

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

JOÃO PEDRO MARTINS OLIVEIRA

**Compatibilização de Compósitos de PEBD Reforçados com o Bagaço da Cana-
de-açúcar**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA

2019

JOÃO PEDRO MARTINS OLIVEIRA

**Compatibilização de Compósitos de PEBD Reforçados com o Bagaço da Cana-
de-açúcar**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais

Orientador: Profa. Dra. Joice Erica Motezuki

LONDRINA

2019



TERMO DE APROVAÇÃO

JOÃO PEDRO MARTINS OLIVEIRA

COMPATIBILIZAÇÃO DE COMPÓSITOS DE PEBD REFORÇADOS COM O BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR

Trabalho de conclusão de curso apresentado no dia 20 de maio de 2019 como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Fábio Cezar Ferreira
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Química)

Prof. Dr. Jean Halison de Oliveira
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)

Prof^a. Dr^a Joice Erica Motezuki
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)

Prof^a. Dr^a. Silvia Midori Higa
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)
Coordenadora do Curso de Engenharia de Materiais

AGRADECIMENTOS

A Deus pela alegria de viver e por sua maravilhosa graça que me orientou e cuidou de mim até aqui.

Aos meus pais, João Carlos e Valéria, por todo apoio, palavras incentivo, por serem inspiração de vida acadêmica e, principalmente, por seu amor incondicional por mim. Aos meus irmãos, Izabela e João Vitor, por seu companheirismo e por dividirem comigo as dificuldades.

A minha namorada Raquel Monteiro, pelo amor e por me incentivar sempre a olhar de maneira positiva para os obstáculos.

Aos meus amigos, Beatriz, Felipe, Maria Fernanda, Raquel Matioli e Natalia, por me ensinarem que existem amigos mais próximos que irmãos.

Aos irmãos da Primeira Igreja Presbiteriana de Londrina, que por seu apoio, orações e conselhos, fizeram dessa jornada um desafio prazeroso.

A minha orientadora, Profa. Dra. Joice Erica Motezuki, que do início ao fim desse trabalho se mostrou sempre disposta e paciente para orientar, discutir e buscar possibilidades.

Aos professores do curso de engenharia de materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Londrina, por me mostrarem a beleza e relevância da ciência dos materiais.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Londrina, por tornar possível a realização do curso de graduação em engenharia de materiais.

RESUMO

OLIVEIRA, João Pedro Martins. **Compatibilização de Compósitos de PEBD Reforçados com o Bagaço da Cana-de-Açúcar**. 2019. 51 p. Trabalho de conclusão de curso – Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2019.

O interesse na utilização das fibras vegetais em compósitos poliméricos se dá por se apresentarem como potenciais substitutas às fibras sintéticas em aplicações específicas, destacando-se pelo seu apelo ambiental e econômico. Dentre as fibras vegetais, destacam-se as fibras do bagaço da cana-de-açúcar por sua grande disponibilidade em solo brasileiro, de modo que, como reforço em matrizes termoplásticas, sua destinação final torna-se uma interessante alternativa tecnológica e economicamente favorável. As diferentes características químicas e físicas inerentes ao material termoplástico da matriz e à fibra celulósica torna a compatibilidade desses materiais um desafio. Contudo, a aplicação de métodos de compatibilização fibra-polímero pode viabilizar a produção deste material. Dessa forma, o presente trabalho analisa a influência de diferentes teores de agente compatibilizante em compósitos de polietileno de baixa densidade reforçados com 20% (m/m) de fibras do bagaço da cana-de-açúcar. A presença do compatibilizante mostrou-se essencial no que diz respeito às propriedades mecânicas do material, de modo a resultar em um aumento de 51% no limite de resistência a tração quando aplicado 2% de agente compatibilizante.

Palavras-chave: Compósitos termoplásticos, bagaço da cana de açúcar, fibras naturais, compatibilização

ABSTRACT

OLIVEIRA, João Pedro Martins. **Compatibility of LDPE Reinforced Composites with Sugarcane Bagasse**. 2019. 51 p. Elaboration of the course completion work - Department of Materials Engineering, Federal Technological University of Paraná. Londrina, 2019.

The interest in the polymeric composites use of vegetal fibers occurs because they present themselves as potential substitutes for the synthetic fibers in specific applications, standing out for its environmental and economic appeal. Among the natural fibers, sugarcane bagasse fibers stand out by their great availability in Brazilian soil, so that, as a reinforcement in thermoplastic matrices, their final destination becomes an interesting technological and economically favorable possibility. The different chemical and physical characteristics inherent to the thermoplastic matrix material and the cellulosic fiber makes the compatibility of these materials a challenge. However, the application of fiber-matrix compatibilization methods, can viable this material production. Thus, the present work analyzes the influence of different compatibilizing agent contents on low density polyethylene composites reinforced with 20% (w/w) of the sugarcane bagasse fibers. The presence of the compatibilizer was essential with respect to the mechanical properties of the material, resulting in a 51% increase in tensile strength when 2% compatibilizing agent was applied.

Keywords: Thermoplastic composites, sugarcane bagasse, natural fibers, compatibilization

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – O triângulo do sucesso comercial dos compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais.....	2
Figura 2 – Diferentes geometrias de reforço em um compósito.....	6
Figura 3 – Representação esquemática de uma fibra vegetal.....	9
Figura 4 – Esquema diferentes de polietilenos: (a) PEAD, (b) PEBD e (c) PELBD.....	12
Figura 5 – Mecanismo químico de compatibilização.....	15
Figura 6 – Procedimento experimental utilizado neste trabalho.....	17
Figura 7 – Moinho de Facas tipo willye.....	18
Figura 8 – Peneira de 35 mesh.....	19
Figura 9 – Extrusora monorosca.....	21
Figura 10 – Sistema de resfriamento utilizado.....	21
Figura 11 – <i>Pellets</i> do Compósito PEBD/Fibra do bagaço da cana-de-açúcar.....	22
Figura 12 – Sequência dos parâmetros de prensagem.....	23
Figura 13 – Prensa hidráulica utilizada no processo de prensagem.....	23
Figura 14 – Corpos de prova de PEBD e Compósito PEBD/BCA.....	24
Figura 15 – Ensaio de tração realizado.....	25
Figura 16 – Fibras do bagaço da cana de açúcar antes da secagem.....	27
Figura 17 – Fibras do bagaço da cana de açúcar após secagem.....	27
Figura 18 – Termogravimetria das fibras do bagaço da cana-de-açúcar.....	28
Figura 19 – Compósito PEBD/Fibra do bagaço da cana-de-açúcar.....	29
Figura 20 – Curvas tensão vs deformação das formulações de 1 a 6.....	30
Figura 21 – Influência do compatibilizante no PEBD.....	32

Figura 22 – Influência do reforço fibroso no compósito PEBD/Fibra do bagaço da cana-de-açúcar.....	33
Figura 23 – Influência do compatibilizante no compósito PEBD/BCA.....	34
Figura 24 – Representação da interação entre as fibras do bagaço da cana-de-açúcar e agente compatibilizante.....	35
Figura 25 – Análise da interface matriz-fibra.....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Formulações realizadas.....	20
Tabela 2 – Dados de perda de umidade durante o processo de secagem das fibras do bagaço da cana de açúcar.....	26
Tabela 3 – Propriedades mecânicas das formulações de 1 a 6.....	30

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	3
3 JUSTIFICATIVA	4
4 REFERENCIAL TEÓRICO	5
4.1 Compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais	5
4.2.1 O Bagaço da Cana-de-Açúcar	10
4.3 A Matriz Polimérica: Polietileno de Baixa Densidade (PEBD)	11
4.4 Interface Matriz – Fibra	13
4.4.1 Compatibilização.....	14
4.5 Compósitos Termoplásticos a base da fibra da cana-de-açúcar	15
5 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO DE PESQUISA	17
5.1 Preparação das fibras	18
5.1.1 Secagem das fibras	18
5.1.2 Moagem das Fibras	18
5.1.3 Peneiramento das fibras	19
5.2.1 Incorporação das fibras à matriz	19
5.2.2 Prensagem	22
5.3 Caracterização.....	24
5.3.1 Caracterização das fibras	24
5.4 Caracterização do compósito.....	25
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	26
6.1 Fibras do bagaço da cana-de-açúcar.....	26
6.1.1 Perda de umidade durante a secagem	26
6.1.2 Termogravimetria.....	27
6.2 Compósito PEBD/Fibra do bagaço da cana-de-açúcar	29
6.2.1 Obtenção	29
6.2.2 Propriedades mecânicas.....	29
6.2.2.1 Influência do agente compatibilizante no PEBD	31
6.2.2.2 Influência do reforço fibroso no compósito PEBD/Fibra do bagaço da cana-de-açúcar	32
6.2.2.3 Influência do agente compatibilizante no compósito PEBD/Fibra do bagaço da cana-de-açúcar.....	34
6.2.2.4 Análise da interface fibra-matriz.....	35
7 CONCLUSÃO	37
REFERÊNCIAS	38
ANEXO A – DADOS TÉCNICOS PEBD (BC818) E AGENTE DE COMPATIBILIZAÇÃO (POLIBOND® 3349)	41

1 INTRODUÇÃO

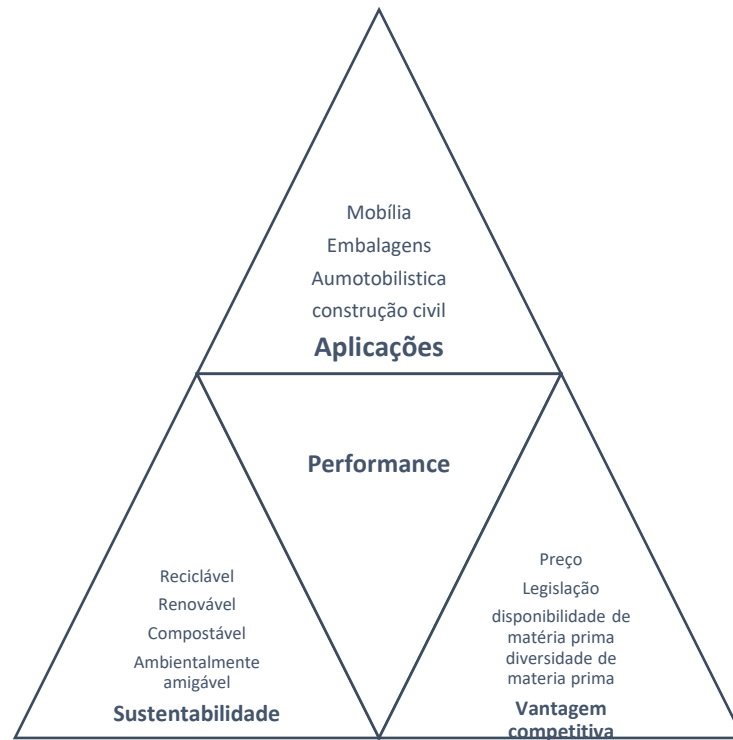
A composição e o estudo da sinergia entre diferentes tipos de materiais têm sido temas de grande interesse da indústria e da comunidade acadêmica, de modo a possibilitar o desenvolvimento de materiais que apresentem propriedades específicas para determinadas aplicações. Assim, a obtenção dos chamados materiais compósitos apresenta soluções tecnológicas para as demandas atuais.

Dentre esses, destacam-se os compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais por se colocarem como uma alternativa viável para a substituição das fibras sintéticas como as de carbono, vidro e aramida por fornecerem menor densidade, ótimas propriedades mecânicas, maior biodegradabilidade e grande disponibilidade de matéria prima. A Figura 1 traz um resumo das propriedades que qualificam a performance desses compósitos. (AGUNSOYE; AIGBODION, 2013, p. 187).

Os desafios para a obtenção desses promissores compósitos encontram-se na compatibilização de uma matriz polimérica de caráter apolar e fibras celulósicas polares e hidrofílicas de modo a promover adesão suficiente entre elas, resultando em propriedades interessantes (VÄISÄNEN; DAS; TOMPPONEN, 2017, p. 584). Assim sendo, a característica da região da interfase da matriz torna-se essencial para a sinergia entre matriz e fibra na obtenção do compósito. Diferentes métodos de compatibilização que alteram as propriedades químicas da superfície das fibras e o uso de agentes compatibilizantes que formam uma interfase têm sido estratégias para superar esse obstáculo.

Dessa forma, o presente trabalho propõe o desenvolvimento de compósitos de polietileno de baixa densidade reforçados com o bagaço da cana de açúcar, de modo a avaliar suas propriedades mecânicas em diferentes teores de compatibilizante afim de definir um teor ótimo de compatibilizante no que diz respeito ao limite de resistência a tração (LRT) e analisar sua influência no compósito.

Figura 1 – O triângulo do sucesso comercial dos compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais



Fonte: Adaptado de Mochane (2017, p. 583)

2 OBJETIVOS

Obter compósitos de polietileno de baixa densidade e média fluidez (BC818) reforçados com 20% de bagaço de cana-de-açúcar, realizando a caracterização mecânica e térmica, além de avaliar a influência de diferentes teores de agente compatibilizante (POLIBOND ® 3349). Sendo assim, os objetivos são listados abaixo de forma específica:

- Definir um teor ótimo de agente compatibilizante para o compósito no que diz respeito ao limite de resistência a tração (LRT)
- Avaliar a influência do agente compatibilizante
- Caracterizar mecanicamente os compósitos obtidos através do ensaio de tração
- Caracterizar termicamente as fibras de bagaço de cana-de-açúcar através da análise TG.

3 JUSTIFICATIVA

A indústria sucroalcooleira no Brasil é responsável pela produção de um grande volume de resíduo proveniente de seus processos, sendo esse o bagaço da cana-de-açúcar. Esse grande volume de resíduo industrial gerado é, na maioria das vezes, destinado à queima em caldeiras para a produção de energia, processo que emite grandes quantidades de gás carbônico na atmosfera, de modo a ser prejudicial ao meio ambiente. Assim, este trabalho apresenta uma alternativa que causa menor impacto ambiental para a destinação desse resíduo agroindustrial, aplicando-o como carga em um compósito termoplástico.

A grande disponibilidade das fibras vegetais no Brasil é também uma das grandes motivações pela obtenção e utilização de compósitos termoplásticos reforçados com fibras vegetais, sendo, por vezes, cargas substitutas das fibras sintéticas em algumas aplicações.

A obtenção dos filmes compósitos termoplásticos reforçados com fibras vegetais, assim como sua potencial aplicação, é de grande interesse pela substituição de parte da matriz poliolefínica, de maneira a possibilitar a redução de custo na produção de filmes poliméricos e reduzindo o uso de uma matéria-prima de fonte não-renovável.

Dessa forma, o desenvolvimento deste trabalho se justifica por propor uma solução a uma destinação mais sustentável aos resíduos agroindustriais do bagaço de cana; pela grande disponibilidade de matéria-prima das fibras vegetais no Brasil; incentivar o uso de fibras vegetais como substitutas às fibras sintéticas em determinadas aplicações e por se apresentar como uma possibilidade econômica na redução de custo na produção de itens poliméricos.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais

As diferentes classes de materiais – metais, polímeros e cerâmicas – apresentam características específicas de acordo com o tipo de ligação química e estrutura do material. A fim de obter propriedades combinadas, o surgimento dos materiais compósitos na metade do século XIX possibilitou atender aplicações específicas de maneira mais efetiva quanto às classes tradicionais de materiais, especialmente em relação a baixa densidade dos materiais compósitos (CALLISTER, 2016, p. 582).

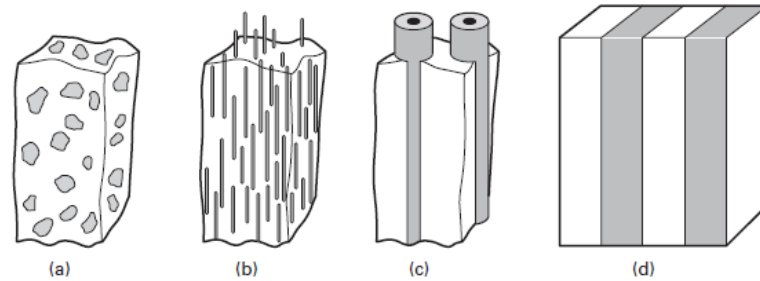
Os materiais compósitos ou conjugados podem ser definidos como materiais gerados pela mistura ou combinação racional de dois ou mais materiais macro ou microconstituintes, diferindo em composição química e/ou forma, e que sejam essencialmente insolúveis entre si, formando conseqüentemente uma interface bem definida entre eles (CHAWLA, 1998, p.5).

Os compósitos de matriz polimérica por sua vez são compostos por uma matriz de material polimérico, seja este um termoplástico ou termorrígido, e uma fase dispersa, estes são amplamente utilizados tanto em maior diversidade de aplicações quanto a quantidade produzida, conseqüência de suas propriedades à temperatura ambiente, facilidade de fabricação e custo (CALLISTER, 2016, p. 599).

Cargas ou reforços nos compósitos podem exibir diferentes geometrias como sugere Chawla (2009, p. 766): (a) partículas, (b) fibras curtas, (c) fibras contínuas e (d) laminados, apresentadas na Figura 2.

Podem desempenhar diferentes funções no compósito, que vão desde lhe conferir aumento de propriedades mecânicas até questões econômicas como a redução de custo na produção de um produto.

Figura 2 – Diferentes geometrias de reforço em um compósito.



Fonte: Chawla (2009, p. 766)

O uso de cargas e fibras dispersas em uma matriz polimérica se torna interessante e são reconhecidas pelo aumento das propriedades mecânicas por unidade de peso dos compósitos, sendo estas: aumento do módulo de rigidez, aumento da resistência mecânicas (tração, flexão e compressão), melhoria na resistência à fluência, aumento na estabilidade dimensional, redução da expansão térmica, aumento da tenacidade a fratura, ausência de corrosão em muitos ambientes agressivos aos metais (MOTUZUKI, 2010, p. 7; PARDINI, 2006, p. 2).

As fibras utilizadas nos materiais compósitos podem ser classificadas como fibras sintéticas e fibras naturais. Como exemplo de fibras sintéticas estão as fibras de carbono, de aramida e de vidro, no qual, esta última é a fibra presente na grande maioria das aplicações de compósitos poliméricos reforçado com fibras sintéticas. As fibras naturais, por sua vez, são de origem da própria natureza, sendo possível encontrá-las *“in natura”*, estas são subdivididas em fibras de origem animal, fibras de origem vegetal e fibras de origem mineral (MARINELLI et al., 2008, p. 95; LOBO, 2018, p. 17).

A utilização de fibras vegetais frente às fibras sintéticas em compósitos poliméricos apresenta vantagens como: baixa densidade, alta deformabilidade, baixa abrasividade aos moldes e equipamentos de mistura, possibilidade de geração de materiais biodegradáveis, nova fonte de renda para a população rural e baixo custo. Contudo, inquestionavelmente, as fibras vegetais se sobressaem quanto ao seu apelo ambiental, sua utilização se torna interessante por apresentar menor impacto

ambiental e menor emissão de dióxido de carbono na atmosfera durante o ciclo de produção, processamento e utilização. Durante a produção, a quantidade de CO₂ liberada no fim de ciclo de vida de um produto de compósito polimérico reforçado com fibras vegetais é parcialmente neutralizada pela quantidade de CO₂ consumida no crescimento das fibras (MARINELLI et al., 2008, p. 96; GANDARA; GONÇALVES; SARON, 2017, p. 1; LOBO, 2018, p. 18,19).

Contudo, ainda que as fibras sintéticas apresentem propriedades mecânicas superiores, os compósitos reforçados com fibras naturais, também chamados de NFRC – *natural fibre reinforced composites* – se tornaram substitutos para diversas aplicações na indústria, dentre essas estão a indústria da construção, moveleira, embalagem, automobilística, entre outras. Destacando-se entre elas a indústria automobilística utilizando os NFRC em painéis de portas, painéis de instrumentos, capas internas do motor, para-sóis, forros de arranque, filtros de óleo e do ar e encostos dos bancos. O modelo da BMW, BMW série 7, ainda no ano de 2006 empregava 24 kg de materiais renováveis, sendo 13 kg fibras naturais. (CESTARI, 2010, p. 7; LOBO, 2018, p. 13; MULINARI, 2009, p. 24).

São grandes as possibilidades de composições entre fibras vegetais e matrizes poliméricas, sendo as mais comumente utilizadas as fibras de madeira, bagaço da cana-de-açúcar, juta, sisal, kenaf, rami, cânhamo, algodão, linho, fibra de coco, entre outras. Dessa forma, o grande número de fibras disponíveis somado aos diversos tipos de materiais poliméricos resulta em numerosas alternativas de composição para os materiais compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais. O presente trabalho se restringe ao estudo dos materiais compósitos termoplásticos reforçados com fibras do bagaço de cana-de-açúcar.

4.2 Fibras Vegetais

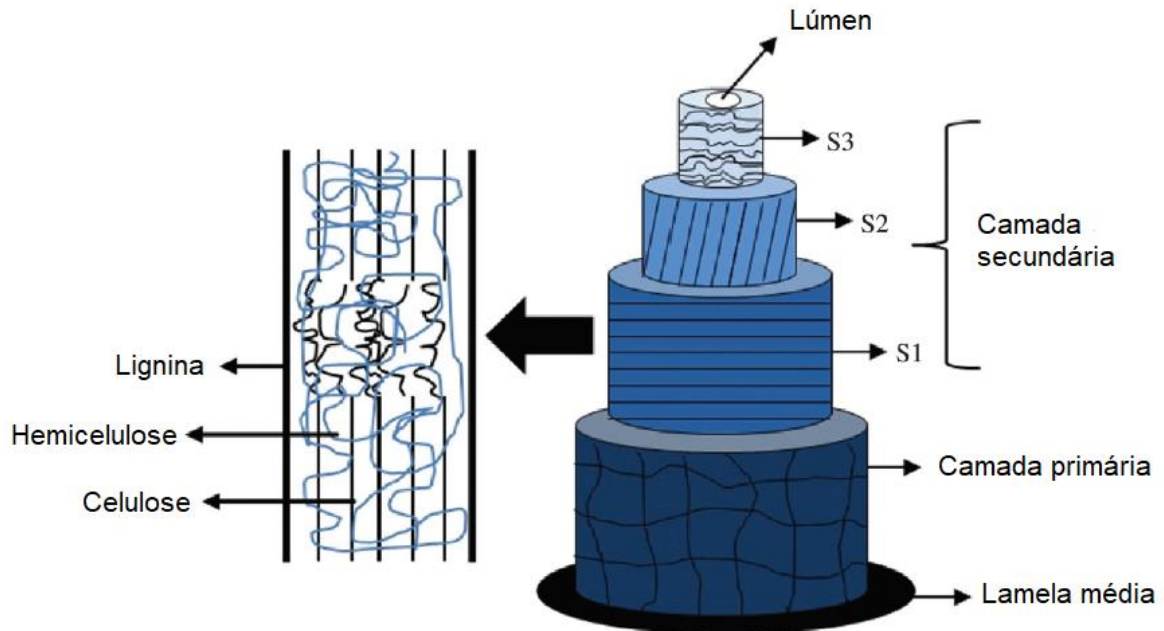
A grande disponibilidade das fibras vegetais é um dos motivos pelo qual se pesquisa sua utilização em conjunto com os materiais poliméricos para uma aplicação tecnológica, especialmente no Brasil como um dos maiores produtores de fibras vegetais do mundo. Por vezes utilizadas na fabricação de papel e biocombustível, a

destinação da grande quantidade de fibras vegetais como reforço em compósitos poliméricos se torna interessante por apresentar maior valor agregado e enfoque tecnológico (LOH et al., 2013, p. 14).

As fibras vegetais são estruturas complexas e são constituídas principalmente por três componentes principais: celulose, hemicelulose e lignina, por isso também podem ser chamadas de fibras celulósicas ou lignocelulósicas. Como componente majoritário das fibras, a celulose é composta por uma longa cadeia de anidro-glicose unidades através de ligações β -(1 \rightarrow 4)-glicosídicas e apresenta estrutura cristalina. A hemicelulose, por sua vez, é o componente presente em todas as camadas da parede celular do vegetal onde ocorre a interação entre a celulose e a lignina, contudo concentrado nas camadas primárias e secundárias. Por fim, a lignina é um complexo de estrutura polifenólica altamente reticulado com estrutura amorfa que atua como agente ligante, como que um “cimento”, entre as fibras individuais e as fibrilas que formam a parede celular, fornecendo uma barreira à degradação enzimática do material celulósico. Além desses constituintes principais, as fibras vegetais apresentam outros compostos orgânicos como ceras, ácidos graxos, gorduras e pectinas (MULINARI, 2009, p. 26; PEREIRA et al., 2015, p. 11).

Outra característica importante acerca das fibras vegetais se diz respeito a sua morfologia. A estrutura morfológica das fibras vegetais é formada essencialmente por duas partes, um canal central chamado lúmen, o qual é responsável pelo transporte de água e nutrientes e pela parede celular. A parede celular é composta por uma camada primária, constituída por um arranjo desordenado de fibrilas de celulose dispersas em uma matriz de pectina, hemicelulose, lignina e proteína, e uma camada secundária, que consiste em microfibrilas de celulose cristalinas em um arranjo espiral a qual é subdivida em uma camada externa, uma camada média e uma camada interna, sendo a camada média a responsável pelas propriedades mecânicas da fibra. A camada mais externa da parede celular é chamada de lamela média e é composta majoritariamente por pectina e age como um ligante entre as fibras. A Figura 3 apresenta de forma esquemática a morfologia de uma fibra vegetal, onde S1 é camada externa, S2 a camada média e S3 a camada interna, constituintes da camada secundária. (PEREIRA et al., 2015, p. 10).

Figura 3 – Representação esquemática de uma fibra vegetal.



Fonte: Adaptado de Pereira (2015, p. 10)

A quantidade de fibras vegetais utilizada também é um importante fator a se considerar na composição do material compósito e afeta suas propriedades finais. Essa relação entre a quantidade de fase matriz e fase dispersa é descrita pela “Regra das Misturas”, relacionando o volume e propriedade de cada fase com a propriedade teórica final do compósito, apresentada na Equação 1, sendo E_{cl} o módulo elástico do compósito, E_m e E_f o módulo elástico da matriz e da fibra, respectivamente e V_m e V_f a fração volumétrica de matriz e fibra, respectivamente. Outra característica da fibra a se considerar é a razão de aspecto da fibra, definida pela razão entre comprimento e largura, o qual interfere nas propriedades do compósito formado e na interação fibra-matriz (CALLISTER; RETHWISCH, 2016, p. 591; PEREIRA et al., 2015, p. 10).

$$E_{cl} = E_m V_m + E_f V_f \quad (1)$$

As diversas fibras vegetais diferem-se pela quantidade dos constituintes citados e por sua morfologia, apresentando características semelhantes por serem compostas essencialmente por celulose. Dessa forma, as propriedades dos compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais são inerentes à alguns fatores como: as propriedades da fibra utilizada, propriedades da matriz e as interações químicas e físicas na região de interface entre a fibra e a matriz, a qual será tratada com detalhes mais adiante.

4.2.1 O Bagaço da Cana-de-Açúcar

O cultivo da cana-de-açúcar no Brasil é destaque mundial desde sua colonização, apresentando a maior produção mundial com 633,26 milhões de toneladas na safra 2017/2018 segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (2018). O grande cultivo da cana-de-açúcar se dá pela demanda na produção de açúcar e etanol, ambos produzidos a partir do caldo extraído da cana-de-açúcar pelas chamadas indústrias sucroalcooleiras. Após a moagem da cana-de-açúcar e a extração do suco presente, o resíduo fibroso restante desse processo é conhecido como o bagaço da cana-de-açúcar, que em sua grande maioria é destinado como combustível para a produção de energia elétrica dentro das próprias indústrias sucroalcooleiras (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2018, p.8).

O bagaço de cana-de-açúcar é constituído de 50% água, 45% de fibras, 2-3% de sólidos solúveis e 2-3% de sólidos insolúveis. De acordo com os constituintes das fibras vegetais já apresentados, no caso do bagaço de cana-de-açúcar tem como composição química 40-48% de celulose, 25% de hemicelulose, 20% de lignina e extrativos e cinzas. (MULINARI, 2009, p. 26).

De acordo com Loh (2013, p.15) a composição química do bagaço o faz uma matéria-prima excepcional para a fabricação de materiais compósitos, além de apresentar baixo custo de extração ainda que haja custos com possíveis necessários tratamentos da fibra para a sua utilização e melhoria de suas propriedades no

compósito ainda seria viável economicamente. Ademais, o bagaço de cana atende à requisitos de menor impacto ambiental sendo biodegradável, reciclável e reutilizável.

De forma geral, o bagaço de cana tem sido cada vez mais estudado e utilizado para diversas aplicações como aumentar o reforço em materiais fabricados com base em diferentes métodos aplicados; as cinzas do bagaço da cana-de-açúcar e cinza de palha de cana-de-açúcar podem substituir parcialmente o cimento e atuar como aditivo pozolânico na fabricação de concreto e bloco de cinzas; as cinzas do bagaço da cana de açúcar misturado com goma arábica e água para produzir cerâmica produtos refratários, entre outras aplicações (LOH et al., 2013, p. 15).

Assim, o uso do bagaço da cana-de-açúcar como reforço e carga em matrizes poliméricas se mostra um grande potencial podendo se apresentar quimicamente compatível com os polímeros, especialmente em conjunto aos termoplásticos, apresentando-se como alternativa tecnológica e economicamente viável.

4.3 A Matriz Polimérica: Polietileno de Baixa Densidade (PEBD)

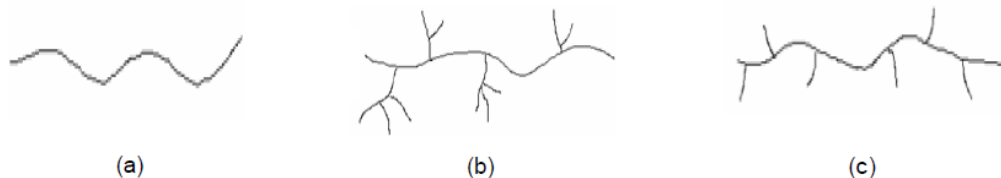
Os polímeros termoplásticos têm sido amplamente utilizados como matriz em compósitos reforçados com fibras vegetais principalmente por suas propriedades reológicas em processamento como bem define Canevarolo (2013, p. 53) o conceito de termoplástico: “plásticos que, quando sob um aumento substancial da temperatura e marginal da pressão, amolecem e fluem, podendo ser moldados nestas condições”. Invariavelmente os termoplásticos saem na frente dos termorrígidos no que diz respeito a sua aplicação como matriz em compósitos reforçados com fibras vegetais pela sua facilidade de processamento e reciclabilidade, sendo utilizados como matéria prima o polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS) e policloreto de vinila (PVC) (VÄISÄNEN; DAS; TOMPPO, 2017, p. 583).

O polietileno por sua vez apresenta-se como um dos termoplásticos mais utilizados nas mais diversas aplicações. O polímero é sintetizado a partir de um processo de polimerização em cadeia, o qual consiste na desestabilização da dupla ligação do etileno a partir de um agente iniciador de forma a gerar sucessivas reações com outras ligações duplas de outras moléculas do monômero no que resulta na formação da cadeia polimérica (CANEVAROLO, 2013, p. 110).

O mais utilizado polímero caracteriza-se por ser um material inerte a maioria dos produtos químicos comuns, parcialmente flexível, de alto peso molecular, e que tem suas propriedades alteradas pela mudança da estrutura química da cadeia polimérica, no que diz respeito a presença ou não de ramificações na cadeia (COUTINHO, 2013, p. 1). Essas mudanças em sua estrutura química classificam os polietilenos como polietileno de alta densidade (PEAD), polietileno de baixa densidade e polietileno linear de baixa densidade (PELBD).

A partir da Figura 4 é possível observar suas diferenças quanto a estrutura química do material. O polietileno de alta densidade (PEAD) caracteriza-se por apresentar uma cadeia linear em relação aos outros polietilenos, e por consequência melhor empacotamento das cadeias de modo a resultar em maior densidade, maior temperatura de fusão, elevado grau de cristalinidade e melhores propriedades mecânicas. Por sua vez, o polietileno de baixa densidade (PEBD) apresenta ramificações na sua cadeia tão longas quanto a cadeia principal do polímero de maneira a dificultar o empacotamento das cadeias no que resulta em uma menor densidade e propriedades mecânicas mais pobre comparadas ao PEAD. Por fim, a estrutura do polietileno linear de baixa densidade (PELBD) pode ser comparada a junção das cadeias lineares do PEAD com as ramificações do PEBD de menor tamanho, apresentando propriedades intermediárias (R.R SOUZA; FAGUNDES; SANTANA, 2014, p. 7028; COUTINHO, 2013, p. 2).

Figura 4 – Esquema diferentes de polietilenos: (a) PEAD, (b) PEBD e (c) PELBD



Fonte: Souza (2014, p. 7028)

Assim, os polietilenos se mostram como potenciais materiais a serem utilizados como matrizes em compósitos termoplásticos reforçados com fibras vegetais. Diferenciando-se por suas características de estrutura química apresentam diferentes propriedades reológicas, o que pode facilitar a incorporação das fibras na matriz.

4.4 Interface Matriz – Fibra

As propriedades finais de um compósito polimérico reforçado com fibras vegetais não só dependem das propriedades da fase matriz e da fibra vegetal dispersa, como a maneira e a intensidade que acontece a interação entre as fases, ou seja, quais as características da região da interface entre a matriz e a fibra. Motezuki (2010, p.16) define interface como “uma superfície matematicamente bidimensional, dividindo duas fases ou componentes distintos em um compósito. A interface é caracterizada por uma mudança abrupta nas propriedades e, frequentemente, na composição química”.

A importância da região da interface matriz – fibra se deve ao fato dela ser responsável pela transferência de carga da matriz para o reforço, evitando o desacoplamento entre matriz e fibra durante solicitações mecânicas. Particularmente, no caso dos compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais a atenção se volta à característica hidrofílica e polar das fibras vegetais que contrasta com a característica apolar da maioria dos polímeros utilizados como matriz, afetando a interação matriz – fibra, o que resulta em um desempenho pobre do compósito (VÄISÄNEN; DAS; TOMPPONEN, 2017, p. 584).

Acerca da interação entre fibra e matriz, Pereira (2015, p.11) também afirma que “as fibras naturais são incompatíveis com matrizes poliméricas hidrofóbicas e têm a tendência de formar agregados, que afetam a qualidade da interface fibra – matriz”. Essa interação depende, essencialmente, de dois fatores: o grau de contato das superfícies na interface (molhabilidade) e as forças coesivas nessa região (adesividade). Sendo assim, visando a melhor adesão fibra – matriz, foram desenvolvidos métodos que atuam na interface a partir de princípios físicos e químicos, promovendo a compatibilização entre fibra e matriz, tornando viável o uso dos compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais (MOTEZUKI, 2010, p. 18).

4.4.1 Compatibilização

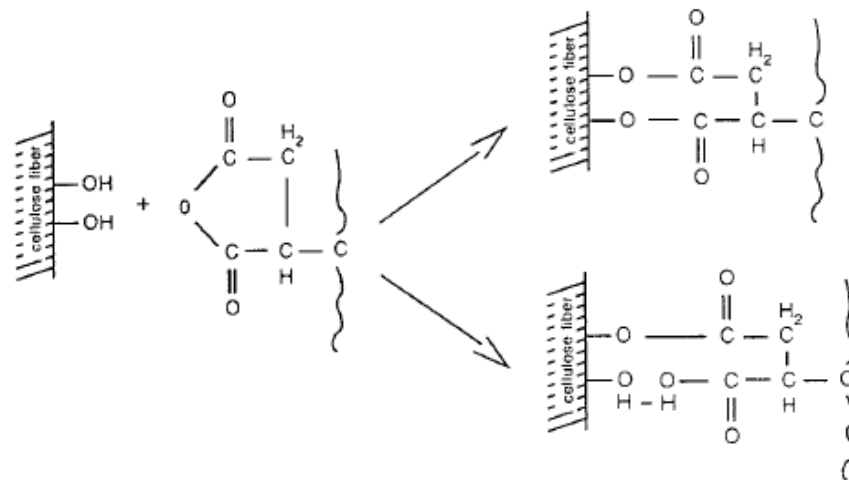
A compatibilização consiste na alteração da característica da superfície das fases presentes no compósito com objetivo de melhorar a adesão fibra – matriz na região de interface. Para isso são utilizados métodos físicos e métodos químicos.

Os métodos químicos partem do princípio de compatibilizarem a matriz com a fibra introduzindo um terceiro material entre as fases, ou seja, através de uma interfase, que consiste em “uma camada tridimensional na vizinhança imediata da superfície da fibra, possuindo propriedades físicas diferentes das duas fases principais em um compósito”, como explica (KARIAN, 2003). Assim, diversos mecanismos podem atuar com o objetivo de eliminar as camadas limites fracas, produzindo uma camada resistente e flexível, melhorando a molhabilidade entre polímero e substrato, formando ligações químicas entre ambos os materiais, entre outros mecanismos (BLEDZKI, 1999, p. 239).

Um dos métodos mais importantes é o método de acoplamento químico, através de ligações químicas entre a fibra e a matriz. O agente de acoplamento, também chamado de compatibilizante em contato com a superfície da fibra interage através de ligações covalentes fortes, ou interações secundárias do tipo ácido – base ou ligações de hidrogênio. Acerca das características do compatibilizante, a quantidade de grupos funcionais presente deve ser suficiente para que ocorra a reação com as hidroxilas da celulose e o comprimento das cadeias deve ser suficientemente longas e de alta massa molar, permitindo que se forme emaranhados moleculares na interfase, promovendo ancoramento mecânico (CORREA et al., 2003, p. 157; BLEDZKI, 1999, p. 240).

Com base no mecanismo de compatibilização, é possível se utilizar o agente de acoplamento anidrido maleico em polímeros termoplásticos, mostrado na Figura 4. A primeira etapa consiste na ativação do copolímero com o uso de calor, possibilitando reações de esterificação com a fibra celulósica, resultando em ligações covalentes e interações secundárias de ligação de hidrogênio. A quantidade de compatibilizante utilizada na confecção do compósito também é um fator essencial para o sucesso do material. (CORREA et al., 2003, p. 157; BLEDZKI, 1999, p. 240)

Figura 5 – Mecanismo químico de compatibilização



Fonte: Adaptado de Bledzki (1999, p. 240)

4.5 Compósitos Termoplásticos a base da fibra da cana-de-açúcar

O bagaço da fibra da cana-de-açúcar atuando como reforço em compósitos poliméricos tem atraído a atenção da indústria automobilística e de embalagens, principalmente no que diz respeito a substituição da fibra de vidro em compósitos termoplásticos como uma alternativa que apresenta menor impacto ambiental e menos custosa, como explica Mulinari (2009, p.317) sobre o uso das fibras naturais em comparação às fibras de vidro “Fibras tem recebido grande atenção dos pesquisadores recentemente devido às vantagens sobre os materiais de reforço tradicionais, como fibra de vidro em termos de custo, densidade e propriedades específicas”.

Os desafios quanto a utilização desse tipo de fibra vegetal são os mesmos relacionados às outras fibras vegetais, sendo esses o caráter hidrofílico das fibras e a tendência de formação de agregados durante o processamento, dificultando a compatibilização das fibras à matriz termoplástica. Por outro lado, o desenvolvimento de tratamentos das fibras e o uso de agentes de compatibilização tem feito dos compósitos termoplásticos com fibras de bagaço da cana-de-açúcar uma realidade com grande potencial de crescimento de aplicações (MULINARI et al., 2009, p. 317). Os recentes desenvolvimentos dos tratamentos das fibras modificadores de suas propriedades superficiais têm como foco o uso de óxidos metálicos como o óxido de

titânio (TiO_2), óxido de zircônio (ZrO_2), óxido de nióbio (Nb_2O_5) e o uso de alumina (Al_2O_3), para diferentes funções e especificidades no tratamento das fibras do bagaço de cana de açúcar (MULINARI et al., 2009, p. 318).

Os termoplásticos mostram-se vantajosos quanto a sua função de matriz em compósitos vegetais quanto a sua baixa temperatura de processamento, o que previne a degradação das fibras durante o processamento, e sua fluidez, que por sua vez auxilia na dispersão da fibra por toda a matriz. Dessa forma, diversos tipos de termoplásticos são utilizados no preparo dos compósitos tais como o etileno vinil acetato (EVA), poliuretanos, polipropilenos (PP), e os polietilenos (HDPE e LDPE) (MOTAUNG; MOCHANE, 2018, p. 1421).

Esses compósitos podem ser obtidos através de diferentes tipos de processamentos, em especial através do processo de extrusão e o misturador termocinético de alta intensidade. Em termos industriais a extrusora dupla rosca se destaca por uma ação de mistura mais intensa que na extrusora simples, flexibilidade na configuração da geometria da rosca, dosagem de material em diferentes pontos da extrusora e controle preciso da dosagem através de alimentadores. O misturador termocinético de alta intensidade por sua vez torna a distribuição das fibras naturais dentro matriz mais homogênea, contudo o processo é realizado por batelada e não contínuo como no processo de extrusão (MULINARI, 2009, p. 33).

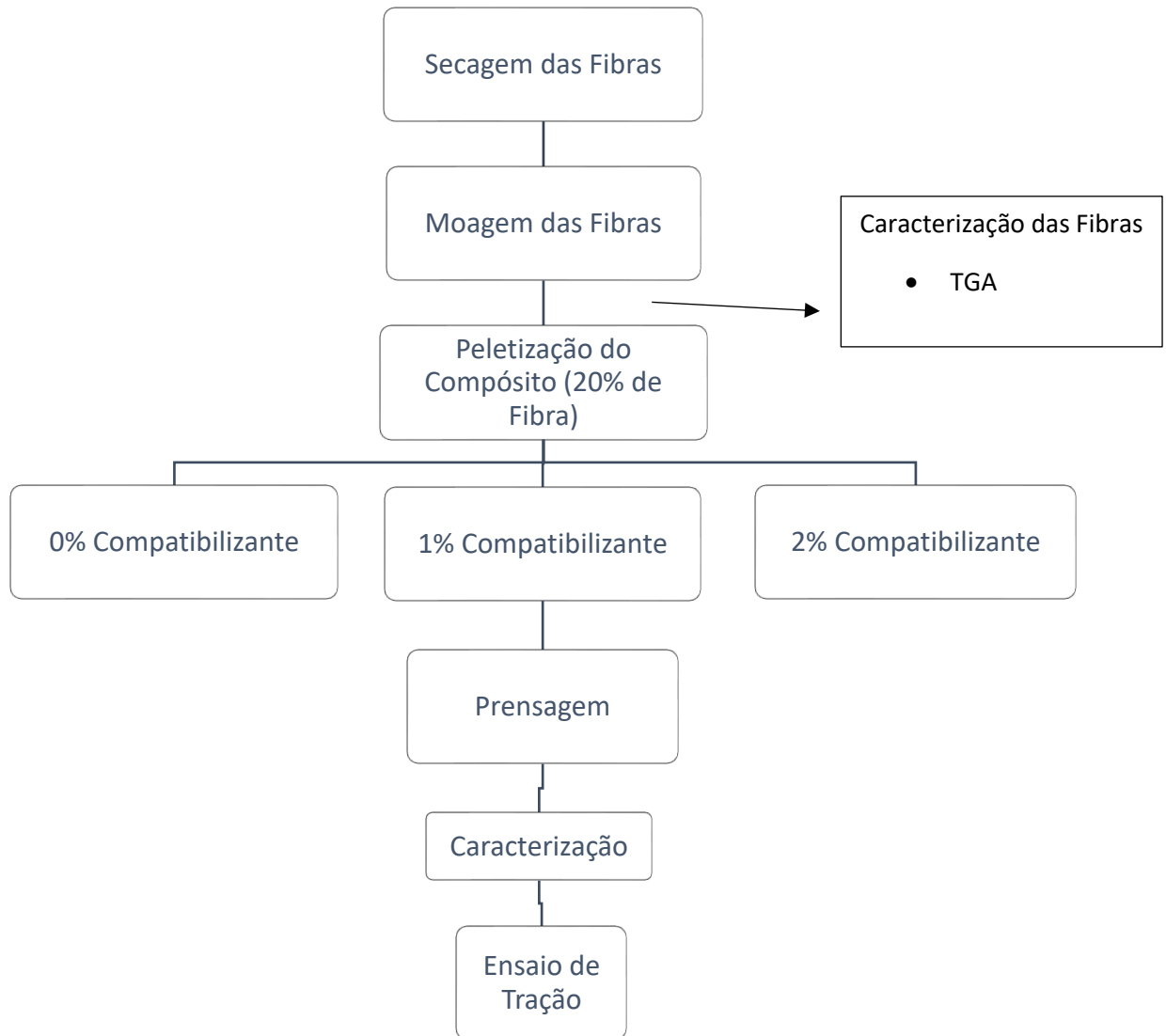
Dessa forma, o bagaço da cana-de-açúcar pode ser incorporado a matrizes termoplásticas com sucesso apresentando ótima dispersão da fibra na matriz durante o processamento, especialmente quando se realiza algum tipo de tratamento das fibras, alterando suas propriedades químicas da superfície. A adesão fibra-matriz melhora significativamente com a alteração das propriedades da superfície das fibras, conferindo ao compósito um aumento na resistência mecânica, dureza e módulo (MOTAUNG; MOCHANE, 2018, p. 1429).

Assim, é de grande interesse o estudo dos compósitos termoplásticos a base da fibra do bagaço da cana de açúcar, uma vez que se vê grandes potenciais de aplicação e melhorias de propriedades mecânicas, apresentando-se como uma solução de menor impacto ambiental e potencial substituinte das fibras sintéticas.

5 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO DE PESQUISA

O procedimento experimental utilizado neste trabalho para atingir os objetivos estabelecidos é apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Procedimento experimental utilizado neste trabalho



Fonte: Autoria própria

5.1 Preparação das fibras

5.1.1 Secagem das fibras

As fibras do bagaço de cana-de-açúcar (BCA) obtida por uma indústria sucroalcooleira foram secadas a 70 °C em uma estufa de circulação de marca Biomax e modelo cr 100, durante 48 horas.

5.1.2 Moagem das Fibras

Após o processo de secagem das fibras, estas foram submetidas ao processo de moagem para que possam ser incorporadas no processo de extrusão juntamente com o polietileno de baixa densidade (PEBD) para a formação do compósito, sendo moídas em um moinho de facas tipo willye de marca Fortinox, modelo Star FT50, utilizando-se em conjunto com uma peneira de 1 mm, conforme observado na Figura 7.

Figura 7 – Moinho de Facas tipo willye.



Fonte: Autoria própria

5.1.3 Peneiramento das fibras

Em sequência, as fibras moídas foram peneiradas para se obter fibras de tamanho uniforme, utilizando-se de uma peneira de 35 *mesh* de marca Bertel Indústria Metalúrgica, apresentada na Figura 8. As fibras retidas na peneira foram as aplicadas nos processos subsequentes de incorporação na matriz polimérica.

Figura 8 – Peneira de 35 mesh



Fonte: Autoria própria

5.2 Obtenção do compósito

5.2.1 Incorporação das fibras à matriz

Após a obtenção das fibras em menor granulometria, retidas no processo de peneiramento descrito, estas foram incorporadas à matriz de polietileno de baixa densidade e média fluidez (BC818 da Braskem), juntamente com o agente compatibilizante (POLIBOND® 3349). Afim de se obter uma melhor incorporação da fibra na matriz polimérica, realizou-se três processos em sequência: preparação, extrusão e peletização.

O processo de preparação consistiu em acondicionar em sacos plásticos as fibras de cana-de-açúcar juntamente com a matriz polimérica e o agente compatibilizante em dez divisões iguais, a fim de obter uma melhor incorporação das fibras à matriz. Realizou-se dessa forma em todas as seis formulações preparadas, mesmo naquelas que não apresentaram nenhuma porcentagem de fibra. A descrição das formulações obtidas é apresentada na Tabela 1, assim como as massas de fibra, matriz e compatibilizante. A quantidade de compatibilizante presente nas formulações 2, 3, 5 e 6 foi calculada a partir da porcentagem de fibra utilizada sobre 1,4% de anidrido maleico presente no agente compatibilizante, segundo as informações da ficha técnica (apêndice).

Tabela 1 – Formulações realizadas

N° Amostra	Descrição	Quantidade PE (g)	Quantidade Fibra (g)	Quantidade Compatibilizante (g)
1	Polietileno Puro	1000	0	0
2	Polietileno + 1% Compatibilizante	857,14	0	142,86
3	Polietileno + 2% Compatibilizante	714,28	0	285,71
4	Polietileno + 20% BC	1000	200	0
5	Polietileno + 20% BC + 1% Compatibilizante	857,14	200	142,86
6	Polietileno + 20% BC + 2% Compatibilizante	714,28	200	285,71

Fonte: Autoria própria

Em seguida, o material armazenado nos sacos plásticos foi introduzido no funil de alimentação da extrusora monorosca de marca AX Plásticos e modelo AX 16:26, de maneira progressiva conforme a necessidade, passando, anteriormente, por agitação mecânica dentro da embalagem, de maneira a favorecer a mistura das fibras junto a matriz. Assim, o material foi extrudado sob os parâmetros de 100 RPM e 180, 185 e 190 °C na zona 1,2 e 3 da rosca, respectivamente. A Figura 9 apresenta a extrusora utilizada.

Figura 9 – Extrusora monrosca

Fonte: Aatoria própria

Logo em seguida, o material extrudado em matriz do tipo filamento foi submetido a um sistema de resfriamento forçado a ar, apresentado na Figura 10. O sistema de resfriamento foi composto por um bobinador de filme AX Plásticos acoplado a um compressor de ar.

Figura 10 – Sistema de resfriamento utilizado

Fonte: Aatoria própria

Por fim o material em filamento foi peletizado pelo peletizador AX Plásticos, obtendo os pellets do material compósito, observado na Figura 11.

Figura 11 – Pellets do Compósito PEBD/Fibra do bagaço da cana-de-açúcar



Fonte: A autoria própria

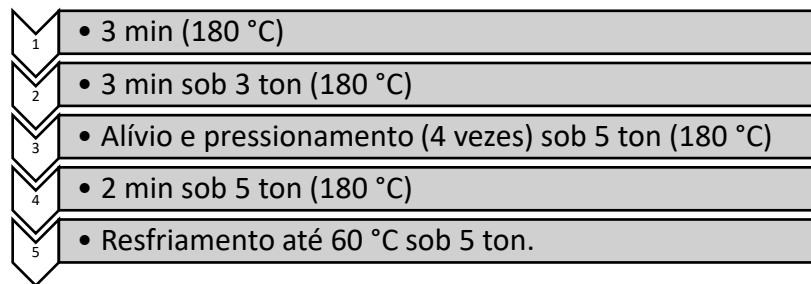
Os processos de preparação, extrusão e peletização descritos foram aplicados a todas as formulações apresentadas na Tabela 1 e realizados no laboratório de polímeros do Departamento de Engenharia de Materiais – Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Londrina.

5.2.2 Prensagem

Os *pellets* obtidos foram conformados em placas através do processo de prensagem em uma prensa hidráulica Marconi (Figura 13), sendo realizada em 5 etapas, apresentadas e descritas na Figura 12. Iniciou-se o processo submetendo os pellets a 180 °C por três minutos, sem aplicação de carga. Em seguida,

aplicou-se três toneladas de pressão durante três minutos. Então, realizou-se alívio de pressão e aplicação de cinco toneladas pressão quatro vezes subsequentes. Na sequência aplicou-se 5 toneladas de pressão durante 2 minutos. Por fim, o material passou por resfriamento lento até 60 °C, sendo retirada da prensa.

Figura 12 – Sequência dos parâmetros de prensagem



Fonte: Autoria própria

Figura 13 – Prensa hidráulica utilizada no processo de prensagem



Fonte: Autoria própria

Os corpos de prova foram retirados utilizando-se uma cunha padrão. A Figura 14 apresenta os corpos de prova retirados das placas produzidas. O processo de prensagem foi realizado e os equipamentos foram disponibilizados no laboratório de polímeros do Departamento de Engenharia de Materiais – Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Londrina.

Figura 14 – Corpos de prova de PEBD e Compósito PEBD/BCA



Fonte: Autoria própria

5.3 Caracterização

5.3.1 Caracterização das fibras

As fibras do bagaço da cana-de-açúcar foram submetidas à análise de termogravimetria. O ensaio foi realizado no laboratório de técnicas de caracterização do Departamento de Engenharia de Materiais – Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Londrina, no equipamento de marca Shimadzu e modelo TgA-51. Os parâmetros utilizados foram os mesmos para ambas as fibras, sendo a taxa de aquecimento 20 °C/min, temperatura máxima 800 °C, em atmosfera de nitrogênio.

5.4 Caracterização do compósito

5.4.1 Ensaio de tração

Os corpos retirados das placas das 6 formulações foram testados em uma máquina universal de ensaios modelo WDW-100E. Foram ensaiados 6 corpos de prova de cada formulação, totalizando 36 corpos de prova ensaiados. O ensaio de tração realizado laboratório de ensaios do Departamento de Engenharia de Materiais – Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Londrina foi baseado na norma ASTM D638-14, tendo como velocidade de ensaio de 5 mm/min. A Figura 15 mostra o ensaio realizado de um dos corpos de prova.

Figura 15 – Ensaio de tração realizado



Fonte: Autoria própria

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Fibras do bagaço da cana-de-açúcar

6.1.1 Perda de umidade durante a secagem

As fibras do bagaço de cana de açúcar passaram pelo processo de secagem como descrito anteriormente. As fibras foram pesadas antes e depois desse processo para avaliar a perda de umidade na fibra durante a secagem. Dessa forma, verificou-se uma perda de 48,76% de umidade durante o processo, validando a fundamentação teórica que afirma que aproximadamente 50% da constituição das fibras do bagaço da cana de açúcar constitui-se de água. A massa das fibras antes e após secagem, bem como a massa de água perdida e sua representação em porcentagem, são apresentadas na Tabela 2.

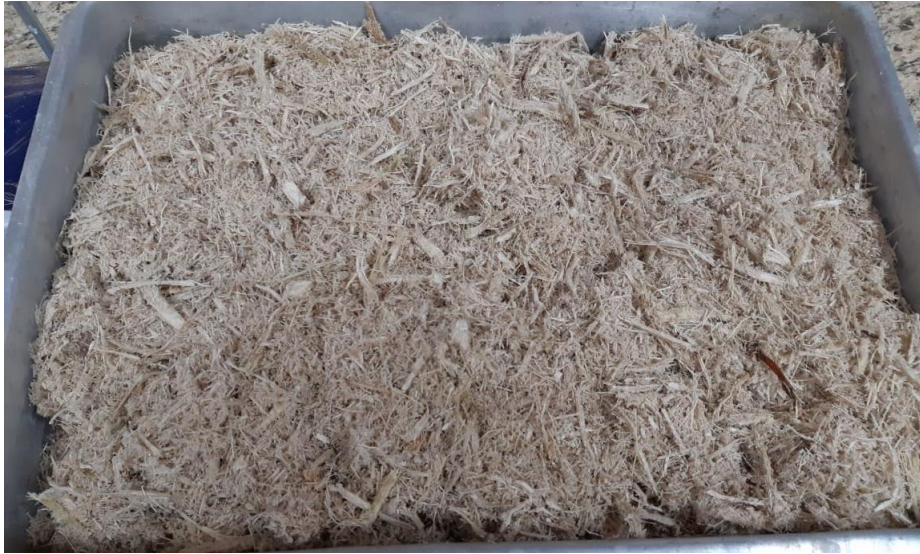
Tabela 2 – Dados de perda de umidade durante o processo de secagem das fibras do bagaço da cana de açúcar.

Peso das Fibras antes da secagem (g)	484
Peso das Fibras após secagem (g)	248
Peso de umidade perdida (g)	236
Porcentagem de umidade perdida	48,76%

Fonte: Autoria própria

Verificou-se também mudança no aspecto das fibras após a secagem, apresentando um aspecto mais claro e as fibras menos emaranhadas e mais soltas. A Figura 16 apresenta as fibras antes do processo de secagem e a Figura 17 as fibras após o processo.

Figura 16 – Fibras do bagaço da cana de açúcar antes da secagem



Fonte: A autoria própria

Figura 17 – Fibras do bagaço da cana de açúcar após secagem



Fonte: A autoria própria

6.1.2 Termogravimetria

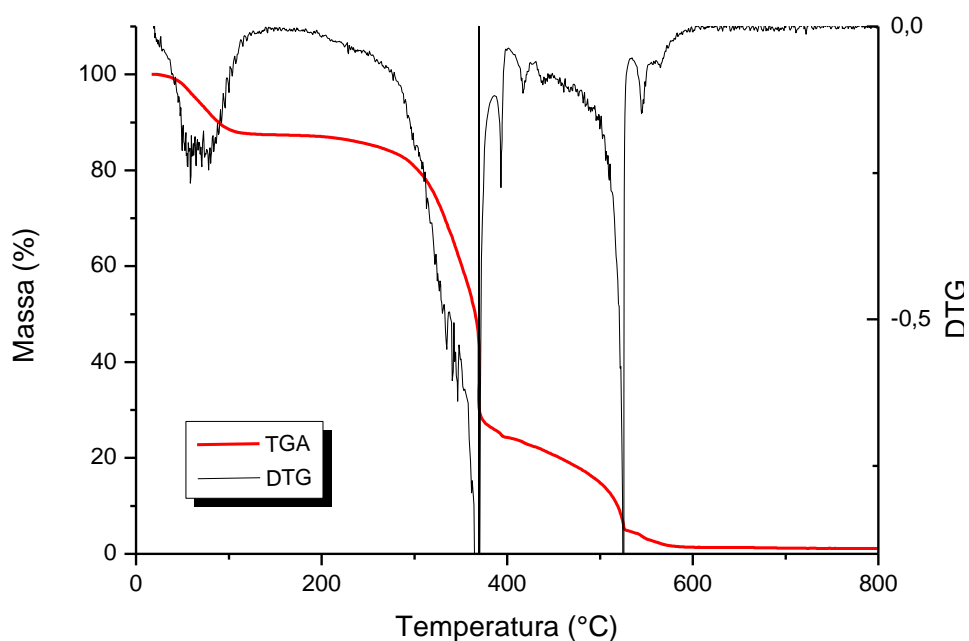
As fibras do bagaço da cana-de-açúcar foram submetidas à análise de termogravimetria, a Figura 18 apresenta as curvas de termogravimetria e sua derivada, DTG de maneira a verificar-se uma pequena perda de massa inicial e duas

grandes expressivas perdas de massa, sendo essas na faixa de 220 a 350 °C e outra entre de 350 a 500 °C. De modo que pequena perda de massa inicial diz respeito a água ainda presente na estrutura da fibra e as duas outras decomposições consecutivas referem-se à decomposição dos elementos da fibra celulósica.

Os constituintes da fibra celulósica, hemicelulose, celulose e lignina apresentam diferentes intervalos de temperatura o qual ocorrem sua decomposição. O estudo realizado por Yang (2007, p.1783) mostra que a hemicelulose se compõe entre 200 e 260 °C, a celulose entre 240 e 350 °C e a lignina se decompõe em intervalo extenso se decompondo simultaneamente com os outros dois constituintes da fibra lignocelulósica (celulose e hemicelulose). Assim, infere-se que a primeira perda de massa expressiva (220 a 350 °C) corresponde a decomposição simultânea da celulose e da hemicelulose enquanto a segunda perda de massa (350 a 500 °C) corresponde a decomposição da lignina e demais componentes presentes.

Dessa forma, as fibras do bagaço da cana-de-açúcar apresentam-se como um reforço viável no que diz respeito ao processamento junto ao polietileno uma vez que sua decomposição se inicia a uma temperatura superior a temperatura de processamento.

Figura 18 – Termogravimetria das fibras do bagaço da cana-de-açúcar



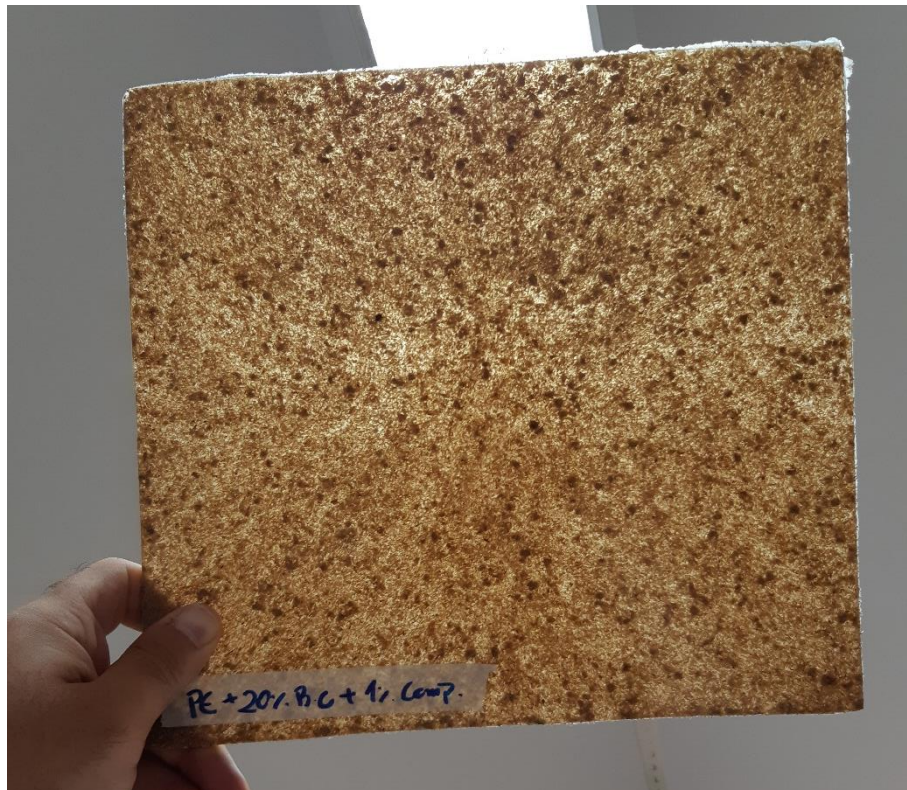
Fonte: Autoria própria

6.2 Compósito PEBD/Fibra do bagaço da cana-de-açúcar

6.2.1 Obtenção

A obtenção do compósito de polietileno de baixa densidade tendo como reforço a fibra do bagaço da cana-de-açúcar foi satisfatória. Apresentou-se uma boa dispersão das fibras na matriz, mostrando-se como um material homogêneo. Contudo, a partir da Figura 19 é possível observar uma das placas conformadas de uma das formulações do compósito apresentando alguns aglomerados de fibra distribuídos em toda a placa.

Figura 19 – Compósito PEBD/Fibra do bagaço da cana-de-açúcar



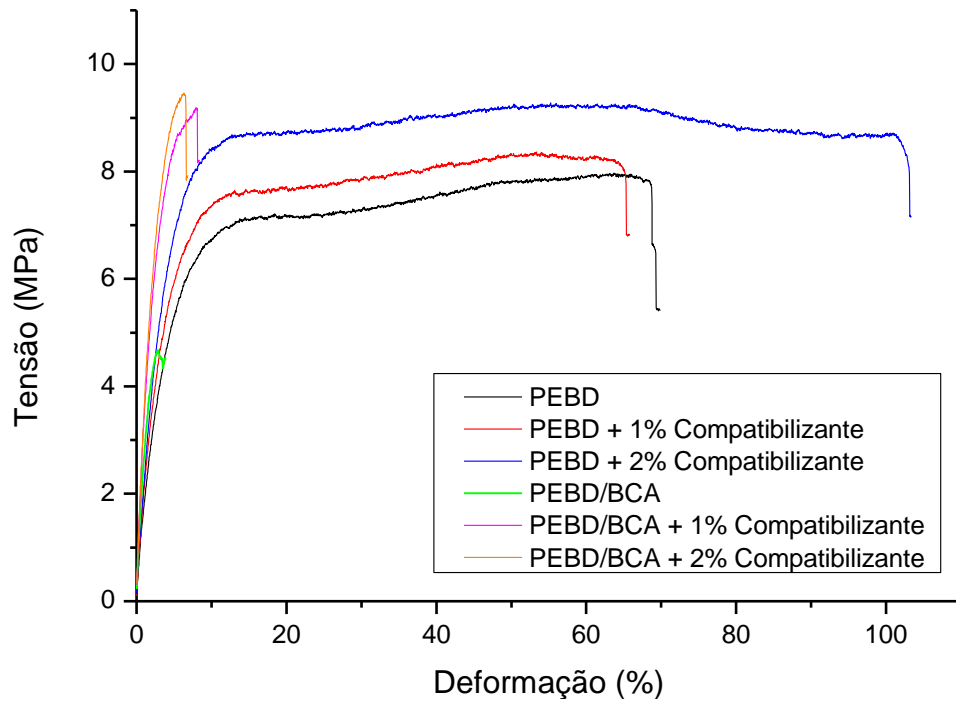
Fonte: Autoria própria

6.2.2 Propriedades mecânicas

Apresentam-se na Figura 20 as curvas de tensão *em função da* deformação das formulações ensaiadas. Os dados das propriedades mecânicas são apresentados

na Tabela 3, sendo esses o limite de resistência à tração (LRT), deformação na ruptura e módulo elástico.

Figura 20 – Curvas tensão vs deformação das formulações de 1 a 6



Fonte: Autoria própria

Tabela 3 – Propriedades mecânicas das formulações de 1 a 6

N° Amostra	Descrição	LRT (MPa)	Deformação na ruptura (%)	Módulo elástico (MPa)
1	Polietileno Puro	7,9 ± 0,3	72,6 ± 1,7	109,6 ± 3,9
2	Polietileno + 1% Compatibilizante	8,4 ± 0,7	72,6 ± 7,45	134,6 ± 9,92
3	Polietileno + 2% Compatibilizante	9,4 ± 0,7	130,3 ± 33,8	130,8 ± 8,7
4	Polietileno + 20% BC	5,4 ± 0,8	6,2 ± 1,3	225,8 ± 28,8
5	Polietileno + 20% BC + 1% Compatibilizante	9,4 ± 0,4	10,1 ± 1,4	270,5 ± 13,6
6	Polietileno + 20% BC + 2% Compatibilizante	10,1 ± 0,4	9,9 ± 1,6	293,9 ± 14,7

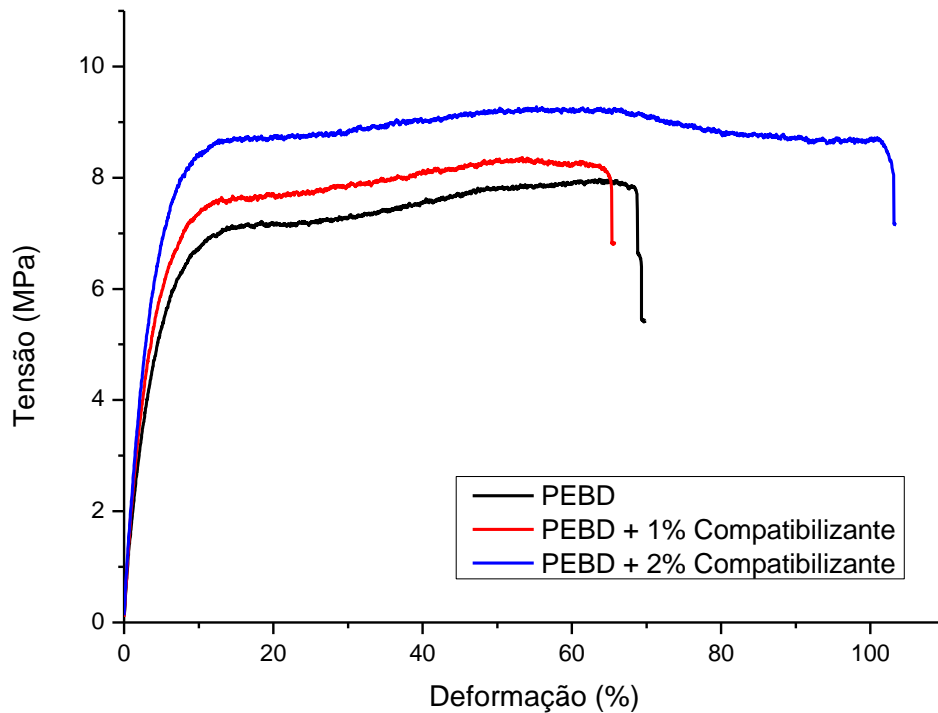
Fonte: Autoria própria

6.2.2.1 Influência do agente compatibilizante no PEBD

Observou-se aumento no limite de resistência à tração e do módulo elástico nas formulações 1, 2 e 3, compostas apenas de polietileno, no que se refere à quantidade de agente compatibilizante presente. É provável que a polaridade presente no anidrido maleico seja o responsável pela aumento das propriedades mecânicas, uma vez que o grupo polar presente na estrutura química do anidrido maleico proporcionou um aumento nas forças intermoleculares secundárias entre as cadeias do PEBD resultando no aumento da resistência mecânica e na rigidez do material, como explica Canevarolo (2013, p. 209): “a existência de grupos polares nas macromoléculas poliméricas tende a aproximar mais fortemente as cadeias entre si, aumentando as forças secundárias”.

A presença do compatibilizante no PEBD influenciou de maneira expressiva a capacidade de deformação do material, observada quantitativamente nos valores de deformação na ruptura, expostos na Tabela 3 e melhor visualizados na Figura 21. É possível observar que a formulação 3 composta por 2% de agente compatibilizante apresentou uma deformação consideravelmente maior em relação as formulações 1 e 2. Uma vez que o agente compatibilizante é composto por anidrido maleico pré-disperso em polietileno de baixa densidade, é possível que a mistura do polietileno presente no compatibilizante com o polietileno utilizado como matriz (BC818) possa ter ocasionado a formação de uma blenda polimérica devido ao teor de agente de acoplamento utilizado para a formulação 3. A possível formação de uma blenda, pode disparar e intensificar mecanismos de deformação, aumentando valores de deformação na ruptura do material. Dessa forma, a formulação 3 foi capaz de apresentar maior alongação e simultaneamente apresentando resistência mecânica devido ao grupo polar presente nas moléculas de anidrido maleico.

Figura 21 – Influência do compatibilizante no PEBD

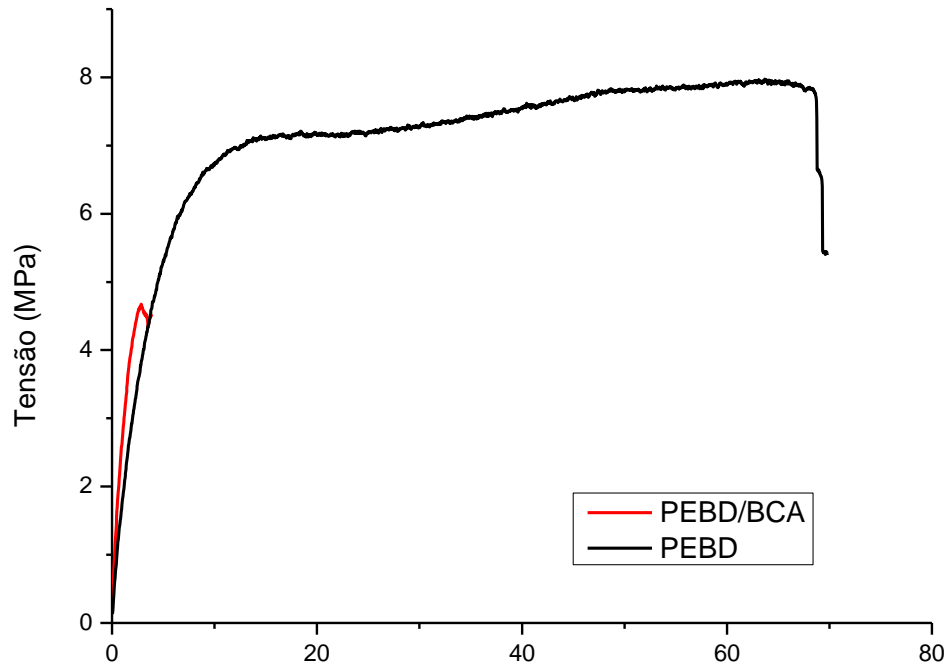


Fonte: Autoria própria

6.2.2.2 Influência do reforço fibroso no compósito PEBD/Fibra do bagaço da cana-de-açúcar

A inserção das fibras na matriz de PEBD sem a utilização de nenhum método de compatibilização resultou em uma diminuição de todas as propriedades mecânicas analisadas do material, exceto o módulo elástico, quando comparado às propriedades da matriz. É possível afirmar tal fato pela comparação entre a formulação 1 e 4, de modo a observar uma diminuição de aproximadamente 41% no limite da resistência a tração e de 94% na deformação na ruptura, enquanto obteve-se um aumento de aproximadamente 46% no módulo elástico. Observa-se na Figura 22 as curvas tensão vs deformação das formulações 1 e 4, constatando as mudanças nas propriedades mecânicas citadas.

Figura 22 – Influência do reforço fibroso no compósito PEBD/Fibra do bagaço da cana-de-açúcar



Fonte: Autoria própria

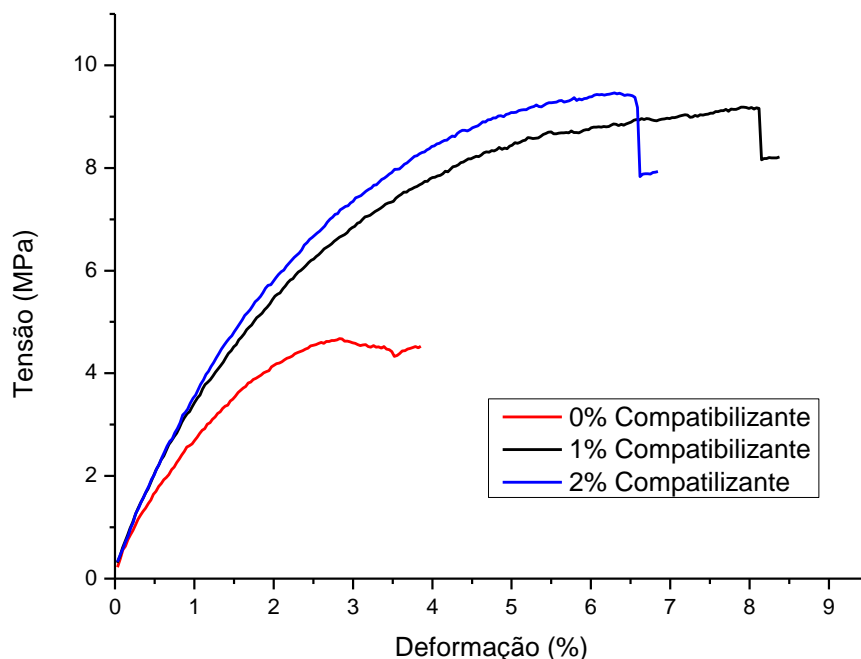
Tal disparidade nos resultados apresentados deve-se à incompatibilidade de uma matriz polimérica de caráter apolar junto às fibras celulósicas do bagaço da cana-de-açúcar de caráter polar, devido às hidroxilas presentes na superfície das fibras ligno-celulósicas. Dessa forma, é possível notar que a adesão entre a matriz e a fibra não foi eficiente, resultando na formação de pontos concentradores de tensão, levando rapidamente à fratura do material.

Assim, verifica-se a necessidade da utilização de um método de compatibilização de modo a viabilizar uma melhor aderência entre a fibra e a matriz com o intuito de obter-se melhores propriedades mecânicas.

6.2.2.3 Influência do agente compatibilizante no compósito PEBD/Fibra do bagaço da cana-de-açúcar

A Figura 23 mostra as curvas tensão vs deformação dos compósitos de PEBD/BCA com 1 e 2% de compatibilizante presente em sua composição. Ao observar as curvas, verifica-se uma considerável melhora nas propriedades mecânicas no material quando há a utilização do agente compatibilizante. A partir dos valores mostrados na Tabela 3, verificou-se um aumento de cerca de 51% no limite de resistência a tração, 44% na elongação na ruptura e 23% no módulo elástico, quando comparamos a formulação 4 e 6.

Figura 23 – Influência do compatibilizante no compósito PEBD/BCA

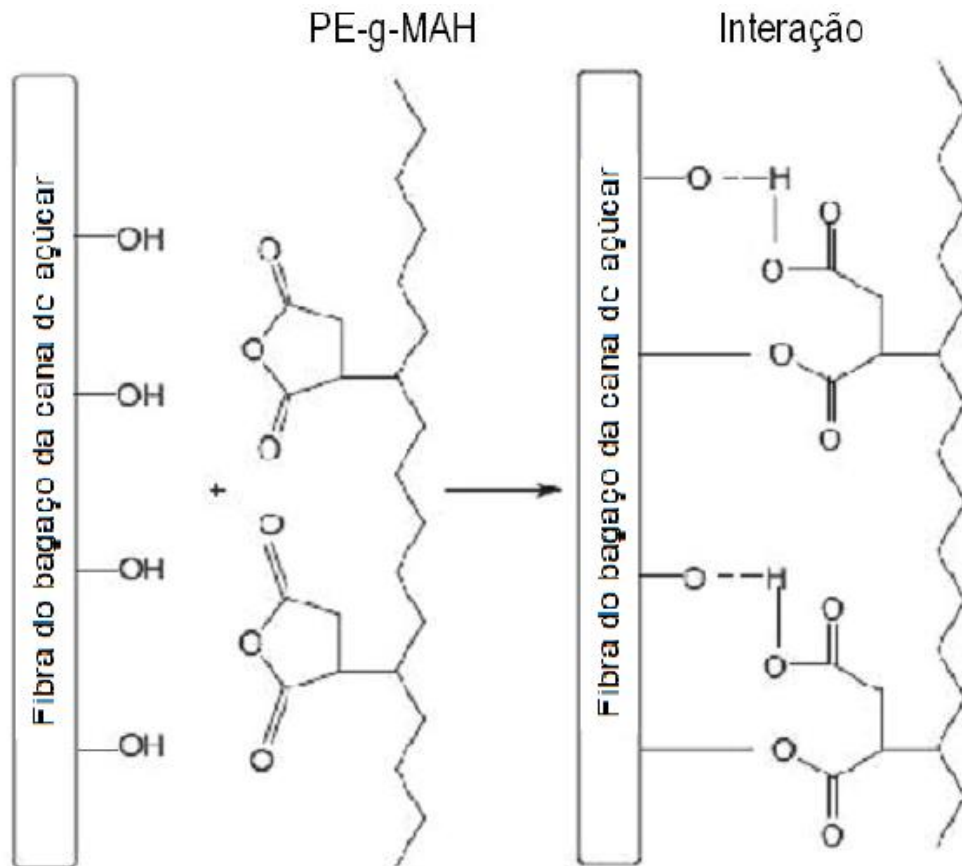


Fonte: Autoria própria

A aderência entre a fibra e matriz ocorre pela formação de uma interface formada pelo agente compatibilizante de modo a reagir com as hidroxilas presentes na superfície da fibra ligno-celulósica e formar um emaranhado molecular com a matriz polimérica de maneira a promover o ancoramento mecânico. A Figura 24 traz uma representação da ação do agente compatibilizante no compósito. Assim, o agente compatibilizante torna-se essencial na composição do compósito uma vez que

promove ao compósito uma aderência fibra – matriz suficiente para que a transferência de tensões da matriz para fibra ocorra e o material compósito apresente propriedades mecânicas superiores a da matriz pura.

Figura 24 – Representação da interação entre as fibras do bagaço da cana-de-açúcar e agente compatibilizante



Fonte: Adaptado de Oliveira (2010, p.14)

6.2.2.4 Análise da interface fibra-matriz

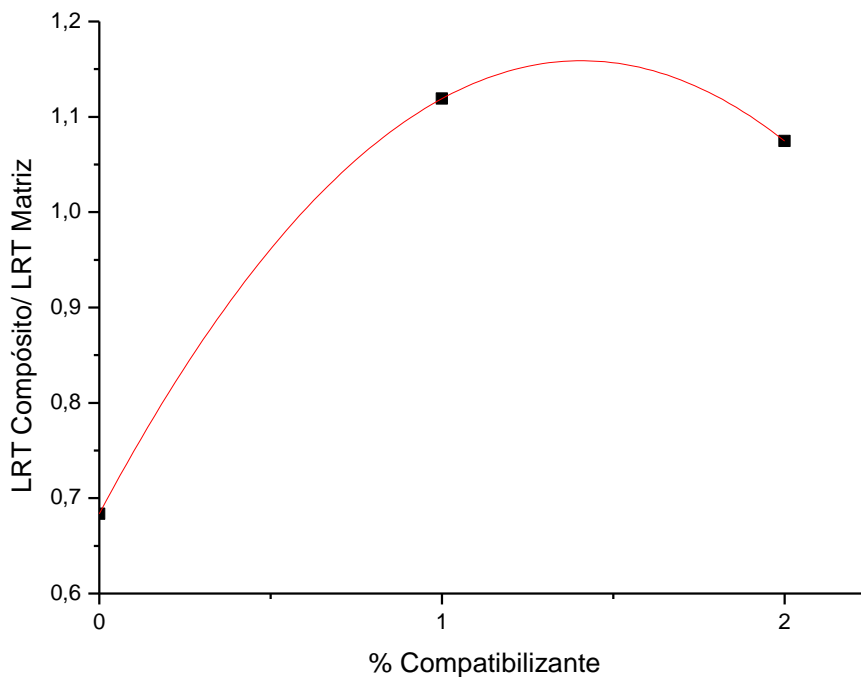
Os valores de limite de resistência à tração (LRT) dos compósitos (formulações 4, 5 e 6) foram relativizados pelos valores de LRT das suas respectivas matrizes (formulações 1, 2 e 3), respectivamente, de acordo com a quantidade de compatibilizante utilizado em cada uma das formulações. Os valores foram plotados no eixo das ordenadas do gráfico apresentado na Figura 25 e o eixo da abscissa mostra a quantidade de compatibilizante. Dessa forma, avalia-se a resistência do

material de modo a desconsiderar a influência da matriz afim de se analisar as propriedades mecânicas da região da interface entre a fibra e matriz.

De acordo com a Figura 25, a formulação 5, composta por 20% da fibra do bagaço da cana-de-açúcar e 1% de compatibilizante apresentou um valor de LRT relativizado maior que o encontrado para o compósito na ausência do agente compatibilizante (formulação 4), e um valor muito próximo ao do compósito com 2% de agente compatibilizante (formulação 6). Dessa forma, observa-se uma tendência da curva em se estabilizar a partir do teor de 1% de compatibilizante e até mesmo sofrer uma leve queda para teores maiores. também que acima de aproximadamente 1,5% de compatibilizante observa-se um início de perda de propriedades. Contudo, para se estudar melhor o o comportamento da curva, seria necessário a avaliação de um maior número de teores de agente compatibilizante.

Assim, pelos resultados obtidos neste trabalho, pode-se inferir que o teor ótimo de compatibilizante encontrado é de 1%, uma vez que abaixo deste percentual a propriedade relativa de LRT cai bruscamente, e acima deste valor, mesmo dobrando o teor de agente compatibilizante, o LRT pouco sofre variação.

Figura 25 – Análise da interface matriz-fibra



Fonte: Autoria própria

7 CONCLUSÃO

Conclui-se, a partir dos resultados demonstrados, que os objetivos do trabalho foram alcançados: obteve-se os compósitos de polietileno de baixa densidade reforçados com a fibra do bagaço da cana-de-açúcar, caracterizando-o mecanicamente e termicamente, avaliando a influência do agente compatibilizante e definindo um valor ótimo de compatibilizante.

O processamento do compósito via extrusora monorosca foi suficiente para que ocorresse a mistura da matriz polimérica e as fibras do bagaço da cana-de-açúcar, contudo apresentaram-se aglomerados de fibras no compósito após o processo de prensagem.

A presença do agente compatibilizante mostrou-se essencial quanto a promoção de melhores propriedades mecânicas, de maneira a promover um aumento significativo no limite de resistência à tração, módulo elástico e alongamento na ruptura. Apesar da formulação 6, com 2% de compatibilizante, mostrar-se como a formulação com melhores propriedades mecânicas, ao se analisar as propriedades do material sem a influência da matriz, a formulação 5, com 1 % de compatibilizante, apresentou-se como o teor ótimo de compatibilizante, de modo a apresentar pouca variação no LRT após o teor de 1%, mesmo incorporando-se o dobro do percentual de agente compatibilizante.

Dessa forma, é possível a obtenção de compósitos de polietileno de baixa densidade reforçados com 20% da fibra do bagaço da cana-de-açúcar que apresente melhores propriedades mecânicas que a matriz pura, uma vez que haja a aplicação de um agente compatibilizante.

Assim, destinação das fibras do bagaço da cana-de-açúcar para a produção de material compósito de matriz de PEBD trata-se de uma alternativa de menor impacto ambiental e ecologicamente correta, evitando a queima do resíduo da indústria sucroalcooleira. Ademais, o uso do reforço fibroso em 20% reduz a quantidade de material polimérico utilizado, mostrando-se, também, como uma alternativa economicamente interessante.

REFERÊNCIAS

AGUNSOYE, J.O.; AIGBODION, V.S. **Bagasse filled recycled polyethylene bio-composites: Morphological and mechanical properties study**. Results in Physics, v. 3, p. 187–194, 2013. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2211379713000296>>. Acesso em: 3 set. 2018.

VÄISÄNEN, Taneli; DAS, Oisik; TOMPPU, Laura. **A review on new bio-based constituents for natural fiber-polymer composites**. Journal of Cleaner Production, v. 149, p. 582–596, 2017. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095965261730358X>>. Acesso em: 19 set. 2018.

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9 edição. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

MOTEZUKI, Joice Erica. **Influência da nanoargila no envelhecimento higrotérmico de compósitos de polipropileno/ PP Maleado/ Fibra de Vidro**. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010.

MEYERS, Marc A.; CHAWLA, Krishan Kumar. **Mechanical behavior of materials**. 2nd ed. Cambridge ; New York: Cambridge University Press, 2009.

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

MARINELLI, Alessandra L.; MONTEIRO, Marcos R.; AMBRÓSIO, José 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. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14282008000200005&lng=pt&tlng=pt>. Acesso em: 17 set. 2018.

LOBO, Alexandre Manuel. **Desenvolvimento de Produtos com Novos Materiais Poliméricos Biodegradáveis**. p. 166, 2018. Disponível em: <<https://repositorio.ipl.pt/handle/10400.21/8396>>. Acesso em: 18 set. 2018.

GANDARA, Meriene; GONÇALVES, Adilson Roberto; SARON, Clodoaldo. **Compósitos de PET reciclado com fibra de cana-de-açúcar tratada por explosão a vapor**. Matéria (Rio de Janeiro), v. 22, n. 4, 2017. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762017000400413&lng=pt&tlng=pt>. Acesso em: 17 set. 2018.

MULINARI, Daniella Regina. **Comportamento Térmico, Mecânico e Morfológico dos Compósitos de Polietileno de Alta Densidade Reforçados com Fibras de Celulose do Bagaço de Cana de açúcar**. p.112, 2009. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/106312>>. Acesso em: 18 set. 2018.

CESTARI, Sibeles. **Compósitos Poliméricos com Fibras Vegetais**. p. 37, 2010. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/251233109/download>>. Acesso em: 18 set. 2018.

LOH, Y.R.; SUJAN, D.; RAHMAN, M.E.; *et al.* **Sugarcane bagasse—The future composite material: A literature review**. Resources, Conservation and Recycling, v. 75, p. 14–22, 2013. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092134491300058X>>. Acesso em: 3 set. 2018.

PEREIRA, Paulo Henrique Fernandes; ROSA, Morsyleide de Freitas; CIOFFI, Maria Odila Hilário; *et al.* **Vegetal fibers in polymeric composites: a review**. Polímeros, v. 25, n. 1, p. 9–22, 2015. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14282015000100002&lng=en&tling=en>. Acesso em: 18 set. 2018.

Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. – v. 1 – Brasília : Conab, 2013- v. quadrimestral. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acesso em: 7 de nov. 2018.

CANEVAROLO Jr., S. V. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 2.ed. São Paulo: Artliber Editora, 2010.

COUTINHO, F. M.B; MELLO, I. L.; *et al.* **Polietileno: Principais Tipos, Propriedades e Aplicações**. Polímeros, v. 13, n. 1, p. 1–13, 2003. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/po/v13n1/15064.pdf>>. Acesso em: 7 nov. 2018.

R.R SOUZA; FAGUNDES, E. C. M.; SANTANA, R. M. C. **Influência Do Teor De Pead Nas Propriedades Termomecânicas De Blendas Ternárias Poliolefinicas**. n. 21º CBECIMAT-Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2014. Disponível em: <<http://www.metallum.com.br/21cbecimat/CD/PDF/405-002.pdf>>. Acesso em: 26 out. 2018.

JANCAR, J. – **Chapter: Engineered Interphases in Polypropylene Composites -- Handbook of Polypropylene and Polypropylene Composites.** Edited by Karian H. G.. Marcel Dekker, Inc, NY, 1999.

BLEDZKI, A. **Composites reinforced with cellulose based fibres.** Progress in Polymer Science, v. 24, n. 2, p. 221–274, 1999. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0079670098000185>>. Acesso em: 18 set. 2018.

CORREA, Carlos A.; FONSECA, Carla N.P.; NEVES, Silmara; *et al.* **Compósitos termoplásticos com madeira.** Polímeros, v. 13, n. 3, p. 154–165, 2003. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14282003000300005&lng=pt&tlng=pt>. Acesso em: 3 set. 2018.

MOTAUNG, Tshwafo E; MOCHANE, Mokgaotsa J. **Systematic review on recent studies on sugar cane bagasse and bagasse cellulose polymer composites.** Journal of Thermoplastic Composite Materials, v. 31, n. 10, p. 1416–1432, 2018. Disponível em: <<http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0892705717738292>>. Acesso em: 30 set. 2018.

MULINARI, D; VOORWALD, H; CIOFFI, M; *et al.* **Sugarcane bagasse cellulose/HDPE composites obtained by extrusion.** Composites Science and Technology, v. 69, n. 2, p. 214–219, 2009. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0266353808004119>>. Acesso em: 3 set. 2018.

MULINARI, Daniella R.; VOORWALD, Herman J.C.; CIOFFI, Maria Odila H.; *et al.* **Preparation and properties of HDPE/sugarcane bagasse cellulose composites obtained for thermokinetic mixer.** Carbohydrate Polymers, v. 75, n. 2, p. 317–321, 2009. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S014486170800338X>>. Acesso em: 3 set. 2018.

YANG, H. *et al.* **Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis.** Fuel, v. 86, n. 12–13, p. 1781–1788, ago. 2007. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001623610600490X>>. Acesso em: 13 maio 2019.

**ANEXO A – DADOS TÉCNICOS PEBD (BC818) E AGENTE DE
COMPATIBILIZAÇÃO (POLIBOND ® 3349)**

Propriedades Típicas – Polietileno de baixa densidade (BC818)

Característica	Método	Unidades	Valores
Índice de fluidez	D1238	g/10 min	8,3
Densidade	D1505	g/cm ³	0,918
Resistência a Tração no Escoamento	D638	MPa	9
Resistência a Tração na Ruptura	D638	MPa	12
Módulo de Flexão Secante	D790	MPa	200

Fonte: Braskem (2018, p.1)

Propriedades Típicas – Agente de Compatibilização (POLIBOND ® 3349)

Característica	Método	Unidades	Valores
Índice de fluidez	D1238	g/10 min	8
Densidade	D792	g/cm ³	0,93
Conteúdo de anidrido maleico	D6047	-	Alto (1,0-1,4%)
Temperatura de fusão	DSC	°C	123

Fonte: Addivant (2013)