

**ESTUDO DE PROPRIEDADES TÉRMICAS E MECÂNICAS DE
COMPÓSITO DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE E RESÍDUO
DO TRONCO DA PALMEIRA DE PUPUNHA PARA USO COMO
MADEIRA PLÁSTICA**

Ana Luísa de Castro Conceição

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheira.

Orientadoras: Elen Beatriz Acordi Vasques Pacheco
e Viviane Alves Escócio

Rio de Janeiro

Março de 2019

ESTUDO DE PROPRIEDADES TÉRMICAS E MECÂNICAS DE COMPÓSITO DE
POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE E RESÍDUO DO TRONCO DA PALMEIRA DE
PUPUNHA PARA USO COMO MADEIRA PLÁSTICA

Ana Luísa de Castro Conceição

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE
ENGENHARIA AMBIENTAL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO AMBIENTAL.

Examinado por:

Prof.^a Elen Beatriz Acordi Vasques Pacheco, D.Sc.-
orientadora

Viviane Alves Escócio, D.Sc.- orientadora

Lys Sirelli, D.Sc.

Prof.^a Monica Pertel, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

Março de 2019

Conceição, Ana Luísa de Castro

Estudo de propriedades térmicas e mecânicas de compósito de polietileno de alta densidade e resíduo do tronco da palmeira de pupunha para uso como madeira plástica / Ana Luísa de Castro Conceição. -- Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2019.

x, 46 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadoras: Elen Beatriz Acordi Vasques Pacheco e Viviane Alves Escócio.

Projeto de Graduação – UFRJ/ POLI/ Engenharia Ambiental, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 40-46.

1. madeira plástica. 2. compósito. 3. polietileno. 4. palmito pupunha. I. Pacheco, Elen Beatriz Acordi Vasques, orient. II. Escócio, Viviane Alves, coorient. III. Universidade Federal do Rio de Janeiro. IV. Título.

AGRADECIMENTOS

Definitivamente, foi um processo desafiador. Desconstrução contínua, diferentes formas de buscar o aprendizado e autoconhecimento foram imprescindíveis ao longo desses anos, que culminam com essa conquista tão importante para mim.

Ao agradecer, impossível não pensar instantaneamente na minha família: minha mãe Carmem, mulher que me orgulha e inspira incessantemente; meu pai Luiz, com seu enorme coração e disposição; e irmão Franco, fonte contínua de orientação, riso e companheirismo. E Bruno, meu companheiro, amor da vida e parceiro, sem você eu teria enlouquecido. Muito obrigada por me dar asas e ser minha âncora.

Agradeço à Elen, que foi muito mais do que uma orientadora, sempre aberta e disposta, me ajudou das formas mais diversas possíveis (e não só ao longo do TCC). Tive a sorte de contar com sua orientação ao longo de quase todo o curso. Palavras não expressam a minha gratidão, obrigada por todos os conselhos e auxílio. Desculpa por dar muito trabalho também. Minha imensa gratidão à galera do IMA, em especial Viviane Escócio, também orientadora, e Júlio Jadorno, técnico incansável, que foram extremamente solícitos e imprescindíveis ao longo de toda a parte experimental, desde a iniciação científica.

Meus amigos da vida - Bea, Pedro, Jess, Luke, Mari, Rapha, Luma, Pauli, Tícia, Malu, Iago e Lucas - que incentivaram (e incentivam), compreenderam as ausências e celebraram todas as vitórias, muito obrigada. Impossível não agradecer aos amigos que a ambiental me presenteou: Tatá, Xuxu, Bruna, Elena, Nat, Léo, Marcos... Esse caminho foi muito mais leve por poder compartilhar com vocês as loucuras (positivas ou não) que a UFRJ proporciona. Obrigada por manterem a minha sanidade.

Um agradecimento especial a todas as mulheres com o qual eu tive o prazer de compartilhar esses anos. Nossa presença na engenharia é resistência, é inspiração e é orgulho. Tenho inclusive o prazer de ter uma banca plenamente feminina. À Lys e à Mônica, meu muito obrigada!

Obrigada à equipe da Controllab Ambiental, pelos ensinamentos, suporte, compreensão, pela aposta em minha capacidade profissional e por tornarem a pesada rotina tão leve.

A todos e todas que direta ou indiretamente fizeram parte dessa trajetória, incluindo colegas de curso, professores e funcionários, meu sincero agradecimento.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

ESTUDO DE PROPRIEDADES TÉRMICAS E MECÂNICAS DE COMPÓSITO DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE E RESÍDUO DO TRONCO DA PALMEIRA DE PUPUNHA PARA USO COMO MADEIRA PLÁSTICA

Ana Luísa de Castro Conceição

Março/2019

Orientadoras: Elen Beatriz Acordi Vasques Pacheco e Viviane Alves Escócio

Curso: Engenharia Ambiental

Visando o desenvolvimento de materiais sustentáveis que reduzam a dependência de combustíveis fósseis, aliado à sua viabilidade econômica, o uso de recursos vegetais se apresenta como alternativa para utilização como reforço em matrizes poliméricas, em substituição às fibras sintéticas. O Brasil se destaca nesse cenário, por possuir vocação econômica agrícola. O objetivo deste projeto foi avaliar, a partir da análise das propriedades térmicas e mecânicas de compósitos formados com fibra proveniente do tronco da palmeira de pupunha e polietileno de alta densidade (HDPE), a viabilidade de sua utilização como madeira plástica na substituição da madeira natural. Foram utilizados elevados teores de fibra ($\geq 50\%$ m/m) e os mesmos apresentaram boas propriedades mecânicas. Os resultados obtidos a partir das análises térmicas revelaram que a temperatura de deflexão térmica do compósito formado de HDPE/fibra 50/50% em massa apresentou valor 15% superior ao polietileno puro. Não houve variação das temperaturas de fusão cristalina e cristalização no resfriamento, contudo, houve redução no grau de cristalinidade. A expansão térmica apresentou variação percentual média nos compósitos em relação ao HDPE de -0,4%, -0,5% e 0,1% na largura, comprimento e espessura, respectivamente. Houve elevação do módulo de tração e flexão em relação ao HDPE puro em 50% e 226%, respectivamente. Concluiu-se que a fibra de palmito pupunha apresenta-se como reforço estrutural e que o compósito formado pode atuar como madeira plástica, além de consistir em uma destinação adequada dos resíduos provenientes do cultivo de tal vegetal.

Palavras-chave: Madeira Plástica; Compósito; Polietileno; Palmito Pupunha.

Abstract of Undergraduate Project presented to Poli/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for degree of Environment Engineer.

**STUDY OF THERMAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF HIGH DENSITY
POLYETHYLENE COMPOSITE AND PEACH PALM TREE RESIDUE FOR USE
AS PLASTIC WOOD**

Ana Luísa de Castro Conceição

March/2019

Advisors: Elen Beatriz Acordi Vasques Pacheco and Viviane Alves Escócio

Course: Environmental Engineering

Aiming to develop sustainable materials that could reduce the dependence of fossil fuels, along with its economic viability, the use of vegetal resources is presented as an alternative for use as reinforcement in polymer matrices, replacing the synthetic fibers. Brazil stands out in this scenario, because it has an agricultural economic vocation. The objective of this project was to evaluate the feasibility of its use as plastic wood in the substitution of natural wood from the analysis of thermal and mechanical properties of composites formed with fiber from peach palm tree and high density polyethylene (HDPE). High fiber contents ($\geq 50\%$ m/m) were used and presented good mechanical properties. The results obtained from the thermal analyzes revealed that the heat deflection temperature of the composite HDPE/fiber 50/50% mass presented a value 15% higher than the pure polyethylene. There was no variation of the crystalline melting temperatures and crystallization in the cooling, however, there was a decrease in the degree of crystallinity. The thermal expansion showed a mean percentage variation in the composites in relation to HDPE of -0.4%, -0.5% and 0.1% in width, length and thickness, respectively. There was elevation of the tensile and flexure modulus in relation to pure HDPE by 50% and 226%, respectively. It was concluded that the peach palm fiber presents as a structural reinforcement and that the formed composite can act as plastic wood, besides constituting a proper destination of the residues coming from the cultivation of such plant.

Keywords: Plastic Wood; Composite; Polyethylene; Peach Palm.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. Objetivo geral	3
2.2. Objetivos específicos	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1. Madeira plástica e suas propriedades.....	4
3.2. Uso de fibras naturais em matrizes poliméricas	6
3.3. Compósitos de polietileno de alta densidade e carga lignocelulósica	9
4. METODOLOGIA	17
4.1. Materiais	18
4.2. Equipamentos.....	18
4.3. Metodologia	19
4.3.1. Processamento da mistura	19
4.3.2. Caracterização dos compósitos.....	20
5. RESULTADOS.....	25
5.1. Propriedades térmicas	25
<i>Temperatura de deflexão térmica.....</i>	<i>25</i>
<i>Temperaturas de ponto de amolecimento VICAT.....</i>	<i>26</i>
<i>Calorimetria diferencial de varredura</i>	<i>27</i>
<i>Análise termogravimétrica</i>	<i>29</i>
<i>Expansão térmica</i>	<i>33</i>
5.2. Propriedades mecânicas	34
<i>Resistência à flexão</i>	<i>34</i>
<i>Resistência à tração</i>	<i>35</i>
5.3. Índice de fluidez.....	36
6. CONCLUSÃO	38

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Classificação das fibras.....	7
Figura 2: Fluxograma das etapas do desenvolvimento do estudo.....	17
Figura 3: Representação das dimensões do corpo de prova utilizado no ensaio de expansão térmica.	22
Figura 4: Temperaturas de deflexão térmica do HDPE puro e compósitos HDPE/fibra.....	25
Figura 5: Temperaturas de amolecimento VICAT do HDPE puro e compósitos HDPE/fibra, em °C.	26
Figura 6: Curva de análise térmica de varredura para o compósito de HDPE e fibra de pupunha de 35 mesh na proporção 50/50% m/m.	28
Figura 7: Curvas de TGA e sua derivada do HDPE puro.	30
Figura 8: Curvas de TGA e sua derivada do compósito de HDPE e fibra de pupunha de 35 mesh na proporção 80/20 %m/m.	31
Figura 9: Curvas de TGA e sua derivada do compósito de HDPE e fibra de pupunha de 35 mesh na proporção 50/50 %m/m.	31
Figura 10: Curvas de TGA e sua derivada do compósito de HDPE e fibra de pupunha de 65 mesh na proporção 80/20 %m/m.	32
Figura 11: Curvas de TGA e sua derivada do compósito de HDPE e fibra de pupunha de 65 mesh na proporção 50/50 %m/m.	32
Figura 12: Módulo de resistência à flexão de HDPE puro e compósitos HDPE/fibra.....	34
Figura 13: Módulo de resistência à tração de HDPE puro e compósitos HDPE/fibra.....	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais resultados dos ensaios mecânicos realizados nos estudos citados na revisão bibliográfica. (Fonte: elaboração própria).....	15
Tabela 2: Temperatura das zonas de aquecimento da extrusora.	20
Tabela 3: Temperatura de fusão, de cristalização no resfriamento, entalpia e grau de cristalinidade dos compósitos HDPE/fibra de pupunha.	27
Tabela 4: Temperatura de degradação térmica dos compósitos HDPE e fibra de pupunha por análise termogravimétrica.....	29
Tabela 5: Valores de expansão térmica do HDPE puro e do compósito de HDPE/fibra.....	33
Tabela 6: Comparação entre as propriedades mecânicas da madeira plástica e o compósito de HDPE e fibra de pupunha.	36

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ASTM - *American Society for Testing and Materials*
DSC - Calorimetria diferencial de varredura (*differential scanning calorimeter*)
DTG - Derivada termogravimétrica (*derivative thermogravimetry*)
HDPE - Polietileno de alta densidade (*high density polyethylene*)
HDPE-R - Polietileno de alta densidade reciclado (*recycled high density polyethylene*)
HDT - Temperatura de deflexão térmica (*heat deflection temperature*)
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IMA - Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano
MFI - Índice de fluidez (*melt flow index*)
NERDES - Núcleo de Excelência em Reciclagem e Desenvolvimento Sustentável
PE - Polietileno
PP - Polipropileno
PS - Poliestireno
PVC - Poli(cloreto de vinila)
TGA - Análise termogravimétrica (*thermogravimetric analysis*)
UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro
VICAT - Temperatura de ponto de amolecimento
WPC - Compósito de plástica e madeira (*wood plastic composite*)

1. INTRODUÇÃO

Diante dos desafios que constituem o ímpeto de reduzir os impactos ambientais negativos em todas as etapas do processo produtivo – produção, beneficiamento, consumo e descarte – é crescente o esforço para a utilização de recursos renováveis e para a diminuição da geração e destinação final adequada dos resíduos. A busca por materiais, produtos e processos guiados por ideais de sustentabilidade, ecologia industrial e química verde constituem grandes desafios que compreendem a crescente urgência no desenvolvimento de tecnologias inovadoras que diminuam a dependência de combustíveis fósseis, aliada à viabilidade econômica de tais materiais.

O uso de recursos vegetais na produção de novos materiais se apresenta como uma relevante alternativa tecnológica ao consumo de plástico, uma vez que tais recursos consistem em fontes renováveis e de baixo custo (MARTINS e MATTOSO, 2004; MARINELLI *et al.*, 2008). Além disso, suas propriedades mecânicas podem ser comparadas às de outros reforços usualmente adotados, como fibras de vidro e fibras sintéticas (SATYANARAYANA *et al.*, 1990; GOMES *et al.*, 2013).

De acordo com McLaughlin (1980), fibras celulósicas apresentam ainda baixa densidade, módulo de resistência elevado, não são abrasivas, de forma que não desgastam equipamentos no processamento, não são tóxicas, podem ser modificadas por agentes químicos e possuem grande abundância, por serem provenientes de fontes renováveis. Outra vantagem do uso de fibras naturais em compósitos poliméricos refere-se à redução de peso de 10 a 30 % em massa, além de incluir benefícios nas propriedades acústicas (FARINA, SOARES, *et al.*, 2012). Por esses aspectos, justifica-se sua aplicabilidade como reforço em matrizes poliméricas.

O Brasil se destaca nesse cenário por possuir forte economia agrícola e, desta forma, a utilização de fibras naturais na indústria de polímeros se constitui como importante possibilidade de explorar matérias-primas naturais com agregação de valor (IOZZI, MARTINS, *et al.*, 2010).

Compósitos de fibras naturais e plásticos também podem ser utilizados para a fabricação de produtos que possam substituir a madeira natural que recebem o nome de madeira plástica. Segundo Azeez (2017), madeira plástica composta de fibras lignocelulósicas apresentam baixo impacto no meio ambiente, com uma grande variedade de aplicações no campo da construção civil, compreendendo boas propriedades mecânicas e físicas com baixo custo de matérias-primas. O uso de compósitos a base de fibras naturais pode ser observado desde em

componentes da indústria automobilística até na construção civil, com destaque para usos não estruturais, como pisos, decks, bancos, cercas etc (ARNANDHA, SATYARNO, *et al.*, 2017).

Contudo, uma questão relevante que diz respeito ao reforço dos polímeros com fibras naturais é a degradação térmica das fibras, que ocorre em média em torno dos 200°C, o que se configura como fator limitante à temperatura de moldagem (PEREIRA *et al.*, 2015; SUMMERSCALES *et al.*, 2010). Associado a isso, características como expansão térmica, retração e absorção de umidade podem proporcionar deformações na estrutura, comprometendo sua utilização em ambientes externos (YANG *et al.*, 2013; ANATOLE, 2007).

Este trabalho busca, portanto, investigar a aplicabilidade de compósito à base de polietileno de alta densidade para atuar como madeira plástica, visando a redução do uso de materiais provenientes de combustíveis fósseis, bem como utilizando como reforço estrutural a fibra do tronco de palmito pupunha, que consiste em um resíduo orgânico proveniente da agricultura. Para tal, faz-se necessário investigar as propriedades térmicas, incluindo estabilidade dimensional sob temperatura, e mecânicas de tal compósito, de forma a assegurar seus possíveis usos.

Este trabalho está estruturado em sete capítulos, como se segue:

- O capítulo 2 descreve os objetivos geral e específico do trabalho;
- O capítulo 3 consiste em uma revisão bibliográfica, no qual foram abordados temas acerca das propriedades da madeira plástica, do uso de fibras em matrizes poliméricas, bem como a discussão de estudos que embasaram e buscaram investigar as propriedades térmicas e mecânicas de compósitos de polietileno de alta densidade (HDPE) e cargas vegetais;
- O capítulo 4 descreve a metodologia do estudo, especificando os equipamentos, procedimentos e ensaios para a caracterização dos compósitos utilizados na presente pesquisa;
- O capítulo 5 apresenta os resultados, análises e interpretações a partir dos ensaios realizados;
- O capítulo 6 discorre sobre as conclusões do estudo;
- Por fim, o capítulo 7 apresenta as referências bibliográficas utilizadas para embasar a pesquisa.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

O objetivo deste projeto foi avaliar, a partir da análise das propriedades térmicas, mecânicas e de fluidez de compósitos com diferentes teores de fibra proveniente do tronco da palmeira de pupunha com polietileno de alta densidade (HDPE), a viabilidade de sua utilização como madeira plástica na substituição da madeira natural.

2.2. Objetivos específicos

Para tanto, este projeto tem como objetivo específico:

- Analisar a influência do teor de carga lignocelulósica (fibra do tronco da palmeira de pupunha) e da sua granulometria em relação às propriedades térmicas e mecânicas do compósito de HDPE;
- Compreender a influência da incorporação de elevados teores de fibra ($\geq 50\%$ em massa) na matriz polimérica e avaliar a viabilidade técnica de seu processamento e do uso pretendido;
- Avaliar a estabilidade dimensional dos compósitos sob temperatura quando comparados ao HDPE puro;
- Propor alternativa de destinação do resíduo gerado na produção de palmito pupunha.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, foi realizada uma revisão bibliográfica de artigos que envolvem a busca pela incorporação de fibras na formulação de materiais e suas propriedades, considerando principalmente o material polietileno de alta densidade.

3.1. Madeira plástica e suas propriedades

O desenvolvimento de materiais compósitos se apresenta como alternativa para reduzir o consumo de plástico e melhorar suas propriedades mecânicas. Esses são usualmente formados por duas fases, uma denominada matriz, que é contínua e envolve a outra, chamada de fase dispersa. Suas propriedades variam em função das fases que os constituem, das suas quantidades relativas e da adesão entre as mesmas. Variam também em função da geometria da fase dispersa, que se relaciona com a forma das partículas, seu tamanho, distribuição e orientação (CALLISTER JR., 2006).

A relevância dos compósitos na engenharia se dá pelo fato de que, ao combinarem-se dois ou mais materiais diferentes, pode-se obter como resultado um material cujas propriedades podem ser superiores às dos seus componentes individualmente. Desta forma, seus constituintes podem ser selecionados visando conferir propriedades não existentes em um único material, como por exemplo, resistência mecânica, tenacidade, densidade, dureza, condutividade, resistência à corrosão, desempenho em altas temperaturas, dentre outras (IOZZI, MARTINS, *et al.*, 2010).

Visando estabelecer uma análise comparativa, é importante destacar os conceitos que envolvem as vantagens e aplicações da madeira plástica em relação à madeira natural.

A madeira natural é um material amplamente utilizado para fins estruturais e não estruturais na construção civil. Suas vantagens incluem baixa densidade, elevada resistência e dureza, não é tóxica e possui baixa condutividade térmica. Contudo, sua principal desvantagem diz respeito à baixa resistência à umidade, além de ser susceptível à ação de pragas (ARNANDHA, SATYARNO, *et al.*, 2017).

Contudo, um fator extremamente relevante no que concerne a exploração de madeira natural é a necessidade de preservação das florestas. Segundo dados do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), entre 2017 e 2018 o desmatamento na Amazônia cresceu 13,7%. Ainda,

segundo o mesmo instituto, restam apenas 12,5% da área original do bioma Mata Atlântica em bom estado de conservação. Contudo, de acordo com o Relatório Técnico elaborado pela Fundação SOS Mata Atlântica e pelo INPE, o desmatamento da Mata Atlântica entre 2016 e 2017 teve queda de 56,8% em relação ao período anterior (2015-2016). Esta redução foi associada a medidas legais, como o maior controle e fiscalização, autuação ao desmatamento ilegal e necessidade de autorização para supressão de vegetação.

Assim, o uso da madeira plástica se apresenta como aliado à preservação das florestas e redução do desmatamento, uma vez que consiste em alternativa ao uso de madeira natural, uma vez que possui boas propriedades mecânicas, além de consistir num material de baixo custo, também renovável e reciclável (ARNANDHA, SATYARNO, et al., 2017). Segundo a *American Society for Testing and Materials* (ASTM) (2018), madeira plástica é o produto composto principalmente de plástico, com seção transversal retangular, sendo tipicamente fornecido em placas e tamanhos que atendem o mercado de madeiras naturais, podendo apresentar perfil oco ou preenchido e contendo em sua composição um ou mais polímeros. No entanto, os produtos de madeira plástica também podem exibir uma seção transversal circular, bem como outras formas (SANTOS, CANTO, et al., 2018).

Madeira plástica pode ser moldada por extrusão, injeção ou compressão e pode ser feita com qualquer tipo de plástico. No entanto, as bases poliméricas mais amplamente utilizadas na sua fabricação e comercialização são polietileno de alta densidade (HDPE), polipropileno (PP), poliestireno (PS), poli(cloreto de vinila) (PVC), ou ainda diferentes resíduos de plástico (ANATOLE, 2007).

Este material vem ganhando espaço e aceitação devido às vantagens de possuir maior rigidez e melhor processabilidade em comparação com outras cargas (como fibra de vidro). Seu aspecto pode assemelhar-se à madeira natural, podendo ser serrada, pregada e aparafusada com a vantagem da não geração de farpas, além de apresentar resistência à ação de microrganismos e pragas. Contudo, suas aplicações potenciais são limitadas devido à sua baixa resistência ao impacto quando comparada à madeira natural (GUO et al., 2003; ZHANG et al., 2012).

Dias e Alvarez (2017) compararam a viabilidade da substituição da madeira natural por madeira plástica e concluíram que esta última apresenta grande potencial para uso em funções onde os componentes da madeira são comprimidos ou esticados perpendicularmente, já que têm resistência à tração muito maior. Ainda, apresenta maior durabilidade e facilidade de manutenção. Contudo, a madeira natural ainda apresenta módulo de flexão bem superior à

madeira plástica, o que pode conferir ao produto termoplástico maior taxa de deformação, apresentando-se como limitação para usos na engenharia civil. Em resumo, embora seja inferior à madeira em diversas propriedades mecânicas, para algumas funções estruturais ou semiestruturais, os compósitos de madeira plástica são alternativas à madeira serrada. Além disso, o uso de cargas em alta proporção de fibra constituem formas eficazes de produzir compostos termoplásticos com propriedades mecânicas mais próximas ou semelhantes às da madeira.

Sendo assim, a madeira plástica é mais amplamente utilizada para usos não estruturais, como pisos, decks, bancos e cercas. Ainda, é bastante utilizada na indústria automotiva como substituto de peças internas de metal e fibra de vidro, uma vez que a baixa densidade da carga celulósica confere maior leveza ao material (ARNANDHA, SATYARNO, *et al.*, 2017).

Um dos desafios para a expansão e consolidação de seu uso consiste em ampliar a estabilidade dimensional a longo prazo para aplicações em ambientes externos em diferentes condições climáticas, tal como temperatura, umidade e radiação ultravioleta (UV), que influenciam na deterioração, descoloração e deformação dos compósitos (FARUK, BLEDZKI, *et al.*, 2012).

3.2. Uso de fibras naturais em matrizes poliméricas

Faruk *et al.* (2012) afirmam que a crise do petróleo fez com que materiais compósitos com fibras naturais ganhassem maior relevância na engenharia de materiais devido à sua versatilidade. Contudo, seguem competitivamente pressionados pelo mercado mundial, o que eleva a necessidade de ampliar as pesquisas que refutem suas propriedades. Dentre as fibras naturais (de origem animal, vegetal e mineral), tem-se destaque às de origem vegetal devido à sua grande biodiversidade e disponibilidade.

O grande desafio ao trabalhar com fibras naturais como reforço em compósitos plásticos é a sua grande variação de propriedades e características, como o tipo de fibra, diferentes composições químicas que refletem as variadas condições ambientais de crescimento (tais como origem, clima e abrangência), métodos de processamento e modificações realizadas na fibra (FARUK, BLEDZKI, *et al.*, 2012). As fibras naturais são classificadas em muitos tipos, como liberiana, folha, semente, fruta e fibra de madeira (SATHISHKUMAR *et al.*, 2013; PEREIRA *et al.*, 2015). O esquema representado na Figura 1 apresenta os diferentes tipos de fibra e suas

classificações, com destaque para a classificação da palmeira de pupunha, cuja fibra proveniente do seu tronco foi utilizada no presente estudo.

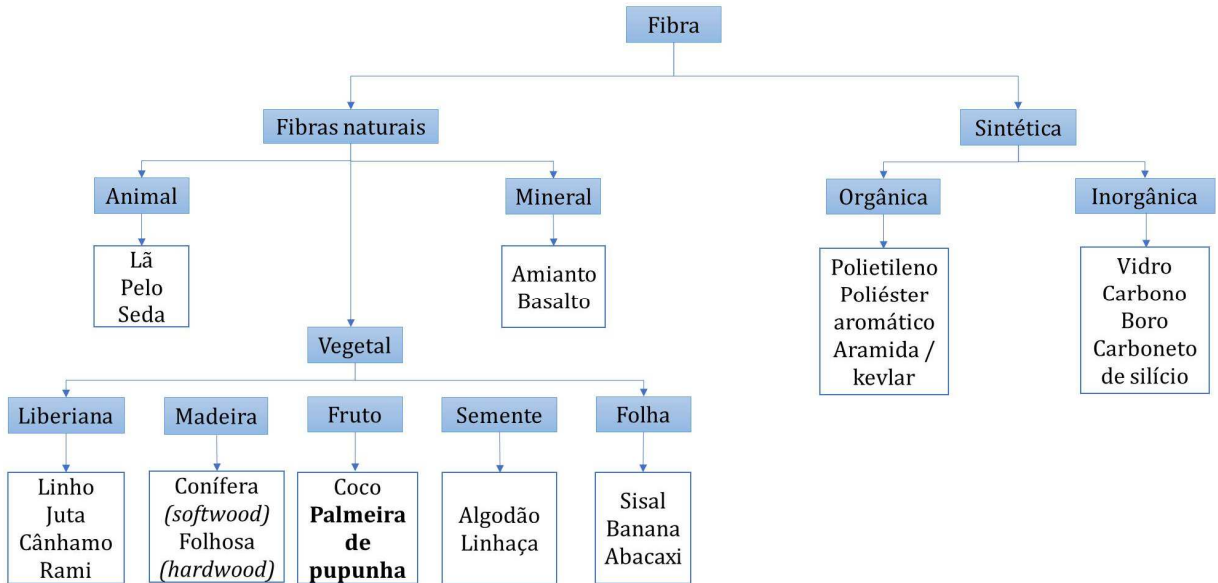


Figura 1: Classificação das fibras.

(Fonte: adaptado de MOCHANE, MOKHENA, *et al.*, 2019)

Segundo Marinelli *et al.* (2008), as fibras e cargas vegetais mais amplamente citadas na literatura como reforço em materiais poliméricos a nível de Brasil são sisal, coco, juta, curauá, fibra de bagaço de cana de açúcar, abacaxi, banana e soja. A nível mundial destaca-se o cânhamo, linho, além de produtos do cultivo de milho e trigo. Além desses, amidos, resíduos de madeira (farinha e pó), cascas de arroz, trigo e outros cereais.

Os materiais lignocelulósicos são compostos principalmente por celulose, hemicelulose e lignina. Em menor proporção, contêm também extrativos e cinzas. A celulose é um polissacarídeo de cadeia longa formada por unidades de glicose, responsável por conferir a estrutura da planta. A hemicelulose está presente em todas as camadas da parede celular da planta, porém está concentrada nas camadas secundárias, onde ocorre em associação com celulose e lignina. A lignina é um complexo molecular reticulado com estrutura amorfa e atua como um agente de acoplamento entre células de fibras individuais e as fibrilas que formam a parede celular (PEREIRA *et al.*, 2015; MOHANTY *et al.*, 2002).

A principal limitação dos polímeros carregados com reforços lignocelulósicos é a impossibilidade de processamento em temperaturas acima de 200 °C devido à susceptibilidade dessa carga sofrer degradação térmica. Outro fator a ser levado em consideração relaciona-se

com a maior absorção de umidade pela carga lignocelulósica, que pode influir em um efeito negativo sobre a aparência, a estabilidade dimensional e as ligações da matriz e a carga (PEREIRA, ROSA, *et al.*, 2015). Li (2000) refuta esta questão, quando afirma que uma das limitações da aplicação de fibras como reforço em matrizes poliméricas refere-se à fraca ligação interfacial com o polímero, devido à baixa compatibilidade entre as fibras celulósicas hidrofílicas com os termoplásticos hidrofóbicos.

Outra questão relevante relaciona-se com o teor de fibra empregado no compósito. Em geral, observa-se que o aumento do teor de fibra eleva significativamente a rigidez do compósito, a força de tração e flexão, além da resistência ao impacto. A quantidade de fibra no compósito é limitada, geralmente, em 50-60% em massa, pois suas propriedades decrescem a partir dessas quantidades. Contudo, a elevação do teor de fibra também propicia o aumento da absorção de umidade (BLEDZKI, JASZKIEWICZ, *et al.*, 2008). O comprimento da fibra e sua geometria ainda desempenham um papel decisivo nas propriedades dos compósitos, influenciando na adesão interfacial entre carga e matriz (FARUK, BLEDZKI, *et al.*, 2012).

Bajwa *et al.* (2011) investigou e comparou as propriedades de compósitos de material polimérico reforçado com resíduos agrícolas provenientes do cultivo do algodão e do guaiúle (arbusto que atua como fonte secundária de látex para produção de borracha) com a fibra de madeira de carvalho como enchimento. De acordo com os resultados, as propriedades físicas e mecânicas do compósito feito com resíduos da agricultura e do feito com madeira foram similares. O principal benefício das cargas provenientes da agricultura foi a menor densidade relativa, já sua desvantagem incluiu a maior absorção de água e inchaço de espessura.

A carga lignocelulósica utilizada no presente estudo é proveniente do tronco da palmeira de pupunha (*Bactris gasepaes*). O Brasil é o maior produtor, consumidor e exportador de palmito no mundo, detendo aproximadamente 75% do mercado mundial. Dentre esses, 90% é de origem extrativista, proveniente do açaí e da juçara (EMBRAPA, 2016). De acordo com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (2017), foram produzidas 4350 toneladas de palmito no Brasil em 2017. Devido à grande exploração, maior tempo de desenvolvimento e morte seguida à colheita, o cultivo do palmito juçara vem reduzindo, enquanto a pupunha ganha espaço na produção nacional. No Brasil, seu cultivo se destaca no Pará, Paraná, Santa Catarina e São Paulo (EMBRAPA, 2016; BOVI, 1997).

A pupunheira é nativa da Amazônia e do sul de América Central, sendo seus frutos e o palmito muito utilizados na dieta da população, apresentando potencial de uso de todas as suas partes na agroindústria. Trata-se de uma espécie doméstica de rápido crescimento e, quando da renovação do plantio, seu estipe (tronco) é descartado. A madeira do tronco da pupunheira tem cor pardo-escuro com fibras amarelas, alta densidade e resistência, sendo usada como estruturas de compósitos na fabricação de móveis de alto padrão (JESUS e ABREU, 2002; SANTOS, 2007). Outra vantagem da pupunha em relação às outras espécies é que esta emite novos brotos por pelo menos 10 anos, além de ser precoce e começar a produzir palmito 18 meses após o plantio. Ainda, não escurece rapidamente após o corte, o que favorece a venda in natura (EMBRAPA, 2016).

O baixo aproveitamento de seu tronco faz da produção deste vegetal um grande gerador de resíduo orgânico, fator este que motiva seu reaproveitamento como reforço em compósitos. Segundo Escócio *et al.* (2017), o resíduo proveniente da produção corresponde a 75% do peso total da árvore, sendo os 25% restantes vendidos principalmente no mercado interno em diversas formas (palmitos inteiros e cortados). Com base nessa proporção de geração de resíduo e no rendimento da fibra no processamento (6% em peso), foi estimado pelos autores uma produção de fibra anual de aproximadamente 20.000 t. É importante destacar que este resíduo é usualmente descartado em lixões e aterros, ou são queimados sem o devido controle, causando problemas ambientais, como emissões atmosféricas e risco de queimadas (PEREIRA, ROSA, *et al.*, 2015).

A caracterização da fibra de pupunha realizada pelos autores obteve como resultado que a sua densidade é de 1,20 g/cm³, enquanto que a de fibra de vidro é 2,54¹ g/cm³. Menores valores de densidade permitem a obtenção de compósitos com menor massa específica, ou seja, mais leves. Ainda, o mesmo estudo indicou que aproximadamente 56% de sua composição é celulose, 8% lignina e 3% hemicelulose (ESCÓCIO, PACHECO, *et al.*, 2017).

3.3. Compósitos de polietileno de alta densidade e carga lignocelulósica

No presente tópico, buscou-se na literatura estudos que analisassem as propriedades térmicas e mecânicas de compósitos formados por polietileno de alta densidade (HDPE) e fibras lignocelulósicas. Foram selecionados estudos nos quais foram executados os mesmos ensaios realizados na presente pesquisa, de forma a comparar e embasar os resultados obtidos. A ordem

dos estudos expostos nesta seção foi estabelecida visando a comparação entre os artigos que realizaram os mesmos ensaios técnicos.

Adhikary *et al.*(2008) avaliou a estabilidade dimensional e comportamento mecânico da madeira plástica composta de HDPE e farinha de madeira (*Pinus radiata*) nas proporções 100/0%, 60/40% e 50/50% m/m. Como a farinha de madeira consiste na carga lignocelulósica mais empregada na formulação de madeira plástica, estes resultados serão utilizados como base para a comparação com os resultados encontrados no presente estudo. Os componentes foram misturados por extrusão e os corpos de prova foram moldados por compressão. Foi avaliado que a absorção de umidade aumentou com a elevação do teor de fibra e que houve redução da resistência à tração e flexão com a incorporação da carga em comparação com o HDPE puro. À medida que a carga de farinha de madeira aumenta, também aumentam a tensão de escoamento, o módulo de tensão e a resistência à tração, mas, em tendência oposta, a ductilidade do material cai.

Estudos com outros tipos de fibra foram realizados. Gomes *et al.* (2013) compararam as propriedades térmicas e mecânicas de compósitos de HDPE com 10, 20, 30 e 40% m/m de fibra de bananeira com compósitos de fibra de vidro, na mesma matriz polimérica e mesmas proporções. A mistura e os corpos de prova foram obtidos utilizando a técnica de extrusão seguida de injeção, respectivamente. De acordo com os resultados, os autores observaram um acréscimo no módulo de elasticidade de aproximadamente 326, 530, 727 e 732% nos compósitos com 10, 20, 30 e 40% m/m de carga, respectivamente, com base no valor de módulo elástico sob tração de 105 MPa para o polietileno puro. Eles também observaram acréscimo no módulo de flexão de 62%, 147% e 164%, respectivamente, nas formulações contendo 20, 30 e 40% m/m de fibra de bananeira, em relação ao polímero puro.

Os resultados de tal pesquisa indicaram também que a fibra de bananeira com teor de 20% m/m pode atuar plenamente como substituta da fibra de vidro. Ainda, a adição de tal fibra elevou a resistência ao impacto do compósito quando comparado com o HDPE puro, fato este que não ocorreu com o uso de fibra de vidro. Quanto aos ensaios térmicos, a curva da análise termogravimétrica (TGA) revelou que quanto maior o percentual de fibra no compósito, menor a temperatura de início da degradação térmica e maior será seu efeito sobre a estabilidade térmica da composição (GOMES, VISCONTE e PACHECO, 2013).

Araújo *et al.* (2010) também comparou as propriedades mecânicas de compósitos de HDPE com carga lignocelulósica (fibra de curauá) e fibra de vidro. Os ensaios de flexão resultaram no aumento linear da resistência mecânica com aumento do teor de fibra de 5 a 20%. O compósito com adição de 20% de fibra de curauá apresentou resistência à tração e flexão 55% e 95%, respectivamente, maiores do que o HDPE puro. Este aumento foi atribuído ao efeito de reforço proporcionado pelas fibras, que permitiu a distribuição uniforme da tensão aplicada. O compósito reforçado com fibras de curauá apresentou propriedades mecânicas semelhantes ao reforçado com fibra de vidro (80% do valor da resistência e módulo de tração e flexão), com a vantagem de apresentarem menor densidade. Desta forma, os autores concluíram que o reforço com a carga lignocelulósica se configurou como bom candidato à substituição dos produtos reforçados com fibra de vidro.

Nos estudos realizados por Lu e Oza (2013), foram avaliadas as propriedades térmicas e mecânicas de compósitos de HDPE com 20, 30 e 40% de fibra de cânhamo. Os resultados dos ensaios mecânicos revelaram um aumento da resistência à tração máxima, redução da deformação, aumento da resistência à flexão e rigidez com a elevação do teor de fibras, indicando que fibra de cânhamo desempenhou um papel de reforço no sistema. O ensaio de análise termogravimétrica (TGA) mostrou que a degradação da fibra de cânhamo se inicia a 225°C. A temperatura no qual houve 50% de perda de massa foi de 459°C para o HDPE puro e 451°C para o compósito com 20% de fibra, mostrando que a estabilidade térmica foi praticamente mantida.

Mohanty e Nayak (2006) avaliaram o comportamento mecânico e térmico de compósitos de HDPE reforçados com fibra de sisal. As fibras foram misturadas ao polímero nas proporções 10, 15, 30, 45% m/m e os compósitos foram moldados por compressão. Foram realizados ensaios de tração, flexão, impacto e TGA. Os autores observaram que as propriedades mecânicas dos compósitos aumentaram linearmente com o aumento da carga de fibras de 10 para 30%. Os compósitos preparados com 30% de fibra exibiram maior resistência à tração (62,5%), resistência à flexão (50,6%) e resistência ao impacto (76,7%) em comparação com HDPE puro. O módulo de tração e flexão correspondente também aumentou 433 e 153%, respectivamente. Entretanto, as propriedades mecânicas diminuíram com o aumento da carga de fibras de 30 para 45%. Os resultados do ensaio de TGA indicaram que a temperatura de degradação do compósito é inferior a do polímero puro, revelando maior propensão à degradação térmica.

Mohanty e Nayak (2010) avaliaram o comportamento térmico e mecânico de compósitos de HDPE reforçados com fibras de bambu nas proporções de 0, 10, 20, 30 e 40% de fibra. Os corpos de prova foram misturados e moldados em um reômetro de torque e injetora, respectivamente. De acordo com os resultados, os autores observaram que os compósitos preparados com 30% de fibra apresentaram os maiores valores nos ensaios de tração e flexão.

As análises térmicas realizadas a partir do ensaio de temperatura de deflexão térmica (HDT), calorimetria diferencial de varredura (DSC) e TGA evidenciaram que os compósitos podem apresentar maior estabilidade térmica a alta temperatura do que o polímero sozinho. As temperaturas de fusão cristalina relevadas pelo ensaio de DSC foram de 148°C e 151°C para o polímero puro e o compósito com 20% de fibra, respectivamente. Contudo, houve redução do grau de cristalinidade (estrutura e organização das moléculas) com a inserção das fibras de 89% para 67%, o que foi atribuído à presença de grupos polares no compósito. A temperatura de degradação final do compósito com o mesmo teor de fibra foi de 516°C, enquanto o HDPE puro se decompôs a 474°C, verificadas por TGA. O resultado do ensaio de HDT para HDPE virgem e para o compósito HDPE com 30% de fibra de bambu foi de 70 °C e 73 °C, respectivamente, mostrando sensível elevação na estabilidade térmica. O índice de fluidez (MFI) reduziu 18%, 64% e 74% com a incorporação de 10, 20 e 30% de fibra na matriz polimérica (MOHANTY e NAYAK, 2010).

Escócio *et al.* (2015) investigou o índice de fluidez de compósitos de polietileno com resíduos de bucha (esponja vegetal) e observaram que a adição de 10, 20 e 40% de carga na matriz polimérica gerou uma redução de 19, 43 e 83% no MFI, respectivamente, comparado ao HDPE puro.

O estudo feito por Ortiz *et al.* (2014) com compósitos de HDPE e 20% m/m de cinza de casca de arroz concluiu que a inclusão da carga como reforço elevou em 254% a resistência à tração e 95% a resistência ao impacto em comparação com o polímero puro, contudo a resistência a flexão reduziu 16%. A temperatura de deflexão térmica para o HDPE foi de 56,3°C enquanto a do compósito foi de 63,9°C.

Lobo *et al.* (2014) avaliou a resistência à flexão de compósitos de HDPE com fibra de palmito pupunha nas proporções HDPE/fibra 80/20, 50/50, 40/60, 20/80% m/m e granulometria 35 *mesh* (0,50 mm). Também foram obtidas as misturas HDPE/fibra 100 *mesh* (0,15 mm) 80/20% m/m. Os corpos de prova foram misturados e moldados em extrusora e injetora, respectivamente. A partir da extrusão do compósito, observou-se que o aumento do teor de fibra

gerava um composto mais quebradiço, impossibilitando inclusive o processamento da mistura com 80% de fibra em tais equipamentos.

Os autores concluíram que teores de fibra acima de 50% geraram dificuldades no processamento pela redução do índice de fluidez. O aumento no teor de fibra mostrou também elevação da rigidez (módulo sob flexão) e redução da elasticidade. Não observaram diferenças significativas nos resultados em relação às diferentes granulometrias utilizadas para a fibra lignocelulósica (LOBO, PACHECO, *et al.*, 2014).

Zhang *et al.* (2018) também investigaram as propriedades mecânicas de compósitos com elevado teor de fibra. O HDPE foi reforçado com farinha de madeira (FM) e fibra de linho (FL). Os resultados indicaram que o desempenho mecânico dos compósitos foi elevado, tendo sido principalmente atribuído à alta resistência da fibra de linho e sua excelente compatibilidade com a farinha de madeira e a matriz HDPE. Os compósitos formados com 40% de HDPE, 51% FM e 9% FL apresentaram resistência à flexão e módulo 14,6 e 51,4% maiores, respectivamente, do que o composto com 40% HDPE e 60% FM. No entanto, houve redução no desempenho de processamento.

Panthapulakkal e Sain (2007) investigaram o potencial da utilização de resíduos agrícolas como palha de trigo, caule e espiga de milho como alternativa às fibras de madeira em compósitos. Os corpos de prova foram preparados com HDPE e alta quantidade de fibra (65% m/m) e executaram-se ensaios de TGA, tração, flexão e impacto, além de absorção de umidade. Os resultados de degradação térmica mostraram que a decomposição das fibras se inicia em torno de 200°C, sugerindo que tais fibras são adequadas para o processamento com polímeros.

A incorporação de palha de trigo ao HDPE apresentou melhores resultados de tração e flexão que as fibras de milho e de madeira, indicando que o trigo consiste em uma alternativa para o uso como madeira plástica. O ensaio de TGA indicou a aplicabilidade do processamento dessas fibras com termoplásticos com uma temperatura de fusão inferior a 200°C. Ainda, concluiu-se que absorção de umidade reduziu as propriedades mecânicas dos compósitos (PANTHAPULAKKAL e SAIN, 2007).

No estudo de Yang *et al.* (2013), foram investigadas as alterações na estabilidade dimensional em compósitos feitos com HDPE e farinha de madeira quando submetidos às variações de temperatura (-20°C, 20°C, 52°C e 80°C). Observou-se que inicialmente houve uma expansão linear das dimensões à medida que as temperaturas subiam, mas em seguida houve a lenta

contração. Os autores supuseram que a mudança dimensional seja devida à reconfiguração das moléculas de HDPE e à perda de peso do compósito.

Estudos mais recentes também analisaram as propriedades de compósitos de HDPE com carga celulósica: Bhattacharjee e Bajwa (2018) investigaram a reciclabilidade compósitos de HDPE preenchidos com farinha de madeira de carvalho com duas formulações diferentes (30 e 50% em massa) após serem reprocessados seis vezes por extrusão; Karmarkar *et al.* (2018) realizaram um estudo comparativo do módulo de elasticidade dinâmico e estático em compósitos feitos com HDPE e fibras de bambu, juta e coco; Pouriman *et al.* (2018) avaliaram as propriedades morfológicas e físico-mecânicas de HDPE com fibra de salago (de origem filipina) com realização de ensaios de flexão e tração; Friedrich *et al.* (2017) estudaram a estrutura e comportamento mecânico/desgaste abrasivo de compósito de madeira de palma de fibra preta, incluindo a realização de ensaios de TGA.

Em geral, com base nos estudos avaliados, é possível observar:

- A madeira plástica composta por HDPE e farinha de madeira apresentou redução na resistência à tração e flexão, mas aumento em seus módulos, quando comparada ao polímero puro;
- Porém, na maioria dos casos avaliados com utilização de outras fibras, houve aumento na resistência e módulo de tração e flexão com a inserção de carga lignocelulósica nos compósitos em comparação com o HDPE puro, com teores de fibra até 50%;
- A comparação entre compósitos formados com carga celulósica e fibra de vidro revelam propriedades semelhantes, concluindo que o reforço com fibras naturais pode atuar como substituto e ainda apresentar menor densidade;
- Elevados teores de fibra ($\geq 50\%$ m/m) geram dificuldades no processamento do compósito pela redução do índice de fluidez;
- A temperatura de degradação térmica dos compósitos em geral é inferior ao polímero puro, com exceção ao observado por Mohanty e Nayak que utilizou fibra de bambu (2010);
- Com a elevação da temperatura, pode haver expansão seguida de contração linear das dimensões dos compósitos.

A Tabela 1 apresenta um resumo dos principais resultados dos ensaios mecânicos efetuados nos estudos citados nesta revisão bibliográfica.

Tabela 1: Principais resultados dos ensaios mecânicos realizados nos estudos citados na revisão bibliográfica. (Fonte: elaboração própria)

Tipo de fibra	Teor de fibra (% m/m)	Granulometria da fibra (mesh)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de tração (MPa)	Resistência à flexão (MPa)	Módulo de flexão (MPa)	Resistência ao impacto (J/m)	Referência
Farinha de madeira	0	35-45	21 ± 3	-	22 ± 1	840 ± 30	-	Adhikary <i>et al.</i> (2008)
	40	35-45	12 ± 1	1640 ± 90	18 ± 1	1060 ± 50	-	
	50	35-45	10 ± 0	1680 ± 70	14 ± 2	1340 ± 30	-	
Sisal	0	-	21 ± 1	109 ± 1	24 ± 1	682 ± 1	33 ± 1	Mohanty e Nayak (2006)
	10	-	26 ± 1	289 ± 1	29 ± 1	784 ± 1	41 ± 1	
	45	-	27 ± 1	451 ± 1	30 ± 1	1189 ± 1	49 ± 1	
Bambu	0	325 (0,04 mm)	21*	153*	19*	790*	78*	Mohanty e Nayak (2010)
	20	325 (0,04 mm)	22*	758,*	27*	1667*	70*	
	40	325 (0,04 mm)	21*	2756*	25*	2987*	51*	
Kenaf	0	-	-	-	12 ± 1	231 ± 26	308*	Taufiq <i>et al.</i> (2018)
	30	120	-	-	13 ± 1	599 ± 49	172*	
	40	120	-	-	12 ± 1	848 ± 33	101*	
	50	120	-	-	10 ± 1	1141 ± 67	65*	
	60	120	-	-	14 ± 1	1544 ± 81	43*	
Palha de Trigo	65	-	21 ± 0	3100 ± 300	40 ± 4	3900 ± 200	35 ± 4	Panthapulakkal e Sain (2007)
Caule de milho	65	-	16 ± 1	2100 ± 100	33 ± 4	2200 ± 200	33 ± 2	
Espiga de milho	65	-	11 ± 1	1300 ± 100	26 ± 3	1300 ± 100	30 ± 3	
Fibra de madeira	65	-	16 ± 2	2600 ± 300	33 ± 0	2600 ± 300	39 ± 7	
Cânhamo	0	1 (25 mm)	189*	339*	17*	559*	-	Lu e Oza (2013)
	20	1 (25 mm)	18*	645*	36*	1586*	34*	
	40	1 (25 mm)	60*	1324*	45*	1597*	43*	
Cinza de casca de arroz	0	-	6 ± 0	-	17 ± 1	-	77 ± 6	Ortiz <i>et al.</i> (2014)
	20	-	20 ± 1	-	14 ± 1	-	151 ± 20	
Curauá	20	-	30 ± 1	2700 ± 100	-	1900 ± 100	65 ± 1	Araújo <i>et al.</i> (2010)
Fibra de vidro	20	-	58 ± 9	5600 ± 1100	-	5200 ± 1000	70 ± 4	
Bananeira	0	16-40	-	105*	-	942 ± 39	16 ± 1	Gomes <i>et al.</i> (2013)
	20	16-40	-	662*	-	1526*	39*	
	40	16-40	-	874*	-	2487*	13*	
Palmito pupunha	0	-	-	-	-	929 ± 44	-	Lobo <i>et al.</i> (2014)
	20	100	-	-	-	1652 ± 71	-	
	20	35	-	-	-	1589 ± 132	-	
	50	35	-	-	-	2877 ± 144	-	
	60	35	-	-	-	3327 ± 274	-	

(-) ensaio não realizado/valor não informado; (*) desvio padrão não informado.

Para a formulação de compósitos com fibras, é comum a utilização de algum agente de acoplamento ou compatibilização, responsável por interagir ou reagir quimicamente com os componentes visando uma maior adesão interfacial entre a fibra e a matriz. São exemplos: anidrido maleico (MOHANTY e NAYAK, 2010; BHATTACHARJEE e BAJWA, 2018), tratamento alcalino (mercerização) (MOHANTY e NAYAK, 2006; POURIMAN, DAHRESOBH, *et al.*, 2018), silano (BONELLI, ELZUBAIR e SUAREZ, 2005; LU e OZA, 2013), acetilação (SEGERHOLM, IBACH e WÅLINDER, 2012), ou tratamento por radiação de feixe de elétrons (FERREIRA, SARTORI, *et al.*, 2014; ORTIZ, TEIXEIRA, *et al.*, 2014). Contudo, tais tratamentos estão associados à elevação no custo e na complexidade do processamento.

Para a realização do presente trabalho, não foram utilizados agentes de acoplamento, de forma a assegurar que o compósito avaliado tenha menor custo financeiro, impacto ambiental reduzido e processamento otimizado, por contar com menos elementos (apenas polímero e carga) e menor complexidade.

4. METODOLOGIA

Para elaboração dos compósitos, as fibras de palmito pupunha foram misturadas ao HDPE em variadas proporções, com dois diferentes tamanhos de fibra. Tais compósitos foram misturados por extrusão e, em seguida, moldados por injeção. Os corpos de prova resultantes de tais processos foram submetidos a ensaios para avaliação das propriedades térmicas, mecânicas e de fluidez, a fim de avaliar a estabilidade dimensional dos mesmos, conforme os procedimentos descritos na Figura 2.

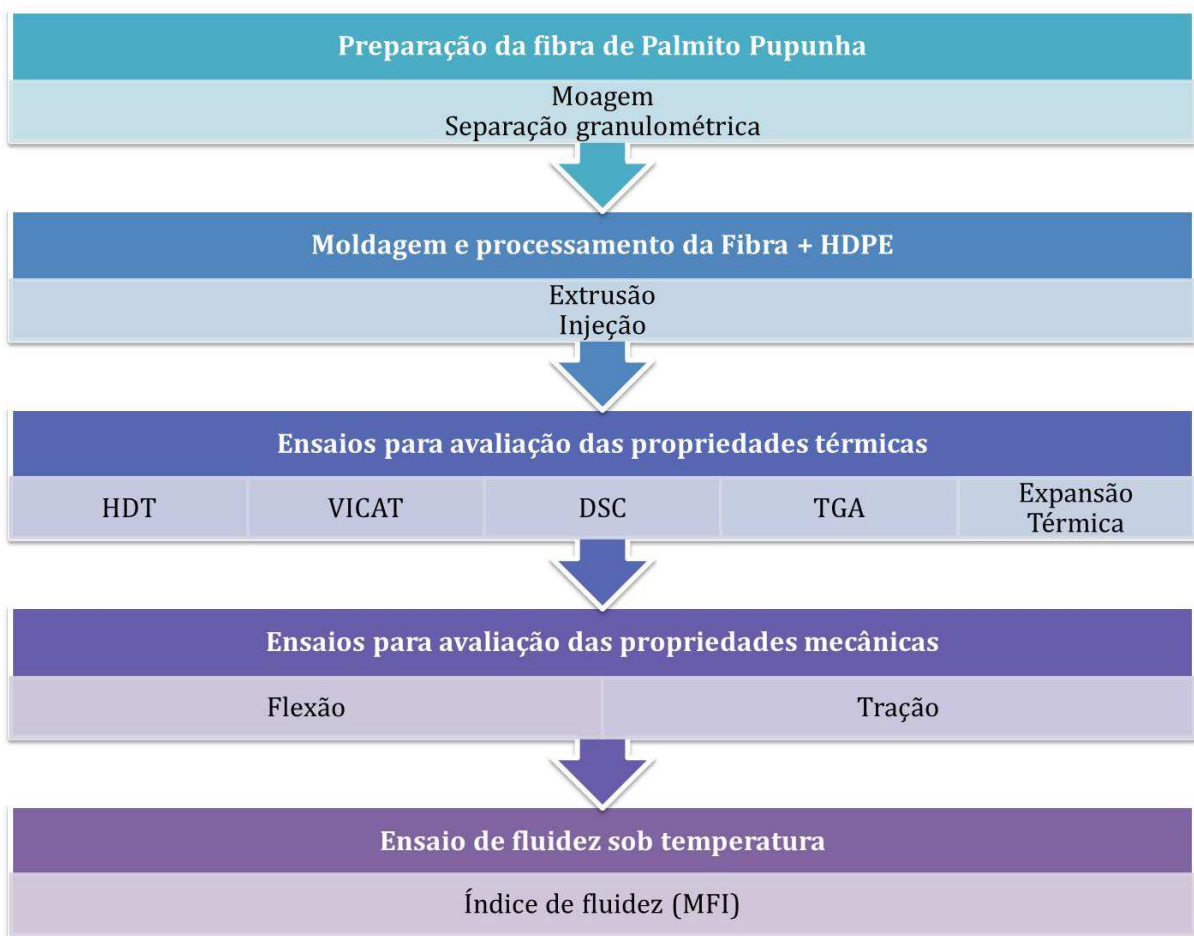


Figura 2: Fluxograma das etapas do desenvolvimento do estudo.

(Fonte: elaboração própria)

4.1. Materiais

Utilizou-se HDPE (tipo 7260, Braskem). As fibras do tronco do palmito pupunha foram fornecidas por uma fazenda produtora localizada no Rio de Janeiro ao laboratório Núcleo de Excelência em Reciclagem e Desenvolvimento Sustentável (NERDES) do Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano da Universidade Federal do Rio de Janeiro (IMA – UFRJ).

4.2. Equipamentos

Para a elaboração do presente estudo, foram utilizados os equipamentos listados a seguir. Todos se encontram nas dependências do IMA – UFRJ.

- Agitador de Peneiras Produtest 4273, modelo T;
- Analisador termogravimétrico (TGA) TA *Instruments*, modelo Q500;
- Calorímetro diferencial de varredura (DSC) TA *Instruments*, modelo Q100;
- Estufa com circulação de ar, Erzinger Ind. Mec. Ltda;
- Extrusora dupla-roscas co-rotacional interpenetrante TEK TRIL modelo DCT-20, com diâmetro de roscas de 20 mm e razão entre comprimento e diâmetro das roscas (L/D) igual a 36;
- HDT e VICAT CEAST modelo *Series 6 Stations Testers*;
- Injetora ARBURG ALLROUNDER, modelo 270 S (400-170);
- Máquina de ensaios universais EMIC, modelo DL 3000;
- Medidor de Índice de Fluidez (MFI) Dynisco modelo LMI 4003;
- Moinho de Facas de Bancada Solab modelo SL-32;
- Paquímetro Digital Profissional *Blackbull*.

4.3. Metodologia

A seguir, são descritos os métodos utilizados para a elaboração deste trabalho.

Primeiramente, executou-se a moagem das fibras, que se deu em moinho de facas. Após a moagem, o material foi separado em agitador de peneiras nas seguintes dimensões: até 35 mesh e até 65 mesh (equivalente à 0,50 e 0,212 mm, respectivamente) para uniformização das partículas a serem incorporadas na matriz polimérica. Após a separação, as fibras foram secas em estufa a 60°C por um período de 24 horas para retirada de umidade.

Segundo Marinelli *et al.* (2008), a secagem das fibras antes do processamento favorece a retirada de umidade e consequente formação de vapores, que podem elevar a porosidade da estrutura, comprometendo a estabilidade dimensional da mesma.

4.3.1. Processamento da mistura

O HDPE puro sob a forma de *pellets* foi misturado manualmente à fibra nas proporções: HDPE/fibra 35 mesh: 80/20, 50/50, 40/60% m/m e HDPE/fibra 65 mesh: 80/20, 50/50% m/m. Não foi ensaiada a proporção 40/60% m/m com fibra a 65 mesh devido à dificuldade de obtenção de quantidade suficiente de fibra com tal granulometria a partir do processo de moagem e separação. Além disso, o HDPE puro também foi processado para fins de comparação.

Devido à limitação da quantidade de corpos de prova com a composição 40/60% de HDPE/fibra, os ensaios de calorimetria diferencial de varredura e análise termogravimétrica não contemplaram tal composição. Além disso, nos ensaios de resistência à tração e de fluidez utilizaram-se apenas as misturas HDPE/fibra 35 mesh 50/50% m/m e HDPE/fibra 65 mesh 50/50% m/m, além do HDPE puro. Isso ocorreu devido à ausência de corpos de prova suficientes para realização de todos os testes, ocasionado pela limitação da quantidade de fibra disponível para o estudo. Portanto, foi necessário escolher as misturas que obtiveram resultados de destaque para dar continuidade aos ensaios.

As misturas foram submetidas à extrusora dupla-rosca co-rotatória a 300 rpm nas temperaturas apresentadas na Tabela 2. Após passagem pela extrusora, a mistura foi submetida ao corte em *pellets*.

Tabela 2: Temperatura das zonas de aquecimento da extrusora.

Zona de aquecimento da extrusora	Temperatura (°C)	Zona de aquecimento da extrusora	Temperatura (°C)
1	90	6	160
2	140	7	160
3	140	8	160
4	140	9	160
5	140	Matriz	180

Após a extrusão, os *pellets* dos compósitos foram alocados em estufa a 60°C por 24 horas para secagem. Em seguida, foram moldados por injeção para a obtenção de corpos de prova segundo normas específicas dos ensaios. As condições de injeção foram:

- Volume de dosagem: 21 cm³;
- Vazão: 26 cm³;
- Volume de comutação: 3 cm³;
- Pressão de injeção: 1400 bar;
- Pressão de recalque: 450 bar;
- Tempo de resfriamento do molde: 30 segundos
- Temperaturas das 5 zonas de aquecimento e do bico de injeção: 160, 175, 185, 195 e 205°C.

4.3.2. Caracterização dos compósitos

A caracterização dos compósitos foi dividida entre os ensaios executados para avaliação das propriedades térmicas, mecânicas e de fluidez, como se segue.

4.3.2.1. Propriedades térmicas

Temperatura de deflexão térmica

Este método determina a temperatura de deflexão térmica (HDT), na qual ocorre uma deformação arbitrária quando as amostras são submetidas a um conjunto específico de condições de teste. Os corpos de prova foram moldados por injeção, segundo norma ASTM D648-18 (2018). Estes foram posicionados e fixados previamente no equipamento e, em seguida, submetidos a pesos em forma de disco, submersos em tanque com óleo de silicone. A temperatura desse óleo eleva-se a partir da temperatura ambiente até atingir a temperatura em que o compósito deflexiona.

Temperatura de amolecimento VICAT

Este teste compreende a determinação da temperatura de amolecimento do material, na qual ocorre a penetração de $1 \pm 0,01$ mm da agulha no corpo de prova quando as amostras são submetidas a condições de teste controladas.

Os corpos de prova foram moldados por injeção, segundo norma ASTM D1525-17 (2017), para análise do ponto de amolecimento VICAT. As massas foram padronizadas de acordo com a condição de ensaio, proporcionais a uma força de $10 \pm 0,2$ N e uma taxa de aquecimento de 120 ± 10 °C/h, segundo determinação de tal norma.

Calorimetria diferencial de varredura

Este teste descreve a determinação da entalpia de fusão e cristalização por calorimetria diferencial de varredura (DSC). As condições de ensaio foram: atmosfera de nitrogênio (N₂), faixa de temperatura de 30 °C a 200 °C e taxa de aquecimento de 10 °C/min. Foram realizados: primeiro aquecimento, resfriamento e segundo aquecimento. Os dados foram obtidos do resfriamento e do segundo aquecimento.

O grau de cristalinidade (X_c) foi calculado a partir da seguinte Equação 1.

$$X_c = \left(\frac{\Delta H_m}{\Delta H^*} \right) \times (100 - n) \quad \text{Equação 1}$$

(MOHANTY e NAYAK, 2010)

Em que ΔH_m é a entalpia de fusão do HDPE puro e dos compósitos, determinadas a partir dos resultados do ensaio de DSC, ΔH^* é a entalpia padrão da amostra de HDPE 100% cristalino que, de acordo com a literatura, é 293 J/g, e n é a concentração de carga celulósica empregada no compósito.

Análise termogravimétrica

A análise termogravimétrica (TGA) objetivou avaliar a variação da massa das amostras em função da temperatura a fim de determinar a decomposição térmica do material. As condições de ensaio foram: atmosfera de nitrogênio (N₂), temperatura inicial ambiente até cerca de 600 °C e a taxa de aquecimento de 10 °C/min, de acordo com a ASTM E2550-17.

Expansão térmica

Este teste objetivou aferir as alterações nas dimensões dos corpos de prova quando submetidos a diferenças de temperatura. Utilizaram-se três corpos de prova de cada mistura, além do polímero puro. O ensaio de expansão térmica foi realizado para avaliar a estabilidade dimensional para temperaturas elevadas. Os corpos de prova foram condicionados por 48 horas a temperatura de 23 °C e foi medido o seu comprimento, largura e espessura com paquímetro digital. A representação do corpo de prova e suas dimensões aferidas é apresentado na Figura 3.



Figura 3: Representação das dimensões do corpo de prova utilizado no ensaio de expansão térmica.

(Fonte: elaboração própria)

Em seguida, os corpos de prova foram inseridos em uma estufa a 100 °C e, após 48 horas, suas dimensões foram novamente aferidas. A diferença entre os valores médios medidos em 23 °C e depois a 100 °C permitiu determinar a sua expansão térmica. O coeficiente linear (k) de expansão e contração térmica foi determinado, segundo a ASTM D6341 conforme a Equação 2.

$$k = \frac{1}{L_0} \left(\frac{\Delta L}{\Delta T} \right) \quad \text{Equação 2}$$

4.3.2.2. Propriedades mecânicas

Resistência à flexão

Este teste objetivou estabelecer o módulo de resistência à flexão dos materiais a partir da submissão dos corpos de prova à carga específica. Para confecção dos corpos de prova, foram seguidas as determinações da norma ASTM D6109-13 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2013). Em seguida, foram ensaiados em uma máquina universal de ensaios, cujos parâmetros utilizados foram: velocidade de ensaio de 14 mm/min e célula de carga de 1000 kgf, também segundo a mesma norma.

Resistência à tração

O objetivo deste teste foi estabelecer o módulo de resistência à tração dos materiais a partir da submissão dos corpos de prova à aplicação de força específica.

Para confecção dos corpos de prova, seguiu-se a norma ASTM D638-10 (2010), bem como os parâmetros de ensaio, a saber: velocidade de ensaio de 2,5 mm/min, célula de carga de 500 kgf, tempo mínimo de ensaio de 30 segundos e tempo máximo de ensaio de 5 minutos. Este ensaio foi executado com o HDPE puro e os compósitos HDPE/fibra 35 mesh 50/50% m/m e HDPE/fibra 65 mesh 50/50% m/m. Tanto para o teste de resistência a flexão quanto para o de resistência a tração, valores medianos foram calculados.

4.3.2.3. Propriedade de fluidez - Índice de fluidez

O *Melt Flow Index* (MFI) é definido como a taxa de fluxo mássico do polímero através de um capilar específico, em condições controladas de temperatura e pressão. Foi determinado através de medidas da massa do termoplástico fundido que escoou pelo capilar em um determinado intervalo de tempo.

O ensaio para determinação do índice de fluidez foi realizado nos *pellets* extrusados segundo a norma ASTM D1238-10 (2010) (190°C/2,16kg). Utilizou-se para tal ensaio o método de corte, com tempo de fusão de 240 segundos e tempo de corte de 15 segundos, selecionando 5 espécimes. Esses foram pesados e obteve-se a média dos valores. O ensaio foi executado com HDPE puro e os compósitos HDPE/fibra 35 mesh 50/50% m/m e HDPE/fibra 65 mesh 50/50% m/m.

5. RESULTADOS

Os resultados dos ensaios executados na presente pesquisa serão apresentados por meio de gráficos e/ou tabelas, visando a sua exposição de forma clara e objetiva. Além disso, buscou-se comparar com os resultados obtidos na literatura, apresentados no **capítulo 3** do presente estudo.

5.1. Propriedades térmicas

Nesta seção serão apresentados os resultados dos ensaios realizados para avaliação das propriedades térmicas dos compósitos em comparação com o HDPE puro.

Temperatura de deflexão térmica

O ensaio para avaliação da temperatura de deflexão térmica pode ser observado na Figura 4.

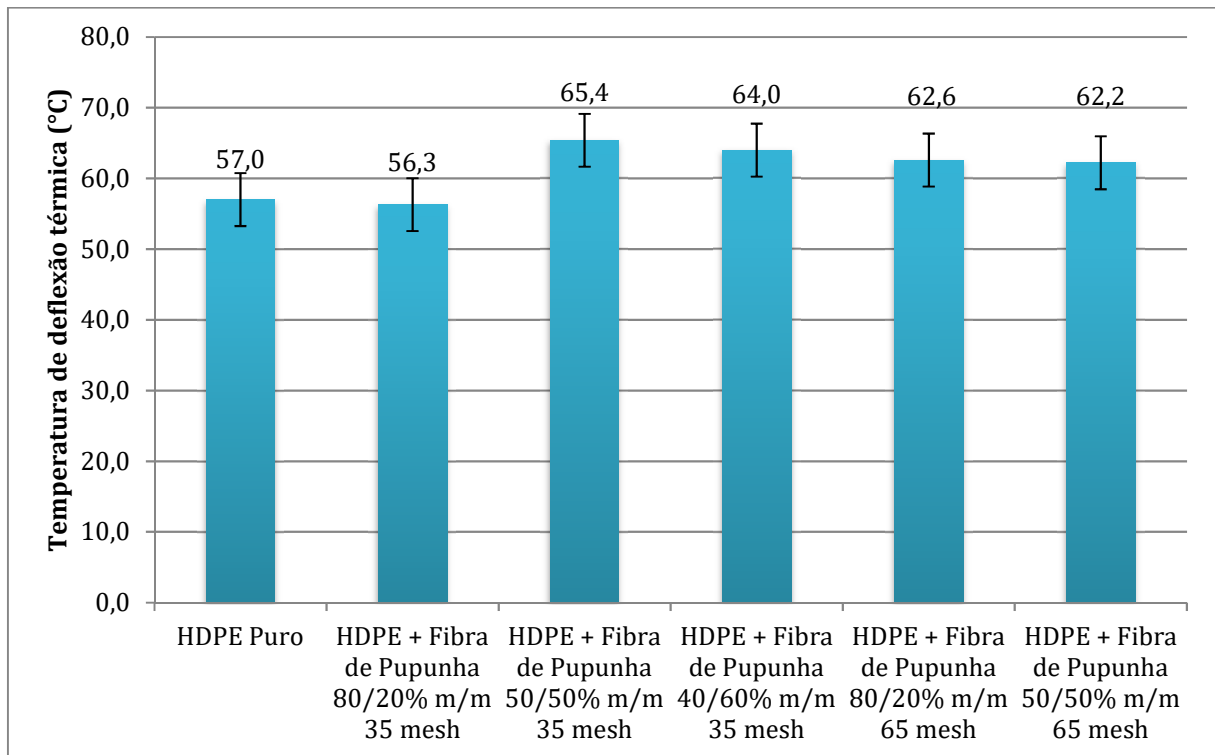


Figura 4: Temperaturas de deflexão térmica do HDPE puro e compósitos HDPE/fibra (Fonte: elaboração própria.)

Observa-se que houve pouca variação dos compósitos quando comparado ao HDPE puro. Os compósitos que utilizaram maior percentual de fibra de granulometria de 35 mesh (50 e 60% de fibra) se mostraram com maior resistência a temperatura de deflexão térmica. O compósito de HDPE e fibra nas proporções 50/50% m/m e 35 mesh apresentou uma temperatura ligeiramente superior aos demais, além de ser aproximadamente 15% maior que o polímero puro, o que demonstra maior estabilidade térmica.

Comparativamente, Mohanty e Nayak (2010) obtiveram como resultado uma elevação de 4% com a adição de 30% de fibra de bambu.

Ortiz *et al.* (2014) encontraram valores similares, conforme apresentado na revisão bibliográfica do presente estudo, no qual a temperatura de deflexão térmica do HDPE foi de 56,3°C enquanto a do compósito com 20% m/m de cinza da casca do arroz foi de 63,9°C.

Temperaturas de ponto de amolecimento VICAT

Os resultados dos valores das temperaturas de ponto de amolecimento VICAT estão na Figura 5.

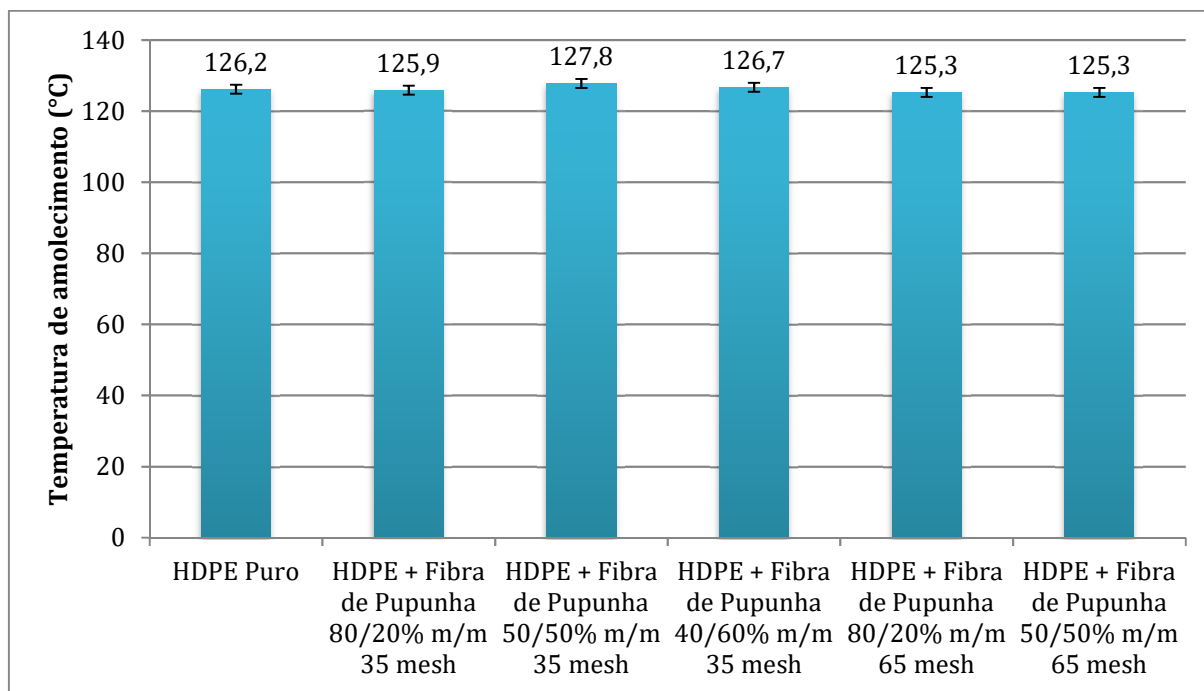


Figura 5: Temperaturas de amolecimento VICAT do HDPE puro e compósitos HDPE/fibra, em °C.

(Fonte: elaboração própria.)

Como é possível observar, comparativamente os valores obtidos são semelhantes e numericamente iguais ao considerar o desvio padrão, não apresentando alterações no que diz respeito à quantidade de fibra ou à sua granulometria.

No estudo de García *et al.* (2008), a incorporação de fibras de kenaf e casca de arroz na matriz termoplástica também não alterou a temperatura de amolecimento dos materiais. Tasdemir *et al.* (2008) também não observaram alteração em relação aos compósitos com fibra de algodão e matriz polimérica.

Calorimetria diferencial de varredura

A Tabela 3 apresenta resultados dos ensaios de DSC, com os valores das transições térmicas, da entalpia de fusão e do grau de cristalinidade para as composições estudadas analisadas.

Tabela 3: Temperatura de fusão, de cristalização no resfriamento, entalpia e grau de cristalinidade dos compósitos HDPE/fibra de pupunha.

HDPE ou HDPE/Fibra e tamanho da fibra	T _m (°C)	T _{cc} (°C)	Entalpia ΔH (J/g)	Grau de cristalinidade X _c (%)
HDPE Puro	126	120	184	62,8
80/20% m/m 35 mesh	125	120	146	39,9
50/50% m/m 35 mesh	125	120	104	17,7
80/20% m/m 65 mesh	126	120	140	38,2
50/50% m/m 65 mesh	125	120	101	17,2

T_m: Temperatura de fusão cristalina; T_{cc}: Temperatura de cristalização no resfriamento.

As curvas das composições estudadas foram semelhantes, assim são mostradas as curvas do compósito de HDPE/fibra 50/50% m/m para fins de exemplificação (Figura 6), onde é possível observar os picos de temperatura no primeiro aquecimento, no resfriamento e no segundo aquecimento. Não houve variação expressiva das temperaturas de fusão cristalina e a temperatura de cristalização no resfriamento não se alterou com a incorporação da fibra, como também observado por Gomes *et al.* (2013).

Contudo, observou-se uma redução do grau de cristalinidade do HDPE puro em relação aos compósitos, o que também foi observado por Taufiq *et al.* (2018) ao avaliar tal propriedade em

compósitos com fibra de kenaf. O aumento da quantidade de fibra conduziu ao decréscimo do grau de cristalinidade do compósito. E, curiosamente, as mesmas composições com diferentes tamanhos de fibras mostraram mesmos valores de cristalinidade, mostrando que, para esse caso, o tamanho da fibra não influenciou na propriedade.

Segundo Mohanty e Nayak (2010), o decréscimo do grau de cristalinidade com o aumento do teor de fibra pode ser atribuído à presença de grupos polares no compósito que podem atrapalhar a ordenação tridimensional da molécula de HDPE. Em seu estudo, o HDPE puro obteve grau de cristalinidade de 89% e o compósito, com 20% de fibra de bambu, 67%. Tal diferença de resultados pode estar associado ao fato de que o HDPE no presente estudo passou pelo mesmo processo de extrusão e moldagem por injeção dos compósitos e este fato pode ter favorecido a redução de seu arranjo molecular.

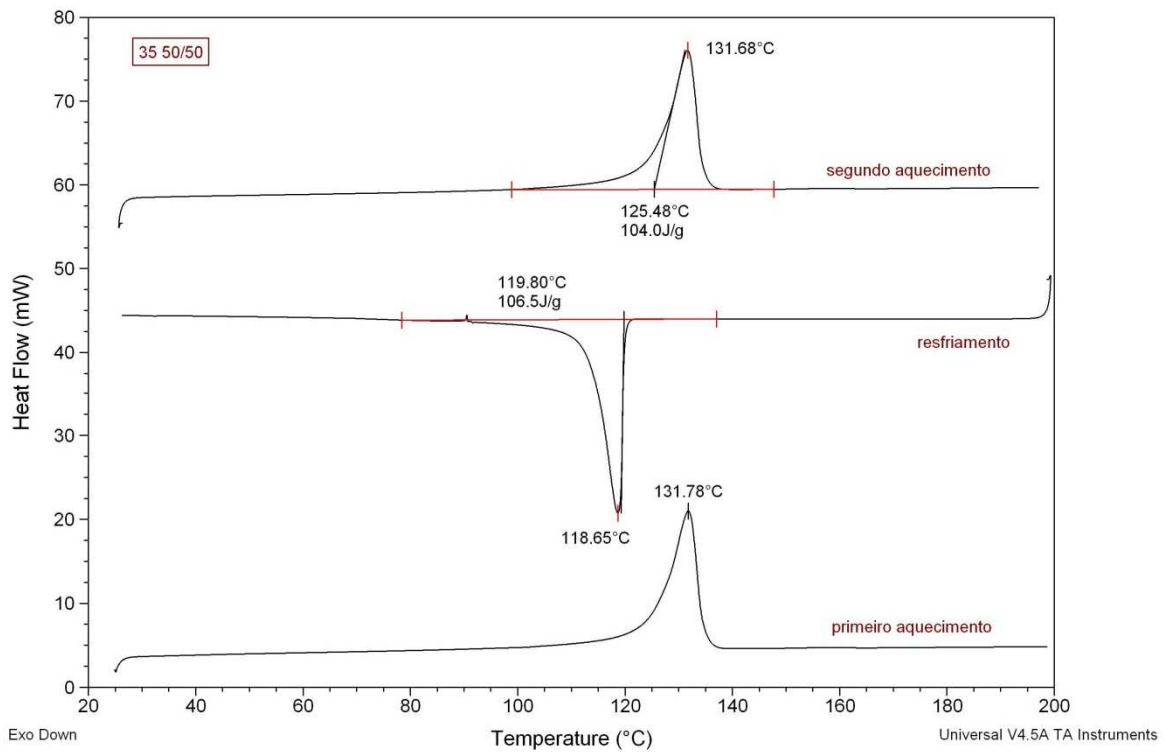


Figura 6: Curva de análise térmica de varredura para o compósito de HDPE e fibra de pupunha de 35 mesh na proporção 50/50% m/m.

Análise termogravimétrica

A Tabela 4 apresenta os resultados encontrados a partir da análise termogravimétrica para cada faixa de temperatura.

Tabela 4: Temperatura de degradação térmica dos compósitos HDPE e fibra de pupunha por análise termogravimétrica.

Composição	Temperatura de degradação < 200°C (°C)	Temperatura de degradação na faixa de 250-300°C (°C)	Temperatura de degradação na faixa de 300-350°C (°C)	Temperatura de degradação na faixa de 450-500°C (°C)	Temperatura de degradação > 500°C (°C)
HDPE puro	-	-	-	462,8	-
HDPE/fibra 35 mesh: 80/20% m/m	-	287,5	345,7	462,8	± 530-550
HDPE/fibra 35 mesh: 50/50% m/m	-	286,8	341,1	466,2	± 530-550
HDPE/fibra 65 mesh: 80/20% m/m	148,5	292,7	340,4	466,2	538,2
HDPE/fibra 65 mesh: 50/50% m/m	-	285,5	340,4	470,8	± 530-550

Observa-se que nas composições com maior teor de fibra (50% m/m), o comportamento das curvas foi semelhante. Ainda, o padrão de decomposição da massa em geral se apresentou similar em todos os compósitos entre 250 e 500°C, com pequenas variações de temperatura. Com base em tais resultados, observa-se que não há interferência significativa em relação ao teor de fibra e granulometria na degradação térmica.

De acordo com os resultados da análise termogravimétrica, é possível observar que a degradação do HDPE puro se inicia em aproximadamente 380°C e demonstra um único pico de degradação máxima (462,8°C), conforme apresentado na Figura 7. Para Mohanty e Nayak (2006), a decomposição do HDPE virgem começou em 430°C e quase 100% de decomposição ocorreu a 515°C.

Já os compósitos, demonstraram em geral três picos, com exceção da mistura HDPE/fibra 80/20% m/m 65 mesh, que apresentou quatro. Os resultados são apresentados nas Figuras 8 a 11. Os primeiros picos são referentes à degradação térmica da fibra de pupunha, enquanto o último pico é relativo à degradação do HDPE.

O processo de degradação ocorrido em 250-300°C pode ser devido à decomposição de hemicelulose, em 300-350°C referente à degradação da celulose e em 450-500°C, causada pela decomposição da lignina (SPINACÉ, LAMBERT, *et al.*, 2009).

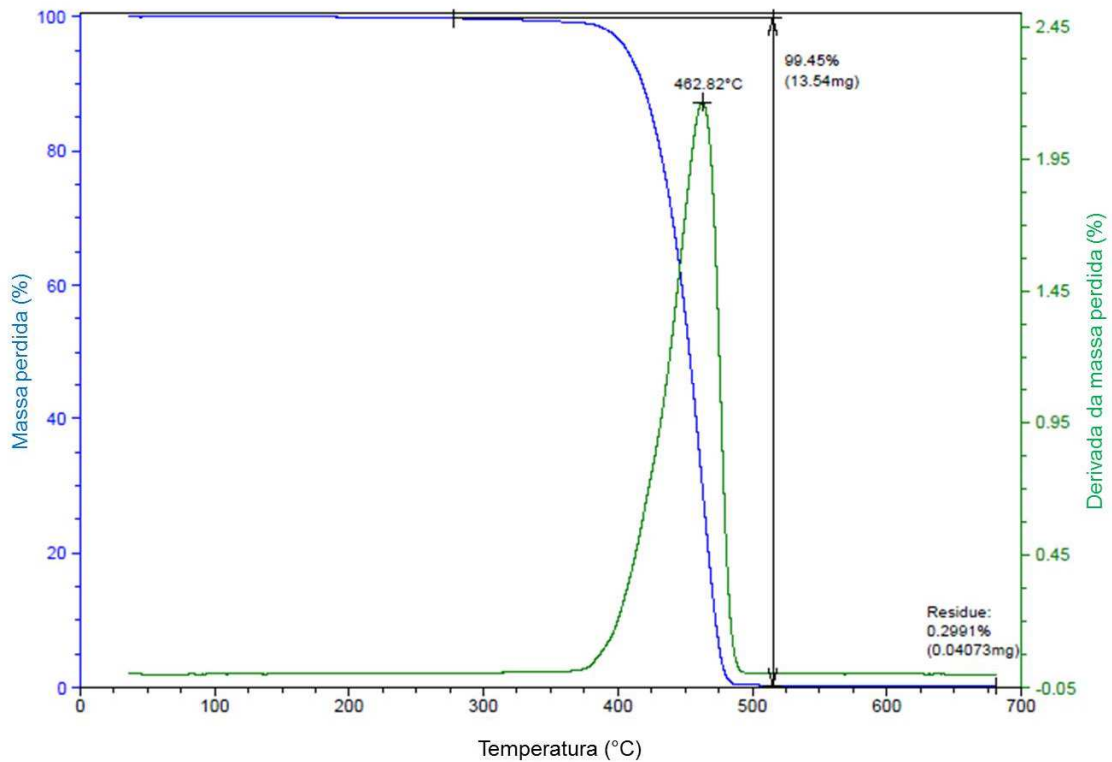


Figura 7: Curvas de TGA e sua derivada do HDPE puro.

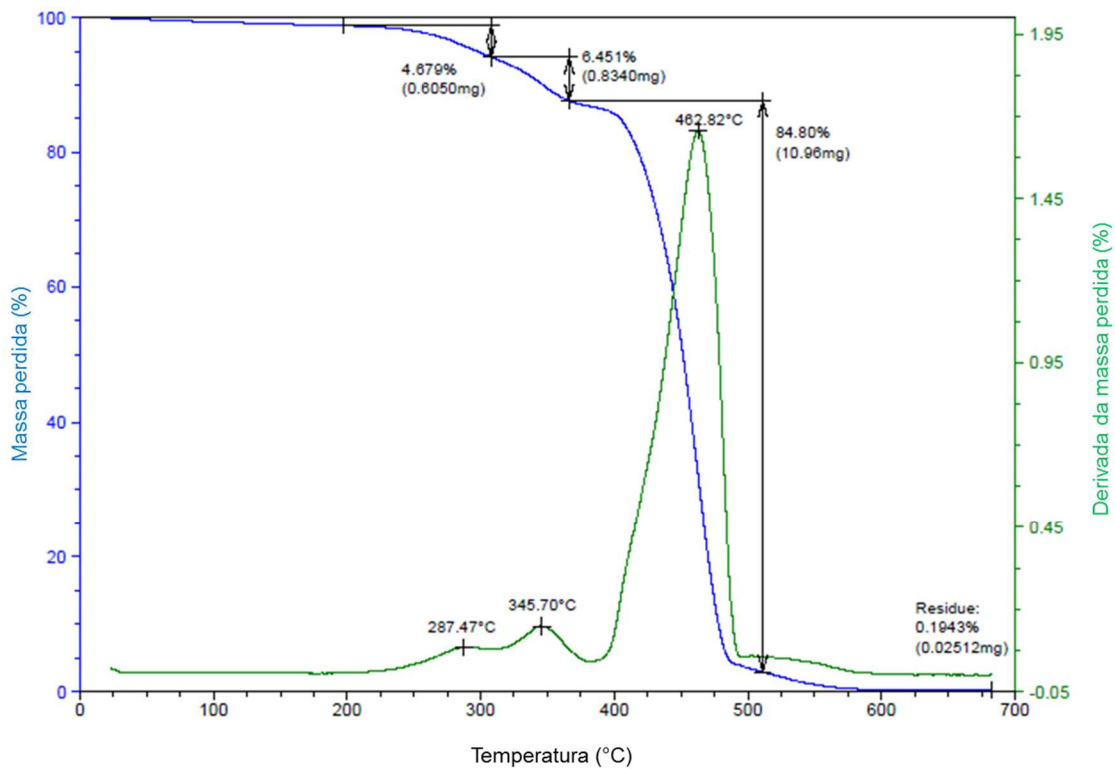


Figura 8: Curvas de TGA e sua derivada do compósito de HDPE e fibra de pupunha de 35 mesh na proporção 80/20 %m/m.

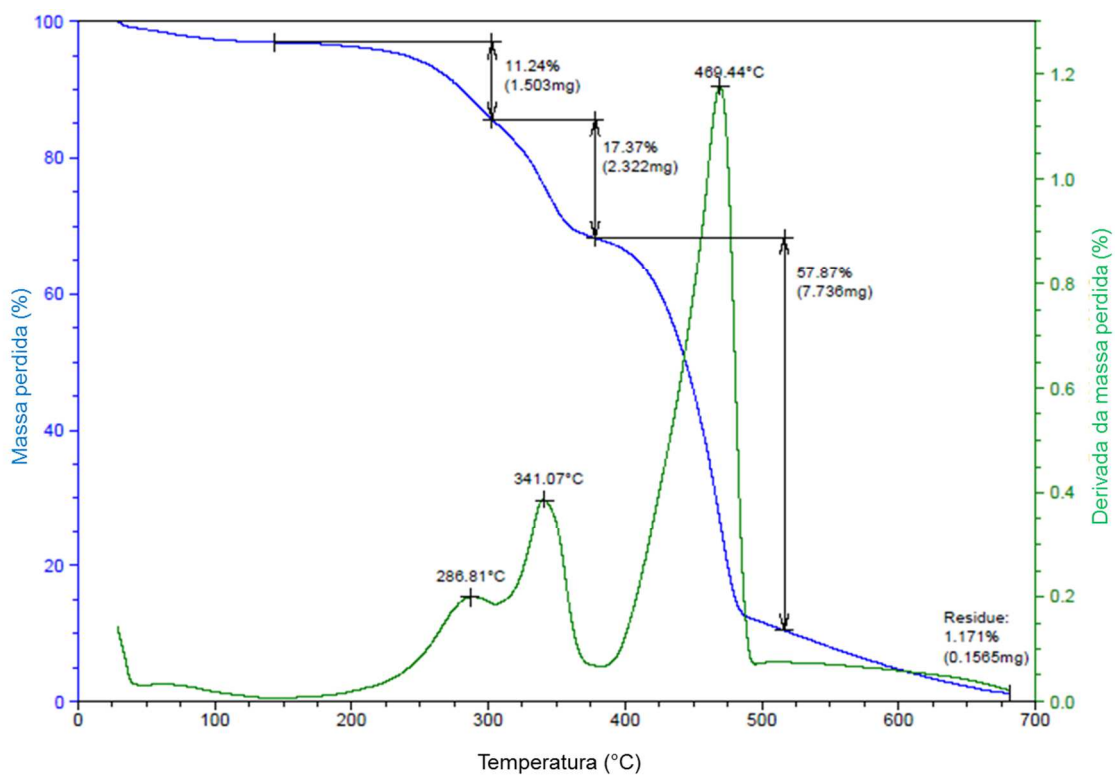


Figura 9: Curvas de TGA e sua derivada do compósito de HDPE e fibra de pupunha de 35 mesh na proporção 50/50 %m/m.

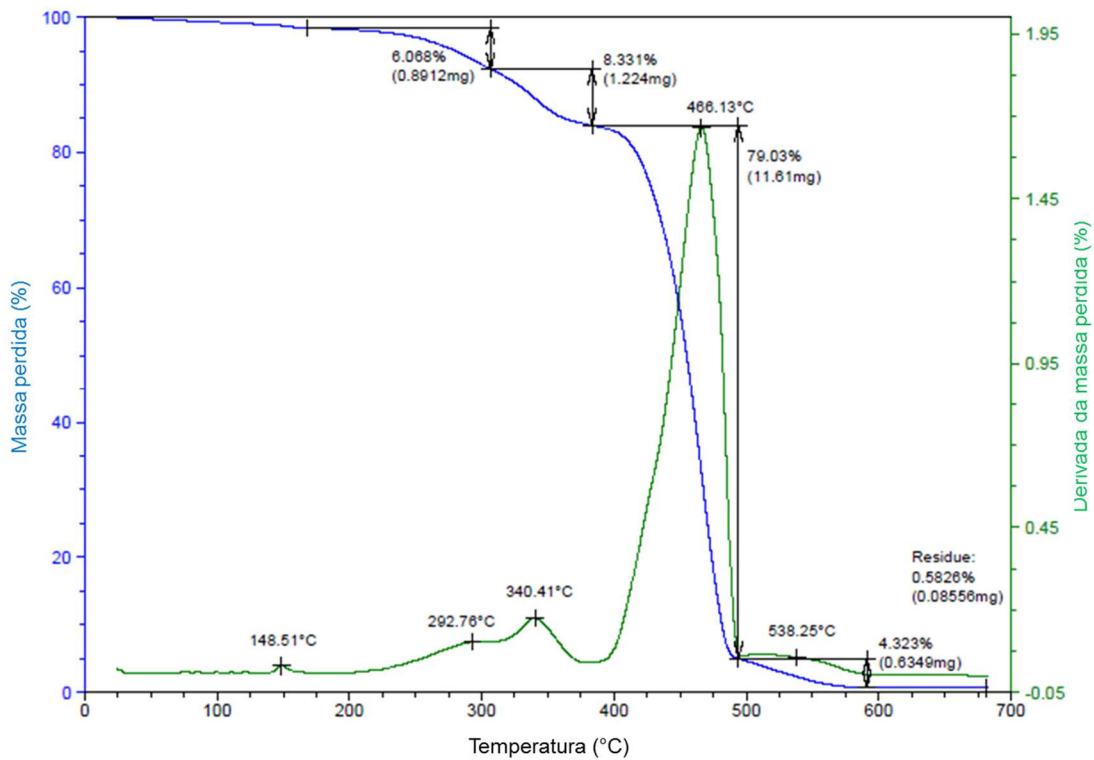


Figura 10: Curvas de TGA e sua derivada do compósito de HDPE e fibra de pupunha de 65 mesh na proporção 80/20 %m/m.

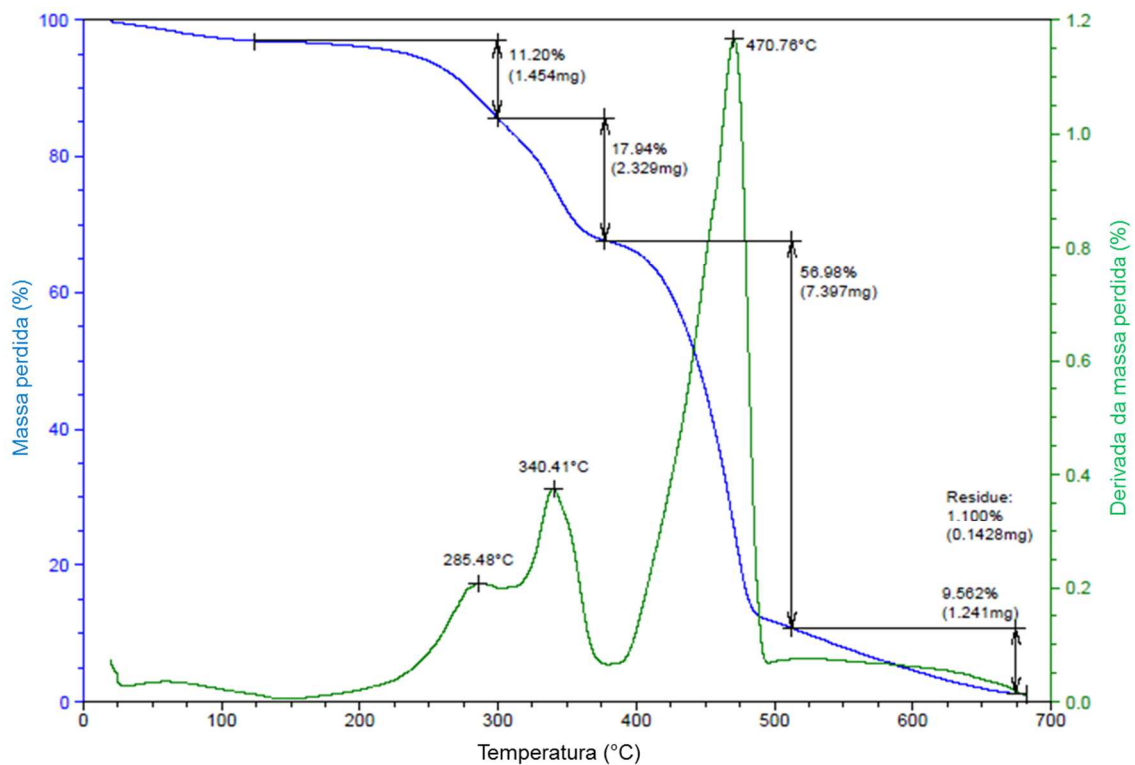


Figura 11: Curvas de TGA e sua derivada do compósito de HDPE e fibra de pupunha de 65 mesh na proporção 50/50 %m/m.

Expansão térmica

Para avaliação da estabilidade dimensional das amostras quando submetidas à elevada temperatura (100°C), foram calculados valores médios a partir da medição da variação da largura, comprimento e espessura quando comparados à temperatura ambiente (23°C). Os resultados são apresentados na Tabela 5, incluindo a variação percentual das dimensões e o coeficiente linear de expansão térmica calculado para as amostras.

Tabela 5: Valores de expansão térmica do HDPE puro e do compósito de HDPE/fibra.

HDPE ou HDPE/Fibra e tamanho da fibra	Variação média na largura (mm)	Variação percentual na largura (%)	Variação média no comprimento (mm)	Variação percentual no comprimento (%)	Variação média na espessura (mm)	Variação percentual na espessura (%)	Coefficiente linear de expansão (k)
HDPE Puro	-0,02	-0,2	-0,76	-0,6	0,01	0,3	-7,95E-05
80/20% m/m 35 mesh	-0,03	-0,3	-0,50	-0,4	0,03	0,9	-5,17E-05
50/50% m/m 35 mesh	-0,03	-0,3	-0,43	-0,3	0,01	0,1	-4,40E-05
40/60% m/m 35 mesh	-0,07	-0,6	-0,67	-0,5	0,00	0,2	-6,85E-05
80/20% m/m 65 mesh	-0,04	-0,3	-0,64	-0,5	-0,02	-0,2	-6,63E-05
50/50% m/m 65 mesh	-0,07	-0,5	-0,47	-0,4	-0,01	-0,6	-4,88E-05

Comparativamente, a mistura de HDPE com 50% de fibra com 35 mesh apresentou o maior coeficiente linear de expansão, enquanto o HDPE apresentou o menor. Todos os compósitos apresentaram coeficientes superiores ao HDPE puro, demonstrando que a incorporação de fibra na matriz polimérica gerou uma menor estabilidade dimensional, contudo, a amostra com 60% de fibra com 35 mesh demonstrou valor próximo ao polímero.

Observa-se que de uma forma geral, a submissão dos materiais à alta temperatura repercutiu na contração da largura e no comprimento dos mesmos, como pode ser avaliado pelo sinal negativo. A expansão dos materiais pôde ser apenas observada na variação da espessura. A variação percentual média na largura dos compósitos em relação ao HDPE foi de -0,4%, no comprimento foi de -0,5% e na espessura, 0,1%. Supõe-se que a mudança dimensional seja devida à reordenação tridimensional das moléculas de HDPE sob temperatura, conduzindo ao decréscimo de suas dimensões. Yang *et al.* (2013) também observaram que inicialmente há uma

expansão linear das dimensões à medida que as temperaturas sobem, mas em seguida há a lenta contração.

O HDPE é tradicionalmente um material semicristalino e sob temperatura de 100°C, permite-se que a molécula se arranje e se ordene. Com isso, supõe-se o aumento do seu grau de cristalinidade, que conduz ao decréscimo de volume do material, conseqüentemente de suas dimensões. Não houve tempo para a realização de análise de DSC nos corpos de prova que saíram da estufa para comprovação do aumento de cristalinidade e esse ensaio se faz necessário explorar em outros estudos.

5.2. Propriedades mecânicas

Nesta seção serão apresentados os resultados dos ensaios realizados para avaliação das propriedades mecânicas dos compósitos em comparação com o HDPE puro.

Resistência à flexão

Os resultados do ensaio mecânico por flexão dos compósitos são mostrados na Figura 12.

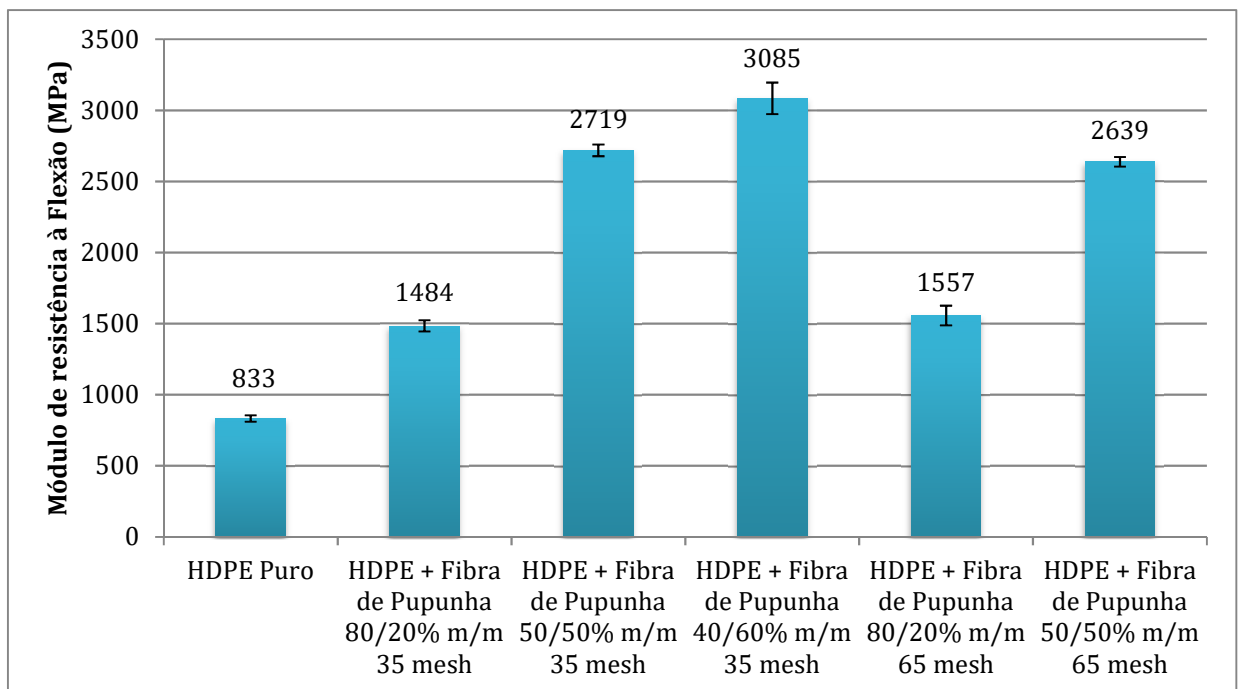


Figura 12: Módulo de resistência à flexão de HDPE puro e compósitos HDPE/fibra
(Fonte: elaboração própria.)

Pode-se observar que todas as misturas apresentaram valores de módulo de resistência à flexão superiores ao polímero puro e que o aumento da quantidade de fibra reflete na elevação do módulo de flexão, o que refuta os resultados obtidos na literatura e citados no **item 3.3** do presente estudo (MOHANTY e NAYAK, 2006; GOMES, VISCONTE e PACHECO, 2013; MOHANTY e NAYAK, 2010; LOBO, PACHECO, *et al.*, 2014; PANTHAPULAKKAL e SAIN, 2007; LU e OZA, 2013; TAUFUQ, MANSOR e MUSTAFA, 2018).

O compósito formado por 60% em massa de fibra de pupunha com granulometria de 35 mesh apresentou o maior módulo de flexão. Além disso, observa-se que a variação do tamanho da fibra não influenciou nos resultados para as composições que apresentaram os mesmos teores de HDPE e fibra.

Resistência à tração

Os resultados do ensaio de resistência à tração são apresentados na Figura 13.

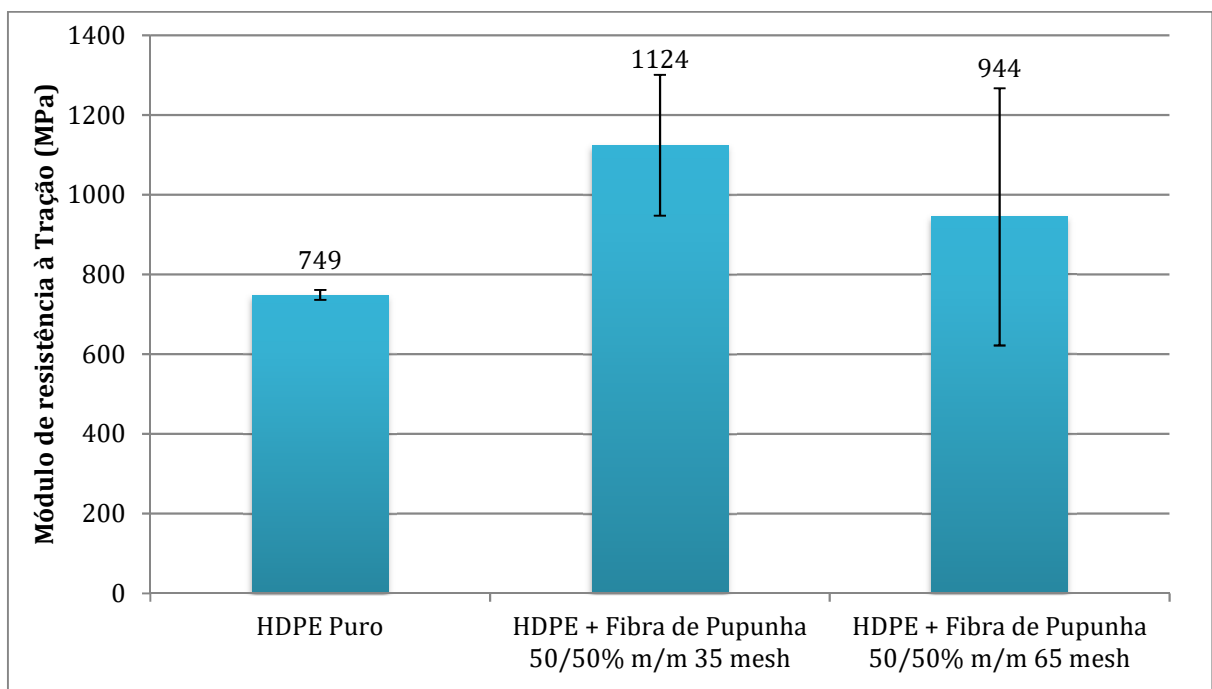


Figura 13: Módulo de resistência à tração de HDPE puro e compósitos HDPE/fibra.

(Fonte: elaboração própria.)

O teste de resistência à tração também revelou que os compósitos apresentam módulo de resistência à tração superiores ao HDPE puro. O resultado do compósito HDPE/fibra de pupunha 65 mesh 50/50 % m/m mostrou alto desvio padrão, dificultando sua discussão.

Contudo, nesse ensaio, foi possível observar que a mistura HDPE/fibra 50/50 % m/m com maior granulometria (35 mesh) mostrou valor do módulo superior ao polímero puro, resultado este que também foi identificado nos estudos avaliados na revisão bibliográfica deste trabalho.

A comparação com as propriedades mecânicas atribuídas por Adhikary *et al.* (2008) à madeira plástica constituída de 50% m/m de farinha de madeira e os resultados das propriedades mecânicas para a amostra com 50% de fibra da palmeira de pupunha (35 mesh) obtidos no presente estudo constam na Tabela 6.

Tabela 6: Comparação entre as propriedades mecânicas da madeira plástica e o compósito de HDPE e fibra de pupunha.

Composição	Resistência à tração (MPa)	Módulo de tração (MPa)	Resistência à flexão (MPa)	Módulo de flexão (MPa)
HDPE + FM (50/50% m/m)	10 ± 0	1680 ± 70	14 ± 2	1340 ± 30
HDPE + pupunha 50/50% m/m 35 mesh	9 ± 3	1124 ± 354	45 ± 1	2719 ± 83

FM - Farinha de madeira

Observa-se que o compósito estudado no presente estudo apresenta resultados superiores quanto à resistência e módulo de flexão, contudo possui módulo de tração inferior. Desta forma, o compósito com fibra de pupunha apresenta menor tendência à deformação.

5.3. Índice de fluidez

Para realização do ensaio para avaliação do índice de fluidez, foram utilizadas amostras de HDPE puro e os compósitos HDPE/fibra 35 mesh 50/50% m/m e HDPE/fibra 65 mesh 50/50% m/m.

O HDPE apresentou como resultado $5,7 \pm 0,2$ g/10 min. Já para os compósitos, não foi possível obter o valor de MFI, pois nas condições utilizadas (em concordância com a norma ASTM D1238-10), a mistura não fluiu. Provavelmente, isso se deve ao fato de que, com a incorporação

da fibra na matriz polimérica, a viscosidade do compósito aumentou consideravelmente, acarretando em um MFI muito baixo. Contudo, esta questão não impossibilitou o processamento dos compósitos em injetora para formação dos corpos de prova.

O compósito com 60% m/m de fibra de palmito pupunha e HDPE avaliado por Lobo *et al.* (2014) também não fluiu, enquanto que a mistura com 50% de fibra apresentou MFI de 0,7 g/10 min. O compósito com 48% de fibra de celulose analisado por Fonseca-Valero *et al.* (2015) resultou em um MFI de 0,04 g/10 min.

6. CONCLUSÃO

O presente estudo objetivou avaliar as propriedades térmicas, mecânicas e de fluidez de compósitos formados por HDPE como matriz polimérica e fibra de palmito pupunha como carga lignocelulósica, proveniente do resíduo de seu cultivo.

De acordo com os resultados obtidos, pode-se concluir:

- Foi possível obter compósitos com elevados teores de fibra ($\geq 50\%$ m/m), atestando a sua processabilidade, e os mesmos apresentaram boas propriedades mecânicas;
- O fato de ser possível a utilização de elevados teores de fibra demonstra que um maior reaproveitamento do resíduo proveniente do cultivo da pupunha é viável, apresentando-se como alternativa de destinação de tal resíduo, minimizando os impactos ambientais associados a esta produção;
- Objetivando a análise da variação da granulometria da carga lignocelulósica, não foi observada a sua influência nas propriedades avaliadas. Desta forma, para fins de facilidade no processamento, pode-se optar pela escolha de fibras com granulometria superior (35 mesh) em relação à de 65 mesh, uma vez que a obtenção de fibras maiores é mais fácil a partir do processo de moagem do tronco da palmeira de pupunha;
- A presença de fibra trouxe uma avaliação positiva em relação à temperatura de deflexão térmica e o compósito com 50/50% m/m e 35 mesh apresentou uma temperatura ligeiramente superior aos demais, além de ser aproximadamente 15% maior que o polímero puro, demonstrando maior estabilidade térmica;
- Não houve alteração significativa na temperatura de amolecimento VICAT com a inserção de carga lignocelulósica na matriz polimérica;
- O grau de cristalinidade foi afetado negativamente com o aumento do teor de fibra, mas não houve alteração das temperaturas de fusão e cristalização no resfriamento;
- A partir da análise termogravimétrica, observou-se que os primeiros picos identificados nos compósitos referem-se à degradação da fibra e que os últimos picos relacionam-se com o HDPE;
- A análise de expansão térmica identificou que todos os compósitos apresentaram coeficientes de expansão linear superiores ao HDPE puro, entretanto a amostra com 40% de fibra com 35 mesh demonstrou valor próximo ao polímero. A variação nas dimensões dos corpos de prova foi de -0,4% no comprimento, -0,5% na largura e 0,1%

na espessura, em comparação com o HDPE. Tais resultados mostram que os compósitos apresentam boa estabilidade dimensional para elevadas temperaturas;

- A incorporação de fibra gerou uma considerável elevação na viscosidade do compósito, acarretando em um MFI muito baixo;
- A fibra de palmito pupunha pode atuar como reforço estrutural, uma vez que as propriedades mecânicas de seus compósitos foram superiores ao HDPE puro;
- Em geral, o compósito formado por 50% de fibra com 35 mesh apresentou os resultados mais expressivos, com elevação do módulo de tração e flexão em relação ao HDPE puro em 50% e 226%, respectivamente, além de ter apresentado a maior temperatura de deflexão térmica;
- Em comparação com os valores tomados como referência para as propriedades mecânicas da madeira plástica, os resultados encontrados no presente estudo foram satisfatórios. Ainda que tenha sido observado um módulo de tração inferior, houve elevação da resistência e módulo de flexão, demonstrando menor tendência à deformação.

Diante dos resultados, acredita-se que o compósito avaliado pode atuar como madeira plástica em substituição à madeira natural, gerando ainda uma destinação adequada aos resíduos provenientes do cultivo de palmito pupunha. A avaliação do ciclo de vida do compósito pode constituir uma importante ferramenta para complementar os resultados da presente pesquisa.

BIBLIOGRAFIA

ADHIKARY, K. B.; PANG, S.; STAIGER, M. P. Dimensional stability and mechanical behaviour of wood–plastic composites based on recycled and virgin high-density polyethylene (HDPE). **Composites: Part B**, v. 39, p. 807-815, 2008.

ALIREZA, K. Effects of formulation design on thermal properties of wood/thermoplastic composites. **Journal of Composite Materials**, v. 44, n. 18, p. 2205-2215, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D6341-98: Standard test method for determination of the linear coefficient of thermal expansion of plastic lumber and plastic lumber shapes between -30 and 140 °F (-34,4 and 60 °C)**. West Conshohocken. 1998.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1238-10: Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer**. West Conshohocken. 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D638-10: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics**. West Conshohocken. 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D6109-13: Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastic Lumber**. West Conshohocken. 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D5229-14: Standard Test Method for Moisture Absorption Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials**. West Conshohocken. 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1525-17: Standard Test Method for Vicat Softening Temperature of Plastics**. West Conshohocken. 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E2550-17: Standard Test Method for Thermal Stability by Thermogravimetry**. West Conshohocken. 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D6117-18: Methods for Mechanical Fasteners in Plastic Lumber and Shapes**. West Conshohocken. 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D648-18: Standard test method for deflection temperature of plastics under flexural load in the edgewise position.** West Conshohocken. 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E793-06(2018): Standard Test Method for Enthalpies of Fusion and Crystallization by Differential Scanning Calorimetry.** West Conshohocken. 2018.

ANATOLE, A. **Wood-plastic composites.** Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2007.

ARNANDHA, Y.; SATYARNO, I.; AWALUDIN, A.; IRAWATI, I. S.; PRASETYA, Y.; PRAYITNO, D. A.; WINATA, D. C.; SATRIO, M. H.; AMALIA, A. Physical and machanical properties of WPC board fron sengon sawdust and recycled HDPE plastic. **Procedia Engineering**, v. 171, p. 695-704, 2017.

AZEEZ, A. T. A Review of Wood Plastic Composites effect on the Environment. **Journal of Babylon University**, v. 25, n. 2, p. 360-367, 2017.

BHATTACHARJEE, S.; BAJWA, D. S. Degradation in the mechanical and thermo-mechanical properties of natural fiber filled polymer composites due to recycling. **Construction and Building Materials**, v. 172, p. 1-9, 2018.

BLEDZKI, A. K.; JASZKIEWICZ A.; MURR, M.; .SPERBER, V. E.; LÜTZENDGRF, R.; REUßMANN, T. Processing techniques for natural and wood–fibre composites. **Cambridge, UK: Woodhead Publishing**, 2008. 163-192.

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

BOVI, M. L. A. Expansão do cultivo da pupunheira para palmito no Brasil. **Horticultura Brasileira**, v. 15, p. 183-185, 1997.

CALLISTER JR., W. D. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais:** uma abordagem intergrada. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

DIAS, B. Z.; ALVAREZ, C. E. Mechanical properties: wood lumber versus plastic lumber and thermoplastic. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 2, p. 201-219, 2017.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Transferência de tecnologia florestal - Sobre a pupunha**, 2016. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/florestas/transferencia-de-tecnologia/pupunha/tema>>. Acesso em: 20 fevereiro 2019.

ESCÓCIO, V. A.; PACHECO, E. B. A. V.; SILVA, A. L. N.; CAVALCANTE, A. P.; VISCONTE, L. L. Y. Rheological Behavior of Renewable Polyethylene (HDPE) Composites and Sponge Gourd (*Luffa cylindrica*) Residue. **International Journal of Polymer Science**, v. 2015, p. 1-7, 2015.

FARINA, M. Z.; JUNIOR, C. A. A.; SANTOS, A. S.; PEZZIN, A. P. T.; SILVA, D. A. K. Análise da aplicação de resíduos do corte de palmito pupunha (*Bactris gasipaes* H.B.K.) em compósitos de matriz poliéster com diferentes proporções. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 72, p. 131-138, 2012.

FARUK, O.; BLEDZKI, A. K.; FINK, H. P.; SAIN, M. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. **Progress in Polymer Science**, v. 37, p. 1552-1596, 2012.

FERREIRA, M. S.; SARTORI, M. N.; OLIVEIRA, R. R.; GUVEN, O.; MOURA, E. A. B. M. Short vegetal-fiber reinforced HDPE - A study of electron-beam radiation treatment effects on mechanical and morphological properties. **Applied Surface Science**, v. 310, p. 325-33-, 2014.

FRIEDRICH, K.; AKPAN, E. I.; WETZEL, B. Structure and mechanical/abrasive wear behavior of a purely natural composite: black-fiber palm wood. **J Mater Sci**, v. 52, p. 10217–10229, 2017.

GARCÍA, M.; GARMENDIA, I.; GARCÍA, J. Influence of Natural Fiber Type in Eco-Composites. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 107, p. 2994-3004, 2008.

GASSAN, J.; GUTOWSKI, V. S.; BLEDZKI, A. K. About the surface characteristic of natural fibres. **Macromolecular Materials and Engineering**, v. 283, p. 132-139, 2000.

GOMES, T. S.; VISCONTE, L. L. Y.; PACHECO, E. B. A. V. Substituição da Fibra de Vidro por Fibra de Bananeira em Compósitos de Polietileno de Alta Densidade. Parte 1. Avaliação Mecânica e Térmica. **Polímeros**, v. 23, n. 2, p. 206-211, 2013.

GUO, G.; RIZVI, G. M.; PARK, C. B.; LIN, W. S. Critical processing temperature in the manufacture of fine-celled plastic/wood-fiber composite foams. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 91, n. 1, p. 621-629, 2003.

HOPEWELL, J.; DVORAK, R.; KOSIOR, E. Plastics recycling: challenges and opportunities. **Phil. Trans. R. Soc. B**, v. 364, p. 2115-2126, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Sistema IBGE de Recuperação Automática - SIDRA. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pevs/quadros/brasil/2017>>. Acesso em: 07 janeiro 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite (PRODES). **Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite**. Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes>>. Acesso em 24 de março de 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica - Período 2016-2017 - Relatório Técnico**. Disponível em: <https://www.sosma.org.br/link/Atlas_Mata_Atlantica_2016-2017_relatorio_tecnico_2018_final.pdf>. Acesso em 24 de março de 2019.

IOZZI, M. A.; MARTINS, G. S.; MARTINS, M. A.; FERREIRA, F. C.; JOB, A. E.; MATTOSO, L. H. C. Estudo da Influência de Tratamentos Químicos da Fibra de Sisal nas Propriedades de Compósitos com Borracha Nitrílica. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 20, n. 1, p. 25-32, 2010.

JESUS, M. A.; ABREU, R. L. S. Durabilidade natural da madeira de pupunha (*Bactris gasipaes* KUNTH). **ACTA AMAZÔNICA**, v. 32, n. 4, p. 663-675, 2002.

LI, Y. Sisal fibre and its composites: a review of recent developments. **Composites science and technology**, v. 60, n. 11, p. 2037-2055, 2000.

LOBO, J. G. N.; PACHECO, E. B. A. V.; PACHECO, E. A. V.; JANDORNO JUNIOR, J. C.; VISCONTE, L. L. Y. Resistência à Flexão de Compósitos de HDPE e Fibra de Pupunha. **Brasiltec**, Rio de Janeiro, setembro 2014.

LU, N.; OZA, S. A comparative study of the mechanical properties of hemp fiber with virgin and recycled high density polyethylene matrix. **Composites: Part B**, v. 45, p. 1651-1656, 2013.

LU, N.; OZA, S. Thermal stability and thermo-mechanical properties of hemp-high density polyethylene composites: Effect of two different chemical modifications. **Composites: Part B**, v. 44, p. 484-490, 2013.

MARINELLI, A. L.; MONTEIRO, M. R.; AMBRÓSIO, J. D.; BRANCIFORTI, M. C.; KOBAYASHI, M.; NOBRE, A. D. Desenvolvimento de Compósitos Poliméricos com Fibras Vegetais Naturais da Biodiversidade: Uma Contribuição para a Sustentabilidade Amazônica. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 18, n. 2, p. 92-99, 2008.

MCLAUGHLIN, E. C. The strength of bagasse fibre-reinforced composites. **Journal of Materials Science**, v. 15, p. 886-890, 1980.

MOCHANE, M. J.; MOKHENA, T. C.; MOKHOTHU, T. H.; MTIBE, A.; SADIKU, E. R.; RAY, S. S.; IBRAHIM, I. D.; DARAMOLA, O. O. Recent progress on natural fiber hybrid composites for advanced applications: A review. **eXPRESS Polymer Letters**, v. 13, n. 2, p. 159-198, 2019.

MOHANTY, A. K.; MISRA, M.; DRZAL, L. T. Sustainable Bio-Composites from Renewable Resources: Opportunities and Challenges in the Green Materials World. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 10, n. 1/2, abril 2002.

MOHANTY, S.; NAYAK, S. K. Interfacial, Dynamic Mechanical, and Thermal Fiber Reinforced Behavior of MAPE Treated Sisal Fiber Reinforced HDPE Composites. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 102, p. 3306-3315, 2006.

MOHANTY, S.; NAYAK, S. K. Short Bamboo Fiber-reinforced HDPE Composites: Influence of Fiber Content and Modification on Strength of the Composite. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 29, n. 14, 2010.

ORTIZ, A. V.; TEIXEIRA, J. G.; GOMES, M. G.; OLIVEIRA, R. R.; DÍAZ, F. R. V.; MOURA, E. A. B. Preparation and characterization of electron-beam treated HDPE composites reinforced with rice husk ash and Brazilian clay. **Applied Surface Science**, v. 310, p. 331-335, 2014.

- PANTHAPULAKKAL, S.; SAIN, M. Agro-residue reinforced high-density polyethylene composites: Fiber characterization and analysis of composite properties. **Composites: Part A**, v. 38, p. 1445-1454, 2007.
- PEREIRA, P. H. F.; ROSA, M. F.; CIOFFI, M. O. H.; BENINI, K. C. C. C.; MILANESE, A. C.; . Vegetal fibers in polymeric composites: a review. **Polímeros**, v. 25, n. 1, p. 9-22, 2015.
- POURIMAN, M.; DAHRESOBH, A.; CAPARANGA, A. R.; MORADIPOUR, M.; MEHRPOOYA, M. Morphological and physicomechanical analysis of high-density polyethylene filled with Salago fiber. **Journal of Applied Polymer Science**, p. 4679-4689, 2018.
- SANTOS, F. A. D.; CANTO, L. B.; SILVA, A. L. N.; CAVALCANTE, A. P.; VISCONTE, L. L. Y.; PACHECO, E. B. A. V. **Processing and Properties of Plastic Lumber**. DOI: 10.5772/intechopen.82819. IntechOpen. Disponível em: <https://www.intechopen.com/online-first/processing-and-properties-of-plastic-lumber>, 2018.
- SATHISHKUMAR, T. P.; NAVANEETHAKRISHNAN, P.; SHANKAR, S.; RAJASEKAR, R.; RAJINI, N . Characterization of natural fiber and composites - A review, v. 32, n. 19, p. 1457-1476, 2013.
- SATYANARAYANA, K. G.; SUKUMARAN, K.; MUKHERJEE, P. S.; PAVITHRAN, . Natural fibre-polymer composites. **Cement & concrete composites**, v. 12, n. 2, p. 117-136, 1990.
- SEGERHOLM, B. K.; IBACH, R. E.; WÄLINDER, M. E. P. Moisture Sorption in Artificially Aged Wood-Plastic Composites. **BioResources**, v. 7(1), p. 1283-1293, 2012.
- SPINACÉ, M. A. S.; LAMBERT, C. S.; FERMOSELLI, K. K. G.; DE PAOLI, M. A. Characterization of lignocellulosic curaua fibres. **Carbohydrate Polymer**, v. 77, p. 47-53, 2009.
- SUMMERSCALES, J.; DISSANAYAKE, N. P. J; VIRK, A. S.; HALL, W. A review of bast fibres and their composites. Part 1 – Fibres as reinforcements. **Composites: Part A**, v. 41, p. 1329-1335, 2010.

TASDEMIR, M.; KOÇAK, D.; USTA, I.; AKALIN, M.; MERDAN, N. Properties of Recycled Polycarbonate/Waste Silk and Cotton Fiber Polymer Composites. **International Journal of Polymeric Materials**, v. 57, p. 797-805, 2008.

TAUFIQ, M. J.; MANSOR, M. R.; MUSTAFA, Z. Characterisation of wood plastic composite manufactured from kenaf fibre reinforced recycled-unused plastic blend. **Composite Structures**, v. 189, p. 510-515, 2018.

YANG, W.-J.; XIE, Y.-J.; WANG, Q.-Q. Impacts of freezing and thermal treatments on dimensional and mechanical properties of wood flour-HDPE composite. **Journal of Forestry Research**, v. 24, n. 1, p. 143-147, 2013.

ZHANG, J.; WANG, H.; OU, R.; WANG, Q. The properties of flax fiber reinforced wood flour/high density polyethylene composites. **J. For. Res.**, v. 29, n. 2, p. 533-540, 2018.

ZHANG, Z. X.; GAO, C.; XIN, Z. X.; KIM, J. K. Effects of extruder parameters and silica on physico-mechanical and foaming properties of PP/wood-fiber composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 43, n. 4, p. 2047-2057, 2012.