,30 ab

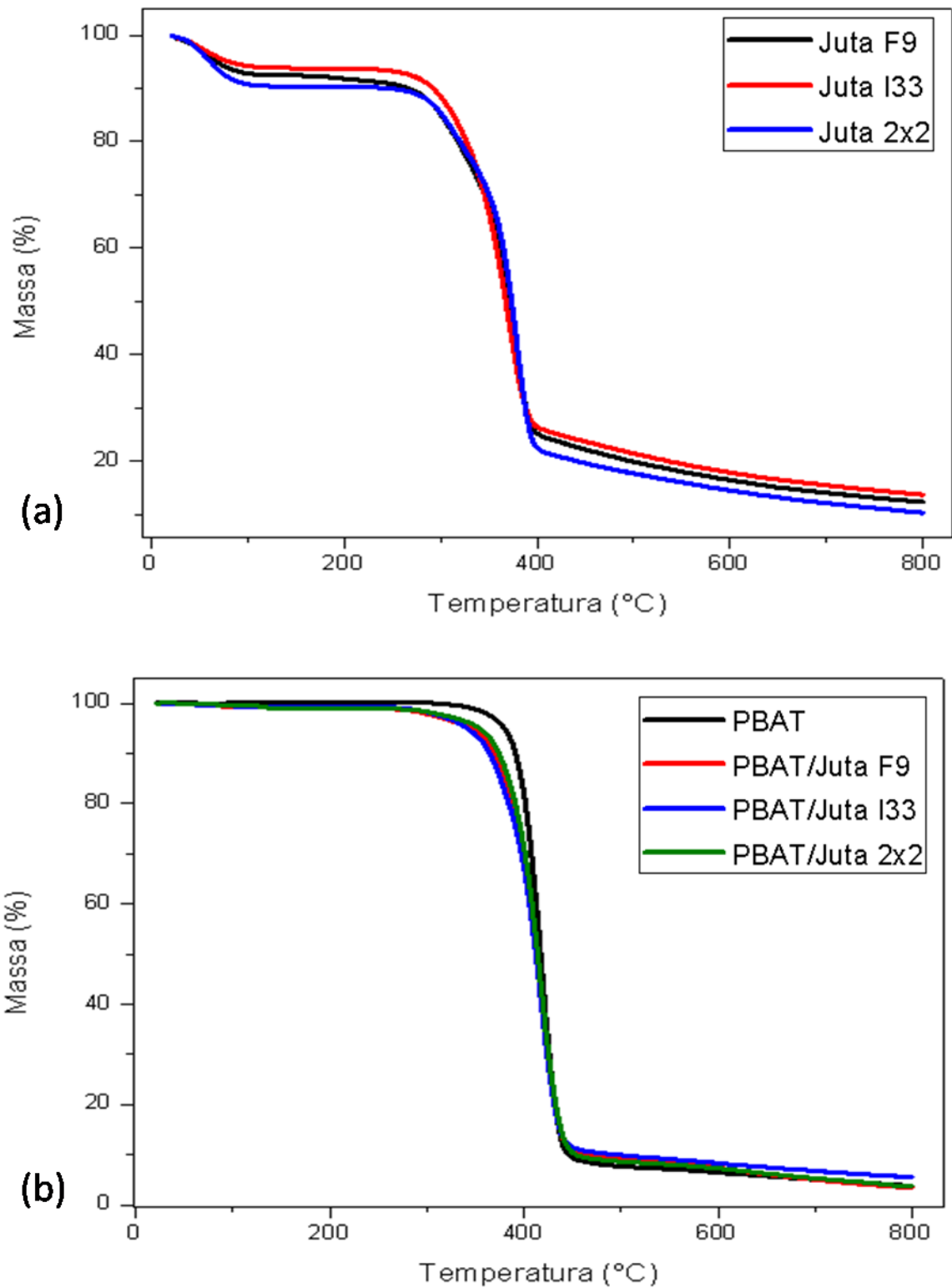
\*Pelo nível de significância de 5% pelo teste de Tukey, as médias seguidas de mesma letra não diferem entre si.

**Fonte:** Autor

As letras que acompanham os valores médios de ângulo de contato (Tabela 8) são referentes às análises estatísticas realizada com o método de Tukey. A análise sugere que houve diferença nos valores obtidos para os ângulos de contato apenas para dois tipos de amostras. No entanto os compósitos que obtiveram agrupamentos diferentes foram os compósitos de PBAT/Juta F9 e PBAT/Juta e Algodão I33 e mais dois agrupamentos os quais não diferem entre si, sugerindo que os valores dos ângulos obtidos para essas amostras estão próximos. Portanto, todas as amostras apresentam um perfil desfavorável para a molhabilidade da superfície polimérica e apresentaram grau elevado de recobrimento do tecido de fibras de juta pelo polímero PBAT, mostrando que o resultado da moldagem permitiu materiais com superfícies excelentes para impedir que haja transferência de umidade do ambiente, ou qualquer outro de tipo de exposição de umidade para os tecidos de fibras de juta que estão nesses compósitos.

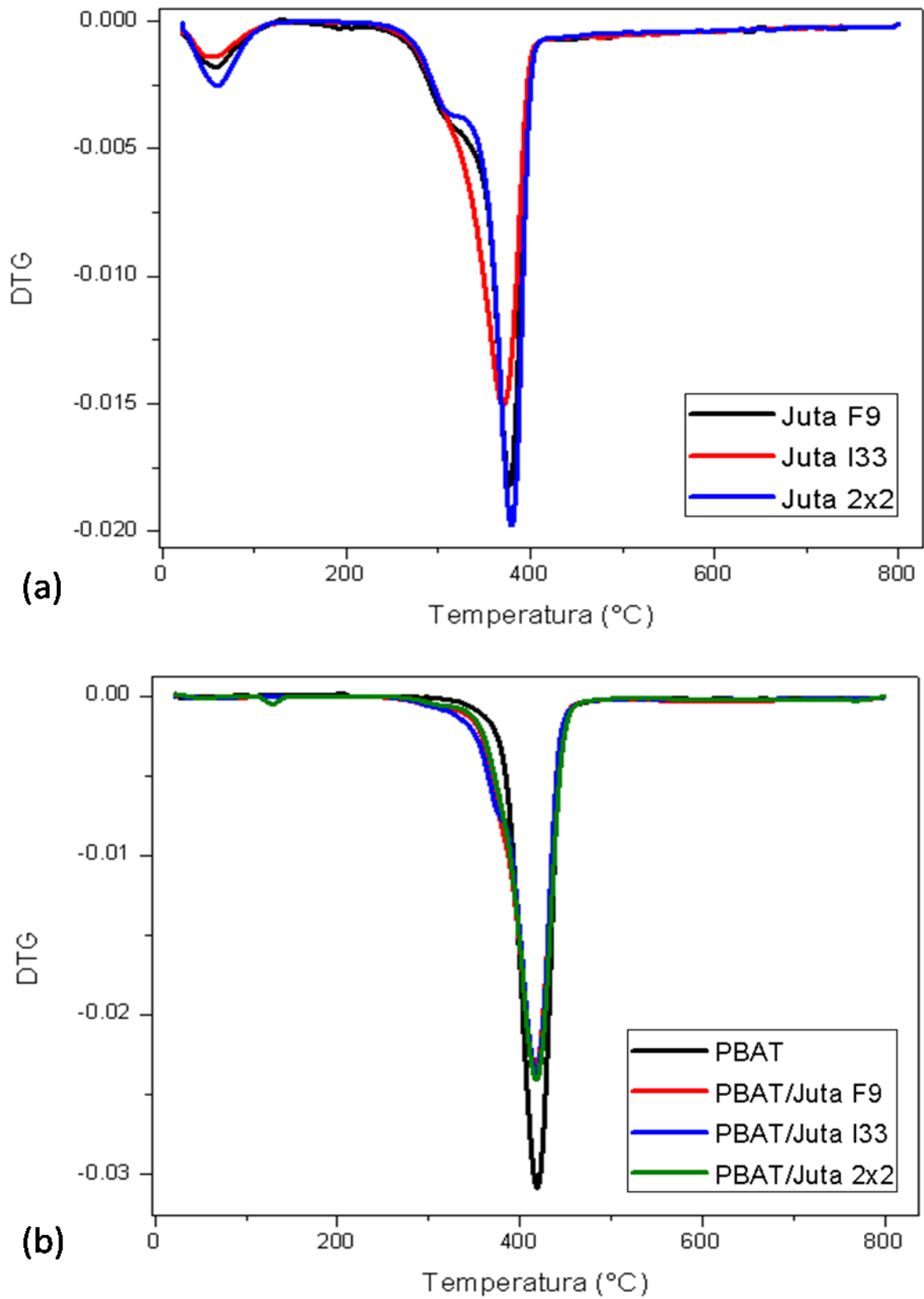
#### **5.4 Termogravimetria (TG) e Termogravimetria Derivada (DTG)**

As curvas de TG e DTG dos materiais moldados estão representadas nas Figuras 17 e 18. Detalhes como temperatura inicial ( $T_i$ ) e final ( $T_f$ ) de degradação, massa inicial e final em cada estágio, porcentagem de perda de massa (%) e porcentagem residual de amostra (%) estão detalhados na Tabela 9.



**Figura 17:** Curvas TG dos tecidos de fibras de juta (a), do polímero PBAT e dos compósitos com os 3 tipos de tecidos de fibras de juta (b) .

**Fonte:** Autor



**Figura 18:** Curva DTG dos tecidos de fibras de juta (a), do polímero PBAT e dos compósitos com os 3 tipos de tecidos de fibras de juta (b).

**Fonte:** Autor

**Tabela 9:** Estágio de degradação das curvas de TGA e DTG, apresentando temperatura inicial ( $T_i$ ) e final ( $T_f$ ), perda de massa (%), temperatura máxima de perda de massa ( $T_{máx}$ ) e porcentagem residual (R).

AMOSTRAS	1º Estágio			2º Estágio			3º Estágio		
	$T_{(i)} - T_{(f)}$ (°C)	Perda de Massa (%)	T. Máx (°C)	$T_{(i)} - T_{(f)}$ (°C)	Perda de Massa (%)	T. Máx (°C)	$T_{(i)} - T_{(f)}$ (°C)	Perda de Massa (%)	T. Máx (°C)
Juta F9	16,17 - 117,71	8,17	57,12	242,24 - 454,11	69,26	378,06	454,11 - 807,22	9,04	598,07
Juta I33	16,59 - 119,80	6,93	51,90	206,72 - 440,32	69,05	369,70	440,32 - 801,58	9,65	638,61
Juta 2x2	16,59 - 117,09	10,17	60,05	231,17 - 445,75	70,47	380,15	445,75 - 804,30	9,29	665,77
PBAT	325,61 - 522,02	93,03	420,47	522,02 - 802,21	3,10	655,53	-	-	-
PBAT/Juta F9	253,32 - 510,94	90,71	418,59	510,94 - 801,58	5,64	663,05	-	-	-
PBAT/Juta e Algodão I33	233,26 - 513,03	89,84	417,96	513,03 - 803,67	4,38	659,71	-	-	-
PBAT/Juta 2x2	102,88 - 162,64	1,25	130,04	257,70 - 513,03	90,35	417,96	513,03 - 804,93	4,63	628,69

Fonte: Autor

A partir dos valores descritos na Tabela 9 podemos observar que a análise para as fibras de juta ocorreram em três estágios de perda de massa com uma temperatura média inicial de 16,45 °C e temperatura média final de 119,38 °C no primeiro estágio para os três tipos de tecidos de fibras de juta (códigos F9, I33, 2x2). Esse estágio corresponde à perda de umidade das fibras, os valores obtidos condizem com dados encontrados na literatura (MUHAMMAD et al.; YANG et al, 2007).

No caso dos compósitos, o compósito contendo as fibras de juta em arranjo 2x2 no tecido, o qual possui maior gramatura, foi o material que apresentou maior porcentagem de umidade. Esse fato pode ser observado nas curvas do TG/DTG, revelando uma maior intensidade de perda de umidade conforme a gramatura dos tecidos aumenta nos compósitos. Na sequência crescente de valor de gramatura, os valores em porcentagem de perda de massa dos compósitos no primeiro estágio foram: 6,93; 8,17 e 10,17%. Esses resultados estão relacionados ao fato de que as fibras vegetais, como a juta e o algodão, possuem teor de umidade em torno de 10 a 12% (porcentagem mássica), pois são fibras higroscópicas (NASCIMENTO, 2009; BLEDZKI; GASSAN, 1999).

O segundo estágio está relacionado ao início da degradação da hemicelulose seguida da celulose, verificou um intervalo médio de temperatura entre 228,99 – 457,24 °C para os três tipos tecidos de fibra de juta. Esse intervalo está relacionado à degradação da hemicelulose que ocorre na faixa de 220 – 315°C e da celulose que ocorre em uma faixa entre 327 – 450°C de decomposição (PIRES, 2009; YANG et. al., 2007)

Para o compósito de PBAT contendo fibras de juta e algodão (tecido I33) foi possível verificar que houve maior queda de temperatura comparada com o polímero PBAT em seu primeiro evento de degradação (1ºestágio), ou seja, o PBAT se manteve estável até aproximadamente 325,61°C, enquanto o compósito que iniciou o processo degradativo em 233,26°C. Esse evento está associado à degradação da hemicelulose e celulose que acontece em uma faixa menor de temperatura comparado com a lignina. Além disto, justamente esse tipo de tecido Juta e Algodão I33, possui 47% da sua trama em fibras de algodão e, de acordo com a literatura, o algodão é composto por aproximadamente 84% de celulose (LIU et.al., 2011; YANG et. al., 2007).

No terceiro estágio ocorreu perda de massa em temperatura média inicial de 446,72°C, que está relacionada à degradação da lignina, que é reportada na literatura (LIU et al, 2011) até a temperatura de 550°C. Essa característica da lignina está relacionada ao fato de possuir cadeia macromolecular complexa e apresentar degradação em intervalos de temperaturas mais amplos com temperaturas mais elevadas (LIU et al, 2011).

A partir destes resultados obtidos por TG/DTG foi possível analisar o comportamento térmico dos três principais componentes (celulose, hemicelulose e lignina) presentes nos tecidos de fibra de juta, revelando pequenas diferenças em seus comportamentos de pirólise.

Para o polímero puro (PBAT) pode ser observada apenas uma etapa de degradação térmica onde seu processo degradativo iniciou em 325,61°C, com término em 522,02°C. Resultados semelhantes foram encontrados na literatura (KUMAR et al., 2010; KUCHNIER, 2014) com uma pequena faixa de degradação, indicando que o PBAT é relativamente estável até aproximadamente 320 °C. A porcentagem residual do PBAT por TG foi bem pequena entre 3,6-5,8%, sendo o menor valor para o PBAT e maiores valores para os compósitos, pois o polímero PBAT apresentou mais de 95% de perda de massa ao atingir a temperatura de 800°C.

Para os compósitos de PBAT /Juta (F9), PBAT/Juta e Algodão (I33) e PBAT/Juta 2x2, foram observados pequenos deslocamentos de menor temperatura no início da degradação que foram respectivamente 253,32 – 233,26 e 102,88 °C comparado com o polímero PBAT que obteve seu início degradativo em 325,61°C, mostrando que a adição dos reforços diminuiu a estabilidade térmica do PBAT, porém esse deslocamento não afeta consideravelmente as propriedades do material. RAJESH et. al. (2016) ao trabalharem com PLA e fibras de juta reportaram um efeito parecido, no qual o compósito apresentou uma redução de temperatura de degradação em 27% comparada com o polímero de PLA. No entanto, pode ser observado que o intervalo de temperatura relacionado à maior perda de massa foi similar para todos os compósitos, uma vez que a matriz PBAT se manteve estável termicamente, mesmo diminuindo um pouco o início da temperatura de degradação dos compósitos.

A partir das curvas também é possível notar que no compósito de PBAT/Juta (2x2), Figura 18, obteve um evento a mais em seu processo degradativo. Podemos correlacionar esse evento com o fato de que as gramaturas dos tecidos mudaram e, conseqüentemente, ao aumentar o valor da gramatura, o seu volume dentro do molde também aumenta. Comparando os dados obtidos para os compósitos contendo diferentes gramaturas de tecidos de fibra juta utilizados, observamos que com as duas gramaturas (Juta (F9) e Juta (I33)) de menores valores, mas que possuem valores próximos, seus compósitos sofreram apenas dois eventos de degradação. Neste caso, seus tecidos por serem menos espessos permitiram maior quantidade de matriz polimérica dentro do molde e, conseqüentemente, maior recobrimento do polímero sobre o tecido de fibras de juta. Assim, a quantidade de matriz polimérica se sobressai na análise termogravimétrica, obtendo resultados parecidos com os do polímero sem fibras. Com relação ao tecido de maior gramatura (Juta (2x2)), a quantidade de matriz

polimérica no compósito é menor, pois o volume deste tecido é 15% maior que os outros dois tecidos utilizados (comparando os valores de gramatura). Esse fato permite que a degradação ocorra mais facilmente, pois o houve maior porcentagem de tecido de fibras de juta (2x2) na análise; ocorrendo no intervalo de 102,88 - 162,64 °C, um primeiro evento relacionado à desidratação devido à umidade presente no reforço de fibras de juta.

Os valores residuais foram maiores para os tecidos de fibras de juta comparados com o PBAT e os compósitos, como já descritos anteriormente. Isto está associado ao fato das fibras de origem vegetal após sua combustão gerarem resíduos de cinzas, as quais são provenientes de sais minerais presentes nas plantas. Também é importante salientar que os compósitos moldados neste trabalho possuem, aproximadamente, 8 a 10% em massa de fibras de juta. Essas porcentagens também variam de acordo com a composição do solo onde essas plantas foram cultivadas (CHAPPLE; ANANDJIWALA, 2010; DITTERNER; GANGARAO, 2012).

## 5.5 Análise Térmica Dinâmico-Mecânica (DMTA)

As curvas de módulo de armazenamento ( $E'$ ), módulo de perda ( $E''$ ) e  $\tan \delta$  para o polímero PBAT e seus compósitos, estão demonstrados nas Figuras 19, 20 e 21 respectivamente.

Pela Figura 19 é possível observar que as amostras obtiveram temperatura máxima em temperatura de -43°C, onde o polímero PBAT foi o que apresentou maior valor de módulo de armazenamento de energia ( $E' = 1990$  MPa), e o compósito contendo fibras de juta e algodão (I33) apresentou queda de 10,55% comparado com o PBAT (Tabela 10), porém ao comparar com os outros compósitos foi o qual obteve maior módulo. Portanto os compósitos contendo os tecidos de fibras de juta (F9) e juta (2x2) apresentaram diminuição na propriedade em, aproximadamente, 33% (Tabela 10) que pode estar ligado ao fato de que não tenha ocorrido uma forte adesão na interface fibra/matriz. O módulo de armazenamento representa a resposta elástica que o material obtém no ensaio, isso está ligado ao fato de quanto maior o módulo de armazenamento do material, maior tende a ser seu módulo elástico (FREITAS, 2016).

É possível verificar também, a partir da Tabela 10, que na temperatura de 20 e 43°C os valores do módulo de armazenamento entre o polímero e os compósitos estão aproximados, havendo uma igualdade de valores apenas para os compósitos de PBAT/Juta I33 e PBAT/Juta 2x2. Portanto, os resultados obtidos na transição vítrea ( $T_g$ ) das amostras, em

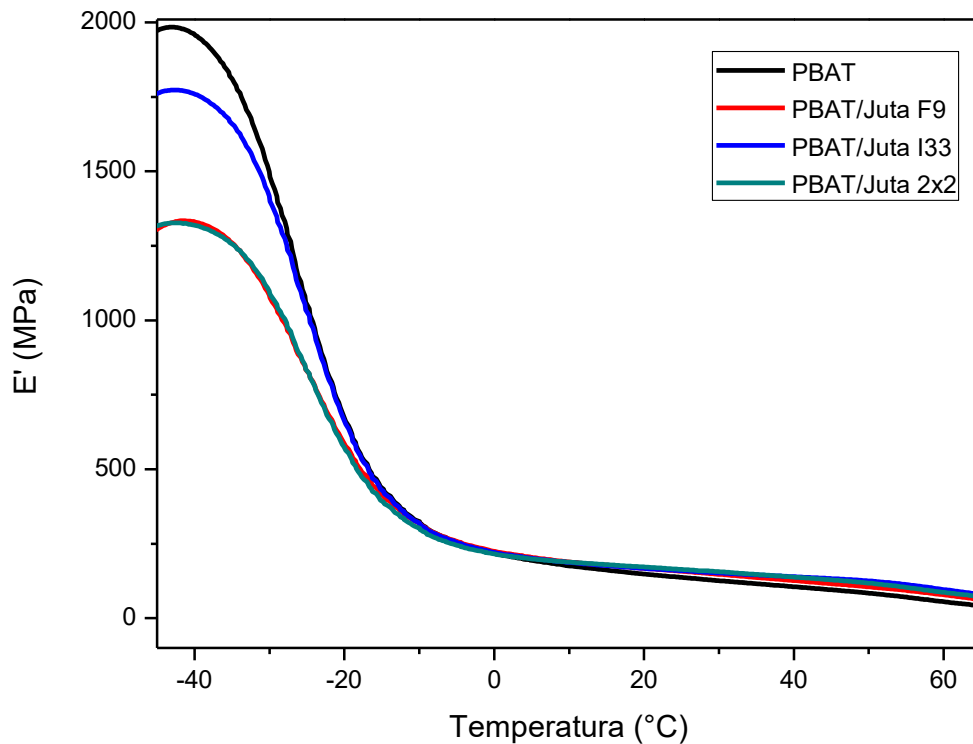


aproximadamente  $-19^{\circ}\text{C}$ , as fibras já não causam mais efeitos no comportamento mecânico dos compósitos; nesse ponto tanto matriz quanto compósitos passam a ser iguais, ou seja, possuem o mesmo comportamento.

Pelos resultados obtidos no módulo de armazenamento (comportamento elástico), inicialmente poderia se esperar que o módulo de elasticidade encontrado no ensaio de tração (sessão 5.6) fosse maior para o compósito de PBAT/Juta e Algodão (I33), contudo é necessário enfatizar que os ensaios de DMTA foram realizados no modo de flexão, ocorrendo diferenças nos valores obtidos. Adicionalmente, com o aumento da temperatura no PBAT e nos compósitos, as cadeias poliméricas apresentaram o efeito de contração, pois se trata de polímero muito flexível, fato que provocou um maior valor de módulo de armazenamento ( $E'$ ), comportamento pertinente aos materiais mais flexíveis sob aumento de temperatura (SANGRONIZ, et al., 2018).

Em geral, os materiais poliméricos possuem comportamento viscoelástico e o aumento do  $E'$  pode estar relacionado ao aumento das ligações e que permitem dificultar a movimentação das cadeias poliméricas e tal comportamento também pode ser encontrado em elastômeros ou que contenham fases elastoméricas (SANGRONIZ, et al., 2018; MORENO, et al., 2006; LIYANA, et al., 2013.), portanto a flexibilidade do PBAT permite que seja comparado com esse tipo de material.

Pode-se relacionar o módulo de armazenamento ( $E'$ ) com a propriedade cristalina do material, ou seja, quanto maior a cristalinidade do material, maior pode ser seu módulo de armazenamento; isso se deve ao fato de que a região cristalina aumenta as interações moleculares, sendo assim necessária mais energia para a movimentação das cadeias (FREITAS, 2016). A partir dessas considerações os resultados obtidos na análise de DRX (sessão 5.5) corroboram com as curvas obtidas para o módulo de armazenamento, ou seja, o compósito de PBAT/Juta e algodão (I33) foi o que obteve curva de maior intensidade de cristalinidade no difratograma e, conseqüentemente, foi o compósito que obteve maior valor de módulo de armazenamento ( $E'$ ).



**Figura 19:** Curvas do módulo de armazenamento ( $E'$ ) do polímero PBAT e seus respectivos compósitos.

**Fonte:** Autor

**Tabela 10:** Valores de módulo de armazenamento ( $E'$ ) em determinadas temperaturas para o PBAT e seus respectivos compósitos.

Amostra	Módulo de Armazenamento ( $E'$ ) (MPa)		
	Temperatura:		
	-43°C	25°C	43°C
PBAT	1990	141	112
PBAT/Juta F9	1333	159	122
PBAT/Juta I33	1780	168	137
PBAT/Juta 2x2	1333	168	137

**Fonte:** Autor

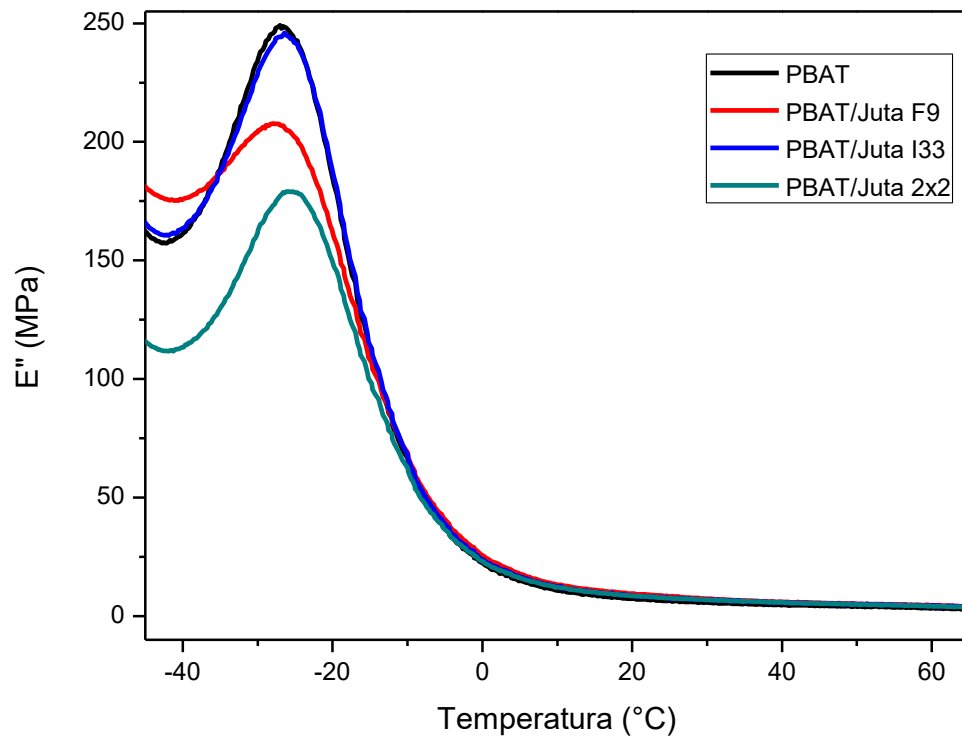
A Figura 20 apresenta as curvas de módulo de perda de energia ( $E''$ ) dos materiais, essa propriedade corresponde à resposta viscosa do material, de tal maneira que quanto maior seu módulo de perda, maior sua capacidade de dissipar energia mecânica e, conseqüentemente, mais flexibilidade o material terá (FREITAS, 2016; PAN et al. 2018).

O aumento no módulo de perda está relacionado à flexibilidade do material, portanto quanto maior o módulo de perda mais flexível o material será. Neste caso, os resultados obtidos para o compósito de PBAT/Juta e algodão (I33) tanto para o módulo de armazenamento, quanto para o módulo de perda são coerentes, uma vez que é um material que armazena mais energia e dissipa mais energia também.

A partir da Tabela 11 é possível verificar que o compósito de PBAT/Juta e algodão (I33) obteve um decréscimo de apenas 2% com relação ao polímero PBAT, já os compósitos de PBAT/Juta F9 e PBAT/Juta 2x2 obtiveram em relação ao PBAT decréscimos de módulo de perda de 16,86 e 28,11% respectivamente. Contudo é importante destacar que os valores de módulo de perda ( $E''$ ) para cada amostra foram obtidos em temperaturas distintas, apenas as amostras de PBAT e PBAT/Juta F9 tiveram resultados em  $-27^{\circ}\text{C}$ .

LIYANA, et al. (2013) estudou o comportamento de blendas de PLA/PBAT com fibra vegetal de kenaf e como parte da caracterização do trabalho utilizou análise de DMTA para verificar o comportamento das amostras. Os autores observaram diferenças significativas no módulo de perda nas amostras reforçadas com fibra de kenaf, ou seja, as blendas de PLA/PBAT obtiveram aproximadamente 3100 MPa em módulo de armazenamento, enquanto que a mesma blenda com a inserção da fibra de kenaf resultou em 2500 MPa.

Portanto, podemos sugerir que o tipo de tecido de fibras de juta utilizado também afetou diretamente na propriedade do compósito, supondo que o tecido de fibra de juta e algodão (I33), o qual obteve os melhores resultados, é um tecido mais flexível comparado com os outros tecidos utilizados. As faixas de temperaturas de módulo de armazenamento e perda obtidos neste trabalho também foram encontradas na literatura (TAVARES et al.,2018; PAN et al.,2018).



**Figura 20:** Curvas do módulo de perda ( $E''$ ) do polímero PBAT e seus respectivos compósitos.

**Fonte:** Autor

**Tabela 11:** Valores de módulo de perda ( $E''$ ) em determinadas temperaturas para o PBAT e seus respectivos compósitos

Amostra	Temperatura (°C)	Módulo de Perda (MPa)	Módulo de Perda (MPa) em 40°C
PBAT	-27	249	4,49
PBAT/Juta F9	-27	207	4,49
PBAT/Juta I33	-26	244	4,49
PBAT/Juta 2x2	-25	179	4,49

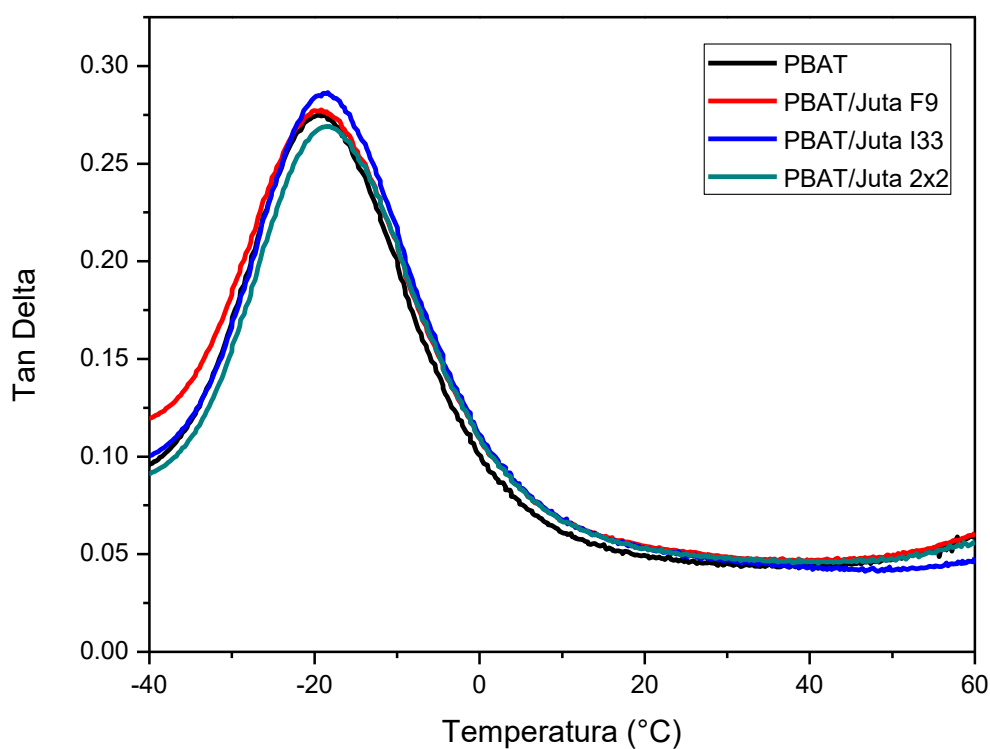
**Fonte:** Autor

A temperatura de transição vítrea de materiais poliméricos pode ser determinada pelo pico máximo das curvas de Tan Delta na análise de DMTA, sendo que essa transição ocorre por meio do alcance de energia suficiente para superar a energia de rotação de ligações químicas na cadeia polimérica (LORANDI, 2016; PAN et al. 2018).

Podemos observar na Figura 21 as curvas de Tg (temperatura de transição vítrea) dos materiais, a qual corresponde à temperatura em que as cadeias dos polímeros amorfos e

semicristalinos passam de um estado relativamente rígido para um estado de mobilidade (LORANDI, 2016; PAN et al. 2018).

A Tabela 12 apresenta a média das Tg's obtidas pelas curvas *Tan Delta* dos corpos de prova analisados para cada material. De acordo com os valores descritos é possível verificar que não houve diferença significativa entre a Tg do PBAT e a dos compósitos contendo os tecidos de fibras vegetais. Os valores encontrados de Tg para as amostras corroboram com os resultados obtidos no trabalho de PAN et al. (2018), onde analisaram o comportamento dos polímeros de PBAT e PLA separadamente e, posteriormente, a formação de blenda entre os dois polímeros e obtiveram como resultado de Tg do PBAT o valor de aproximadamente  $-25^{\circ}\text{C}$ . Como podem ser observados na Tabela 12, os resultados obtidos em relação à temperatura de transição vítrea do PBAT e dos compósitos foram similares.



**Figura 21:** Curvas Tan Delta do polímero PBAT e seus respectivos compósitos.

**Fonte:** Autor

**Tabela 12:** Temperaturas médias de transição vítrea por Tan Delta para o polímero PBAT e seus compósitos.

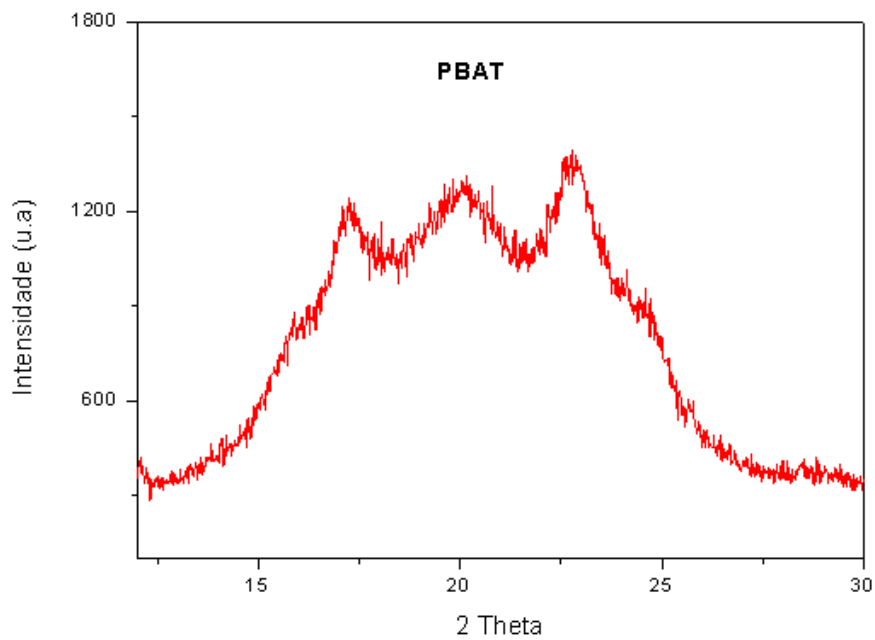
<b>Amostra</b>	<b>Tg (°C)</b>
PBAT	-19,36
PBAT/Juta (F9)	-19,36
PBAT/Juta e Algodão (I33)	-18,50
PBAT/ Juta (2x2)	-18,21

**Fonte:** Autor

## 5.6 Difração de Raios-X (DR-X)

Um difratograma que apresenta um material com excelente cristalinidade compõe de reflexões de Bragg estreitas e nítidas. De acordo com a Figura 22 é possível verificar que a matriz polimérica biodegradável (PBAT) apresenta característica de uma estrutura semicristalina. Esta afirmação se dá pela obtenção dos picos presentes no difratograma, os quais apresentam característica de pico largo e amplo com muitos ruídos que são ocasionados pela fase amorfa do material (PAN, et al., 2018).

A realização do cálculo de porcentagem de cristalinidade foi feita com base apenas no difratograma do polímero PBAT, pois os compósitos têm como base o mesmo polímero. Porém, mais adiante estão apresentados todos os difratogramas contendo algumas diferenças na intensidade entre as amostras. A partir de programas computacionais foi possível obter valores das áreas cristalina e amorfa do difratograma para calcular a porcentagem cristalina do PBAT. Portanto, a porcentagem calculada de fase cristalina deste polímero foi de 17,79%.



**Figura 22:** Difratograma do polímero PBAT.

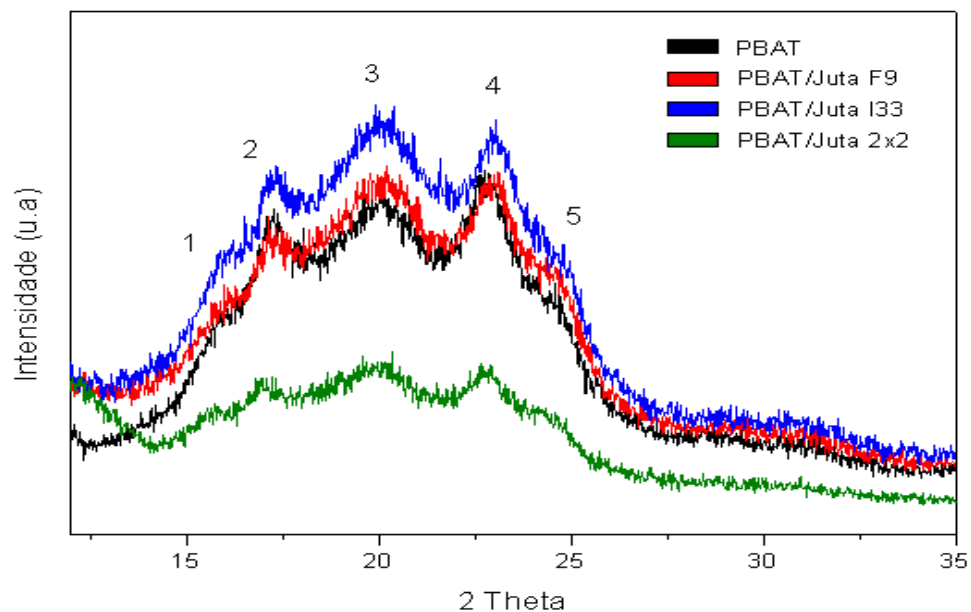
A partir da análise de DRX foi possível verificar cinco picos largos que caracterizam o material, os valores dos picos obtidos para cada amostra em ângulo de difração  $2\theta$  estão apresentados na Tabela 13. A partir da análise dos valores obtidos é possível verificar que entre as amostras de PBAT, PBAT/Juta F9 e PBAT/Juta I33 os valores dos ângulos estão próximos, ou seja, entre essas amostras houve o mínimo de deslocamento, praticamente desprezível. No entanto, a amostra de PBAT/Juta 2x2 foi a única que obteve deslocamento dos picos, os quais obtiveram valores menores com uma média de  $1,65^\circ$ .

É possível verificar ainda no difratograma que as amostras não apresentaram diferenças na quantidade de picos. Portanto, a adição do tecido de fibras de juta não causou interferência na cristalinidade da matriz polimérica, ou seja, não acrescentou ou reduziu picos comparando o polímero PBAT e os compósitos. Observando o eixo y do gráfico o qual corresponde a intensidade das amostras, pode ser observado que houve diferenças, onde é possível conferir que para cada tipo de amostra a intensidade dos picos foi diferente (Tabela 14). Desta forma, nesta análise, as amostras podem ser classificadas conforme sua intensidade em ordem decrescente: PBAT/Juta e Algodão (I33), PBAT/Juta (F9), PBAT e PBAT/Juta (2x2), respectivamente.

No geral valores próximos de ângulo (*theta*) foram encontrados nos trabalhos de ZEHMEYER (2016) e CHIVRAC (2006), nos quais os autores também observaram em seus trabalhos diminuição de intensidade cristalina com incorporação de nanopartículas na matriz

de PBAT. No caso os autores reportaram que, provavelmente, a adição da nanocarga impeça o crescimento de cristais no polímero.

O resultado de intensidades obtido nesta análise condiz com os tipos de tecidos de juta utilizados para cada compósito, ou seja, o tecido de fibra de juta e algodão (I33), por exemplo, é o tecido de menor gramatura, conseqüentemente é o compósito que contém maior quantidade de matriz polimérica e que resultou a maior intensidade cristalina do polímero. Já o compósito contendo o tecido de fibra juta (2x2), possui uma gramatura com porcentagem de 21% maior comparada com o tecido de fibra de juta I33; essa característica permitiu que o compósito de PBAT/Juta (2x2) resultasse no difratograma de menor intensidade, pois a quantidade de matriz polimérica nesse compósito foi menor (quantidade volumétrica no molde devido à maior porcentagem deste tecido) e, conseqüentemente, permitiu que a intensidade da fase cristalina do polímero diminuísse (Tabela 14). A Figura 23 apresenta o difratograma do PBAT e dos compósitos.



**Figura 23:** Difratograma das amostras de PBAT e de seus compósitos reforçados com tecido de fibras de juta.

**Fonte:** Autor



**Tabela 13:** Valores do ângulo 2 Theta obtidos para as amostras de PBAT e seus respectivos compósitos.

Amostras	2 Theta				
	Pico 1	Pico 2	Pico 3	Pico 4	Pico 5
PBAT	15,92	17,35	20,14	22,98	24,56
PBAT/Juta F9	15,89	17,32	20,14	22,80	24,51
PBAT/Juta I33	15,95	17,26	19,96	22,98	24,65
PBAT/Juta 2x2	14,76	15,77	18,61	21,10	22,46

Fonte: Autor

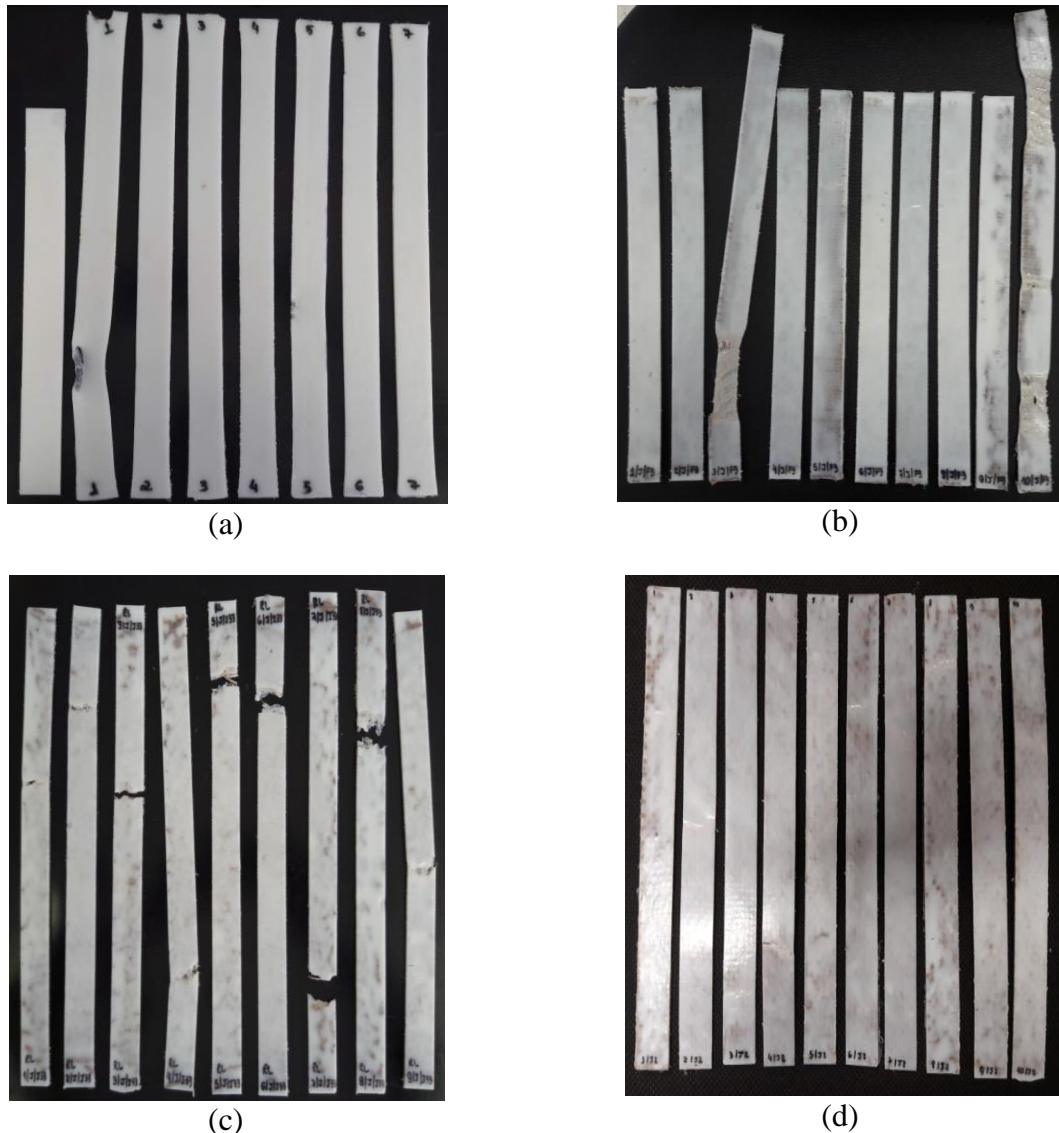
**Tabela 14:** Valores de Intensidades obtidos para as amostras de PBAT e seus respectivos compósitos.

Amostras	Intensidade (u.a)				
	Pico 1	Pico 2	Pico 3	Pico 4	Pico 5
PBAT	818,61	1188,03	1267,92	1340,97	879,10
PBAT/Juta F9	878,47	1121,37	1340,86	1336,11	997,73
PBAT/Juta I33	1068,26	1356,23	1583,62	1561,51	1069,57
PBAT/Juta 2x2	514,88	601,24	669,15	645,56	499,09

Fonte: Autor

## 5.7 Ensaio de Tração

Na Figura 24 estão representadas as amostras de polímero e dos compósitos após os ensaios de tração, a Figura 24 (a) apresenta uma amostra não ensaiada, para que assim possam ser observadas as diferenças das amostras. É possível observar que ocorreram fraturas apenas nas amostras em que a composição do tecido de fibras de juta possui fibras de algodão na trama, ou seja, no caso do compósito PBAT/Juta I33 (Figura 24 (c)).



**Figura 24:** Amostras após ensaio de tração: PBAT (a), PBAT/Juta F9 (b), PBAT/Juta I33 (c) e PBAT/Juta 2X2 (d).

**Fonte:** Autor

Os resultados obtidos para o ensaio de tração para amostras de PBAT e para os compósitos de PBAT com tecidos de fibra de juta estão representados na Tabela 15.

Ao ensaiar os corpos de prova de PBAT foi possível verificar que não houve nenhum tipo de trinca ou fratura nas amostras, como pode ser visto na Figura 24 (a). Além disso, o equipamento utilizado não permitiu chegar ao alongamento máximo das amostras, pois o mesmo possuía um comprimento de coluna menor do que a capacidade de alongamento do polímero, fato que também foi observado por NOSSA (2014). No entanto foi possível conferir um aumento de 30% no alongamento das amostras partindo de uma amostra original para o ensaio.

A partir da Tabela 15 é possível verificar que houve acréscimos significativos na propriedade mecânica de tração, mostrando um resultado satisfatório com a inserção de fibras naturais no polímero, no sentido de aprimorar suas propriedades de resistência máxima e módulo de elasticidade em tração. No entanto, também é possível averiguar que ocorreu decréscimo nos valores de deformação máxima dos compósitos comparando com a matriz PBAT sem reforço de fibras. A Tabela 15 descreve os resultados obtidos para as amostras com e sem tecido de fibras de juta, os quais foram submetidos à análise estatística por método de Tukey, que permite avaliar se os conjuntos diferem entre si.

**Tabela 15:** Valores médios e seus respectivos desvios padrão para o ensaio de propriedades mecânicas de tração baseados em 10 corpos de prova para cada tipo de amostra.

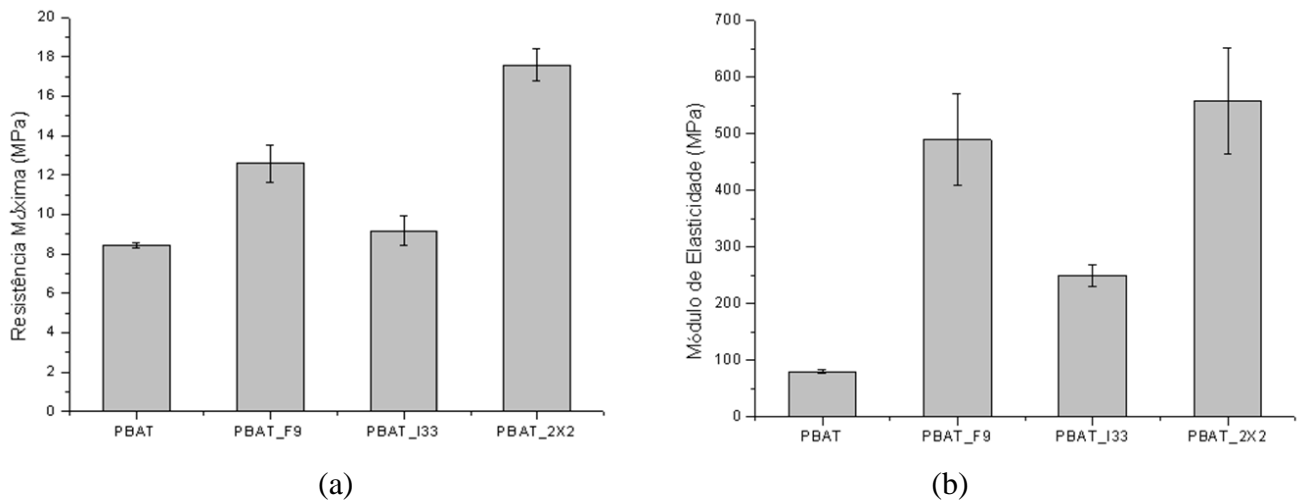
<b>Amostras</b>	<b>Resistência Máxima (MPa)</b>	<b>Deformação Máxima (MPa)</b>	<b>Módulo de Elasticidade (MPa)</b>
PBAT	8,43 ± 0,14 a	19,36 ± 1,64 a	79,84 ± 2,90 a
PBAT/Juta e algodão I33	9,12 ± 0,74 a	22,94 ± 4,35 a	154,99 ± 19,84 b
PBAT/Juta F9	12,60 ± 0,94 b	6,84 ± 0,70 b	489,10 ± 81,42 c
PBAT/Juta 2X2	17,58 ± 0,83 c	7,0 ± 0,81 b	558,50 ± 93,46 c

\*Pelo nível de significância de 5% pelo teste de Tukey, as médias seguidas de mesma letra não diferem entre si.

Para os resultados de resistência máxima e deformação máxima pode ser observado que de acordo com a análise estatística não existem diferenças significativas entre as amostras de PBAT e PBAT/Juta e algodão (I33). Já para as amostras de compósitos de PBAT/Juta (F9) e PBAT/Juta (2x2) os resultados de resistência máxima se diferem entre si, no sentido que há aumento desta propriedade nos compósitos. Os resultados de análise estatística comprovam que a inserção de tecidos contendo somente fibras de juta na matriz polimérica pode aumentar significativamente as propriedades de resistência e módulo em tração dos materiais moldados com o PBAT.

A partir da Figura 25 é possível analisar a diferenças entre as médias com índice de confiabilidade simultâneo de 95% de Tukey, comparando todas as amostras, onde as médias correspondentes serão significativamente diferentes quando no intervalo não contém zero.

A Figura 25 apresenta os gráficos de resistência e módulo de elasticidade, os quais revelam as diferenças de propriedades ao mudar o tipo de tecido de juta utilizado.



**Figura 25:** Apresentação gráfica dos resultados de: Resistência Máxima (a) e Módulo de Elasticidade (b).

**Fonte:** Autor

Pode ser observado (Figura 25) que o compósito contendo tecido de fibras de juta com algodão (I33) obteve um acréscimo de 8,65% na resistência máxima e 312,5% no módulo de elasticidade. Assim, o compósito de PBAT/Juta e Algodão (I33) apresentaram os menores valores de resistência à tração e módulo, porém apresentou maior valor de deformação máxima com 12,41%.

Esse comportamento pode estar ligado ao fato de que as fibras lignocelulósicas que contêm maiores quantidades de lignina, contribuem para resistência mecânica em tração dos compósitos. Já no caso do compósito de PBAT/Juta e Algodão (I33), que contém tecido de juta tramado com fibras de algodão, apresenta maior quantidade de celulose proveniente das fibras de algodão, ocasionando decréscimos nas propriedades de tração. A Figura 24 (c) mostra o comportamento das amostras de PBAT/Juta e Algodão (I33) após o ensaio de tração, onde é possível verificar fratura em 55,6% das amostras analisadas, sendo que os restantes das amostras sofreram trincas significativas, mostrando um comportamento mais frágil em relação às outras amostras dos outros compósitos e do PBAT.

Os valores obtidos podem ser relacionados ao fato de que esse tipo de tecido possui em sua trama fios de algodão, permitindo que melhorasse os resultados em relação ao PBAT por se tratar de um reforço, mas por outro lado demonstrou resultados inferiores comparados com os outros dois tipos de tecido de fibra de juta (F9 e 2x2) que não contém algodão na trama, apontando que a fibra de juta é mais resistente que a fibra de algodão. Essa afirmação pode ser constatada por BLEDZKI e GASSAN (1999) que estudaram o comportamento

mecânico de vários tipos de fibras naturais, entre elas destacam-se os valores para as fibras de juta e de algodão descritos na Tabela 16.

**Tabela 16:** Propriedades mecânicas de fibras naturais de juta e algodão.

<b>Fibra</b>	<b>Densidade (g/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Alongamento (%)</b>	<b>Resistência à Tração (MPa)</b>	<b>Módulo de Elasticidade (GPa)</b>
Juta	1,3	1,5 – 1,8	393 – 773	26,5
Algodão	1,5 – 1,6	7,0 – 8,0	287 – 597	5,5 – 12,6

**Fonte:** Adaptado de: BLEDZKI e GASSAN, 1999; MONTEIRO et. al., 2011.

**Fonte:** Autor

Os dois compósitos que estão com os tecidos de fibras com gramaturas maiores (PBAT/Juta F9 e PBAT/Juta 2x2) apresentaram aumentos significativos em suas propriedades de tração. A Figura 24 (b) revela que esses compósitos não sofreram rupturas nas amostras, mas é possível analisar que os compósitos de PBAT/Juta F9 apresentaram certo deslizamento da matriz entre o tecido de fibras de juta, evidenciando maior deformação em duas amostras. Os resultados para esses compósitos foram satisfatórios uma vez que os valores de limite de resistência a tração e módulo de elasticidade aumentaram 49,46 e 512,60% respectivamente.

Ao analisar as amostras ensaiadas dos compósitos moldados com os tecidos de fibras de juta 2x2 (Figura 24 (d)), foi verificado que não houve qualquer tipo de trinca ou fratura. Tal evento está relacionado ao fato de que esse tecido é mais reforçado justamente por se tratar de uma trama com maior gramatura, com dois filamentos de urdume e dois na trama, sendo mais densa e mais resistente. Seus resultados foram capazes de superar o dobro do valor adquirido pelo PBAT, obtendo um aumento de 108,54% na resistência à tração e de 599,52% no módulo de elasticidade.

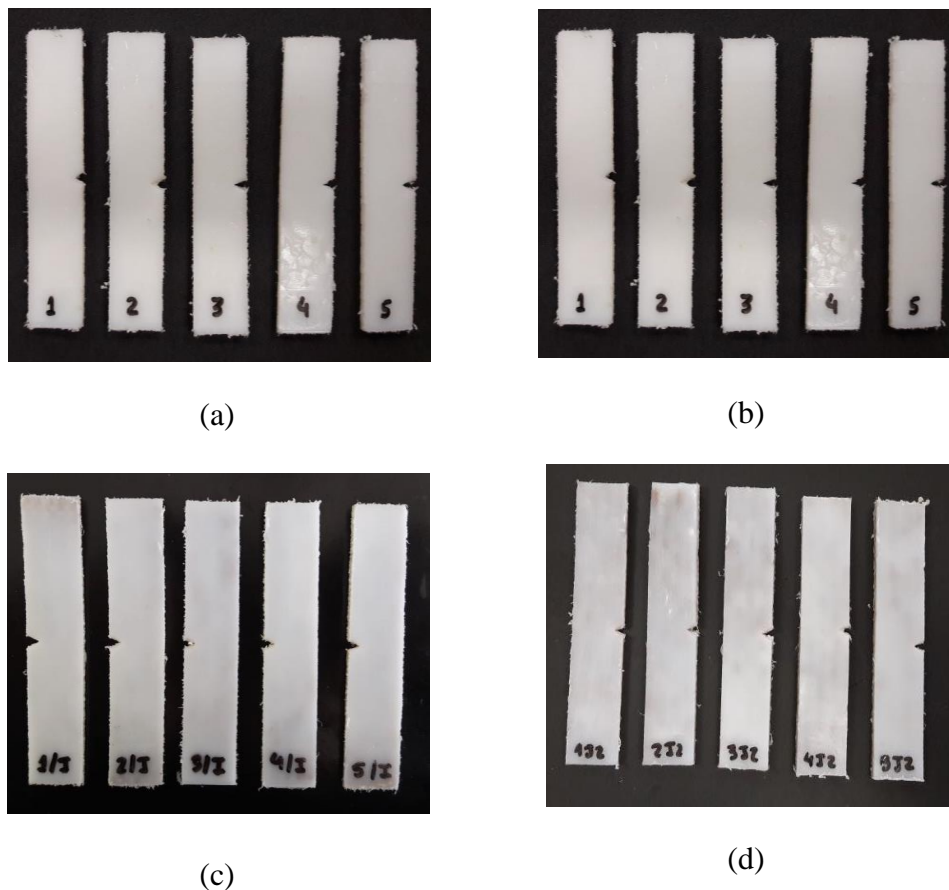
Pode-se assegurar que por se tratar de um reforço em forma de tecido, ocorreu com melhor transferência e propagação de esforços causados pelo ensaio de tração nas fibras orientadas, permitindo aumentos significativos na resistência e rigidez dos compósitos.

Considerando os resultados obtidos neste ensaio, podemos afirmar que ocorreu boa interação fibra/matriz, uma vez que nem o polímero e nem os tecidos de fibras de juta receberam qualquer tipo de tratamento químico antes da moldagem. A partir de análises complementares em próximos tópicos serão descritos possíveis eventos ocorridos na

moldagem que permitiram que houvesse bons resultados na interação na interface fibra/matriz.

## 5.8 Ensaio de Impacto

A Figura 26 a seguir apresenta as fotografias das amostras de PBAT e seus compósitos após os ensaios de impacto do tipo Izod, como é possível verificar nas Figuras todos os corpos de provas foram entalhados.



**Figura 26:** Fotografias das amostras após ensaio de impacto do tipo Izod: PBAT (a), PBAT/Juta F9 (b), PBAT/Juta I33 (c) e PBAT/Juta 2X2 (d).

**Fonte:** Autor

A Tabela 17 apresenta os resultado de energia absorvida e energia de impacto obtido para o ensaio de impacto Izod, que também foram analisadas estatisticamente pelo método de Tukey para verificação de diferença entre os conjuntos de amostras.

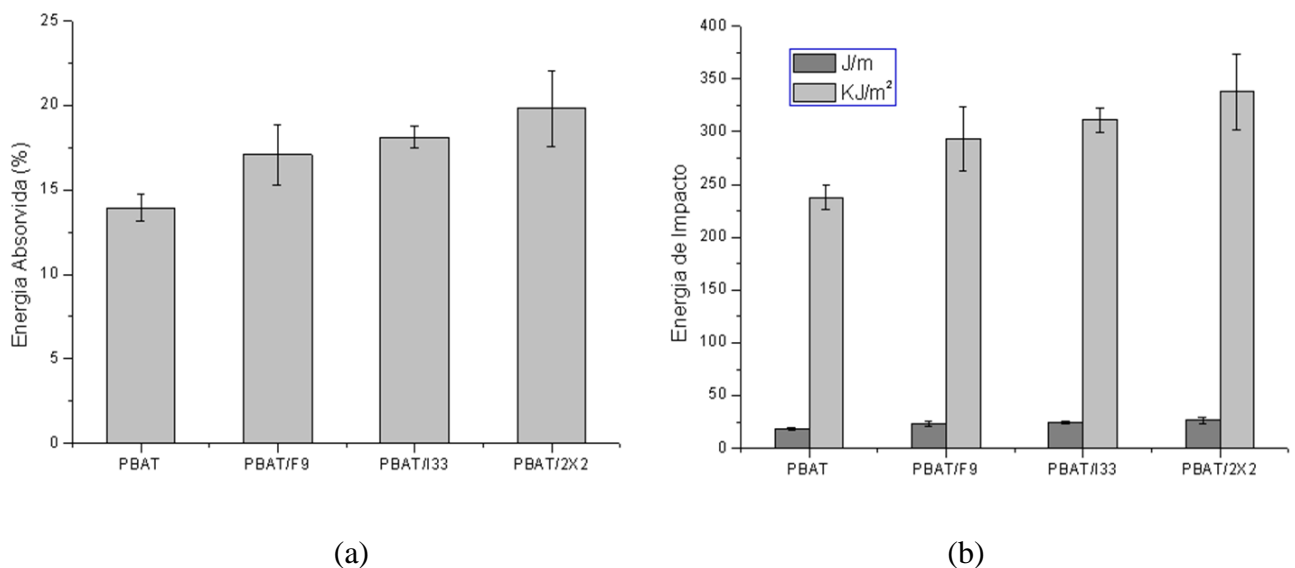
**Tabela 17:** Valores médios e seus respectivos desvios padrão para o ensaio de propriedades mecânicas de impacto, baseados em 5 corpos de prova para cada tipo de amostra.

Amostras	Energia Absorvida (%)	Energia de Impacto (J/m)
PBAT	13,93±0,79 a	18,70±0,90 a
PBAT/Juta F9	17,08±1,79 b	23,09±2,43 b
PBAT/Juta e Algodão I33	18,13±0,66 b	24,52±0,90 b
PBAT/JUTA 2X2	19,82±2,25 b	26,58±2,82 b

\*Pelo nível de significância de 5% pelo teste de Tukey, as médias seguidas de mesma letra não diferem entre si.

**Fonte:** Autor

A partir da análise estatística é possível verificar que tanto para os resultados de energia absorvida quanto para energia de impacto a diferença ocorre apenas entre os compósitos e o polímero PBAT sem reforço, ou seja, entre os compósitos não houve diferença significativa, o que permitiu resultados com apenas dois tipos de agrupamentos. A Figura 27 apresenta a diferença de médias entre todas as amostras.



**Figura 27:** Apresentação gráfica dos resultados de: Energia Absorvida (a) e Energia de Impacto em duas unidades de medidas (b).

**Fonte:** Autor

É possível observar na Figura 26, que o PBAT e os seus respectivos compósitos não sofreram qualquer tipo de trinca ou fratura, mesmo os corpos de prova tendo o entalhe, o que facilitaria a propagação da fratura. Outro fator importante a ser citado é que as amostras foram ensaiadas com o martelo de maior energia (5J). Durante os ensaios, os corpos de prova não se romperam, mas tiveram a capacidade de absorver as energias de impacto. Esse

comportamento revela que as amostras do polímero PBAT e respectivos compósitos apresentaram comportamentos similares aos de materiais elastoméricos, quando submetidos a impactos repentinos.

A partir dos resultados obtidos na Tabela 17, podemos verificar que independente do tipo de tecido de fibras de juta utilizado os valores de energia absorvida aumentaram consideravelmente comparados com o PBAT. Tal comportamento é explicado pelo fato de que a inclusão do reforço na matriz permite a transferência de carga, ou seja, parte da energia é transferida para o reforço, resultando em um material com melhores propriedades de impacto.

Os valores obtidos para o compósito PBAT/Juta F9 resultou em um aumento de 22,61% na absorção de energia e 23,47% em energia de impacto (J/m); mesmo obtendo um acréscimo considerável, esses valores foram os menores comparados aos outros compósitos. Tal comportamento pode estar associado ao fato de que a trama desse tipo de tecido de fibra de juta é mais aberta e mecanicamente menos resistente, resultando em um compósito com menor capacidade de absorver energias de impacto, quando comparado com os outros compósitos moldados.

Para o PBAT/Juta e Algodão I33 o aumento de energia absorvida e energia de impacto (J/m) foram respectivamente 30,15% e 31,12%. Esse tipo de tecido utilizado apresenta arranjo trama e urdume mais fechado do que o tecido de juta F9, proporcionando maior concentração de reforço no meio do corpo de prova e, conseqüentemente, maior capacidade de absorção de energia e resistência ao impacto do compósito.

Verificando os valores obtidos para o PBAT/Juta 2x2, identificamos aumentos significativos, sendo 42,28% de absorção de energia e 42,14% de energia de impacto (J/m). No caso deste tipo de tecido que apresentam em sua trama dois fios de juta e em seu urdume também dois fios de juta entrelaçados entre si, resulta em um tecido ainda mais fechado e resistente com maior capacidade de absorver energia produzida pelo ensaio de impacto.

Portanto é possível afirmar que independente dos tipos de tecidos utilizados ocorreu aumentos significativos nos resultados de impacto Izod dos compósitos. O comportamento de todas as amostras foi satisfatório, uma vez que elas suportaram resistência ao impacto considerável, sem sofrer trincas ou fraturas, e ainda se mantiveram intactas.



## 5.9 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

### 5.9.1 Tecidos de Fibras de Juta

As figuras 28, 29 e 30 apresentam as micrografias dos tecidos de fibras de juta F9, juta e algodão (I33) e juta 2x2, respectivamente. Devido à limitação do equipamento utilizado não foi possível realizar aumentos maiores, para uma melhor nitidez. Porém com os aumentos em que a análise foi realizada é possível verificar o entrelaçamento de cada tecido, sendo possível visualizar espaços que permitiram o escoamento da matriz polimérica sobre as fibras do tecido.

Como já descrito anteriormente não foi realizado nenhum processo de tratamento das fibras que ocasionassem aumento nas suas rugosidades. Portanto, as imagens revelam as fibras em suas formas originais. A figura 29 apresenta a diferença entre as fibras de juta e algodão, onde se pode observar que as fibras de algodão são mais finas e mais fechadas na trama do tecido.



(a)



(b)

**Figura 28:** MEV do tecido de fibras de Juta F9 com aumentos de 15x (a) e 60x (b)

**Fonte:** Autor



PD1 2018/12/21 13:09 F D10.0 x15 5 mm

(a)

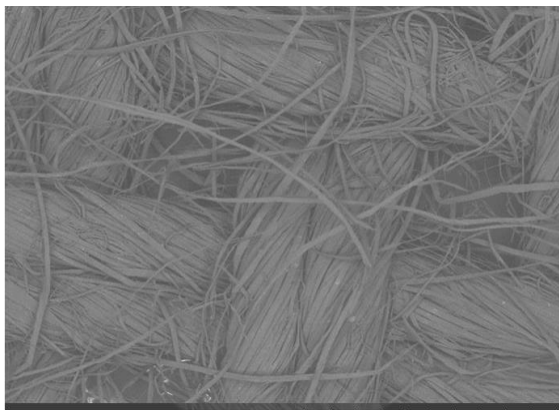


PD1 2018/12/21 13:16 F D8.9 x60 1 mm

(b)

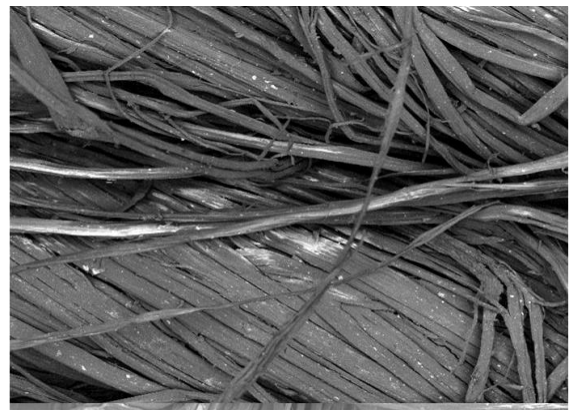
**Figura 29:** MEV do tecido de fibras de Juta e Algodão (I33) com aumentos de 15x (a) e 60x (b).

**Fonte:** Autor



PD1 2018/12/21 12:09 F D11.0 x15 5 mm

(a)



PD1 2018/12/21 12:35 F D10.0 x60 1 mm

(b)

**Figura 30:** MEV do tecido de fibras de Juta 2x2 com aumentos de 15x (a) e 60x (b).

**Fonte:** Autor

### 5.9.2 Compósitos

As Figuras 31, 32 e 33 apresentam as micrografias da superfície lateral em diferentes ampliações dos compósitos de PBAT com os diferentes tipos de tecido de fibras de juta. No caso, não foi possível fazer a análise de fratura, pois esses compósitos não apresentaram rompimento nos ensaios mecânicos. No entanto, analisando a lateral dos corpos de prova destes compósitos, nestas imagens por MEV é possível avaliar a interface fibra/matriz e ainda verificar como a fibra está disposta no compósito. Observamos que o tecido bidirecional está envolvido pela matriz polimérica, em orientações paralelas e perpendiculares.

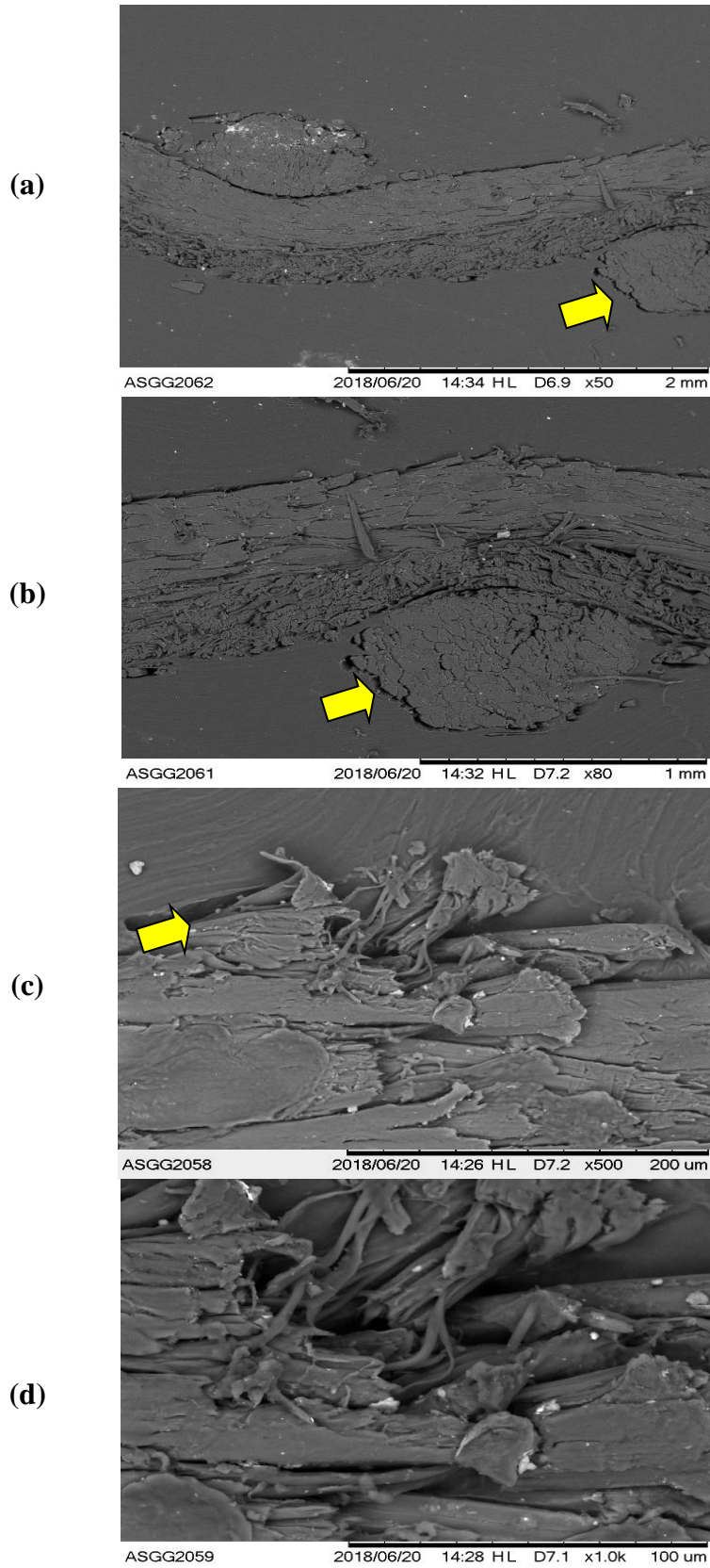
A adesão interfacial é um fator importante no comportamento dos compósitos, pois a melhora de propriedades, principalmente, mecânicas tende a aumentar se houver de fato adesão entre as duas fases (fibra/matriz). Os mecanismos de adesão interfacial entre os componentes podem ser por ligações de hidrogênio, Van Der Waals ou ligações covalentes (PEREIRA, 2017). Nas imagens das Figuras (31, 32 e 33) pode-se notar que a interação interfacial foi efetiva, tal característica pode ser relacionada aos resultados obtidos nos ensaios mecânicos de tração e de impacto, proporcionando aumento nos valores de resistência e absorção de energia.

Também é possível identificar nestas Figuras (31, 32 e 33) a fase dispersa e a fase contínua dos compósitos, assim como é possível identificar exatamente o entrelaçamento (trama e urdume) do tecido de fibras de juta na matriz.

A partir das micrografias é possível verificar que não houve qualquer tipo de defeito que pudesse interferir na adesão interfacial fibras/matriz, como o aparecimento de bolhas, por exemplo. Isso revela, também, que a técnica de moldagem com os parâmetros utilizados obteve resultados satisfatórios.

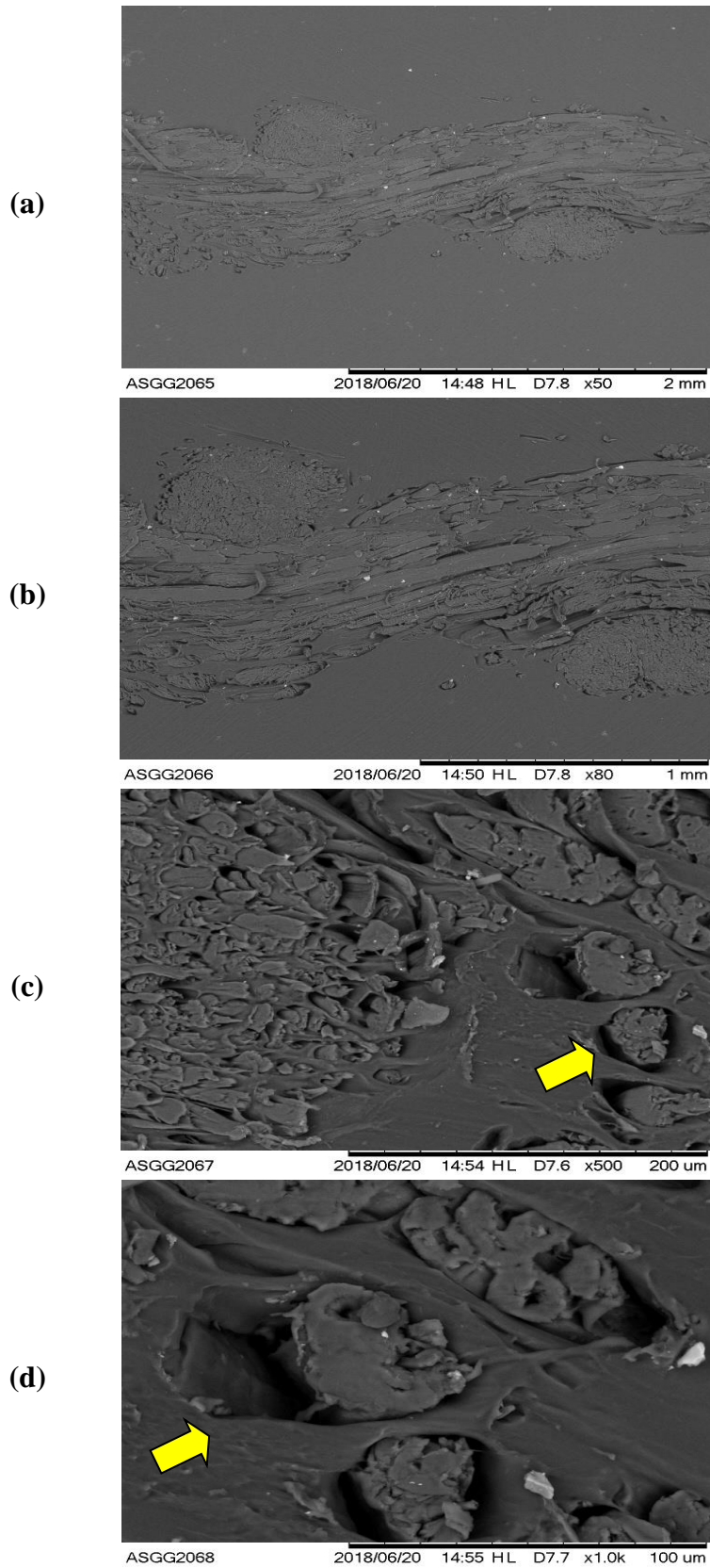
Assim, os resultados das imagens de MEV corroboram com os resultados mecânicos, pois tal análise mostra a efetividade da adesão de fibra/matriz, permitindo que os resultados dos compósitos superassem os valores obtidos com o polímero PBAT sem reforço.

É possível observar também que os tecidos de fibras de juta ocupam um volume considerável na amostra, mostrando que as fibras possuem uma espessura significativa quando estão dispostas nos compósitos, onde pode ser visto nas indicações das setas amarelas.



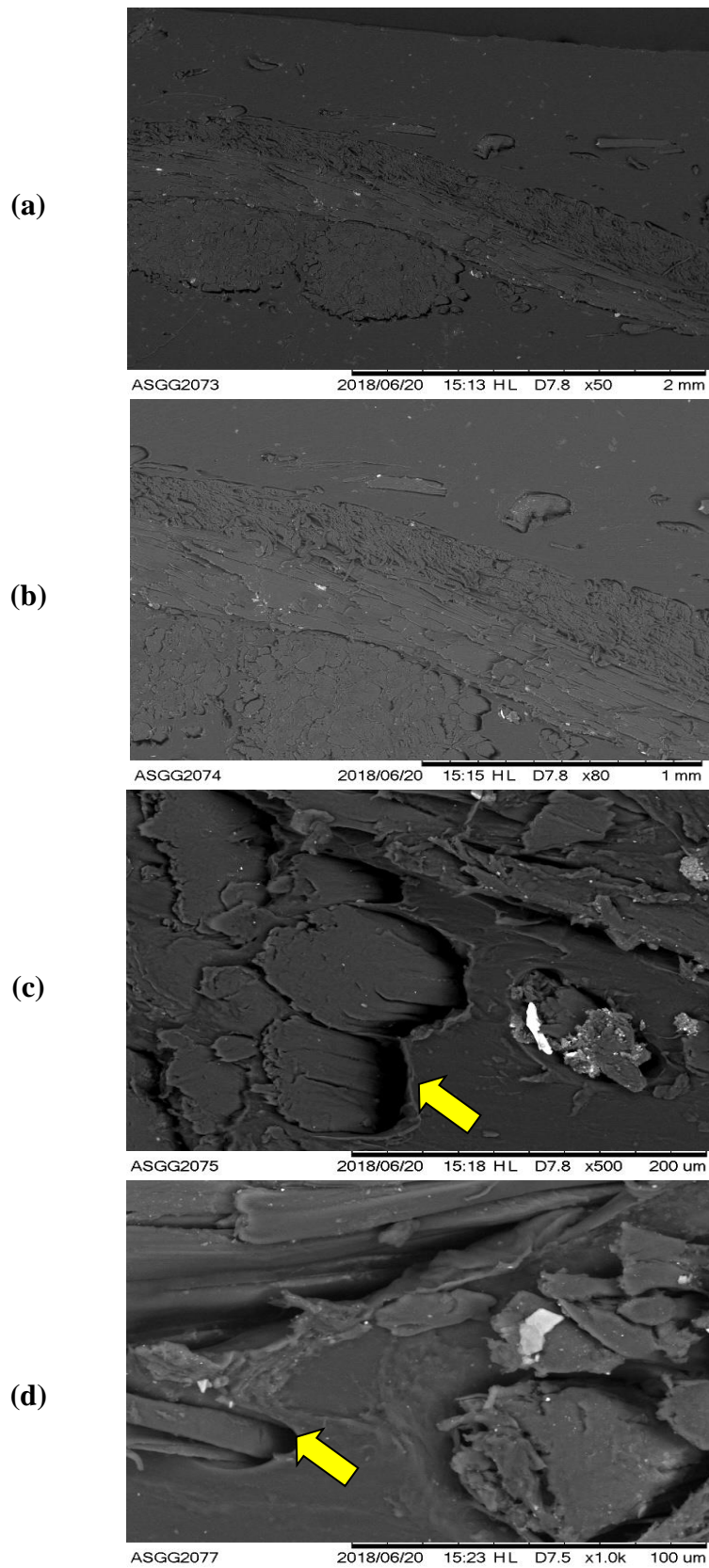
**Figura 31:** Micrografias dos corpos de prova do ensaio de impacto, interface fibra/matriz do compósito de PBAT\_JUTA\_F9 com ampliações de: 50X (a), 80X (b), 500X (c) e 1000X (d).

**Fonte:** Autor



**Figura 32:** Micrografias dos corpos de prova do ensaio de impacto, interface fibra/matriz do compósito de PBAT\_JUTA\_I33 com ampliações de: 50X (a), 80X (b), 500X (c) e 1000X (d).

**Fonte:** Autor



**Figura 33:** Micrografias dos corpos de prova do ensaio de impacto, interface fibra/matriz do compósito de PBAT\_JUTA\_2X2 com ampliações de: 50X (a), 80X (b), 500X (c) e 1000X (d).

## 6 CONCLUSÕES

A partir da proposta de desenvolvimento de compósitos poliméricos com reforço de fibras vegetais, foi possível moldar compósitos de matriz polimérica de PBAT com diferentes tipos de tecidos de fibras de juta, através do processo de moldagem por compressão a quente.

Os resultados das análises de Termogravimetria (TG) dos compósitos apresentaram uma pequena redução de temperatura com relação ao polímero sem fibra; no entanto, essa redução não prejudica as propriedades térmicas dos compósitos. Por outro lado, a incorporação das fibras de juta na matriz polimérica de PBAT ocasionou melhoras significativas nas propriedades mecânicas de tração e impacto, sendo um fator atrativo para aplicações dos compósitos em peças ou componentes que sejam mais solicitados nestas propriedades.

Foi observada, por análise de MEV, a ocorrência de adesão na interface fibras/matriz, pois a fase contínua (matriz) envolveu a fase dispersa (reforço de fibras) nos compósitos. Em relação à análise de DRX foi possível verificar que não houve diferença de picos cristalinos entre os compósitos e o polímero sem fibra, mas foi possível notar diferenças de intensidades entre as amostras. A partir da análise estatística realizada para as medidas de ângulo de contato foi possível verificar que, apesar das pequenas diferenças dos ângulos obtidos entre as amostras, todas obtiveram resultados superiores a  $90^\circ$ , o que as caracterizaram como hidrofóbicas.

O resultado de DMTA, no modo de flexão, permitiu observar diferenças pouco significativas nos valores das temperaturas de transição vítrea ( $T_g$ 's) do PBAT e compósitos, apresentando valores próximos a  $-20^\circ\text{C}$ . Portanto, o desenvolvimento dos compósitos de PBAT reforçados com tecidos de fibras de juta ocasionou resultados satisfatórios, principalmente, em relação às propriedades mecânicas e térmicas.

Em geral, a introdução de fibras de juta na matriz polimérica de PBAT apresentou melhoras, principalmente mecânicas, comparadas com o polímero sem fibras. No entanto, dentre os compósitos moldados, o compósito de PBAT/Juta 2x2 obteve os melhores nos ensaios mecânicos, comportamento desejável para um material mecanicamente resistente.

Assim, as combinações de um polímero biodegradável comercial com tecidos de fibras de juta possibilitaram a obtenção de compósitos com adequadas propriedades para algumas áreas de aplicação, além de manter as vantagens das possibilidades de reciclagem e biodegradabilidade.

## **7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Avaliação de testes de biodegradação nos compósitos, para posterior comparação com o PBAT, o qual já tem certificações de biodegradabilidade.
- Preparação de compósitos com outros tipos de fibras vegetais como: sisal, coco e rami, para uso de comparação de propriedades.
- Variação nas camadas dos tecidos como, por exemplo, o uso de duas ou mais camadas nos compósitos.



## 8 REFERÊNCIAS

ABIPLAST. **Indústria Brasileira de Transformação do Material Plástico**. Perfil 2017. Associação Brasileira da Indústria do Plástico. 2017. Disponível em: <<http://www.abiplast.org.br/site/publicacoes>>. Acessado em 30 de julho de 2018.

ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2015**. p. 92, 2016. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/>. Acessado em: 02 de agosto de 2018.

AL-ITRY, R.; LAMNAWAR, K.; MAAZOUZA, A. Improvement of thermal stability, rheological and mechanical properties of PLA, PBAT and their blends by reactive extrusion with functionalized epoxy. **Polymer Degradation and Stability**, v. 97, p. 1898-1914, 2012.

ALMEIDA, C. B. **Características estruturais e funcionais de biofilmes de zeína e óleos vegetais comestíveis**. 2010. 124f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência de Alimentos) – Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, “Júlio de Mesquita Filho”, São José do Rio Preto, 2010.

AL-SALEM, S. M. et al. A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste (PSW). **Journal of Environmental Management**, v. 197, n. 1408, p. 177–198, 2017.

ASTM – American Society for Testing Material. **ASTM D256** Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics. Pennsylvania, 2010.

ASTM – American Society for Testing Material. **ASTM D3039** Standard Test Methods for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. Pennsylvania, 2008.

AVÉROUS, L.; POLLET, E.; Environmental silicate nano-biocomposites. Green Energy and Technology. **Springer-Verlag**, London 2012, 12.

BASF. Biodegradable and Compostable Packaging solutions with ecoflex®. **Disponível em: <http://product-finder.basf.com>. Acesso em: 23 de julho de 2018.**

BELGACEM, M. N.; GANDINI A., **Polymers from renewable resources, in Comprehensive Polymer Science, First Supplement**. Eds.: Aggarwal S.L. and Russo S., Pergamon Press, Oxford, 2008, pp. 528–573.

BEVITORI, A. B., SILVA, I.L.A., LOPES, F.P.D., MONTEIRO. Diameter dependence of tensile strength by Weibull analysis: Part II jute fiber, **Revista Matéria.**, v. 15(2), p. 125-131. 2010.

BLEDZKI, A.; GASSAN, J. Composites reinforced with cellulose based fibers. **Prog. Polym. Sci**, v. 24, p. 221–274, 1999.

BRITO, G. F. et al. Biopolímeros, Polímeros Biodegradáveis e Polímeros Verdes. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**. v. 2, p. 127–139, 2011.

CALLISTER, JR.; W.D.; RETHWISCH, D.G. Materials science and engineering: An Introduction. 9 ed. **Hoboken: Wiley**. 2014.

CANEVAROLO JR, S. V. **Técnicas de Caracterização de Polímeros**. Artliber, São Paulo. 2007.

CAROLINO, A. S. **Estimativa do Percentual de Cristalinidade de Polímeros Semicristalinos Derivados da Anilina Através dos Padrões de Difração de Raios-X**. 2017. 88f. Dissertação (Mestrado em Física) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2017.

CASTANHAL. **A Juta**. Disponível em: <<http://www.castanhal.com.br/a-juta.html>>. Acesso em: 20 de julho de 18.

CÉLINO, A., FRÉOUR, S., JACQUEMIN, F., CASARI, P. The hygroscopic behavior of plant fibers: a review. **Frontiers in chemistry**, v. 1, p. 1-12, 2014.

CHAPPLE, S.; ANANDJIWALA, R. Flammability of natural fiber-reinforced composites and strategies for fire retardancy: A review. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, v. 23, n. 6, p. 871–893, 2010.

CHIENG, B. et al. Isolation and Characterization of Cellulose Nanocrystals from Oil Palm Mesocarp Fiber. **Polymers**, v. 9, n. 8, p. 355, 2017.

CHIVRAC, F.; KADLECOVÁ, Z.; POLLET, E.; AVÉROUS, L.; Aromatic Copolyester-based Nano-biocomposites: Elaboration, Structural Characterization and Properties. **J. Polym. Environ.** v.14(4), 393 - 401. 2006.

CORTES, M. S. **Características estruturais e físicas de material biodegradável produzido a base de zeína e fibras de milho e bananeira**. 2015. 99f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência de Alimentos) - Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, São José do Rio Preto, 2015.

DIAS, P. D. P. **Blendas Biodegradáveis De Poli (Ácido Láctico) E Poli (ε-Caprolactona) Tenacificadas Por Compatibilização Não-Reativa – Influência Do Teor De Compatibilizante**. 2016. 119f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo. 2016.

DING, Y. et al. PLA-PBAT-PLA tri-block copolymers: Effective compatibilizers for promotion of the mechanical and rheological properties of PLA/PBAT blends. **Polymer Degradation and Stability**, v. 147, n. November 2017, p. 41–48, 2018.

DITTENBER, D. B.; GANGARAO, H. V. S. Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 43, n. 8, p. 1419–1429, 2012.

FALCÃO, G. A. M. et al. Influência do Teor de Carga em Filmes Nanocompósitos PBAT/Argila Organofílica. **Congresso Brasileiro de Polímeros**. Águas de Lindóia, SP. Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), 2017.

FAO. **Jute, kenaf, sisal, abaca, coir and allied fibres** - Statistical Bulletin 2016. **Fao**, p. 1–40, 2017. Acesso em: 20 de julho de 2018.

FORTINI, A.; MAZZANTI, V. Combined effect of water uptake and temperature on wood polymer composites. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 135, n. 35, p. 46674, 2018.

FREITAS, R. M. **Estudo das Propriedades Dinâmico Mecânicas e de Biodegradação de Acetatos de Celulose com Diferentes Graus de Substituição**. 2016. 81f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, São Paulo, 2016.

FUKUSHIMA, K., WU, M.-H., BOCCHINI, S., RASYIDA, A. & YANG, M.-C. PBAT based nanocomposites for medical and industrial applications. **Materials Science and Engineering**, v. 32, 1331–1351. 2012.

GIBSON, L. J. The hierarchical structure and mechanics of plant materials. **Journal of the Royal Society Interface**, p. rsif20120341, 2012.

GIRDTHEP, S. et al. Physico-chemical characterization of natural lake pigments obtained from *Caesalpinia Sappan* Linn. and their composite films for poly (lactic acid)-based packaging materials. **Dyes and Pigments**, v. 157, p. 27–39, 2018.

GONZALES, D. **Obtenção de Celulose Whisker a partir de Resíduo Têxtil**. 2013. 26f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Química) – Universidade Federal do ABC, Santo André, São Paulo. 2013.

GU, L.; OZBAKKALOGLU, T. Use of recycled plastics in concrete: A critical review. **Waste Management**, v. 51, p. 19–42, 2016.

GUIMARÃES, B. M. G. **Estudo das características físico-químicas de fibras têxteis vegetais de espécies de Malvaceae**. 2014. 167f. Dissertação (Mestrado em Materiais e Processos Têxteis) - Universidade de São Paulo Escola de Artes, Ciências e Humanidades Programa de Pós-Graduação em Têxtil e Moda, São Paulo. 2014.

GUO, G. et al. Structure and property of biodegradable soy protein isolate/PBAT blends. **Industrial Crops and Products**, v. 74, p. 731–736, 2015.

HALASA, F. A. et al. Relationship between interchain spacing of amorphous polymer and blend miscibility as determined by wide-angle X-ray scattering. **Journal of Applied Polymer Science**, New York, v. 43, p. 183-190, 1991

HASAN, M. H.; MOLLIK, M. S.; RASHID, M. M. Effect of nanoclay on thermal behavior of jute reinforced composite. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 94, n. 5–8, p. 1863–1871, 2018.

HOSOKAWA, M. **Aproveitamento do Copolímero ABS Reciclado na Moldagem de Compósitos com Fibras de Juta e Avaliação de Propriedades**. 2017. 85f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Universidade Federal de São Carlos campus Sorocaba, Sorocaba, São Paulo. 2017.

HOSOKAWA, M. N. et al. Polyhydroxybutyrate composites with random mats of sisal and coconut fibers. **Materials Research**, v. 20, n. 1, p. 279–290, 2017.

IDOWU, A.; BOESL, B.; AGARWAL, A. 3D graphene foam-reinforced polymer composites – A review. **Carbon**, v. 135. p. 54 - 71, 2018.

JONH, M.J., FRANCIS, B., VARUGHESE, K.T., THOMAS, S. “Effect of chemical modification on properties of hybrid fiber biocomposites”. **Composites Part A**, 2007.

KALIA, S.; KAITH, B.S.; KAUR, I. Cellulose Fibers: Bio- and NanoPolymer Composites. 1a ed. **New York: Springer**. 2011.

KUBO, S., KADLA, J. F. Hydrogen bonding in lignin: a Fourier transform infrared model compound study. **Biomacromolecules**, v. 6, n. 5, p. 2815-2821, 2005.

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

LAURICHESSE, S., VÉROUS, L. Chemical modification of lignins: towards biobased polymers. **Progress in Polymer Science**, v. 39, n. 7, p. 1266-1290, 2014.

LE TROEDEC, M., SEDAN, D., PEYRATOUT, C., BONNET, J. P., SMITH, A., GUINEBRETIERE, R., GLOAGUEN, V., KRAUSZ, P. Influence of various chemical treatments on the composition and structure of hemp fibres. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 39, n. 3, p. 514-522, 2008.

LI, G.; SHANKAR, S.; RHIM, J.-W.; OH, B.-Y.; Effects of preparation method on properties of poly(butylene adipate-co-terephthalate) films. **Food Sci. Biotechnol.** v. 24(5), p. 1679 - 1685, 2015.

LI, W. C.; TSE, H. F.; FOK, L. Plastic waste in the marine environment: A review of sources, occurrence and effects. **Science of the Total Environment**, v. 566–567, p. 333–349, 2016.

LI, X. et al. Applied Clay Science Effect of surface property of halloysite on the crystallization behavior of PBAT. **Applied Clay Science**, v. 157, p. 218-256, 2018.

LIMA, A. C. **Caracterização e Propriedades de Compósitos de Tecido de Juta Reforçando Matriz de Polietileno Reciclado**. 2009.109f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campo dos Goytacazes, Rio de Janeiro. 2009.

LIU, Q. et al. Interactions of biomass components during pyrolysis: A TG-FTIR study. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 90, n. 2, p. 213–218, 2011.

LIYANA, A.; SIS, M.; AZOWA, N. Effect of ( 3-aminopropyl ) trimethoxysilane on mechanical properties of PLA / PBAT blend reinforced kenaf fiber. **Iran Polymer** p. 101–108, 2013.

LORANDI, N. P.; CIOFFI, M. O. H.; JR, H. O. Análise Dinâmico-Mecânica de Materiais Compósitos Poliméricos. **Sientia Cum Industria**, v. 4, n.13, p. 48-60, 2016.

LUCHESE, C. L. et al. Impact of the starch source on the physicochemical properties and biodegradability of different starch-based films. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 135, n. 33, p. 1–11, 2018.

MANNAN, K.M., TALUKDER, M.A.I. “Characterization of raw, delignified and bleached jute fibres by study of absorption of moisture and some mechanical properties”. **Polymer**, v.38, n.10, pp. 2493-2500, 1997.

MARINELLI, A. L.; MONTEIRO, M. R.; AMBRÓSIO, J. D., et al. Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras vegetais naturais da biodiversidade: uma contribuição para a sustentabilidade amazônica. **Polímeros**, v. 18, n. 2, p. 92–99, 2008.

MILEO, P. C. **Estudo do uso de ligninas como agente compatibilizante em compósitos de polipropileno reforçados com celulose de bagaço e palha de cana-de-açúcar**. 2015. 201f. Tese (Doutorado em Biotecnologia Industrial na Área de Concentração: Conversão de Biomassa.) – Universidade de São Paulo, Lorena, São Paulo. 2015.

MOHANTY, A. K.; MISRA, M.; DRZAL, L. T.; SELKE, S. E.; HARTE, B. R.; HINRICHSSEN, G. Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites: An Introduction. **Taylor & Francis**. Boca Raton. p. 885. 2005.

MONTEIRO, S.N.; LOPES, F.P.D.; BARBOSA, A.P.B.; BEVITORI, A.B.; DA SILVA, I.L.A.; DA COSTA, L.L. Natural Lignocelulosic Fibers as Engineering Materials – An Overview. **Metallurgical and Materials Transactions A**, Vol. 42A, p. 2963-2974. 2011.

MORENO, D. D. P.; HIRAYAMA, D.; SARON, C. Accelerated aging of pine wood waste/recycled LDPE composite. **Polymer Degradation and Stability**, v. 149, n. January, p. 39–44, 2018.

MORENO, R. M. B. et al. Monitoramento e avaliação da borracha natural crua utilizando a técnica de análise térmica dinâmico-mecânica. **Polímeros**, v. 16, n. 3, p. 235–238, 2006.

MOTHÉ, L. M. C. Q. **Formulação e caracterização de materiais alternativos a partir do polipropileno pós-consumo modificado e fibra de coco**. 2016. 76f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia) - Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campo dos Goytacazes, Rio de Janeiro. 2016.

MOUSTAFA, H. et al. Utilization of torrefied coffee grounds as reinforcing agent to produce high-quality biodegradable PBAT composites for food packaging applications. **ACS Sustainable Chemistry and Engineering**, v. 5, n. 2, p. 1906–1916, 2017.

MÜLHAUPT, R. Green Polymer Chemistry and Bio-based Plastics: Dreams and Reality. **Macromolecular Chemistry and Physics**, v. 214, 159–174 p., 2013.

MUROI, F. et al. Characterization of a poly(butylene adipate-co-terephthalate) hydrolase from the aerobic mesophilic bacterium *Bacillus pumilus*. **Polymer Degradation and Stability**, v. 137, p. 11–22, 2017.

MUTHURAJ, R.; MISRA, M.; MOHANTY, A. K. Hydrolytic degradation of biodegradable polyesters under simulated environmental conditions. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 132, n. 27, p. 1–13, 2015.

NOFAR, M. et al. Mechanical and bead foaming behavior of PLA-PBAT and PLA-PBSA blends with different morphologies. **European Polymer Journal**, v. 90, n. March, p. 231–244, 2017.

NURAJE, N.; KHAN, W. S.; LEI, Y.; CEYLAN, M.; ASMATULU, R.; Superhydrophobic electrospun nanofibers. **Journal of Materials Chemistry A**. v. 1(6), 1929. 2013.

OCHOA-VILLARREAL, M., AISPURRO-HERNÁNDEZ, E., VARGAS-ARISPURO, I., MARTÍNEZ-TÉLLEZ, M. Á. Plant cell wall polymers: function, structure and biological activity of their derivatives. **Intech Open**. v.4, p. 24, 2012.

OTONI, C. G. et al. Optimized and scaled-up production of cellulose-reinforced biodegradable composite films made up of carrot processing waste. **Industrial Crops and Products**, v. 121, p. 66–72, 2018.

PAN, H. et al. The effect of MDI on the structure and mechanical properties of poly(lactic acid) and poly(butylene adipate-co-butylene terephthalate) blends. **RSC Advances**, v. 8, n. 9, p. 4610-4623, 2018.

PAPPU, A.; PATIL, V.; JAIN, S.; MAHIDRAKAR, A.; HAQUE, R.; THAKUR, V.K. Advances in industrial prospective cellulosic macromolecules enriched banana biofibre resources: A review. **Int. J. Biol. Macromol.** v. 79, p. 449-458. 2015.

PEREIRA, A. C. **Propriedades e Estrutura de Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras e Tecido de Figue**. 2017. 67 f. Dissertação (Mestrado em CIÊNCIAS DOS MATERIAIS) - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2017.

PESQUISADOR. Disponível em <  
[http://www.pesquisador.net.br/noticias.php?operacao=mostrar\\_info&pagina=1&ano=2009&cod\\_info=661](http://www.pesquisador.net.br/noticias.php?operacao=mostrar_info&pagina=1&ano=2009&cod_info=661)>. Acesso em 21 de julho de 2018.

PETRECHEN, G. P. **Caracterização dos materiais lignocelulósicos da castanha do brasil (bertholletia excelsa), preparação e caracterização de seus compósitos com polipropileno**. 2017. 391f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. 2017.

PICKERING, K. L.; EFENDY, M. G. A.; LE, T. M. A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Special Issue on Biocomposites**. V. 83, p. 98-112. 2016.

PIRES, E. N. **Efeito do tratamento de superfície em fibras de juta no comportamento mecânico de compósitos de matriz epóxi**. 2009. 73f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2009.

PIVA, A. C. **Caracterização De Aditivos Em Filmes Flexíveis De Polietileno**. 2014. 74f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Santa Catarina, Criciúma. 2014.

POLETTO, M., ORNAGHI, H. L., ZATTERA, A. J. Native Cellulose: Structure, Characterization and Thermal Properties. **Materials**, v. 7, n. 9, p. 6105-6119, 2014.

RAFSANJANI, A., STIEFEL, M., JEFIMOV, K., MOKSO, R., DEROME, D., CARMELIET, J. Hygroscopic swelling and shrinkage of latewood cell wall micropillars reveal ultrastructural anisotropy. **Journal of The Royal Society Interface**, v. 11, n. 95, p. 20140126, 2014.

REN, P. G. et al. Biodegradable graphene oxide nanosheets/poly-(butylene adipate-co-terephthalate) nanocomposite film with enhanced gas and water vapor barrier properties. **Polymer Testing**, v. 58, p. 173–180, 2017.

ROSA, A. **Estudo da incorporação da fibra de juta como modificadora nas propriedades mecânicas do polipropileno reciclado**. 2009.76f. Dissertação (Mestrado Profissional de Engenharia de Materiais) – Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, São Paulo, 2009.

ROY, K. et al. Exploring the synergistic effect of short jute fiber and nanoclay on the mechanical, dynamic mechanical and thermal properties of natural rubber composites. **Polymer Testing**, v.67, p. 487-493, 2018.

SALEEM, J.; ADIL RIAZ, M.; GORDON, M. Oil sorbents from plastic wastes and polymers: A review. **Journal of Hazardous Materials**, v. 341, p. 424–437, nov. 2018.

SAMAL, S. Thermal behavior of flax and jute reinforced in matrix acrylic composite. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 131, n. 2, p. 1035–1040, 2017.

SANGRONIZ, A. et al. Blends of biodegradable poly(butylene adipate-co-terephthalate) with poly(hydroxi amino ether) for packaging applications: Miscibility, rheology and transport properties. **European Polymer Journal**, v. 105, n. May, p. 348–358, 2018.

SANTOS, F. A., QUEIRÓZ, J. H., COLODETTE, J. L., FERNANDES, S. A., GUIMARÃES, V. M., REZENDE, S. T. Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol. **Química Nova**, v. 35, n. 5, p. 1004-1010, 2012.

SANTOS, M. R. **Efeito do tratamento com ciclos de molhagem e Secagem na composição química das fibras vegetais de sisal e juta com perspectiva para utilização como reforço em compósitos cimentícios**. 2015. 102f. Dissertação (Mestrado em Pós-Graduação em Química, Instituto de Química) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

SHELLER, H. V., ULVSKOV, P. Hemicelluloses. **Plant Biology**, v. 61, p. 263, 2010.

SCHWANNINGER, M., RODRIGUES, J. C., PEREIRA, H., & HINTERSTOISSER, B. Effects of short-time vibratory ball milling on the shape of FT-IR spectra of wood and cellulose. **Vibrational Spectroscopy**, v. 36, n. 1, p. 23-40, 2004.

SHANKAR, S.; RHIM, J. W. Tocopherol-mediated synthesis of silver nanoparticles and preparation of antimicrobial PBAT/silver nanoparticles composite films. **LWT - Food Science and Technology**, v. 72, p. 149–156, 2016.

SILLS, D. L., GOSSETT, J. M. Using FTIR to predict saccharification from enzymatic hydrolysis of alkali-pretreated biomasses. **Biotechnology and bioengineering**, v. 109, n. 2, p. 353-362, 2012.

SILVA, I. L. A. **Propriedades e estrutura de compósitos Poliméricos reforçados com fibras contínuas de juta**. 2014. 110f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia) - Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campo dos Goytacazes, Rio de Janeiro. 2014.

SILVA, R. S. **Termo-Estabilização Da Blenda Pla / Pbat**. 2016. 83f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia de Materiais) - Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, São Paulo. 2016.

SILVA, R. V. **Compósito de Resina Poliuretano Derivada de Óleo de Mamona e Fibras Vegetais**. 2003. 139f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

SILVA, V.F. **Avaliação de parâmetros experimentais do fracionamento do bagaço de cana-de-açúcar na obtenção de etanol celulósico e lignina**. 2014. 145f. Tese (Doutorado em Biotecnologia Industrial na área de Microbiologia Aplicada)- USP – Escola de Engenharia de Lorena, São Paulo. 2014.

SILVERSTEIN, R.; WEBSTER, F. Spectrometric Identification of Organic Compounds, 1998. Disponível em: <<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Spectrometric+identification+of+organic+compounds#0>>

SIMONASSI, N. T. **Estudo da Resistência a Tração e Impacto Izod de Compósitos de Matriz Poliéster Reforçados com Fibras Naturais de Curauá de Alto Desempenho**. 2017. 79f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2017.

SUO, H. et al. Developments in compartmentalized bimetallic transition metal ethylene polymerization catalysts. **Coordination Chemistry Reviews**, v. 372, p. 101–116, 2018

TAVARES, L. B. et al. PBAT/kraft lignin blend in flexible laminated food packaging: Peeling resistance and thermal degradability. **Polymer Testing**, v. 67, n. January, p. 169–176, 2018.

TEJADO, A., PENA, C., LABIDI, J., ECHEVERRIA, J. M., MONDRAGON, I. Physico-chemical characterization of lignins from different sources for use in phenol– formaldehyde resin synthesis. **Bioresource Technology**, v. 98, n. 8, p. 1655-1663, 2007.

TOUCHALEAUME, F. et al. Performance and environmental impact of biodegradable polymers as agricultural mulching films. **Chemosphere**, v. 144, p. 433–439, 2016.



VIEIRA, G. A. **Síntese e Caracterização de Polímeros Verdes : Poliésteres do Glicerol e do Ácido Isoftálico**. 2016. 102f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia, Ambiente e Sociedade). Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Minas Gerais, Teófilo Otoni. 2016.

WAN, J., WANG, Y., XIAO, Q. Effects of hemicellulose removal on cellulose fiber structure and recycling characteristics of eucalyptus pulp. **Bioresource technology**, v. 101, n. 12, p. 4577-4583, 2010.

WANG, L.-F.; RHIM, J. W.; HONG, S. I.; Preparation of poly(lactide)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) blend films using a solvent casting method and their food packaging application. **LWT - Food Sci. Technol.** 2016, 68, 454.

WANKE, C. H. **Tratamento superficial do polipropileno visando controle da molhabilidade**. 2012. 109f. Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2012.

WATKINS, D., NURUDDIN, M., HOSUR, M., TCHERBI-NARTEH, A., JEELANI, S. Extraction and characterization of lignin from different biomass resources. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 4, n. 1, p. 26-32, 2015.

WEI, D. et al. Non-leaching antimicrobial biodegradable PBAT films through a facile and novel approach. **Materials Science and Engineering C**, v. 58, p. 986–991, 2016.

WENG, Y. X. et al. Biodegradation behavior of poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT), poly(lactic acid) (PLA), and their blend under soil conditions. **Polymer Testing**, v. 32, n. 5, p. 918–926, 2013.

WITT, U. et. al. Biodegradation of aliphatic – aromatic copolyesters : Evaluation of the final biodegradability and ecotoxicological impact of degradation intermediates. **Chemosphere**. v. 44, n. January, p. 289–299, 2016.

XU, F., YU, J., TESSO, T., DOWELL, F., WANG, D. Qualitative and quantitative analysis of lignocellulosic biomass using infrared techniques: a mini-review. **Applied Energy**, v. 104, p. 801-809, 2013.

YANG, H. et al. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, v. 86, n. 12–13, p. 1781–1788, 2007.

Young, R. J. and Lovell, P. A.. **Introduction to Polimers**. CRC Press, New York, 3a edition, 2011.

YU, T. et al. Enhanced mechanical properties and flame retardancy of short jute fiber/poly(lactic acid) composites with phosphorus-based compound. **Science China Technological Sciences**, v. 60, n. 11, p. 1716–1723, 2017.

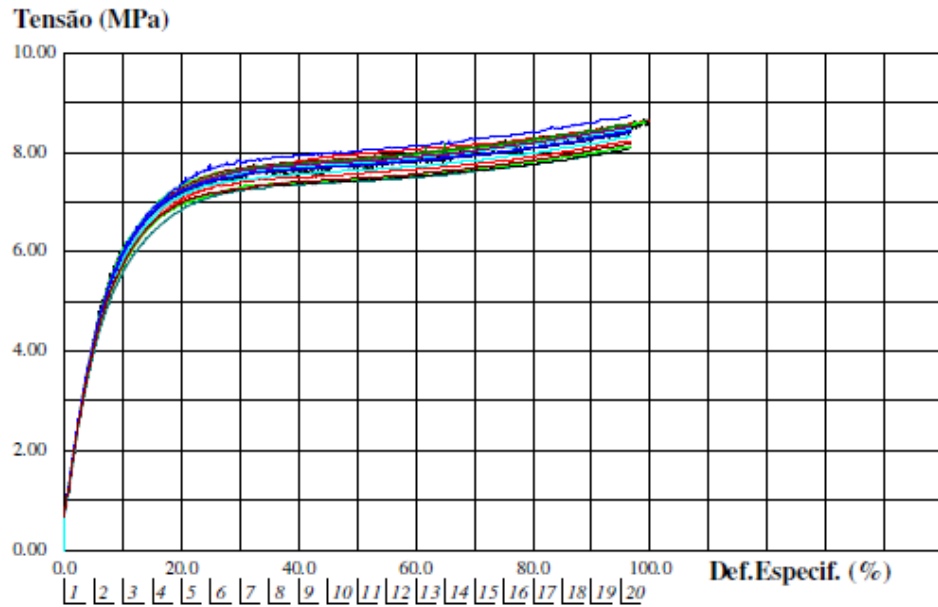
ZEHETMEYER, G. **Desenvolvimento e Caracterização de Embalagens Ativas Compostas de PBAT com Incorporação de Nisina**. 2016. 200f. Tese (Doutorado em Ciência dos

Materiais) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul. 2016.

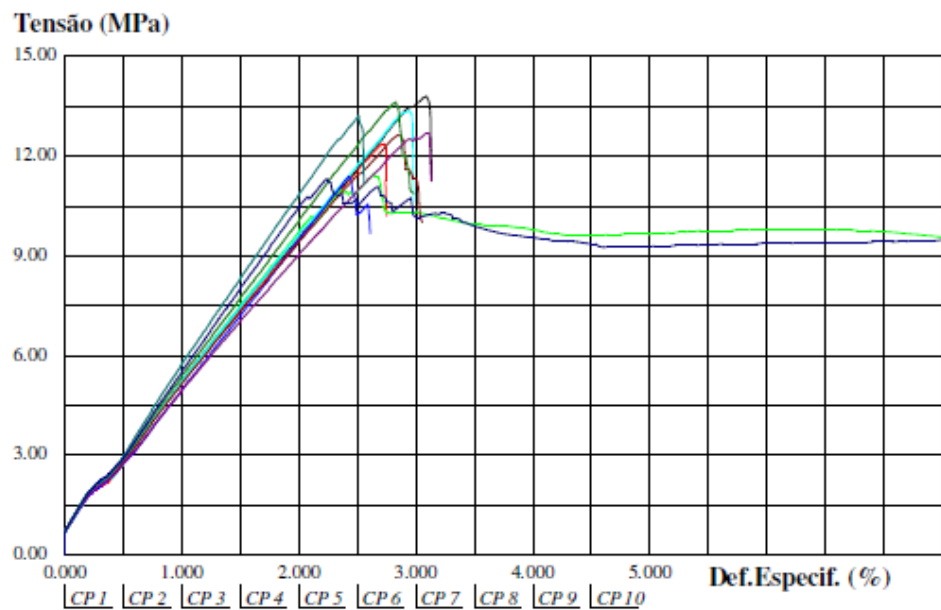
## Apêndice A

Gráficos dos ensaios de tração do polímero PBAT e dos compósitos com tecido de fibra de juta.

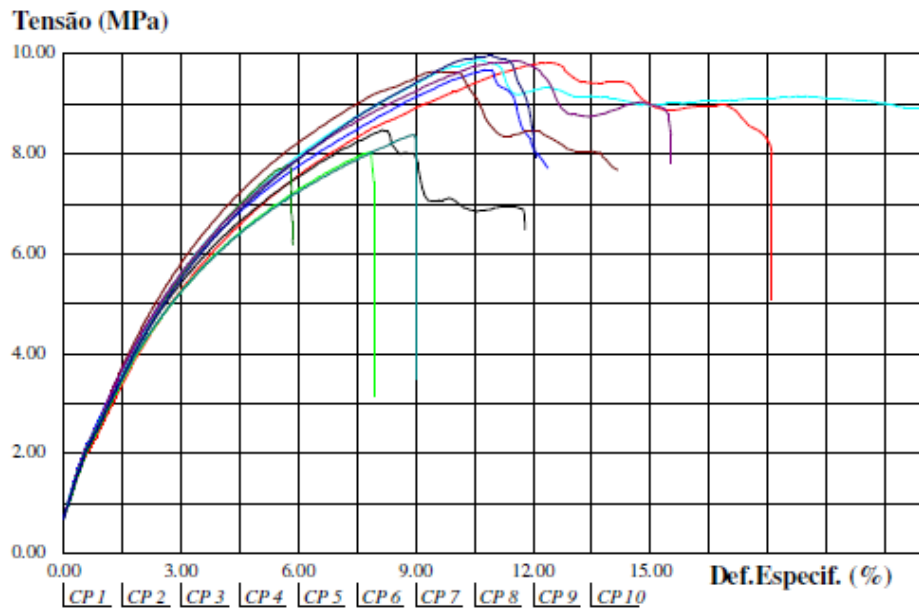
Curva de tensão x deformação dos corpos de prova do polímero PBAT.



Curva de tensão x deformação dos corpos de prova do polímero PBAT com tecido de fibra de juta (F9).



Curva de tensão x deformação dos corpos de prova do polímero PBAT com tecido de fibra de juta (I33).



Curva de tensão x deformação dos corpos de prova do polímero PBAT com tecido de fibra de juta (2X2).

