



UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Alessandra Mara da Silva Marton

**Desenvolvimento de um compósito Eco-Friendly de ABS reforçado
com resíduos proveniente da fibra da palmeira para aplicação em
impressão 3D**

Resende

2023

Alessandra Mara da Silva Marton

**Desenvolvimento de um compósito Eco-Friendly de ABS reforçado com
resíduos proveniente da fibra da palmeira para aplicação em impressão 3D**



Dissertação apresentada, como requisito para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Tratamento e Destino Final de Resíduos Sólidos.

Orientador: Prof.^a Dra. Daniella Regina Mulinari

Coorientador: Prof. Dr. Derval dos Santos Rosa

Resende

2023

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

M387 Marton, Alessandra Mara da Silva.
Desenvolvimento de um compósito eco-friendly de ABS
reforçado com resíduos proveniente da fibra da palmeira para
aplicação em impressão 3D / Alessandra Mara da Silva Marton. –
2023.
108 f.

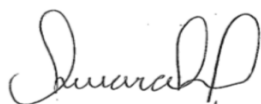
Orientadora: Daniella Regina Mulinari.
Coorientador: Derval dos Santos Rosa.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de
Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia ambiental - Teses. 2. Termoplásticos - Teses. 3.
Resíduos vegetais - Teses. 4. Fibras vegetais - Teses. 5.
Impressão digital (Computação) - Teses. I. Mulinari, Daniela
Regina. II. Rosa, Derval dos Santos. III. Universidade do Estado do
Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. IV. Título.

CDU 628.477.2

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial
desta tese, desde que citada a fonte.



Assinatura

03/03/2023

Data

Alessandra Mara da Silva Marton

**Desenvolvimento de um compósito Eco-Friendly de ABS reforçado com
resíduos proveniente da fibra da palmeira para aplicação em impressão 3D**

Dissertação apresentada, como requisito para
obtenção do título de Mestre, ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, da
Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área
de concentração: Tratamento e Destino Final de
Resíduos Sólidos.

Aprovados em: 03 de março de 2023.

Banca Examinadora:



Prof^a. Dr^a. Daniella Regina Mulinari (Orientadora)

Faculdade de Engenharia - UERJ



Prof^a. Dr^a. Elisabeth Ritter

Faculdade de Engenharia - UERJ



Prof. Dr. Clodoaldo Saron

Escola de Engenharia de Lorena da USP - EEL/USP

Resende

2023

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho em especial à Deus, ao meu esposo e meu filho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a Deus por seu amor incondicional, e me proporcionar esta oportunidade de poder realizar um sonho.

A minha amiga e orientadora Prof^a. Dr^a. Daniella Regina Mulinari, que sempre acreditou em mim, e me auxiliou durante essa jornada com seus ensinamentos, apoio, orientações, dedicação e inesgotável paciência.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Derval S. Rosa pelo incentivo a não desistir no meio da jornada e toda paciência e ensinamentos compartilhados.

À Prof^a. Dr^a. Elisabeth Ritter que foi uma grande incentivadora durante as aulas ministradas, apoio, orientação e auxílio.

Ao meu esposo que sempre me apoio, incentivou, me aguentou nos momentos mais difíceis e nunca deixou de orar por mim e meu filho que pacientemente me compreendeu nos momentos de estudo.

Aos meus pais e sogros que me apoiaram e estiveram ao meu lado, incentivaram e acreditaram em mim.

Um agradecimento especial aos amigos do Laboratório da FAT, Ericson Jonathan de Oliveira Teixeira e Lana S. Maia pelo suporte e conhecimento compartilhado durante o desenvolvimento do projeto.

Aos colegas do Programa de Pós-Graduação - Engenharia Ambiental pelos conhecimentos e momentos compartilhados ao longo desses dois anos.

Conquistas são precedidas de entregas.

Carlito Paes

RESUMO

MARTON, A.M.S. *Desenvolvimento de um compósito Eco-Friendly de ABS reforçado com resíduos proveniente da fibra da palmeira para aplicação em impressão 3D*. 2023. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Resende, 2023.

No presente trabalho o objetivo é avaliar o potencial para valorizar os resíduos sólidos da palmeira real australiana para uso como reforço na matriz de acrilonitrila butadieno estireno (ABS) e desenvolver um filamento compósito que seja mais amigável ao meio ambiente. Os filamentos compósitos foram processados utilizando um misturador termocinético e depois processados por uma mini extrusora utilizando diferentes quantidades de fibras (5, 10, 15 e 20%). Foi avaliado o efeito do conteúdo de fibras sobre as propriedades morfológicas, químicas e térmicas, e foi realizada uma análise ambiental utilizando a avaliação do ciclo de vida (ACV). O ABS puro não apresentou porosidade, enquanto os filamentos compósitos apresentaram uma estrutura porosa devido à presença de fibras e maiores quantidades de fibras induziu poros com diâmetro menor que 50 μm . O ABS e os filamentos compósitos apresentaram espectros semelhantes de FTIR; no entanto, o coeficiente de ligação de hidrogênio indicou uma melhor interação fibra-matriz para a composição do ABS/15%Palmeira, aumentando 42% em comparação com o ABS. Os filamentos compósitos apresentaram uma leve diminuição na estabilidade térmica, o que não compromete sua temperatura de processamento, enquanto o Tg apresentou valores similares ao ABS puro. A avaliação do ciclo de vida demonstrou ganhos ambientais benéficos com a incorporação de fibras naturais à matriz de ABS. As categorias que mais apresentaram ganhos ambientais foram: ocupação de terrenos agrícolas, depleção da camada de ozônio, ocupação dos terrenos urbanos, esgotamento de água, formação de oxidantes químicos e depleção fóssil. Os resultados do ensaio de absorção de água apresentaram um aumento na taxa de absorção de água dos filamentos compósitos de acordo com a carga de fibra, a composição ABS/20%Palmeira teve o maior resultado na absorção de água. Os filamentos compósitos foram impressos com sucesso numa mini extrusora mostrando a viabilidade de usar os filamentos desenvolvidos, e novas aplicações podem ser promovidas. O ABS puro e os filamentos compósitos foram analisados para obter as propriedades mecânicas, tais como a resistência à tração, a deformação e o módulo de elasticidade, observou-se que ao aumentar o teor de fibras na matriz de ABS houve uma redução nas propriedades mecânicas dos filamentos compósitos. O teste de biodegradação dos corpos de prova do ABS puro e dos filamentos compósitos apresentaram uma perda de massa, confirmando que a incorporação de fibra na matriz foi favorável para que o material seja degradado, os filamentos compósitos obtiveram uma perda de massa de quase 25% quando comparado com o peso inicial. Assim, a valorização do uso das fibras de palmeira na matriz ABS apresenta uma alternativa de baixo custo para a produção de filamentos e poder expandir as aplicações de impressão 3D com materiais mais sustentáveis que permitiriam novas aplicações na área de fabricação de aditivos.

Palavras-chave: Resíduos de palmeira. ABS. Filamentos compósitos. Impressão 3D.

ABSTRACT

MARTON, A.M.S. *Development of an Eco-Friendly ABS composite reinforced with palm fiber residue for application in 3D printing*. 2023. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Resende, 2023.

In the present work, the objective is to evaluate the potential to valorize the solid waste of the Australian royal palm tree for use as reinforcement in the acrylonitrile butadiene styrene (ABS) matrix and to develop a composite filament that is more environmentally friendly. The composite filaments were processed using a thermokinetic mixer and then processed by a mini extruder using different amounts of fibers (5, 10, 15 and 20% wt). The effect of fiber contents on the morphological, chemical and thermal properties was evaluated, and an environmental analysis was performed using life cycle assessment (LCA). Pristine ABS presented no porosity, while the composite filaments showed a porous structure due to the presence of fibers and higher amounts of fibers induced pores with diameter less than 50 μm . ABS and filament composites presented similar FTIR spectra; however, the hydrogen bonding coefficient indicated a better fiber-matrix interaction for the ABS/15%Palm tree composition, increasing by 42%wt compared to ABS. The composite filaments presented a slight decrease in thermal stability, which does not compromise their processing temperature, while T_g presented similar values to pristine ABS. The life cycle assessment demonstrated beneficial environmental gains with the incorporation of natural fibers into the ABS matrix. The categories that showed the most environmental gains were: agricultural land occupation, ozone layer depletion, urban land occupation, water depletion, chemical oxidant formation, and fossil depletion. The results of the water absorption test presented an increase in the water absorption rate of the composite filaments according to the fiber loading, the ABS/20%Palm composition had the highest water absorption result. The composite filaments were successfully printed on a mini extruder showing the viability of using the developed filaments and new applications may be promoted. Pristine ABS and the composite filaments were analyzed to obtain the mechanical properties, such as tensile strength, strain and modulus of elasticity, it was observed that by increasing the fiber content in the ABS matrix there was a reduction in the mechanical properties of the composite filaments. The biodegradation test of the specimens of pristine ABS and the composite filaments presented a loss of mass, confirming that the incorporation of fiber in the matrix was favorable for the material to be degraded, the composite filaments obtained a mass loss of almost 25% wt, when compared to the initial weight. Thus, enhancing the use of palm fibers in the ABS matrix presents a low-cost alternative for filaments production and may expand 3D printing applications with more sustainable materials that could enable new applications in the area of additive manufacturing.

Keywords: Palm waste. ABS. Composite filaments. 3D printing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Princípios Fundamentais da PNRS em ordem de prioridade	19
Figura 2 -	Disposição Adequada x Disposição Inadequada de resíduos no país	20
Figura 3 -	Distribuição das Áreas de Plantação de Palmito no Brasil	22
Figura 4 -	Diagrama esquemático de uma palmeira	23
Figura 5 -	Tipos de fibras de origem animal, vegetal, mineral e as fibras sintéticas	25
Figura 6 -	Visão geral da estrutura da fibra lignocelulose	26
Figura 7 -	Estrutura molecular da celulose	27
Figura 8 -	Representação de algumas estruturas presentes na hemicelulose.	28
Figura 9 -	Unidades presentes na lignina: (a) para-hidroxifenila, (b) guaiacila e (c) siringila	28
Figura 10 -	Tipos de tratamentos para modificação da superfície ou estrutura da fibra natural	31
Figura 11 -	Estrutura para formação de um compósito	32
Figura 12 -	Fluxograma da estrutura para formação de um compósito.....	33
Figura 13 -	Compósitos reforçados com fibras (a) descontínuas e alinhadas, (b) contínuas e alinhadas e (c) descontínuas e aleatoriamente orientadas	34
Figura 14 -	Fluxograma da estrutura para formação de um compósito e seus tipos de reforços	35
Figura 15 -	Representação sistemática do modelo FDM	41
Figura 16 -	Monômeros acrilonitrila, butadieno e estireno sofrem polimerização para se tornar o copolímero ABS	43
Figura 17 -	Fluxograma da metodologia e suas etapas de processamento e análise do material	46
Figura 18 -	Representação esquemática ilustrativa da metodologia adotada: a) a partir da fonte de fibra de palmeira e b) seu uso na fabricação de filamentos compostos (onde X representa o conteúdo de fibra de palmeira)	47

Figura 19 -	Composição das fases para realização de uma avaliação do ciclo de vida de um material, processo ou serviço	52
Figura 20 -	Metodologia do Teste de Biodegradação dos corpos de prova impressos em ABS puro, ABS10%Palmeira, ABS15%Palmeira e ABS20%Palmeira	57
Figura 21 -	Coloração dos Filamentos - a) ABS puro, b) ABS/5% Fibra Palmeira, c) ABS/10% Fibra Palmeira, d) ABS/15% Fibra Palmeira e e) ABS/20% Fibra Palmeira	59
Figura 22 -	Comprimento (L) e o diâmetro (D) da fibra de palmeira	60
Figura 23 -	Ilustração do filamento da seção transversal (esquerda) e a aparência geral do filamento (direita): (a, b) ABS, (c, d) ABS/5%, (e, f) ABS/10%, (g, h) ABS/15% e (i, j) ABS/20%	62
Figura 24 -	Imagens MEV de seção transversal do ABS puro e dos filamentos compósitos	63
Figura 25 -	Conteúdo e posição do vazio nos filamentos compósitos	65
Figura 26 -	Distribuição do diâmetro do vazio nos filamentos compósitos	66
Figura 27 -	Medição da porosidade: (a) filamento, (b) secção do diâmetro, (c) porosidade realçada e (d) medição da porosidade através de ImageJ	67
Figura 28 -	Espectros de FTIR de ABS, fibra da palmeira e seus compostos: com o respectivo pico de deconvolução para os	69
Figura 29 -	Curvas termogravimétricas (TGA) e suas derivadas (DTG) da fibra da palmeira, do ABS puro e dos filamentos compósitos	75
Figura 30 -	Curvas de DSC da fibra da palmeira, do ABS puro e dos filamentos compósitos	77
Figura 31 -	Resultados da avaliação do ciclo de vida de filamentos de ABS sem e com fibra de palmeira com destaque para os impactos ambientais	79
Figura 32 -	Absorção de água do ABS puro e dos filamentos compósitos 5%, 10%, 15% e 20% de fibra da palmeira	84
Figura 33 -	a) Impressora 3D Ender Pro 5, b) impressão ABS puro e c) impressão compósito de fibra de palmeira	85
Figura 34 -	Impressão 3D dos corpos de prova	86

Figura 35 -	Comportamento do ABS e dos filamentos compósitos no ensaio de tração	87
Figura 36 -	Corpos de prova do ABS puro, ABS10%, ABS15% e ABS20% após o ensaio de biodegradação de 180 dias das amostras enterradas	90
Figura 37 -	Resultado Teste de Biodegradação do ABS puro e dos filamentos compósitos	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Dados sobre a plantação de palmito no ano 2020	22
Tabela 2 –	Comparação da composição química de algumas fibras naturais	29
Tabela 3 –	Tipos de filamentos e suas características utilizados na impressão 3D	42
Tabela 4 –	Diferentes tipos de fibras utilizadas em diferentes porcentagens como reforço na matriz de ABS	45
Tabela 5 –	Composição, diâmetro, densidade, temperatura de processamento dos filamentos e índice de fluidez (IF)	58
Tabela 6 –	Resultados ANOVA	68
Tabela 7 –	Faixas características encontradas nos espectros FTIR de ABS e resíduos de palmeira e seus correspondentes grupos funcionais e os modos de vibração	72
Tabela 8 –	Parâmetros térmicos obtidos a partir da análise TGA e DSC: Tonset (°C), Tmax (°C), Resíduos (%), valores T ₅ e T ₃₀ utilizados para obter o índice de resistência térmica (T _{HRI})	76
Tabela 9 –	Parâmetros térmicos obtidos a partir da análise TGA e DSC: T _g (°C)	78
Tabela 10 –	Propriedades mecânicas do ABS puro e dos filamentos compósitos	88
Tabela 11 –	Comparativo das análises de solo na fase inicial e final do ensaio de biodegradação	90

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ABS	Acrilonitrila-Butadieno-Estireno
AM	Manufatura Aditiva
CAD	Computer Aided Design
DLP	Projeção de Luz Digital
FAO	Organização das Nações Unidas para Alimentação e a Agricultura
FDM	Fused Deposit Modeling
FFF	Fabricação de Filamentos
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
LOM	Fabricação de Objetos Laminados
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
PET	Polietileno Tereftalato
PLA	Poliácido láctico
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PP	Polipropileno
SLA	Estereolitografia
SLM	Fusão Seletiva a Laser
SLS	Sinterização a Laser Seletiva
TPU	Poliuretano

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	15
1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
1.1	A Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS	18
1.2	O Agronegócio no Brasil e a produção de palmito	21
1.3	Fibras Naturais	24
1.4	Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras Naturais	32
1.5	Impressão 3D	36
1.5.1	Tecnologia SLA – <i>Stereolithography</i>	37
1.5.2	Tecnologia SLS – <i>Selective Laser Sintering</i>	38
1.5.3	Tecnologia SLM – <i>Selective Laser Melting</i>	39
1.5.4	Tecnologia FDM – <i>Fused Deposition Modeling</i>	40
1.6	Filamento ABS	42
2	METODOLOGIA	46
2.1	Obtenção dos Materiais	46
2.2	Obtenção das Fibras	47
2.3	Obtenção dos Filamentos	47
2.4	Caracterizações	48
2.4.1	Diâmetros de filamento, densidade e análise do Índice de fluidez (IF) ...	48
2.4.2	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Microscopia óptica (MO)..	49
2.4.3	Espectroscopia de infravermelho de transformação de Fourier (ATR-FTIR)	50
2.4.4	Propriedades Térmicas	51
2.4.4.1	Termogravimetria	51
2.4.4.2	Calorimetria exploratória diferencial (DSC)	51
2.4.5	Avaliação do Ciclo de Vida	51
2.4.6	Absorção de Água	54
2.4.7	Impressão dos Filamentos	54
2.4.8	Propriedades Mecânicas	55
2.4.9	Teste de Biodegradação	55
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	58

3.1	Densidade e diâmetro do filamento e análise do índice de fluidez (IF)	58
3.2	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Microscopia óptica (MO)	59
3.3	Espectroscopia de infravermelho de transformação de Fourier (ATR - FTIR)	68
3.4	Propriedades Térmicas	74
3.4.1	Termogravimetria	74
3.4.2	Calorimetria exploratória diferencial (DSC)	76
3.5	Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)	78
3.6	Absorção de Água	83
3.7	Impressão dos Filamentos	85
3.8	Propriedades Mecânicas	86
3.9	Teste de Biodegradação	89
	CONCLUSÕES	93
	REFERÊNCIAS	95

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas houve um crescimento populacional, industrial e tecnológico bastante significativo para a humanidade, e com isso, a geração de resíduos sólidos teve um aumento considerável. As políticas ambientais têm conduzido governos, sociedade, academia e indústrias para uma gestão sustentável dos resíduos sólidos (MARTI; PUERTAS, 2021); (MIKULA et al., 2021).

Há uma estimativa de que até 2030 cerca de 2,59 bilhões de toneladas de resíduos sejam geradas em todo o planeta a cada ano e, se nenhuma ação for tomada para minimizar este impacto, este número poderá chegar a 3,40 bilhões de toneladas até o ano 2050 (COSTA-TRIGO et al., 2019). Os resíduos são gerados através da vida limitada do produto (alimentos comestíveis, equipamentos eletrônicos, roupas, móveis, entre outros) e pelo agronegócio, que apresenta uma considerável quantidade de sobras que são descartadas no ambiente. Esta produção é responsável por aproximadamente 3,1 bilhões de toneladas de emissões de CO₂ por ano, apresentando, portanto, uma grave preocupação ambiental. Um outro problema observado neste sistema é a disposição incorreta de resíduos em lixões e aterros controlados, que aumenta as emissões gasosas e libera compostos tóxicos no meio ambiente (CABRALES; ARZOLA; ARAQUE, 2020); (MD. TAHIR et al., 2019)

E no Brasil, para que pudesse continuar com o desenvolvimento do país e ao mesmo tempo ter um controle sobre a produção de resíduos sólidos foi criada a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei nº 12.305, com o propósito de minimizar o volume de resíduos sólidos e rejeitos gerados, bem como reduzir os impactos causados ao meio ambiente (BRASIL, 2010).

E com todas as ações tomadas para minimizar os impactos ambientais, ainda há uma preocupação com a poluição do plástico que se tornou um ponto bastante discutido, o que justifica o desenvolvimento de pesquisas sobre possibilidades de novas tecnologias e o reaproveitamento destes materiais (AWOYERA; ADESINA, 2020). Os resíduos plásticos afetam o ambiente em macro e microescalas devido aos seus vários tipos, tamanhos, e também sua resistência à degradação (BORA; WANG; YOU, 2020). Ainda que os plásticos forneçam benefícios econômicos e ambientais durante seu uso em várias aplicações, eles têm sido examinados rigorosamente por seus impactos ambientais negativos, em particular na geração de resíduos e o vazamento em ambientes terrestres e aquáticos (HATTI-KAUL et al., 2019).

Desta forma, a prototipagem rápida tem emergido como uma tecnologia capacitadora para uma ampla gama de novas aplicações (WANG et al., 2020), e tem ganhado espaço no mercado como uma fonte inovadora e sustentável, também conhecida como manufatura aditiva (AM) (LEE; AN; CHUA, 2017). No processo de manufatura aditiva Modelagem por Fusão e Deposição (FDM) os materiais poliméricos (filamentos) são fundidos em um bocal extrusor e depositados camada por camada para produzir uma peça tridimensional pré-determinada através de um modelo, ou seja, um arquivo digital. Durante o processo de impressão, o material polimérico (filamento) atinge temperaturas elevadas, alterando seu estado (fase) e resfriando rapidamente após a deposição das camadas, sendo esse processo repetido até o final da impressão. As peças são impressas em pequenas escalas e com muita precisão e exatidão (Malavolta and Müller, 2020; Wang et al., 2020).

Os materiais poliméricos mais utilizados para impressão 3D são o acrilonitrila butadieno estireno (ABS) e o ácido polilático (PLA). O PLA é uma resina derivada de fontes renováveis através da polimerização de amidos e açúcares, por isso é considerada como biodegradável e reciclável. No caso do filamento ABS, apesar de possuir boas propriedades mecânicas e de fácil capacidade para extrusar, não é uma resina biodegradável (PAKKANEN et al., 2017). Isso ocorre com as resinas plásticas à base de petróleo, que ao serem processadas geram resíduos poluentes ao ambiente (fumos), devido a necessidade de aplicar uma temperatura e pressão alta, dificultando a reciclagem do material e com isso gerando resíduos que afetarão o meio ambiente (CRESS et al., 2021). Assim, uma alternativa para minimizar esse problema atrelado à Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) seria o uso como reforço ou enchimento de um resíduo agroindustrial, como uma tentativa de minimizar a quantidade de resíduos descartados incorretamente, ou quando são queimados, afetando diretamente a camada de ozônio e o aquecimento global (OSMAN; ATIA, 2018) (AL-OQLA; SAPUAN, 2014). E contribuir com as diretrizes da Agenda 2030, em um dos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e sendo um deles a *ODS 13 – Ação contra Mudança Global do Clima*, ressaltando a necessidade de fomentar o desenvolvimento para levar a mudanças estruturais na realidade socioeconômica dos países envolvidos (IPEA, 2022).

Dessa forma, tem observado um avanço para o desenvolvimento de compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais aplicados ao mercado de impressão 3D (HORST et al., 2020). Vários pesquisadores têm buscado atender as

necessidades ambientais, explorando materiais e compósitos preparados a partir de fontes renováveis (BALLA et al., 2019). Atualmente existem matrizes poliméricas reforçadas com fibras de carbono, fibras de vidro, fibras naturais e outros tipos de materiais (FERREIRA et al., 2017). No entanto, o destaque têm sido dado às fibras naturais, tais como, juta, sisal, kenaf, bambu, e outras, as quais apresentam propriedades como inovação no mercado, durabilidade e de baixo custo, baixo peso, bem como a resistência mecânica, justificando seu desenvolvimento para novas aplicações (AGARWAL; MOHANTY; NAYAK, 2021). Assim, adicionar um reforço natural a uma matriz polimérica é uma alternativa para melhorar as propriedades do material, além de torná-lo amigável ao meio ambiente, contribuirá para a diminuição de resíduos sólidos que são destinados para aterros sanitários ou incineradores (ZANINI et al., 2021c).

No Brasil, o setor de agronegócio tem contribuído com a geração de resíduos sólidos. A indústria de extração de palmito em conserva, é um setor que têm crescido nos últimos anos, contribuindo de forma negativa com o meio ambiente, por gerar quantidades elevadas de resíduos. De uma palmeira, é coletado aproximadamente 400 g de palmito, e o restante da planta é considerado como resíduos, o que corresponde a 80-90% do seu peso total. E a bainha da palmeira tem uma alta concentração de carbono e nitrogênio o que dificulta sua decomposição, causando grandes preocupações ao meio ambiente (ZANINI et al., 2021c). Sendo assim, é necessário encontrar soluções inovadoras que utilizem esses resíduos, diminuindo seu impacto ao meio ambiente (ZENNI; HELM; TAVARES, 2018).

Portanto, este projeto tem como objetivo estudar a viabilidade técnica-científica para desenvolver um compósito de ABS reforçado com resíduos provenientes da fibra da palmeira para obtenção de filamentos para impressão 3D, fazendo com que o compósito acelere seu tempo de degradação no meio ambiente. Além disso, será definido quais serão as características necessárias aos materiais utilizados na tecnologia de impressão 3D para garantir peças finais com boa qualidade superficial (aspecto visual) e para oferecer um produto amigável ao meio ambiente.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 A Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS

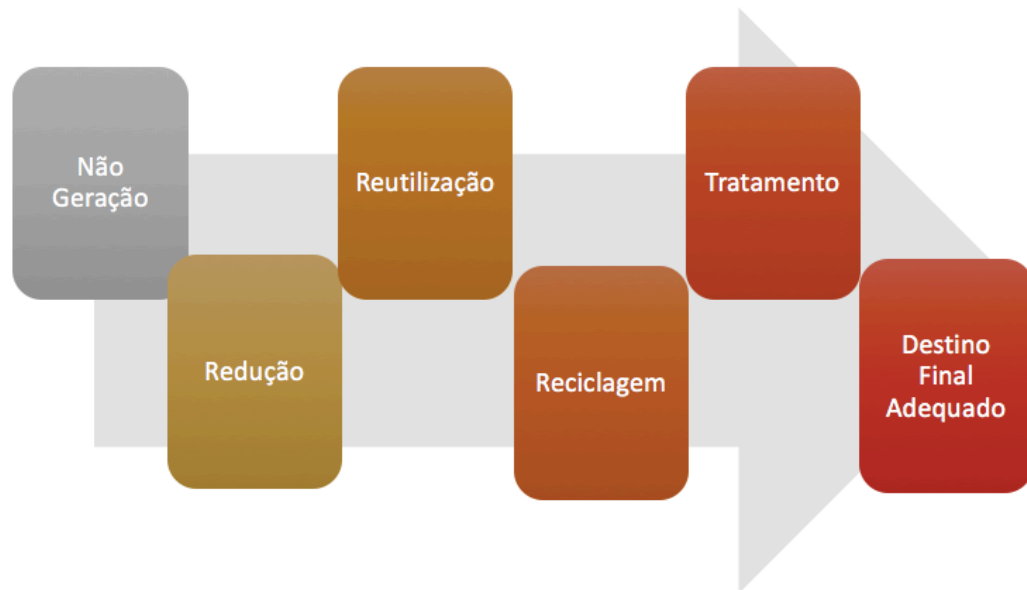
Uma grande preocupação tem assolado as políticas ambientais quando se trata da questão de geração de resíduos, resultantes de anos de exploração dos recursos naturais, os quais se baseavam no modelo tradicional de produção, ou seja, à extração da matéria prima e sua transformação gerando resíduos durante o processo e no final do seu consumo sem nenhuma preocupação com o seu descarte (CERQUEIRA et al., 2020). O crescimento explosivo da população, a migração do campo para cidade e o progresso tecnológico oriundo da Revolução Industrial foram alguns propulsores que aceleraram o aumento da produção estimulando o consumo por parte da população (BAPTISTA, 2010). Assim este modelo não contribuiu para um futuro sustentável, foi utilizado de forma exacerbada os recursos naturais, sem a preocupação com o tempo que seria necessário para que houvesse uma recuperação destes, e por outro lado, foi gerando pilhas de montanhas de resíduos (CERQUEIRA et al., 2020). A sociedade antropocena está preocupada com os problemas causados ao meio ambiente por séculos, e tem buscado novas soluções para mitigá-los, e com isso preservar os recursos naturais do planeta, propondo uma metodologia na qual a produção-consumo seja mais sustentável, ou seja, produzir mais com menos recursos (COSENZA; DE ANDRADE; DE ASSUNÇÃO, 2020).

No Brasil, num período de aproximadamente 10 anos os resíduos sólidos tiveram um aumento significativo de 35,5%, subindo de 60,8 milhões de toneladas por ano, em 2010, e passando para 82,5 milhões de toneladas por ano, em 2020 (RES; BRASIL, 2021). E o gerenciamento destes resíduos continua a ser um grande desafio para a sociedade atual, mesmo com todas as políticas, normas e leis implementadas como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) o descarte destes ainda acontece de formas inadequadas como em lixões e/ou aterros controlados (SILVA; TAGLIAFERRO; OLIVEIRA, 2021).

A Lei Federal 12.305, de 02 de agosto de 2010, regulamentada pelo Decreto Federal 7.404, de 23 de dezembro de 2010, aprovou a Política Nacional de Resíduos Sólidos no Brasil, considerado um marco legal na regulamentação de todo o setor de resíduos no país. A PNRS objetiva uma mudança comportamental, que além das legislações vigentes de Saneamento Básico e outras municipais, busca a integração

do programa de gerenciamento de resíduos num conjunto de: princípios, objetivos, instrumentos, diretrizes, metas, responsabilidades, instrumentos econômicos, entre outros (COSENZA; DE ANDRADE; DE ASSUNÇÃO, 2020). A Figura 1 apresenta os princípios fundamentais da PNRS.

Figura 1. Princípios fundamentais da PNRS em ordem de prioridade.



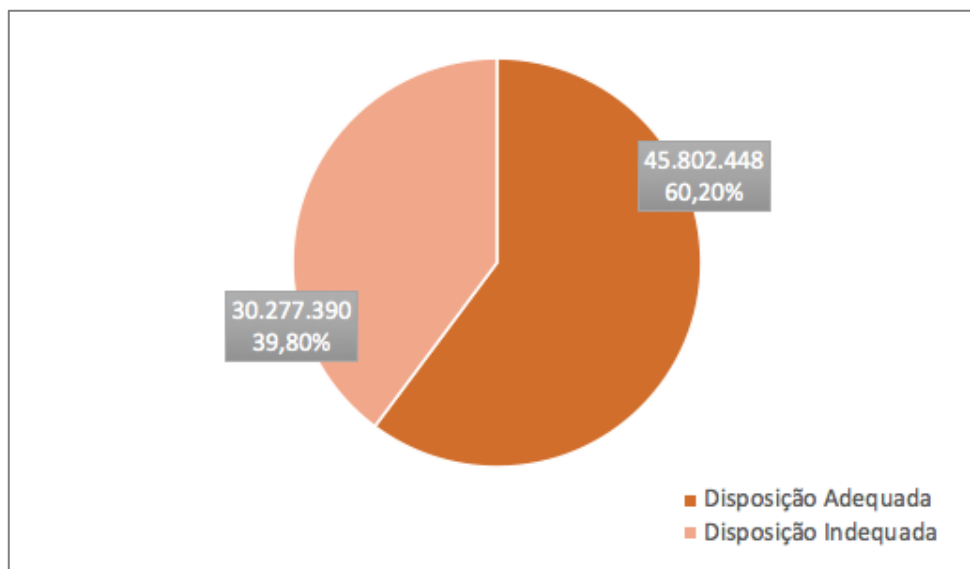
Fonte: O autor, 2021.

Para a PNRS a ordem de prioridade é não gerar resíduos sólidos, e não sendo possível a reutilização e/ou a reciclagem, destaca a importância de buscar meios para que esses resíduos não sejam descartados incorretamente no meio ambiente. E um dos pontos importantes da PNRS é responsabilizar as empresas fabricantes a não só fazer a gestão dos seus resíduos, mas se preocuparem com a destinação correta dos produtos que produzem, buscando novas soluções, tecnologias, inovações para que os resíduos não sejam destinados de forma a comprometer o meio ambiente (RAMOS et al., 2020).

Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) (2021), o Brasil produziu 82.477.300 toneladas de resíduos no ano de 2020, e mesmo sendo um ano atípico devido à pandemia COVID-19, na qual a maior parte dos resíduos foram gerados dentro das residências, foi considerado um total de 390 kg/hab/ ano. E a destinação destes resíduos no país, mesmo com a PNRS

em vigor, ainda apresenta quase 40% de disposição em lixões ou aterros controlados, conforme apresentado na Figura 2 (RES; BRASIL, 2021).

Figura 2 – Disposição Adequada x Disposição Inadequada de resíduos no país.



Fonte: O autor, 2021.

De acordo com a PNRS, até o ano de 2014 deveria ter sido eliminado os lixões, e os materiais passíveis de reaproveitamento ou reciclagem serem encaminhados para aterros sanitários, mas ainda existem muitos lixões operantes pelo país e sendo utilizado de forma inadequada para descartar todo tipo de resíduos (RES; BRASIL, 2021).

Um dos setores que geram grandes quantidades e volumes de resíduos sólidos, é o agronegócio. No Brasil, o agronegócio é um setor produtivo e promissor que apresentou crescimento significativo nos últimos anos, seu crescimento acentuado coloca o país em posição de destaque no processo de desenvolvimento. A Organização das Nações Unidas para Alimentação e a Agricultura (FAO), estima que a produção de resíduos agroindustriais atinja 1,3 bilhão de toneladas por ano, sendo que 1/3 dos alimentos que poderiam ser destinados ao consumo humano são desperdiçados, seja como resíduos, oriundos do processamento, ou como perda na cadeia produtiva. E buscar o aproveitamento desses resíduos traduz ser uma forma de minimizar os impactos ambientais causados pelo descarte incorreto no meio ambiente. Esses resíduos podem ser transformados em matéria prima para produção de produtos com possível valor agregado atendendo a preocupação ambiental com a

limitação de recursos fósseis e sustentabilidade, e a preferência do consumidor por produtos mais naturais, biodegradáveis e ambientalmente amigáveis (DO NASCIMENTO E SILVA ALENCAR et al., 2020 ; Diaz et al., 2018).

Nos últimos anos, o Brasil tem apresentado um crescimento significativo no setor do agronegócio, muito estimulado com as exportações, e em decorrência desses fatores, também houve um aumento na geração de resíduos agroindustriais, sendo necessário estimular investimentos e pesquisas no setor que venham atrelar com as necessidades de uma produção mais sustentável e que possam reutilizar esses resíduos de alguma forma, ou seja, inserir no processo produtivo ou reutilizar em outras aplicações, corroborando com o meio ambiente (IPEA, 2022; Cosenza et al., 2020).

1.2 O Agronegócio no Brasil e a produção de palmito

O setor de agronegócio cresce ano após ano, e com o aumento da população mundial pressupõe a necessidade de mais alimentos no mercado. E com esse crescimento, as indústrias alimentícias se tornaram grandes geradores de resíduos sólidos, causando impactos ambientais negativos, pois quando são deixados no solo, promovem o crescimento de larvas e insetos ou quando são queimados no campo, impactam negativamente a atmosfera e a terra, representam uma das principais fontes de emissões tóxicas (algumas delas como às dioxinas, por exemplo, hidrocarbonetos de cadeia longa/aromáticos) e substâncias poluentes (COSTA-TRIGO et al., 2019).

Os resíduos produzidos no agronegócio são considerados como resíduos sólidos orgânicos, que compreende de materiais residuais de plantas, como cascas, folhas, caules, entre outros. Esses resíduos agroindustriais apresentam potencial poluente, embora não possam ser considerados como rejeitos, pois possuem valor econômico agregado e podem ser tratados e reaproveitados no próprio setor agroindústria (ZENNI; HELM; TAVARES, 2018).

Dentre os resíduos sólidos gerados no Brasil, encontra-se um grande gerador de resíduos que são os produtores de palmito. O Brasil é considerado um dos maiores produtores de palmito no mundo, seus resíduos não são considerados como rejeitos do processo, pois possuem valor econômico agregado, apesar de ser um grande poluente. E com isso diversas palmeiras tem sido objeto de estudo, as quais são comercialmente exploradas na produção de óleo, palmito, amido, cera e fibras. Além

disso, o palmito é o que possui maior valor econômico agregado (HAFEMANN et al., 2019). A Tabela 1 evidencia os dados de plantação e produção do palmito para o ano de 2020 no Brasil, de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2020).

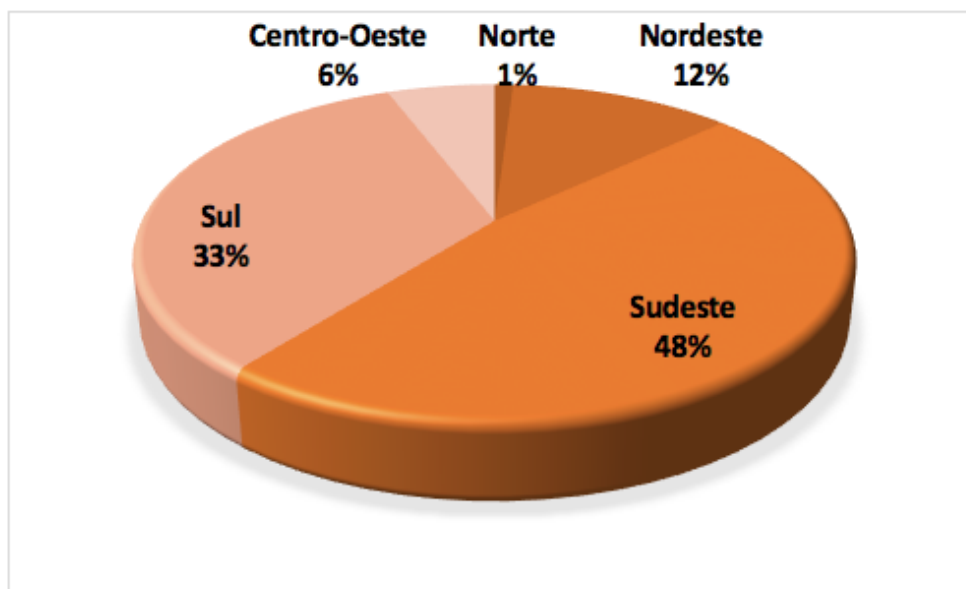
Tabela 1. Dados sobre plantação de Palmito no ano 2020.

Área destinada à colheita (hectares)	27.018
Área colhida (hectares)	26.855
Quantidade produzida (ton)	110.005
Rendimento Médio da produção (kg/Hectare)	4.096
Valor Produção (Mil Reais)	282.223

Fonte: IBGE, 2020.

A Figura 3 mostra que as regiões Sul e Sudeste é onde se encontra as maiores produções de palmito. Estima-se um crescimento de 10% ao ano no cultivo de palmito (IBGE, 2020).

Figura 3. Distribuição das áreas de plantação de palmito no Brasil.

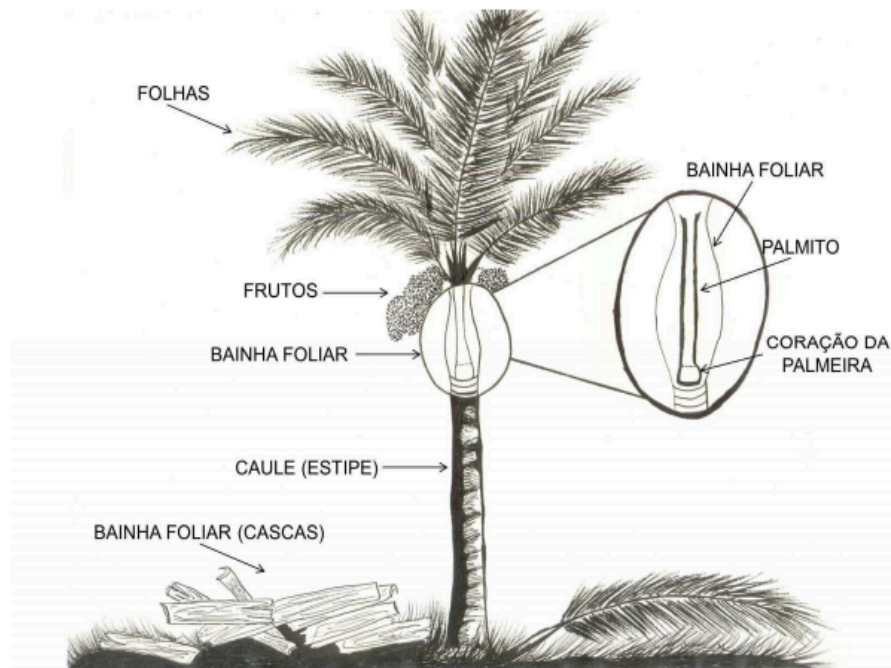


Fonte: O autor, 2022.

Zanini e co-autores cita que aproximadamente 400 g do palmito comercializado é retirado, e o restante da planta, entre 80 a 90% é considerado como resíduos. E quanto maior a produção/extração de palmito, maior é a quantidade de resíduos

gerados e que serão descartados no meio ambiente, as folhas são deixadas no local de corte, e os caules são levados para fábrica (ZANINI et al., 2021c). A Figura 4 apresenta o diagrama esquemático de uma palmeira com as partes que são descartadas: folhas, caule e cascas.

Figura 4. Diagrama esquemático de uma palmeira.



Fonte: ZENNI, 2018.

Esses resíduos têm sido objeto de várias pesquisas, tais como enchimento ou reforço em matrizes termoplásticas para o desenvolvimento de compósitos como aditivos para impressão por FDM (WICKRAMASINGHE; DO; TRAN, 2020). A utilização dos recursos naturais para aplicações industriais aumenta a biodegradabilidade de muitos produtos descartáveis da vida diária como alguns tipos de embalagens, itens de decoração e outros (SH. AL-OTAIBI et al., 2020). Embora existam compósitos poliméricos à base de fibras naturais desde 1900, eles não ganharam muita atenção até os anos 80. Entretanto, atualmente, os compósitos naturais ou verdes são amplamente utilizados devido à eco-legislação e aos benefícios dos compósitos reforçados com fibras naturais (JESUAROCKIAM et al., 2019). As fibras naturais foram utilizadas inicialmente para aplicações domésticas bem limitada, mas a crescente preocupação com o aquecimento global e o esgotamento dos recursos petrolíferos impulsionou a sua utilização em

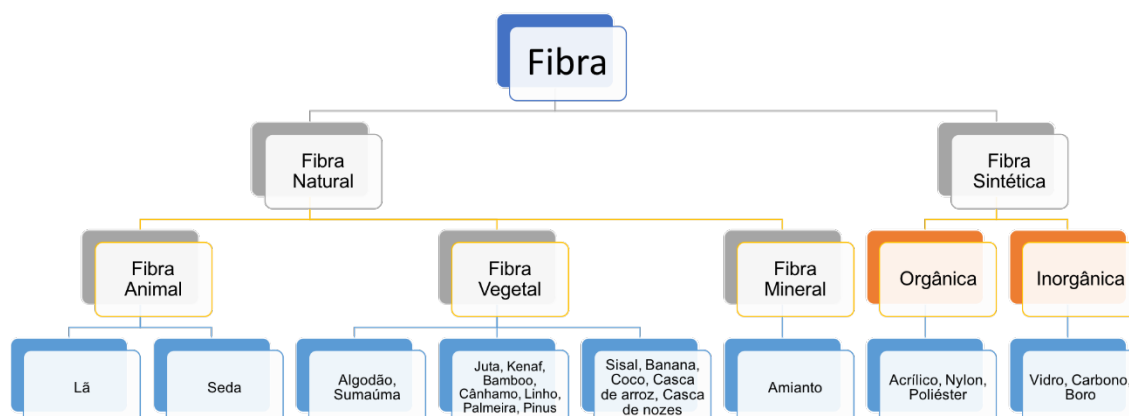
empreendimentos industriais (AWAIS et al., 2021). Destaca-se por ser considerado um material ambientalmente correto, baseia-se em múltiplos fatores como natureza biodegradável, derivada de fontes renováveis e a sua pegada de carbono. O argumento do baixo custo vem da comparação com fibras de alto desempenho, e em muitos casos, está associado ao fato das fibras serem obtidas como resíduos de outros processos, como é o caso da fibra da palmeira (AZMAN et al., 2021).

1.3 Fibras Naturais

Os avanços da ciência e da tecnologia tem resgatado a necessidade do ser humano se preocupar com os recursos naturais, a natureza após anos de exploração, não consegue se regenerar tão rapidamente, como é extraído seus recursos. Este desenvolvimento traz a relevância com a conservação/preservação do meio ambiente, desencadeando pesquisadores a explorar novos materiais de origem biodegradáveis e renováveis (RAJESHKUMAR et al., 2021). Assim a utilização da fibra natural tem sido objeto de vários estudos e como reforço em materiais poliméricos, buscando reutilizar recursos disponíveis, como os resíduos agrícolas, que se encontram em abundância e geralmente são perdas, sobras, do processo de industrialização. A maioria dos resíduos agrícolas é de natureza lignocelulósica, onde a lignocelulose é o principal componente da biomassa vegetal (DO NASCIMENTO E SILVA ALENCAR et al., 2020).

As fibras naturais são materiais biodegradáveis, renováveis, parcialmente ou totalmente recicláveis, e são encontradas na literatura como reforço em diversos polímeros (THYAVIHALLI GIRIJAPPA et al., 2019). Essas fibras são classificadas como sendo de origem vegetal, animal ou mineral e quando comparados aos reforços de materiais convencionais feitas de maneira sintética, como a fibra de vidro, as fibras naturais se destacam pelo fator ecológico vinculado ao seu uso, vantagem financeira de aquisição, baixa densidade, flexibilidade no processamento e boas propriedades mecânicas (AZMAN et al., 2021). A Figura 5 apresenta a classificação de alguns tipos de fibras de origem animal, vegetal, mineral e as fibras sintéticas.

Figura 5. Tipos de fibras de origem animal, vegetal, mineral e as fibras sintéticas.



Fonte: O autor, 2022.

As fibras de origem animal são as mais conhecidas, obtidas de pêlos de animais ou coletado de animais, geralmente são à base de proteínas. A lã e as fibras da seda são os principais exemplos de fibras animais. A fibra de lã está entre as mais antigas, obtidas dos pêlos de cabra, ovelha e alpaca. A qualidade da fibra de lã depende da raça, localização do corpo do animal. As propriedades das fibras de lã dependem do comprimento e do diâmetro das fibras. A seda também está entre as fibras mais antigas conhecidas pelo homem, são produzidas pela secreção de insetos durante a formação de seus casulos ou teias. Os casulos são constituídos de fibroína e ligantes de sericina. A fibroína é uma proteína natural que dá rigidez à fibra, enquanto a sericina ajuda a manter a estrutura da fibra (AWAIS et al., 2021).

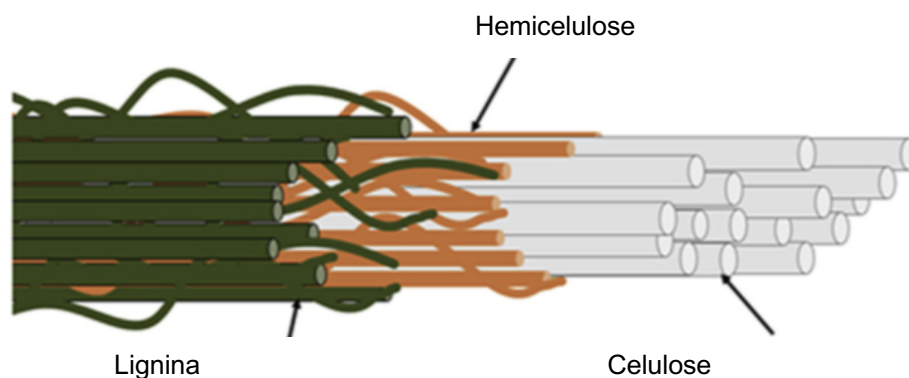
A fibra de amianto é uma fibra mineral obtida das rochas, através de tratamentos únicos que vão sofrendo ao longo do tempo, e essas fibras são resistentes ao calor e não são inflamáveis. Alguns minerais silicatos são conhecidos como amianto devido sua natureza cristalina fibrosa. Comercialmente, o amianto é disponível em 12-300 mm de comprimento, tendo uma forma lisa semelhante a fibra de vidro. Entretanto, estudos realizados apontaram que ficar continuamente exposto ao amianto puro pode vir a causar doenças, e muitos países tem limitado sua utilização (RAMADA RODILLA et al., 2022).

As fibras sintéticas foram utilizadas por muitos anos nas indústrias aeroespacial e setores automotivos. Os compósitos desenvolvidos a partir da fibra de vidro, carbono ou boro, proporcionavam produtos de alta rigidez e resistência. Porém com a

preocupação ambiental, as fibras naturais são utilizadas para substituir as fibras sintéticas como material de reforço em compósitos poliméricos para produtos de engenharia (ASHOTHAMAN; SUDHA; SENTHILKUMAR, 2021). E o principal objetivo de usar fibras naturais é reduzir o custo do material e alcançar a relação de rigidez/peso, reciclabilidade, biodegradabilidade, isolamento térmico e neutralidade de CO₂ em comparação com as fibras de vidro e as fibras de carbono (BALLA et al., 2019).

As fibras vegetais ou lignocelulósicas como são conhecidas, são derivadas de fontes agrícolas ou como resíduos de processamento ou produção quando são processadas para seu uso primário (VÄISÄNEN; DAS; TOMPPONEN, 2017). A fibra vegetal é composta de microfibrilas rígidas de celulose cristalina em matriz amorfa e macia, que é uma mistura de lignina e hemicelulose. As propriedades das fibras dependem da sua composição, ângulo da microfibrilas, cristalinidade e estrutura interna (THYAVIHALLI GIRIJAPPA et al., 2019). A Figura 6 mostra a estrutura de uma fibra lignocelulósica.

Figura 6. Visão geral da estrutura da fibra lignocelulósica.

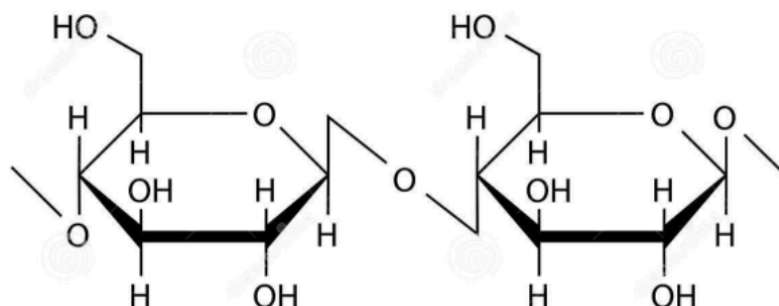


Fonte: AZMAN et al., 2021.

A celulose é um polímero natural, que se encontra em abundância na Terra. É constituída essencialmente por fibras moleculares, composta de unidades repetidas de glicose ligadas entre si em longas plantas que proporcionam resistência mecânica, rigidez e estabilidade (SEDDIQI et al., 2021). Sua cristalinidade está relacionada às ligações de hidrogênio, que regulam as propriedades físicas das fibras naturais (ILYAS et al., 2022). A quantidade de celulose varia de fibra para fibra e pode influenciar não apenas suas propriedades mecânicas, mas também suas

propriedades químicas (AZMAN et al., 2021). A Figura 7 apresenta a estrutura molecular da celulose.

Figura 7. Estrutura molecular da celulose.



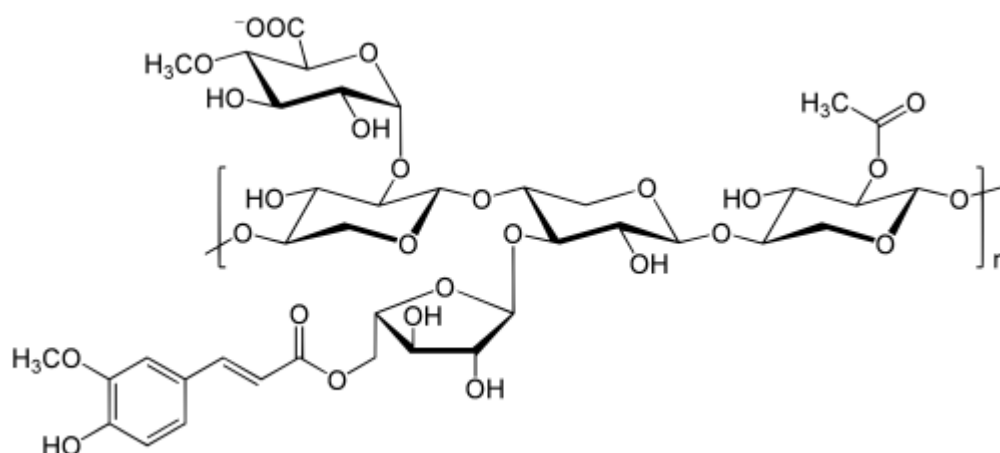
Fonte: FENGEL; WEGENER, 1989.

A hemicelulose é o segundo maior biopolímero abundante na biomassa vegetal depois da celulose. Ao contrário da celulose, a hemicelulose consiste em diferentes unidades de monossacarídeos. A hemicelulose constitui um tipo de heteropolissacarídeos com estruturas complexas, incluindo a glicose, xilose, manose, galactose, arabinose, frutose, ácido glucurônico, e ácido galacturônico em várias quantidades, dependendo da fonte (MACHMUDAH et al., 2017). A hemicelulose é um polissacarídeo hidrofílico e possui uma massa molar inferior ao da celulose. As moléculas de hemicelulose estão ligadas em cadeias ramificadas relativamente curtas, associadas às microfibrilas de celulose, incorporando a celulose em uma matriz (LUCENIUS et al., 2019).

A hemicelulose se divide entre as pentosanas (xilose e arabinose) e hexanas (galactose, manose e glucose) (Figura 8), suas fórmulas mais comuns são $C_5H_8O_4$ e $C_6H_{10}O_5$. E por possuir uma estrutura aberta, pode conter muito hidroxila e acetil, tornando a hemicelulose solúvel em água e higroscópica (LEYNAUD KIEFFER CURRAN et al., 2022).

A hemicelulose tem uma estrutura amorfa e aleatória com pouca força, diferente da celulose que tem uma forte estrutura cristalina e é resistente à hidrólise.

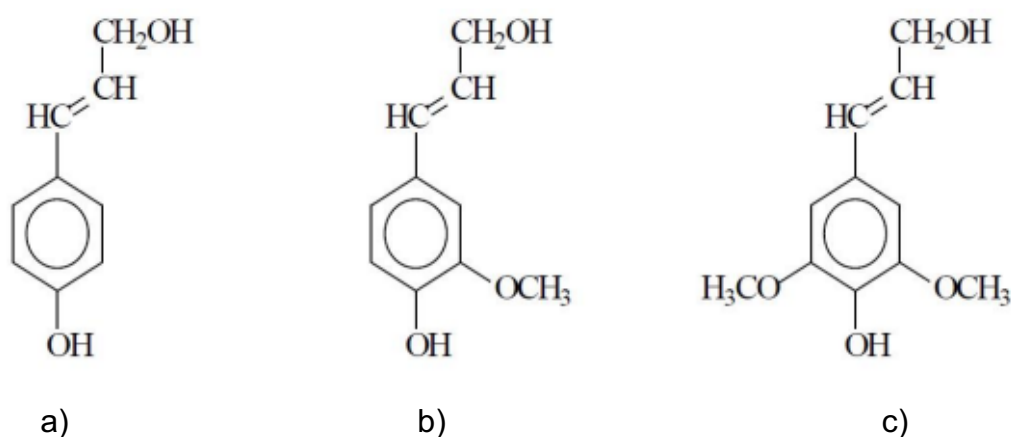
Figura 8. Representação de algumas estruturas presentes na hemicelulose.



Fonte: MACHMUDAH et al., 2017.

A lignina é a substância fundamental para a saúde e o crescimento das plantas, provê suporte mecânico, impermeabilidade, resistência a doenças e pragas, e transporte de água e nutrientes, é um polímero aromático amorfo de hidrocarbonetos com alta massa molecular. É o segundo biopolímero mais abundante na Terra, depois da celulose, e compõe 20-30% da biomassa seca, formando três unidades distintas da família do éter fenil, resultando em diferentes tipos de lignina. A lignina é composta principalmente de siringila (unidade tipo S), guaiacila (unidade tipo G) e para-hidroxifenila (unidade tipo H). A Figura 9 apresenta a estrutura molecular da lignina. A lignina é insolúvel em água, sua estrutura e complexidade química, dificultam o seu isolamento e sua plastificação (LEYNAUD KIEFFER CURRAN et al., 2022).

Figura 9. Unidades presentes na lignina: (a) para-hidroxifenila, (b) guaiacila e (c) siringila.



Fonte: FENGEL; WEGENER, 1989.

As propriedades mecânicas das fibras de origem vegetal, são influenciadas pela composição química, grau de polimerização, morfologia da superfície das fibras e defeitos. A composição química pode diferir de planta para planta, e mesmo em diferentes partes de uma mesma planta, pois dependem de fatores como: idade da planta, condições do solo onde foram cultivadas e o local de extração (AWAIS et al., 2021). Na Tabela 2 estão descritos alguns dados de composição química das fibras naturais utilizadas como reforço em compósitos poliméricos.

Tabela 2. Comparação da composição química de algumas fibras naturais.

Fibra	Hemicelulose (%)	Celulose (%)	Lignina (%)	Referência
Juta	12 – 20	51 - 84	5 - 13	(AZMAN et al., 2021)
Kenaf	22	44 – 87	15 - 19	
Casca de nozes	20 – 22	40 - 60	50 - 55	(Erdogan and Huner, 2018)
Cascas de arroz	24 – 28	31 - 34	18 - 20	
Pinus	35 – 40	40	27 - 30	
Resíduos da Palmeira Real Australiana	23,7	47,8	25,9	(Zanini et al., 2021)

Fonte: O autor, 2022.

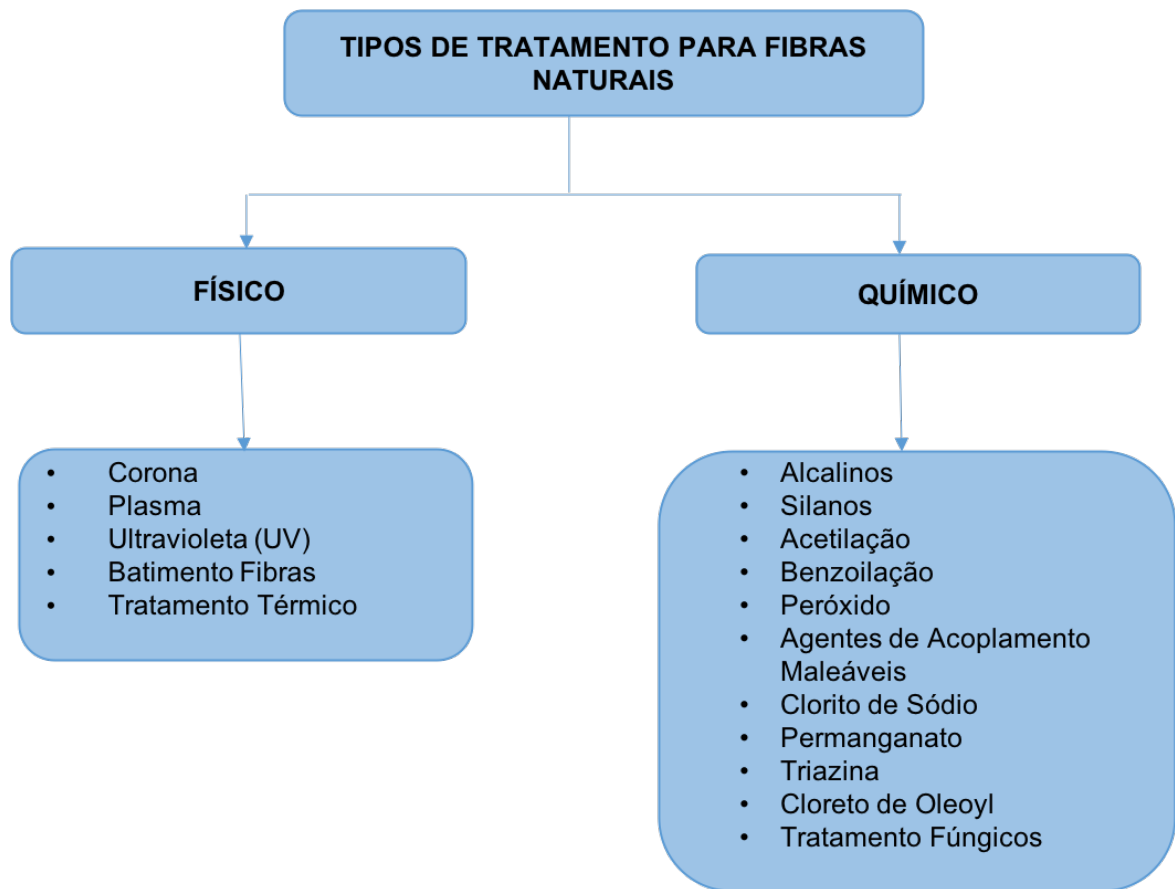
As características das fibras naturais chamam a atenção para a obtenção de compósitos, pois podem ser facilmente misturada à matriz termoplástica (ANBUKARASI; KALAISELVAM, 2014). Atualmente esses compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais podem ser encontrados em diversas aplicações como bens de consumo, estruturas de baixo custo, construção civil, indústria automobilística, adesivos, geotêxteis, embalagens, filtros e outros (OLIVEIRA, 2018).

Ao utilizar uma fibra natural, é necessário atentar quanto a hidrofiliabilidade desta, pois resulta em alta absorção de umidade e fraca aderência às matrizes hidrofóbicas, ou seja, resulta numa fraca compatibilidade entre a fibra e matriz. A interface entre os dois materiais é vital para o comportamento mecânico dos compósitos. Embora a absorção de umidade afete principalmente as fibras naturais, existem algumas resinas

que absorvem uma grande quantidade de umidade. Portanto, a superfície da fibra precisa de ser modificada para melhorar a aderência das fibras naturais à matriz, resultando numa boa resistência e rigidez do compósito de fibras naturais, e nesses casos as fibras passam por tratamentos que irão modificar a estrutura química e física para melhorar sua aderência (GHOLAMPOUR; OZBAKKALOGLU, 2020).

Os métodos de tratamento físicos das fibras podem alterar eficazmente as características estruturais e de superfície aumentando a aderência entre a fibra e a matriz, melhorar as propriedades térmicas e influenciar a ligação mecânica composta sem alterar a sua composição química. Estes métodos podem ser classificados em três categorias: tratamento mecânico, tratamento de extração de solvente e tratamento de descarga elétrica (KOOHESTANI et al., 2019). Enquanto o tratamento químico tem por objetivo expor os grupos funcionais e reativos na superfície da fibra e introduzir as curas hidrofóbicas da fibra celulósica, neste tipo de processo ocorre várias reações químicas nas fibras que alteram suas estruturas moleculares dos componentes das fibras. Este tipo de tratamento químico facilita a remoção da lignina, hemicelulose, cera e óleos da superfície da fibra, e consegue obter uma forte interação entre fibras e matrizes (PRABHU et al., 2021). Além desses tratamentos que são os mais conhecidos, são encontrados o tratamento físico-químico que é a combinação dos dois tipos de tratamento com o objetivo de aumentar a produtividade química e facilitar a separação dos feixes de fibras. E o tratamento térmico, ou seja, uma modificação térmica nativa do tratamento químico, pois é uma abordagem livre de químicos e produz zero de resíduos tóxicos, sofrem alterações químicas em altas temperaturas, porém as fibras modificadas termicamente tornam-se quebradiças em comparação com as fibras não tratadas, apresentando menor flexão e resistência à tração (ASYRAF et al., 2022). A Figura 10 apresenta os tipos de tratamento para as fibras naturais, classificando pelo tipo físico ou químico.

Figura 10. Tipos de tratamentos para modificação da superfície ou estrutura da fibra natural.



Fonte: O autor, 2022.

É necessário avaliar rigorosamente o tipo de tratamento que será aplicado na fibra natural, pois irá influenciar o custo final do compósito. E o preço competitivo das fibras naturais é uma das principais atrações no mercado. E observando que todos os tipos de tratamento realizados são prejudiciais ao meio ambiente devido as grandes quantidades de produtos químicos envolvidos no processo, reforçando a necessidade de ter um descarte adequado dos resíduos (FIORE et al., 2016).

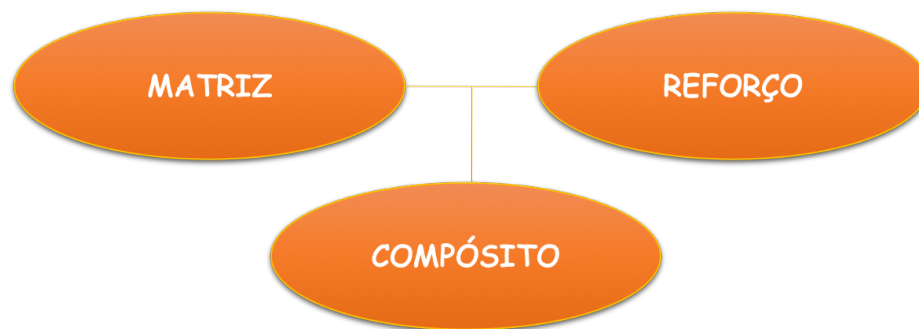
E utilizar a fibra da palmeira in natura é uma das motivações para adicionar como reforço em compósitos poliméricos, pois além de reduzir a quantidade de rejeitos, e ser um resíduo agroindustrial de fácil obtenção, de fonte natural e renovável, irá contribuir com o meio ambiente.

1.4 Compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais

A necessidade de buscar novos materiais com o mínimo impacto ambiental é essencial para os seres humanos e para a preservação do meio ambiente, e com isso a engenharia tem realizado estudos contínuos para desenvolver produtos sustentáveis, e dentre esses novos materiais, os compósitos reforçados com fibras estão se tornando significativamente populares devido à sua baixa densidade, bem como às suas notáveis características mecânicas (ALHIJAZI et al., 2020).

As propriedades dos compósitos são baseadas nos componentes selecionados, ou seja, matriz e reforço, que é a combinação macroscópica de duas fases e são identificadas fisicamente, e apresentam interface entre elas. A principal função da matriz é distribuir a carga pelo compósito, enquanto o reforço é responsável por resistir aos esforços solicitado (ILYAS et al., 2022). A Figura 11 representa a formação do compósito através da matriz e reforço.

Figura 11. Estrutura para formação de um compósito.



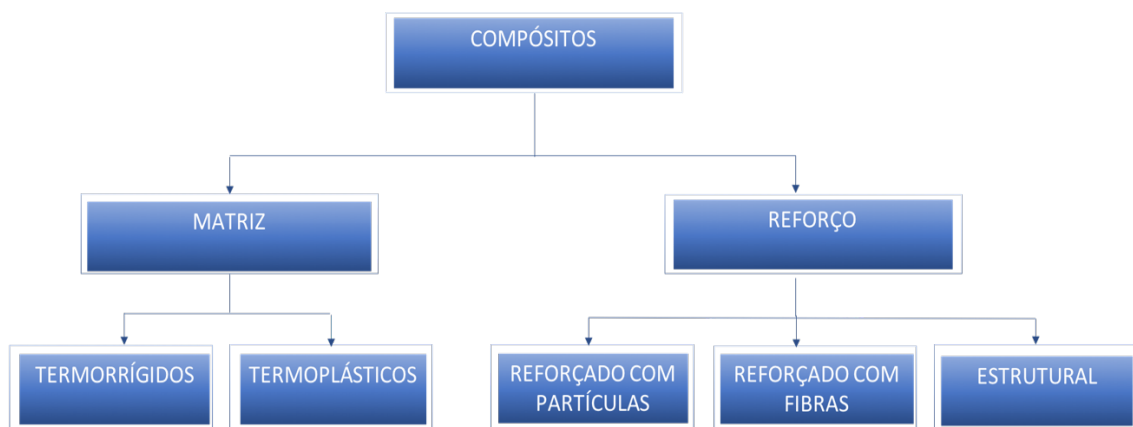
Fonte: O autor, 2022.

As propriedades também são influenciadas por outros parâmetros como:

- Processamento: como o tempo de mistura e temperatura.
- Dispersão das fibras na matriz, ou seja, a incorporação de fibras celulósicas no termoplástico.
- A interface entre fibra e matriz.
- A fração volumétrica.
- Estabilidade térmica das fibras.

Sendo que dentro destas, a interface entre fibra e matriz é a mais importante. A interface fibra-matriz é a zona de difusão, ou seja, é a conexão química ou mecânica das fibras com as fases da matriz, onde ocorre o contato entre os componentes do compósito (AMIANDAMHEN; MEINCKEN; TYHODA, 2020). A interface dos compósitos depende da aderência entre a matriz e as fibras. A função da matriz é aderir as fibras juntas para transferência eficiente de carga entre elas. A aderência é influenciada pelas propriedades físico-químicas do material da matriz. Em geral, fibras são os principais membros dos portadores da carga, enquanto a matriz os mantém no lugar e na orientação desejada, atua como um meio de transferir a carga entre eles (YASHAS GOWDA et al., 2018). Outro fator importante, é a temperatura de processamento dos compósitos com fibras naturais, esses parâmetros influenciam significativamente as propriedades e características interfaciais dos compósitos (CALISTER, 2012). A Figura 12 apresenta o fluxograma para formação de um compósito, matriz e reforço e os materiais que compõem sua estrutura.

Figura 12. Fluxograma da estrutura para formação de um compósito.



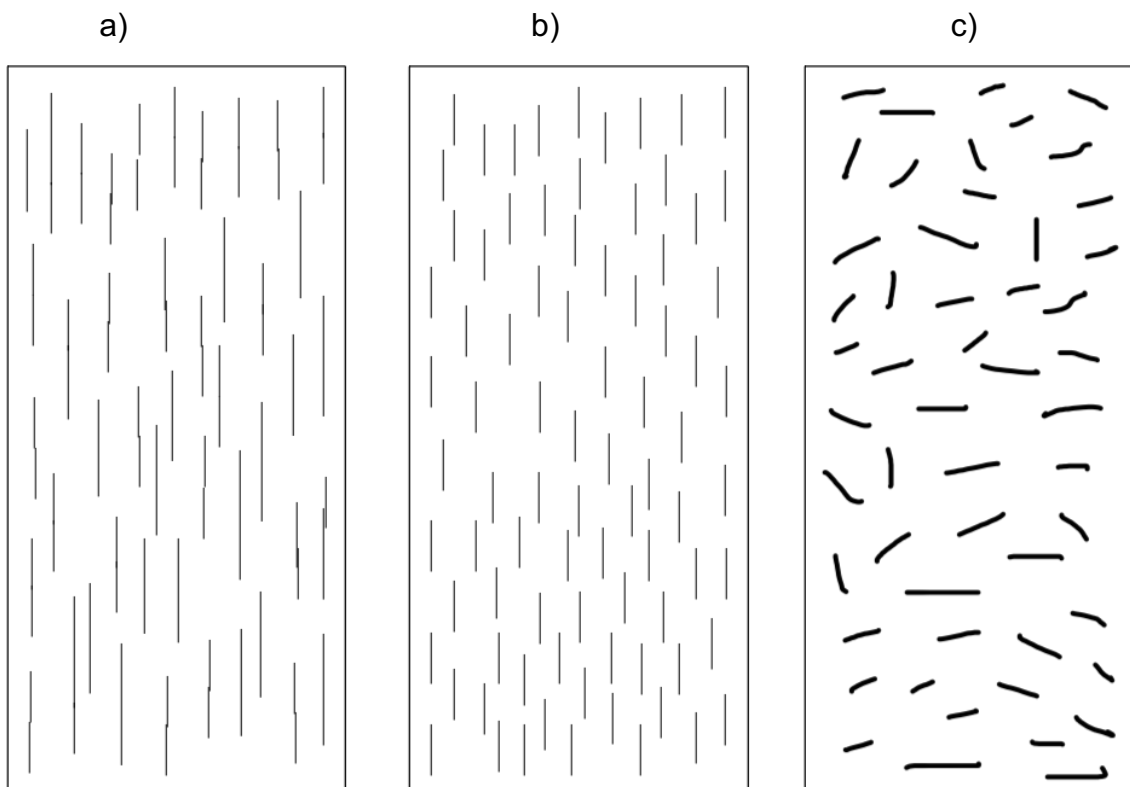
Fonte: O autor, 2022.

As fibras geralmente são incorporadas na matriz polimérica de duas maneiras distintas: uma ou mais fases que tem a finalidade de reforçar, aumentando a rigidez e resistência mecânica ou como carga, neste caso o reforço adicionado à matriz é de baixa massa específica e com custo reduzido, tem a finalidade de aumentar o volume do compósito e proporcionar reduções de peso e custo do material (BALLA et al., 2019).

Os compósitos de matrizes poliméricas podem ser divididos em três classes distintas sendo: (a) compósitos de reforço particulado, (b) reforçados com fibras

contínuas, podendo ser unidirecionais, bidirecionais ou multidirecionais e os (c) compósitos de fibras descontínuas, que também podem ser unidirecionais ou aleatórias. A Figura 13 representa ilustrando os compósitos reforçados com fibras e suas características. Os compósitos de reforço particulados apresentam uma razão de aspecto L/D (relação entre a maior e a menor dimensão do corpo) sendo menor que três, como resultado da introdução de componentes, nos quais estes são denominados de cargas particuladas ou não fibrosas sendo definidos como materiais sólidos adicionados aos polímeros em quantidades suficientes para reduzir o custo do compósito, alterar as suas propriedades físicas e/ou mecânicas. Os compósitos com fibras contínuas dependem de vários fatores como tensão e deformação das fases da matriz e fibra, carga volumétrica e a tensão ou carga aplicada garantindo que as mesmas fiquem alinhadas. E os compósitos com fibras descontínuas tem ganhado mais espaço no mercado, porém sua eficiência é inferior aos compósitos com fibras contínuas, sua distribuição é uniforme e longitudinal (CALISTER, 2012).

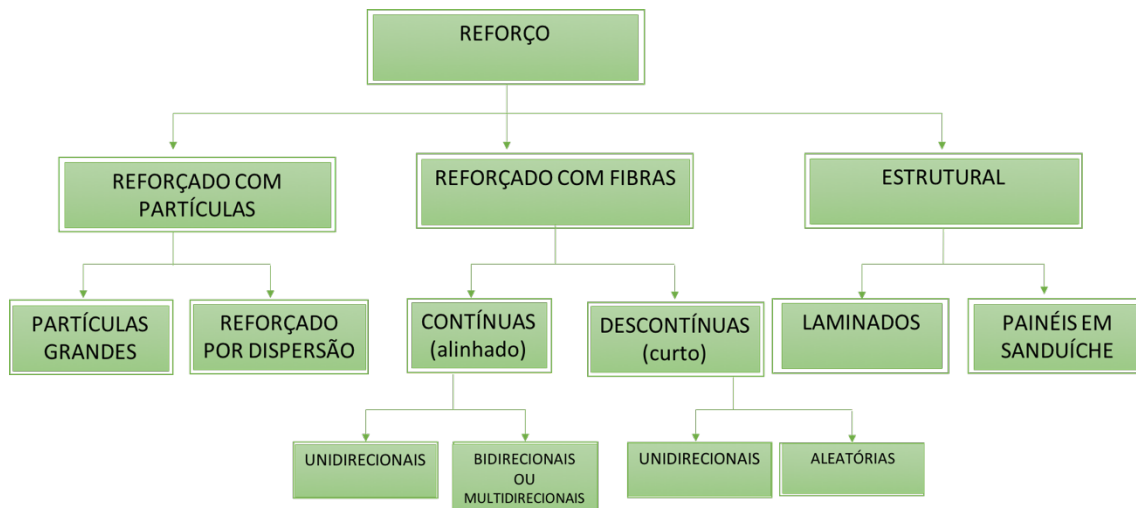
Figura 13. Compósitos reforçados com fibras (a) contínuas e alinhadas, (b) descontínuas e alinhadas e (c) descontínuas e aleatoriamente orientadas.



Fonte: O autor, 2022.

A Figura 14 apresenta o fluxograma da composição de um reforço e suas composições.

Figura 14. Fluxograma da estrutura para formação de um compósito e seus tipos de reforços.



Fonte: O Autor, 2022.

O reforço com a fibra natural além de fornecer benefícios econômicos e ambientais, é um material em abundância, é reciclável e biodegradável, e o custo para se utilizar uma fibra natural é bem mais baixo comparado à fibra sintética (AL-OQLA; SAPUAN, 2014). Além dos benefícios apresentados como redução do custo do material, também causará um impacto positivo ao meio ambiente, reutilizando o material que provavelmente seria destinado em aterros ou ao descarte inadequado (MAZZANTI; MALAGUTTI; MOLLICA, 2019).

Os compósitos de fibras naturais podem ser aplicados em diferentes áreas das engenharias, tais como, aeroespacial, automotivo, marítimo, equipamentos esportivos e construção. E vieram como alternativas para os materiais convencionais como ligas metálicas, cerâmicas e polímeros (ALHIJAZI et al., 2020).

É uma das tecnologias que tem sido destacada com o uso de compósitos de fibras naturais é a impressão 3D, pois esses compósitos proporcionam benefícios para impressão como, peças geométricas personalizadas e complexas, peças em forma de rede, processamento flexível para peças com alto desempenho e economia em termos de tempo e custo (BALLA et al., 2019).

1.5 Impressão 3D

A manufatura aditiva (MA) é uma ferramenta da indústria 4.0, popularmente conhecida como Impressão em 3D. A impressão 3D foi desenvolvida por Charles Hull, conhecido como “Chuck Hull”, e foi comercializada pela primeira vez na área de estereolitografia (SLA) em 1986, sendo utilizado a técnica de deposição de material através de linhas para formação de um objeto em 3D. O processo de impressão em 3D ocorre através da fusão e posterior solidificação dos materiais por deposição camada por camada, formando gradualmente a geometria do produto desejado sem a necessidade de acabamento ou desperdício significativo de material. A utilização do MA tem sido uma das vias mais procuradas no mundo contemporâneo, o mercado global de MA tem uma estimativa de crescimento anual de 14,4% até 2027, estimulada pelas indústrias de utilização final e de personalização (LI et al., 2020b).

A busca e o crescimento contínuo pela MA têm emergido devido as preocupações sustentáveis relativas à redução do consumo de energia e de insumos, e à procura de uma produção limpa e a métodos amigos do ambiente (AHMED et al., 2020). Para executar a impressão 3D, é necessário um programa de desenho, geralmente é utilizado o CAD que cria um modelo sólido em 3D, e a impressão faz uma réplica desse desenho. E pode observar que há uma economia no consumo de matéria prima utilizando essa forma de impressão, pois a perda é muito pequena, tem estimado uma redução de até 75%, consequentemente diminui a poluição da atmosfera com a redução de carbono, além do ganho ao ter um objeto impresso com muito mais precisão e qualidade (MILOSEVIC; STOOF; PICKERING, 2017).

A impressão 3D é uma tecnologia inovadora que tem um potencial de crescimento promissor, pois permite a impressão de peças complexas sem a necessidade de ferramentas técnicas ou específicas. Atualmente, tem sido aplicada em uma ampla gama de produtos de alto valor como: alimentos, eletrônicos, máquinas, indústrias aeroespacial e automobilística, aplicações médicas e odontológicas, têxteis, construção, educação e arquitetura (HARRIS et al., 2019).

As tecnologias de impressão 3D baseadas em polímeros são escolhidas com base em dois fatores. Primeiro, o método de impressão depende do estado inicial do material polimérico (quer seja na forma de resina polimérica líquida, pó de polímero, filamento polimérico, ou filme polimérico), a escolha depende também do método de

construção utilizado, ou seja, do padrão da máquina ou do fusível (óptico, químico/mecânico ou térmico). Portanto, a MA baseada em polímeros pode ser exemplificada como a fabricação de filamentos (FFF), estereolitografia (SLA) conhecida como fotopolimerização; sinterização a laser seletiva (SLS); fusão seletiva a laser (SLM), projeção de luz digital (DLP), multiJet ou polyJet (jato de ligante), e fabricação de objetos laminados (LOM) (DANUT MAZURCHEVICI; NEDELICU; POPA, 2020). Uma das tecnologias mais conhecidas no mercado é a *Fused Deposition Modeling* (FDM) que significa modelagem por fusão e deposição, ou seja, deposição camada por camada. Atualmente é a mais utilizada devido ao seu baixo custo e por ser de fácil manuseio para obter peças utilizando materiais poliméricos como ABS e PLA (HU et al., 2018).

1.5.1 Tecnologia SLA – *Stereolithography*

É uma das mais antigas tecnologias desenvolvidas na metade dos anos 80, pelo fundador da tecnologia impressão 3D. Seu funcionamento é através de uma fonte laser (geralmente luz UV) que induz a polimerização e a ligação cruzada da resina líquida, um sistema que permite o movimento horizontal (direções X e Y) do feixe laser, e um sistema que controla o movimento vertical da plataforma de fabricação laser de alta potência que endurece a resina líquida que fica num reservatório para criar a forma 3D desejada. Esse tipo de impressão é uma das três principais tecnologias adotadas na impressão 3D, seguida pela modelagem de deposição fundida (FDM) e a sinterização seletiva a laser (SLS) (LI et al., 2020a).

O primeiro aparelho Estereolitografia SLA foi criado pela empresa 3D Systems em 1992, possibilitando a impressão de peças complexas numa fração bem menor de tempo que normalmente levaria. O SLA foi o pontapé para entrada no campo de prototipagem rápida durante a década de 80 e continuou avançando e sendo amplamente utilizada. A impressora SLA 3D é composta por quatro seções principais:

- Um tanque preenchido com fotopolímero líquido.
- Uma plataforma perfurada imersa em um tanque.
- Um laser ultravioleta de alta potência.
- Uma interface de computador, que irá gerenciar a plataforma e os movimentos do laser (COSMI; DAL MASO, 2019).

Suas características são de acabamento superficial de alta qualidade, alta precisão, mais transparência, flexível, consegue imprimir detalhes finos em peças grandes, porém suas peças são mais frágeis, não sendo adequado para peças mecânicas. São impressos com materiais fotopoliméricos (DANUT MAZURCHEVICI; NEDELICU; POPA, 2020).

A impressão SLA oferece vantagens em comparação com a impressão por extrusão-3D e os métodos de sinterização a laser; os objetos são fabricados à temperatura ambiente, evitando o risco de degradação, principalmente quando são utilizados para impressão de dispositivos médicos tais como implantes, aparelhos auditivos, dispositivos dentários, e outros (XU et al., 2021).

1.5.2 Tecnologia SLS – *Selective Laser Sintering*

É uma tecnologia conhecida como sinterização seletiva a laser (SLS), que utiliza um laser para aquecer partículas de pó, resultando na fusão parcial do pó seguida da fusão das partículas e subsequente a solidificação para dar uma estrutura 3D conforme o desenho elaborado no programa de computador, imprimindo camada por camada. O sistema SLS é composto de três componentes principais:

- uma plataforma de espalhamento.
- um leito de pó.
- e um sistema laser (laser e scanner).

O pó é espalhado uniformemente sobre a plataforma usando o sistema de espalhamento composto por um alimentador de ranhuras e a lâmina de rolo/scraper para uniformizar a superfície (CHAROO et al., 2020).

Os materiais utilizados são polímeros termoplásticos na forma granular. Suas características de impressão são de alta precisão, boas propriedades mecânicas, geometrias complexas, consegue imprimir peças maiores, é uma tecnologia líder de mercado, porém seu custo é maior que a impressão FDM (DANUT MAZURCHEVICI; NEDELICU; POPA, 2020).

Esse processo não exige uma variedade de excipientes e solventes, e pode fabricar formas de diversos tamanhos num único passo com alta precisão, seguido do reprocessamento e reciclagem da matéria-prima como um benefício. SLS permite alterar vários parâmetros do processo, tais como: temperatura do leito de alimentação e de impressão, potência do laser, espessura, e espaçamento das escotilhas para

fabricar objetos com compactação, porosidade e arquiteturas internas. Essa forma de impressão é muito utilizada para produtos farmacêuticos (LEKURWALE; KARANWAD; BANERJEE, 2022).

O processo de impressão SLS pode ser descrito da seguinte forma:

- o pó é disperso em uma camada fina no topo da plataforma dentro da câmara de construção;
- a impressora pré-aquece o pó a uma temperatura próxima d ponto de fusão da matéria prima;
- o laser faz a varredura da seção transversal do modelo 3D, aquecendo o pó, fazendo com que as partículas se fundem e cria uma parte sólida;
- depois que o pó é fundido, a plataforma de construção desce uma camada na câmara de construção, e em seguida é aplicado uma nova camada de material de pó;
- o processo se repete para cada camada até que a peça seja concluída e quando finaliza elas esfriam gradualmente;
- e após o resfriamento as peças são retiradas da câmara de impressão e passam para uma estação de limpeza para retirar o excesso de pó (GUECHE et al., 2021).

A impressão SLS se sobressai quando precisa de peças de plásticos duráveis, são conhecidas por sua robustez e concorrem com as peças produzidas pelos métodos tradicionais de moldagem por injeção. E podem gerar uma economia de tempo e custos de peças de pequeno porte comparado com a montagem com fabricação tradicional (CHAROO et al., 2020).

A impressão SLS tem sido muito utilizada pela indústria farmacêutica, a fabricação de produtos farmacêuticos exige um limiar de alta qualidade e segurança, justificando a relevância do uso de pós de qualidade farmacêutica, que são conhecidos como seguros para a saúde do ser humano. Devem ser imprimíveis e permanecer estáveis durante o processo de impressão (GUECHE et al., 2021).

1.5.3 Tecnologia SLM – *Selective Laser Melting*

Dentre os processos de manufatura aditiva, o derretimento (fusão) seletivo a laser (SLM) é a técnica de mais sucesso da manufatura aditiva, sendo muito utilizada

para imprimir peças em forma de rede com geometria complexas com alta precisão e qualidade. O SLM usa o laser para obter uma fusão completa do pó metálico, formando uma parte homogênea, resultando em uma peça que tem uma temperatura de fusão única (algo que não é produzido com uma liga) (PILGAR et al., 2022).

Sua impressão é baseada num leito com pó metálico, é distribuído sobre uma plataforma e um raio laser bem poderoso consegue fundir as partículas dos metais para formar as camadas do objeto. O processo de impressão é através de uma fina camada de pó metálico que é espalhado sobre o leito de impressão da impressora, e o laser é usado para derreter o pó sobre o leito, criando a primeira camada do objeto conforme o modelo determinado no CAD. Outra camada fina de pó metálico é espalhada sobre a primeira camada, e a segunda camada é posteriormente fundida com a primeira camada pelo laser. Este processo se repete até que objeto esteja completo (M, 2020). A tecnologia SLM produz objetos de maneira semelhante ao SLS, no entanto, a principal diferença é que são aplicados à produção de peças de metal. Sua grande vantagem é que consegue imprimir peças finais bem complexas que nos modelos tradicionais de fabricação seriam mais complicados de produzir (PILGAR et al., 2022).

Essa tecnologia pode utilizar pó de plástico, mas o principal é o pó de metal para obter peças de geometria complexa através do laser, porém possui um custo mais elevado de todas as demais tecnologias, por isso é usada em poucas áreas, principalmente a indústria aeroespacial, medicina e odontologia (DANUT MAZURCHEVICI; NEDELCU; POPA, 2020).

1.5.4 Tecnologia FDM – *Fused Deposite Modeling*

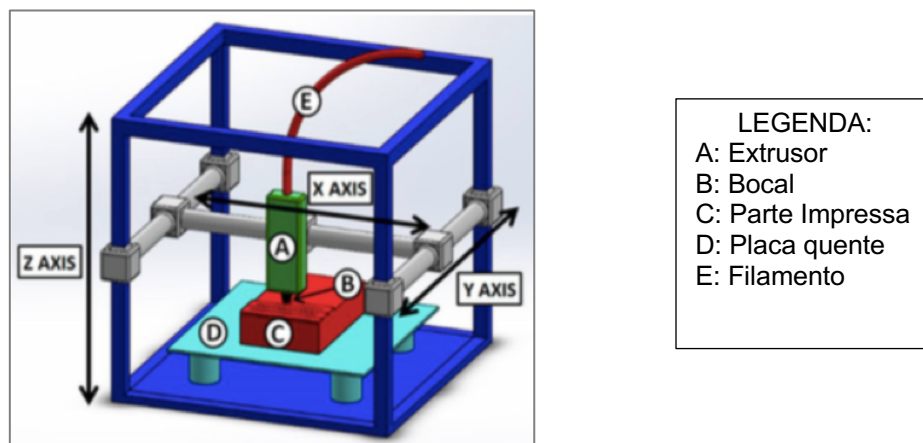
O processo FDM é bastante difundido e utilizado nos tempos atuais, e tem suas vantagens por ser de baixo custo, alta velocidade e simples, capaz de depositar material camada por camada (OSMAN; ATIA, 2018). O sucesso da impressão FDM ocorre devido à sua simplicidade, precisão e ter tornado um produto de fácil acesso atualmente, a qual muitas famílias possuem um equipamento deste dentro de sua casa (MILOSEVIC; STOOF; PICKERING, 2017).

Na impressão FDM é mais comum utilizar os materiais poliméricos, conhecidos como os filamentos. Eles são fundidos em um bocal extrusor e depositados camada por camada para produzir uma peça tridimensional. Durante o processo de impressão,

o filamento atinge temperaturas elevadas, fazendo o filamento derreter no cabeçote e resfriando rapidamente após a deposição das camadas (MALAVOLTA; MÜLLER, 2020).

A impressão FDM tem algumas particularidades importantes como a definição da espessura do filamento, tamanho do bocal, definir temperatura, dependendo do termoplástico escolhido, e a placa onde será depositado o material precisa ser aquecida, conforme evidenciado na Figura 15 (MAZZANTI; MALAGUTTI; MOLLICA, 2019).

Figura 15. Representação sistemática do modelo FDM.



Fonte: MAZZANTI, 2019.

Os filamentos precisam ter um diâmetro entre 1,75 mm ou 3 mm, e são empurrados por um rolo de alimentação até o cabeçote extrusor que estará aquecido conforme temperatura pré determinada, e o material é depositado pelo bocal, que possui um diâmetro entre 0,1 a 1 mm, sobre a placa aquecida, fazendo camada por camada até atingir a forma do objeto desejado (MALAVOLTA; MÜLLER, 2020).

Os termoplásticos utilizados para impressão 3D precisam ter algumas características importantes, pois fazem a diferença no processo de impressão, tais como, baixo ponto de fusão e a viscosidade reduzida para fluir no bocal e aderir a camada anterior, tornando imprescindível a escolha do termoplástico e a definição correta da temperatura (PAKKANEN et al., 2017). A Tabela 3 apresenta diversos materiais poliméricos que são utilizados como filamentos para a impressão 3D.

Tabela 3. Tipos de filamentos e suas características utilizados na impressão 3D.

Tipos de filamentos	Descrição	Características	Referência
ABS	Acrilonitrila butadieno estireno	Durabilidade e capacidade de resistência a altas temperaturas.	(MADKOUR; TIRKES; TAYFUN, 2021)
PLA	Ácido polilático	Fácil impressão, temperatura mais baixas, não emiti fumos.	(AHMED et al., 2020)
TPU	Elastômeros termoplásticos	Excelente resistência ao rasgo e ao desgaste. Alta resistência ao impacto e dureza.	(LEE; AN; CHUA, 2017)
PP	Polipropileno	Resistente, leve, flexível e quimicamente durável.	(HARRIS et al., 2019)
PET	Polietileno tereftalato	Forte e flexível.	(PAKKANEN et al., 2017)
Nylon	Poliamida	Boa resistência química, a fadiga e ao impacto.	(HARRIS et al., 2019)

Fonte: O autor, 2022.

Dentre os materiais poliméricos mais utilizados no mercado como filamento apresentados na Tabela 3, o ABS têm sido uma das escolhas preferida dos usuários, por possui boas propriedades mecânicas e ser de fácil processamento, porém não é biodegradável. E o segundo material mais utilizado é o PLA, o qual é produzido a partir de fontes renováveis, como amido e açúcar, sendo um material biodegradável (PAKKANEN et al., 2017).

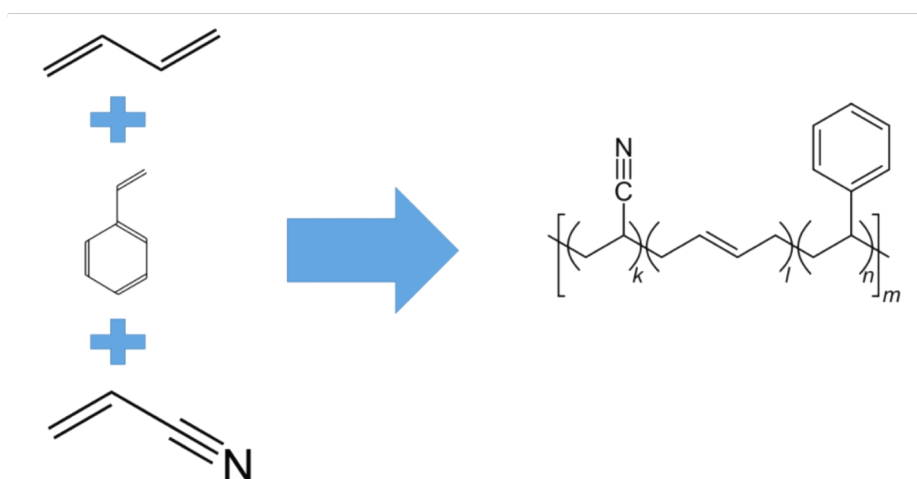
1.6 Filamento ABS

O copolímero acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS) é um termoplástico derivado do petróleo, e durante seu processamento emiti fumos na atmosfera

causando impacto ao meio ambiente. E sua composição não facilita passar pelo processo de reciclagem, tornando-se um problema ambiental. Além disso, o custo energético e as emissões de carbono dos processos tradicionais de reciclagem são altos, como o transporte representando quase 20% de todo o uso de energia e 40% de todas as emissões de carbono para o processo (CRESS et al., 2021).

O ABS é muito utilizado pelas indústrias devido à presença de monômeros presentes em sua estrutura que atribuem características como boa resistência mecânica, rigidez, bom acabamento e de fácil moldagem. Existem dois principais métodos para a obtenção do ABS, por meio dos processos químico e mecânico. O processo químico conhecido como polimerização por enxerto, começa com a obtenção do polibutadieno que recebe os monômeros de estireno e acrilonitrila, que se copolimerizam formando o estireno-acrilonitrila, gerando o ABS com a fusão da mistura. O processo mecânico para a obtenção do ABS consiste na fusão de dois monômeros já polimerizados que ocorre por meio de um misturador ou extrusora (WIEBECK & HARADA, 2005). A Figura 16 apresenta a polimerização dos monômeros para obter o copolímero ABS.

Figura 16. Monômeros acrilonitrila, butadieno e estireno sofrem polimerização para se tornar o copolímero ABS.



Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Acrilonitrila_butadieno_estireno#/media/Ficheiro:Polimerizacao_do_ABS.png.

Basicamente, o ABS é formado de 25% de acrilonitrila, 20% de butadieno e 55% de estireno. Os polímeros ABS possuem uma excelente combinação de propriedades mecânicas, térmicas, elétricas e químicas, e oferece uma boa resistência ao impacto (WIEBECK & HARADA, 2005).

E o filamento ABS foi um dos primeiros materiais utilizados para impressão 3D, e é conhecido por sua dureza e resistência ao impacto, permitindo impressão de peças duráveis que suportam seu uso e desgaste. É um material que suporta altas temperaturas antes de começar a deformar, sendo uma boa escolha para aplicações externas ou de alta temperatura (SINGH; GARG; SINGH, 2018). Além disso, uma das características interessantes do filamento de ABS é que permite a obtenção de formatos e formas específicas (moldabilidade) e a flexibilidade por seu um termoplástico (OLIVEIRA et al., 2018).

Para impressão do filamento ABS é necessário manter a base aquecida, para que o polímero não contraia, causando um problema conhecido como “*warping*”, ou seja, o polímero esfria na sua temperatura de extrusão até a temperatura ambiente. Essa mudança no tamanho que acontece na primeira camada pode fazer com que a peça se separe da base, e para ser minimizado é necessário manter a superfície aquecida a 110°C, fazendo com que a base transfira o calor para a primeira camada (ZHOU et al., 2020). Durante o processamento do filamento ABS é emitido gases tóxicos no ambiente, isso ocorre devido a alta temperatura que o material é extrusado. Esses gases são conhecidos como compostos orgânicos voláteis (COVs) que sofrem reações químicas e formam o gás ozônio, afetando a camada mais baixa da atmosfera (AHMED et al., 2020). No entanto, materiais menos tóxicos têm sido desenvolvidos para a impressão 3D, com o intuito de reduzir esses impactos ao meio ambiente. Dessa forma, as indústrias tem buscado utilizar matrizes poliméricas reforçadas com fibras naturais, que são consideradas ambientalmente corretas e renováveis (AL-OQLA; SAPUAN, 2014).

Assim, o uso desses materiais compósitos reforçados com fibras naturais tem sido foco na aplicação para a produção de filamentos para a impressão 3D, pois esses tipos de reforços são provenientes de fontes inesgotáveis e são biodegradáveis o que poderá diminuir o tempo de vida útil do material, além de além de reduzir o custo do filamento (AHMED et al., 2020).

A Tabela 4 apresenta diferentes tipos de fibras que tem sido utilizada como reforço na matriz ABS e suas diferentes porcentagens adicionadas à matriz.

Tabela 4. Diferentes tipos de fibras utilizadas em diferentes porcentagens como reforço na matriz de ABS.

Tipos de Fibras	Porcentagem de fibra adicionada (%)	Referência
Cobre (Cu)	25	(NABIPOUR; AKHOUNDI, 2021)
Fibra de carbono curta	10, 20, 30 e 40	(TEKINALP et al., 2014)
Fibras de celulose	20 e 30	(FONSECA; WALDMAN; DE PAOLI, 2021)
Fibras de coco	15	(ŠAFKA et al., 2016)
Fibras de Kevlar	10	(WANG et al., 2019)
Fibras de Pinus	2 e 5	(COSTA et al., 2021)
Fibras de vidro	20	(BILLAH et al., 2020)
Lignina de madeira + Fibras de carbono	10	(NGUYEN; BOWLAND; NASKA 2018)
Nanotubos de carbono Multiwall	1, 3, 5, 7 e 10	(SEZER; EREN, 2019)
Nozes de Macadâmia	19 e 29	(GIRDIS et al., 2017)
Palha de arroz	5 e 15	(OSMAN; ATIA, 2018)
Sisal-kenaf	30 e 70	(DUNNE; DESAI; SADIKU, 201

Fonte: O autor, 2022.

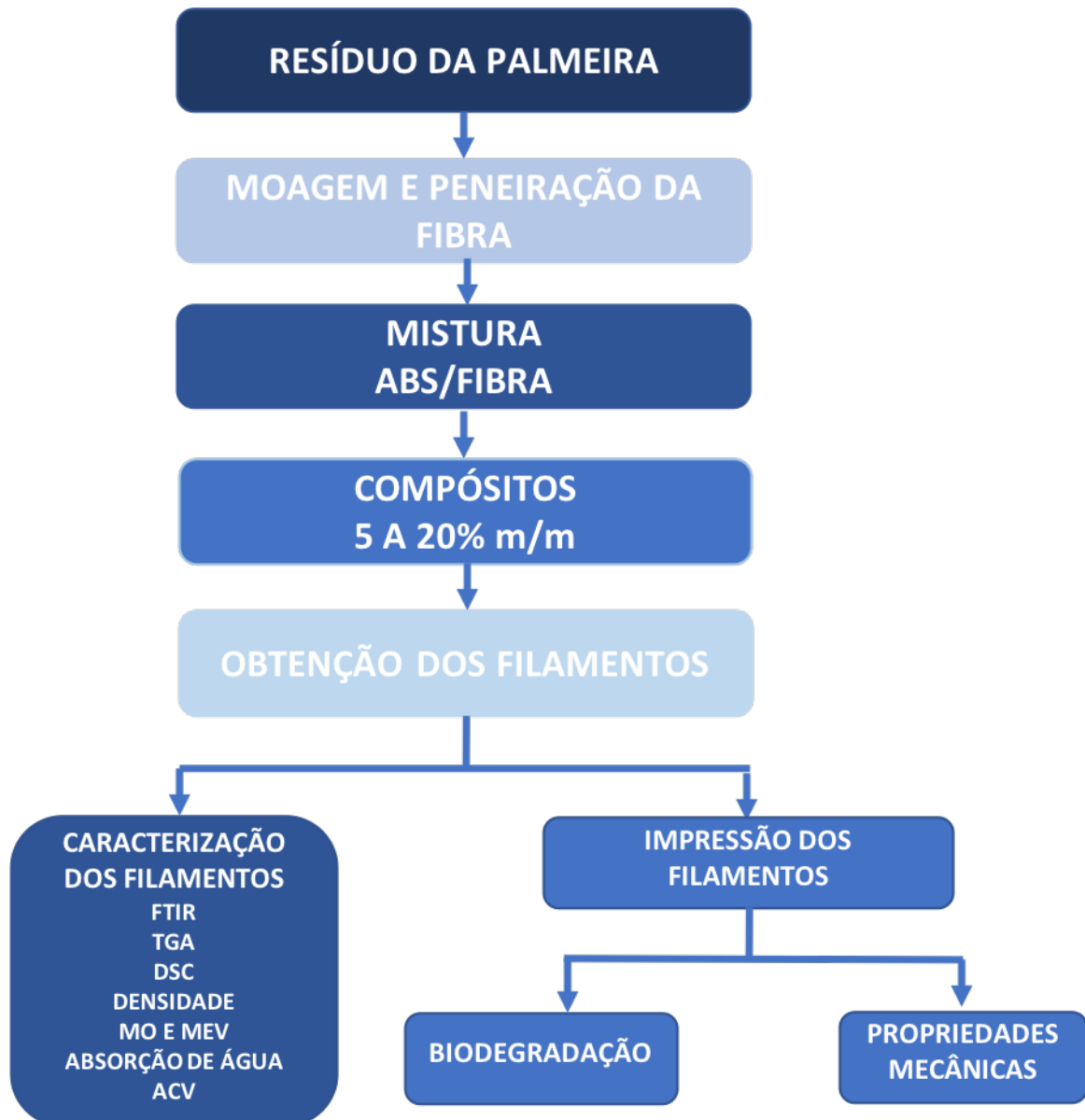
Além de ter o benefício de reduzir o custo do filamento ao adicionar a fibra natural, outros benefícios são evidenciados como a redução dos resíduos que seriam depositados no solo, trazendo um esgotamento fóssil das terras agrícolas. Esses resíduos quando não são descartados corretamente, são queimados no local, emitindo gases na atmosfera, que irão afetar a camada ozônio, e poderão resultar nas alterações climáticas e aquecimento global (RIGAMONTI et al., 2020).

Outra redução que pode ser considerada quando se adiciona uma fibra natural à matriz polimérica, é uma redução do consumo de água. A quantidade que seria necessária para a produção do filamento de ABS puro, é diminuído quando se adiciona a fibra na formulação da matriz. Assim há uma tendência decrescente relacionada aos impactos ambientais quando se adiciona a fibra natural aos filamentos, sendo uma boa alternativa para os materiais convencionais (PARVATKER; ECKELMAN, 2019).

2 METODOLOGIA

A metodologia adotada para a realização desse trabalho pode ser evidenciada no fluxograma da Figura 17.

Figura 17. Fluxograma da metodologia e suas etapas de processamento e análise dos materiais.



Fonte: O autor, 2022.

2.1 Obtenção dos Materiais

A obtenção dos resíduos provenientes da palmeira real australiana foi fornecida pela empresa Biosolvit SA. (Rio de Janeiro, Brasil) e o polímero Acrylonitrile-

butadiene-styrene (ABS) foi fornecido pela empresa Ineos Styrolution of Brazil (GP-35).

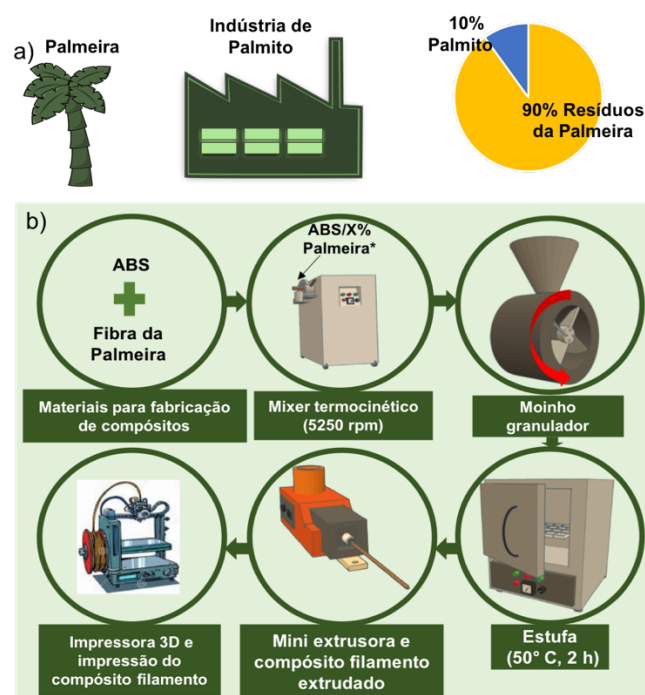
2.2 Obtenção das Fibras

Para a obtenção das fibras, primeiramente, os resíduos da palmeira real australiana foram secos em estufa (modelo SSA, NETLAB Equipamentos para Laboratórios EIRELI, São Paulo, Brasil) a 80 °C por 24h, e depois triturados em um moinho Willye, modelo TE-650 (Tecnal Equipamentos Científicos Ltda., Piracicaba, Brasil). Posteriormente, as fibras trituradas foram peneiradas em peneiras com malha de 60 mesh e utilizadas para reforçar a matriz polimérica de ABS para a obtenção dos filamentos compósitos.

2.3 Obtenção dos filamentos

A metodologia adotada para a produção de filamentos pode ser visualizada na Figura 18.

Figura 18. Representação esquemática ilustrativa da metodologia adotada: a) a partir da fonte de fibra de palmeira e b) seu uso na fabricação de filamentos compósitos (onde X representa o conteúdo de fibra de palmeira).



Fonte: O autor, 2022.

As fibras da palmeira foram misturadas ao ABS em um misturador termocinético (MH-50H, 48 A, MH Equipamentos Ltda., Guarulhos, SP, Brasil), com a velocidade mantida em 5250 rpm.

A quantidade de fibra inserida variou em proporções de 5, 10, 15, e 20% m/m para cada tipo de compósito, onde tiveram a nomenclatura ABS/X%, sendo que X representa a quantidade de fibra adicionada. Os compósitos obtidos foram moídos em um moinho granulador (Plastimax, 3,7 kW, Rio Grande do Sul, Brasil) e secos a 50 °C por 2h.

Para a obtenção dos filamentos de ABS puro e dos compósitos foram extrudados em uma mini extrusora (Weellzoom, modelo B Desktop, Guangdong Prov, China), simulando uma extrusora industrial. A temperatura utilizada no processamento dos filamentos foi na faixa de 180-185°C. A velocidade de extrusão utilizada foi de 380 mm/min. Segundo informação do fabricante, o diâmetro do bico da extrusora é de 1,75 mm, com uma precisão de +/- 0,05 mm. O diâmetro dos filamentos foi medido utilizando um paquímetro (marca Mitutoyo, modelo "Absolute", Suzano, São Paulo).

2.4 Caracterizações

2.4.1 Diâmetros dos filamentos, densidade e análise do Índice de fluidez (IF)

O diâmetro do filamento é um fator importante para o processo de impressão 3D, pois os filamentos utilizados comercialmente estão entre as medidas de 1,75 e 2,85 mm podendo ter uma variação de +/- 0,05mm, se passar desses valores poderá ocasionar problemas como falha na impressão devido ao entupimento do bocal (MAZZANTI; MALAGUTTI; MOLLIKA, 2019). Os diâmetros dos filamentos foram medidos em cada amostra de teste no intervalo de 50 mm, utilizando um paquímetro. No total, foram realizadas dez medições para cada amostra de filamento.

Os termoplásticos são definidos também por apresentar densidades diferentes para cada tipo de material, e a partir do polímero escolhido é possível definir as aplicações e os processos de produção do material. E ao incorporar a fibra de palmeira na matriz ABS a densidade irá sofrer alterações (NEHER et al., 2020). A densidade foi calculada como a relação de massa por unidade de volume.

A medição dos valores do índice de fluidez dos materiais poliméricos é bastante comum, pois através dessa análise pode-se verificar a viscosidade do material e determinar como será a forma de processamento, se o material terá facilidade de

vazão. Quanto maior o seu valor, menor será a viscosidade do material fundido (MADKOUR; TIRKES; TAYFUN, 2021). E o índice de fluidez dos filamentos foi determinado usando o plastômetro de extrusão INSTRON, modelo CEAST MF10 de acordo com a norma ASTM D-1238-13 (ASTM D1238, 2014) com uma carga de 5 kg a 200 °C, as análises foram realizadas no laboratório da Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo, EEL/USP, Lorena/SP. As amostras de corte dentro de um intervalo de 60 s foram pesadas e os valores do índice de fluidez foram calculados em g/60 s.

2.4.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Microscopia óptica (MO)

A microscopia eletrônica de varredura é um dos instrumentos disponíveis para analisar as características microestruturais de amostras sólidas, pois fornece imagens com alta resolução, ou diferenças na composição química entre regiões de uma mesma amostra. Sua relevância também é por apresentar imagem tridimensional da amostra, resultado da grande profundidade de foco, sendo muito útil, pois sua imagem complementa as informações obtidas através da microscopia óptica (DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007). Essa análise foi empregada para avaliar a microestrutura dos filamentos de ABS puro e os filamentos de compósitos nas proporções de 5, 10, 15 e 20% de fibra de palmeira utilizando um microscópio Vega3 Tescan, com ampliações de 125X no Laboratório de Estruturas da Divisão de Engenharia Mecânica e Aeronáutica do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, SP. A preparação das amostras foi feita através de um corte de maneira mais plana, que não afetasse a superfície do material. E a superfície dos materiais foi disposta em um porta-amostra com fita de carbono, aplicando os seguintes parâmetros: 15 kV, 4 mA, e 60 s.

O ensaio de microscopia óptica consiste em incidir uma luz de tungstênio sobre a superfície da amostra, e após refletida são geradas imagens com aumentos de até 1000X, e através dessas imagens é possível obter informações relevantes sobre a morfologia da amostra polimérica (NELSON; RIDDLE, 2022). A morfologia do filamento foi analisada através um microscópio óptico (Axio Imager.Z2m, Zeiss, Alemanha), localizado no Laboratório de Análises de Imagens de Materiais – Departamento de Materiais e Tecnologia (DMT) na FEG/UNESP, Guaratinguetá, SP. As imagens foram utilizadas para medir a porosidade da seção transversal, ou seja, a

seção do diâmetro do filamento. As imagens foram tratadas com o software *ImageJ* para destacar a porosidade e medir a fração, morfologia e posição correspondentes (MONTICELI et al., 2019). A medição da porosidade foi realizada em seis amostras para cada tipo de filamentos para garantir a análise estatística.

2.4.3 Espectroscopia de infravermelho de transformação de Fourier (ATR- FTIR)

A técnica de espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FT-IR) é um importante método utilizado para caracterização e identificação de grupos funcionais de sua composição química. É uma técnica não destrutiva e permite análises qualitativas e semi-quantitativas, sua radiação do infravermelho analisa as transições de níveis vibracionais dos elétrons para obter um perfil espectral do material, e seus traços espectrais específicos (BYRNE et al., 2020).

As estruturas químicas da fibra de palmeira, do ABS puro e dos filamentos compósitos foram analisadas utilizando o Espectrômetro Infravermelho de Transformação de Fourier (FTIR) (Perkin Elmer® Inc, modelo Spectrum 100, Massachusetts, EUA) com o acessório de reflectância total atenuada (ATR), no laboratório Departamento de Materiais e Tecnologias (DMT) na FEG/UNESP, Guaratinguetá, SP. Os dados foram registrados usando o modo de transmitância, com uma resolução espectral de 4 cm⁻¹, e alcance de 4500-400 cm⁻¹. Além disso, os coeficientes de ligação de hidrogênio (F_{H-CO}) foram calculados de acordo com a Equação 1.

$$F_{H-CO} = \frac{\frac{A_H}{r_H/a}}{\frac{A_H}{r_H/a} + A_a} \quad (1)$$

Onde: A_a e A_H são as áreas livres e de pico de ligação de hidrogênio, respectivamente, e r_{H/a} é a relação de absorção específica entre as duas bandas (ZHU et al., 2019).

2.4.4 Propriedades térmicas

2.4.4.1 Termogravimetria

A termogravimetria (TGA) é uma técnica utilizada para medir as alterações de massa em função da temperatura e do tempo, permitindo a investigação da sua estabilidade térmica (NEHER et al., 2016). A estabilidade térmica da fibra de palmeira, do ABS puro e dos filamentos compósitos foi investigada utilizando um analisador térmico STA 6000 (Perkin Elmer® Inc, Massachusetts, EUA), realizado na Universidade Federal do ABC, Santo André, SP. A faixa de temperatura de 30 – 600 °C, em fluxo N₂ (20 ml min⁻¹), e uma taxa de aquecimento de 10 °C min⁻¹.

Também foi possível investigar o índice de resistência ao calor, o qual foi calculado usando a Equação (2):

$$T_{HRI} = 0,49 * [T_{(5\%)} + 0,6 * (T_{(30\%)} - T_{(5\%)})] \quad (2)$$

Onde: T_{HRI} é a resistência térmica, T_(5%) é a temperatura de perda de peso em 5% e T_(30%) é a temperatura de perda de peso em 30%.

2.4.4.2 Calorimetria exploratória diferencial (DSC)

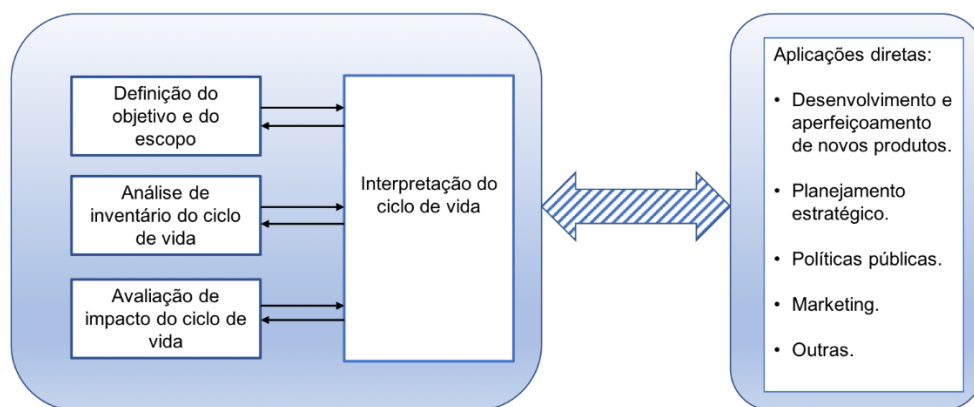
A calorimetria exploratória diferencial (DSC) é uma ferramenta muito utilizada para determinar a temperatura e fluxo de calor na transição dos polímeros, como a fusão, cristalização e a transição vítrea. Para essa análise foi utilizado o equipamento Q20 (TA Instruments, EUA), as amostras foram enviadas para análise na Universidade Federal do ABC, Santo André, SP. A fibra de palmeira, o ABS puro e os filamentos compósitos foram aquecidos a uma taxa de 10 °C min⁻¹ sob a atmosfera de nitrogênio, de 25 °C a 210 °C com o objetivo de obter as temperaturas de transição dos materiais, como as de fusão (endotérmica), cristalização (exotérmica) e transição vítrea (mudança de linha base).

2.4.5 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

A avaliação do ciclo de vida é uma ferramenta muito utilizada para avaliar os impactos ambientais associados aos materiais, processos ou serviços, para identificar

e quantificar a energia e materiais usados, assim como os resíduos emitidos ao meio ambiente, com a finalidade de indicar oportunidades de mitigar os impactos ambientais durante o processo de desenvolvimento do produto (LA ROSA; CICALA, 2015). Tanto empresas como órgãos governamentais buscam esse tipo de análise como forma de estimular a competitividade em oferecer produtos mais sustentáveis e com baixo impacto na emissão de gases de efeito estufa (DA LUZ; DE SOUSA, 2018). As ferramentas ACV compilam e avaliam as entradas, saídas e os potenciais impactos de um sistema de produtos ao longo do seu ciclo de vida. Assim, a ACV pode incorporar dados sobre um material desde seu estado inicial até sua disposição final, de acordo com as normas da Organização Internacional de Normalização (ISO). E segundo a Norma 14040, a ACV é composta por uma estrutura metodológica de fases para a realização da análise: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos ambientais e interpretação (ABNT, 2014). A Figura 19 representa as fases que geralmente são utilizadas para realização de uma ACV.

Figura 19. Composição das fases para realização de uma avaliação do ciclo de vida de um material, processo ou serviço.



Fonte: ABNT, 2014.

A fase de definição do objetivo e do escopo consiste na definição detalhada de todos os aspectos e permite o controle de qualidade do trabalho, sendo decisivo para as demais etapas. O objetivo desta etapa deve especificar a aplicação pretendida e o público alvo a quem será comunicado os resultados. Nesta fase é definido a unidade funcional, principalmente em estudos comparativos de diferentes produtos, para que seja possível quantificar o sistema e permitir a determinação de fluxos de referência

(LA ROSA et al., 2013). Neste trabalho foi utilizado o software OpenLCA 1.9, que é um software de código aberto para ACV e avaliação de sustentabilidade. Os bancos de dados usados nesta avaliação foram o Ecoinvent 3.4 e Agribalyse 3.0, de acordo com a ABNT NBR ISO 14044/44:2009 (ABNT, 2014). As amostras de ABS puro e dos filamentos compósitos foram enviadas para análise na Universidade Federal do ABC, Santo André, SP.

A segunda fase de análise de Inventário do ciclo de vida é indispensável para avaliação quantitativa dos impactos ambientais, pois trata de um inventário dos dados de entrada e saída associados ao sistema em estudo, ou seja, é a coleta dos dados e procedimentos para quantificar o fluxo de entrada e saída. Os inventários possibilitam a identificação de limitações ou necessidade de maiores informações para que seja possível avaliar o processo, e com essas informações pode gerar alterações nos procedimentos de coleta de dados, revisão dos objetivos ou no escopo que está sendo utilizado. E tendo mais consistência nos dados, maior confiabilidade obterá nos resultados da ACV (EAD et al., 2021). Nesta fase, o método ReCiPe 2019 foi aplicado para a interpretação dos dados para este trabalho. Este método integra e harmoniza as abordagens de entrada e saída em uma estrutura consistente. As categorias de impacto que geralmente são abordadas nesta fase são: mudança climática, depleção de ozônio, acidificação terrestre, eutrofização aquática (água doce e marinha), toxicidade humana, formação de oxidantes fotoquímicos, formação de matéria particulada, ecotoxicidade terrestre, aquática (água doce e marinha), radiação ionizante, uso da terra agrícola e urbana, transformação de terra natural, esgotamento de recursos fósseis, de recursos minerais e de recursos de água doce (DEKKER et al., 2020). E o consumo de energia e as informações externas foram obtidos diretamente do desenvolvimento realizado. Para contabilizar o impacto dos resíduos da fibra de palmeira foi considerado que os resíduos foram queimados, quando não eram incorporados aos filamentos, que é o gerenciamento de resíduos mais comum para resíduos de madeira.

A terceira fase corresponde a Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) tem o objetivo de prover informações significativas de aspectos ambientais para ajudar na avaliação dos resultados do inventário e agregar as intervenções em vários ou um único indicador. Os impactos gerados ao meio ambiente podem ser em nível global, regional ou local. Os impactos ambientais são considerados uma abordagem de "*cradle-to-gate*" ("do berço ao portão"), que considera somente os impactos da

extração de matéria-prima, produção do material até o produto final (DA LUZ; DE SOUSA, 2018).

Em uma ACV a fase de interpretação consiste na avaliação do estudo, de acordo com os objetivos estabelecidos a fim de considerar todas as informações em conjunto com verificações de completa, sensibilidade e consistência dos dados obtidos (ABNT, 2014). O resultado obtido a partir desta fase será uma conclusão que servirá de recomendação para decisões futuras, considerando os impactos ao meio ambiente (EAD et al., 2021).

2.4.6 Absorção de água

O ensaio de absorção de água é realizado para medir a massa do corpo de prova antes e depois da imersão em água, com o objetivo de avaliar a capacidade do material de absorver a água. Os testes de absorção de água foram realizados de acordo com a norma ASTM D570-98 (ASTM D570, 2014). As amostras foram submersas em água destilada à temperatura ambiente. Após períodos fixos, as amostras foram retiradas da água, secas, pesadas e devolvidas à água. A diferença de peso determinou a quantidade de água absorvida. Cinco amostras para cada material foram testadas.

A absorção de água (AA) foi calculada usando a Equação (3):

$$AA (\%) = \frac{A_t - A_i}{A_i} \times 100 \quad (3)$$

Onde: A_t representa o peso da amostra em um tempo de imersão específico (t) e A_i representa o peso inicial da amostra antes de ser mergulhada na água (PRAVEENA et al., 2021).

2.4.7 Impressão dos Filamentos

Os filamentos de ABS puro e os filamentos compósitos de ABS com fibra da palmeira foram impressos em uma impressora 3D (Creality, modelo Ender 5 Pro) para obtenção de corpos de prova para realização dos ensaios mecânicos.

Os parâmetros da impressora para impressão dos corpos de prova foi de:

- altura da camada: 0,5 mm
- espessura da parede: 0,8 mm
- preenchimento: 100%
- temperatura do bico: 260°
- temperatura da mesa (cama): 110°
- velocidade de impressão: 65 mm/s
- velocidade da 1° camada: 10 mm/s
- refrigeração: desligada

O tempo de impressão para cada corpo de prova foi de 15 min, e a impressão em duplicata foi de 30 min. Foram impressas 10 amostras de corpos de prova para cada tipo de material.

Para o compósito de ABS/5% de fibra de palmeira não foi possível a impressão, pois o filamento apresentou variações no diâmetro que impediu que passasse pelo bico extrusor da impressora 3D.

2.4.8 Propriedades mecânicas

Os ensaios mecânicos são realizados para definir o comportamento do material quando são submetidos a esforços mecânicos, pois estão relacionados a capacidade do material de resistir ou transmitir estes esforços aplicados sem deformação. Os corpos de prova impressos foram investigados mecanicamente em uma máquina de testes EMIC (modelo DL2000, Instron Brasil Equipamentos Científicos Ltda, Paraná, Brasil), equipada com garras pneumáticas e com uma célula de carga de 5 kN (a força aplicada) e com uma velocidade de 5.000 mm/min. Os ensaios foram realizados na Faculdade de Tecnologia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (FAT/UERJ), Resende/RJ. Os testes de tração foram realizados em quadruplicado para cada amostra, de acordo com a norma ASTM D 638 (ASTM D638, 2014). Foram determinadas a resistência à tração, alongamento e o módulo de elasticidade.

2.4.9 Teste de Biodegradação

A biodegradação é um processo pelo qual compostos orgânicos presentes no solo e em contato com o meio ambiente são convertidos em compostos mais simples,

mineralizados e redistribuídos através de ciclos elementares como o do carbono, nitrogênio e enxofre, durante a fase de enterramento (JI et al., 2021). As fibras naturais podem sofrer biodegradação devido aos agentes biológicos, meios ácidos e alcalinos, absorção de umidade, radiação ultravioleta e temperatura (JUMAIDIN et al., 2020). E ao adicionar a fibra de palmeira na matriz de ABS poderá ocorrer a aceleração no processo de degradação do polímero.

O experimento de degradação do solo foi conduzido em um recipiente plástico em forma de uma caixa, com as seguintes medidas: 400 mm × 150 mm × 100 mm (comprimento × largura × altura) contendo 3,1 kg de solo seco obtido através da empresa Companhia de Entrepósitos e Armazéns Gerais de São Paulo (CEAGESP).

As amostras foram enterradas a 5 cm de profundidade no solo. A temperatura foi acompanhada durante os testes. A umidade, o pH e a relação C/N do solo foram analisadas pela empresa AMPRO, localizada em Lorena-SP. A temperatura ambiental média para os testes é $26 \pm 4^{\circ}\text{C}$, o pH do solo é 7,0, e o teor de umidade é 5,9%. A fração do solo com partículas de tamanho menor ou igual a 2 mm foi selecionado para o estudo.

Antes dos testes, as amostras foram pesadas para obter a massa inicial. As amostras foram retiradas do solo em intervalos especificados 7-15-30-60-90-120-150-180 dias, e limpas para remover o excesso de impurezas e pesadas para obter a massa final. A perda de massa das amostras foi determinada usando a seguinte equação (4):

$$PP (\%) = \frac{Pi - Pf}{Pi} \times 100 \quad (4)$$

Onde Pi representa a massa inicial da amostra antes de iniciar o teste, e Pf representa a massa final após o tempo em que ficou enterrada no solo. De fato, o teste em solo é composto por vários tipos de microorganismos (aeróbicos, anaeróbicos, bactérias fotossintéticas, bactérias arqueológicas e eucariotas inferiores) que são conhecidas por serem responsáveis pelo catabolismo dos bioplásticos, ou seja, a degradação do material em análise (ZOUNGRANAN et al., 2020). A Figura 20 apresenta como os corpos de prova foram preparados para a realização do teste de Biodegradação no período de 6 meses.

Figura 20. Metodologia do Teste de Biodegradação dos corpos de prova impressos em ABS puro, ABS10%Palmeira, ABS15%Palmeira e ABS20%Palmeira.



Fonte: O autor, 2022.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Densidade e diâmetro do filamento e análise do índice de fluidez (IF)

A densidade e os diâmetros dos filamentos são parâmetros essenciais para a impressão 3D e os resultados estão apresentados na Tabela 5. O diâmetro dos compósitos mostrou valores semelhantes aos dos filamentos comerciais para a técnica de impressão FDM 3D (1,75 mm), mas houve um ligeiro desvio em relação ao diâmetro do ABS puro (1,70 mm) (Ponsar et al., 2020). Os baixos desvios padrão confirmam a elevada homogeneidade dos filamentos. Osman e Átia (2018) observaram diâmetros semelhantes ao investigar o compósito de ABS reforçado com palha de arroz para impressão FDM (Osman e Átia, 2018).

A Tabela 5 também mostrou que o teor de fibra da palmeira na matriz polimérica aumentou a densidade dos compósitos (5 a 20% m/m) em comparação ao ABS puro ($1,05 \pm 0,02$ a $1,36 \pm 0,05$). Resultado similar também foi apresentado no trabalho de Neher e colaboradores (2020), que ao inserir pó de madeira na matriz ABS, notou um aumento da densidade dos compósitos, principalmente no compósito com 20% m/m de pó de madeira ($0,998$ a $1,038 \text{ g.cm}^{-3}$) (NEHER et al., 2020). Segundo Fonseca e colaboradores (2021), o aumento na densidade do material traz uma economia desejável, pois diminui a utilização do ABS, que é mais caro comparado à fibra utilizada no compósito (FONSECA; WALDMAN; DE PAOLI, 2021).

Tabela 5. Composição, diâmetro, densidade, temperatura de processamento dos filamentos e índice de fluidez (IF).

FILAMENTOS	ABS (%)	Fibra (%)	Diâmetro (mm)	Densidade (g.cm^{-3})	Temperatura processamento ($^{\circ}\text{C}$)	Índice de Fluidez (IF)
ABS puro	100	---	$1,70 \pm 0,10$	$1,05 \pm 0,02$	185	$2,30 \pm 0,15$
ABS/5%Palmeira	95	5	$1,76 \pm 0,30$	$1,13 \pm 0,04$	185	$2,75 \pm 0,14$
ABS/10%Palmeira	90	10	$1,75 \pm 0,20$	$1,15 \pm 0,01$	185	$2,20 \pm 0,10$
ABS/15%Palmeira	85	15	$1,75 \pm 0,40$	$1,29 \pm 0,06$	185	$2,15 \pm 0,13$
ABS/20%Palmeira	80	20	$1,75 \pm 0,60$	$1,36 \pm 0,05$	185	$2,09 \pm 0,15$

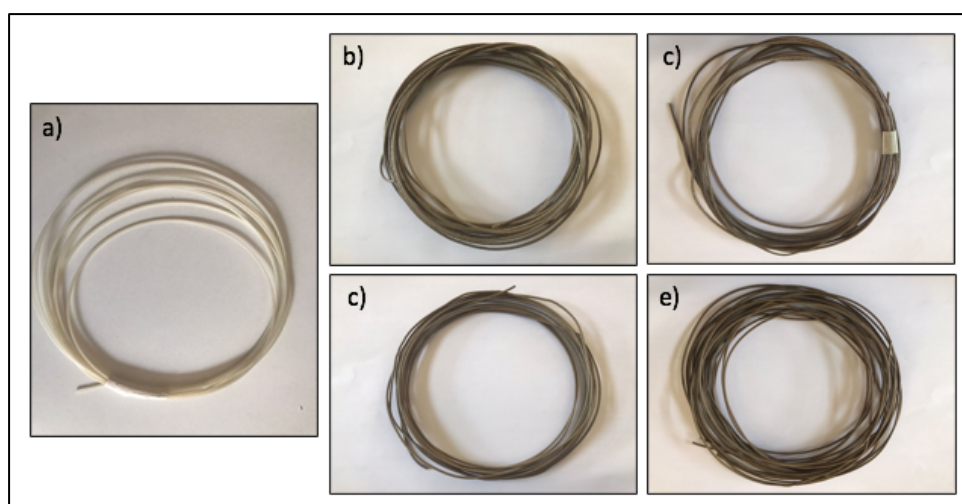
Fonte: O autor, 2022.

Outro parâmetro crítico é o Índice de Fluidez (IF), o qual está diretamente relacionado com a massa molecular média da massa de polímero extrusado (Marwah

et al., 2016). A Tabela 5 elucida as tendências decrescentes do IF, com exceção do filamento ABS/5%Palmeira, que apresentou um resultado superior aos demais filamentos compósitos. Notou-se que ao aumentar a quantidade de reforço houve um decréscimo no índice de fluidez, comparado com o ABS puro. Este fato pode ser explicado devido à incorporação de reforço, ocasionando o atraso no fluxo do polímero, consequentemente aumentando o índice de fluidez dos compósitos. Madkur e colaboradores (2021) observaram um comportamento semelhante ao estudar compósitos de ABS reforçados com barita (Madkour et al., 2021). Resultados semelhantes também foram observados nos compósitos de ABS reforçados com fibras de carbono, que tiveram os valores de IF ligeiramente mais baixo que o ABS puro, indicando que o material poderia ser processado sem problemas ou implicações (AHMED; TIRKES; TAYFUN, 2020).

Todas as porcentagens dos compósitos ganharam uma textura e cor semelhantes às da madeira, à medida que a cor se torna progressivamente mais escura é a medida em que o conteúdo de fibra da palmeira no compósito aumenta, como é apresentado na Figura 21. Resultados semelhantes também foram observados por Angeloupoulos e colaboradores (2021), nos filamentos de ABS reforçados com perlite em diferentes proporções, mostrando que ao adicionar o reforço a tonalidade dos filamentos foi escurecendo (ANGELOPOULOS et al., 2021).

Figura 21. Coloração dos Filamentos - a) ABS puro, b) ABS/5% Fibra Palmeira, c) ABS/10% Fibra Palmeira, d) ABS/15% Fibra Palmeira e e) ABS/20% Fibra Palmeira.



Fonte: O autor, 2022.

3.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Microscopia óptica (MO)

Um dos fatores importantes no desenvolvimento de um compósito é o estudo da sua microestrutura a fim de determinar o seu tipo de fratura, a morfologia da superfície das fibras, e assim por diante. Além disso, o estudo da morfologia de um compósito identifica o grau de compatibilidade destas fibras com a matriz selecionada, e assim especifica a condição de adesão da fibra à matriz e apresenta suas falhas internas (ALHIJAZI et al., 2020).

A microscopia da fibra da palmeira revelou uma superfície porosa, com formas cilíndricas, como mostrado na Figura 22 (MARTINS; MONTICELLI; MULINARI, 2020), e com filamentos fragmentados resultantes do processo de moagem (MARTINS et al., 2021). Em relação aos parâmetros físicos da fibra bruta, os valores médios de comprimento (L) e diâmetro (D) foram $508856,0 \pm 711586,4 \mu\text{m}$ e $102,5 \pm 56,0 \mu\text{m}$, respectivamente. Assim, a divisão de L por D permite obter a relação de aspecto igual a 4962,03. Ponsuriyaprakash e colaboradores (2020) também evidenciaram resultados semelhantes nos compósitos de ABS com fibras de celulose, a superfície tornou-se mais áspera à medida que aumentava a porcentagem de celulose, podendo ser atribuído à quebra das ligações entre a celulose e o ABS (PONSURIYAPRAKASH; UDHAYAKUMAR; PANDIYARAJAN, 2020). De acordo com Balla e colaboradores (2019), a quantidade de fibras e suas características como comprimento, relação L/D e composição têm forte influência no processamento dos compósitos reforçados com fibra natural (BALLA et al., 2019).

Figura 22. Comprimento (L) e o diâmetro (D) da fibra de palmeira.



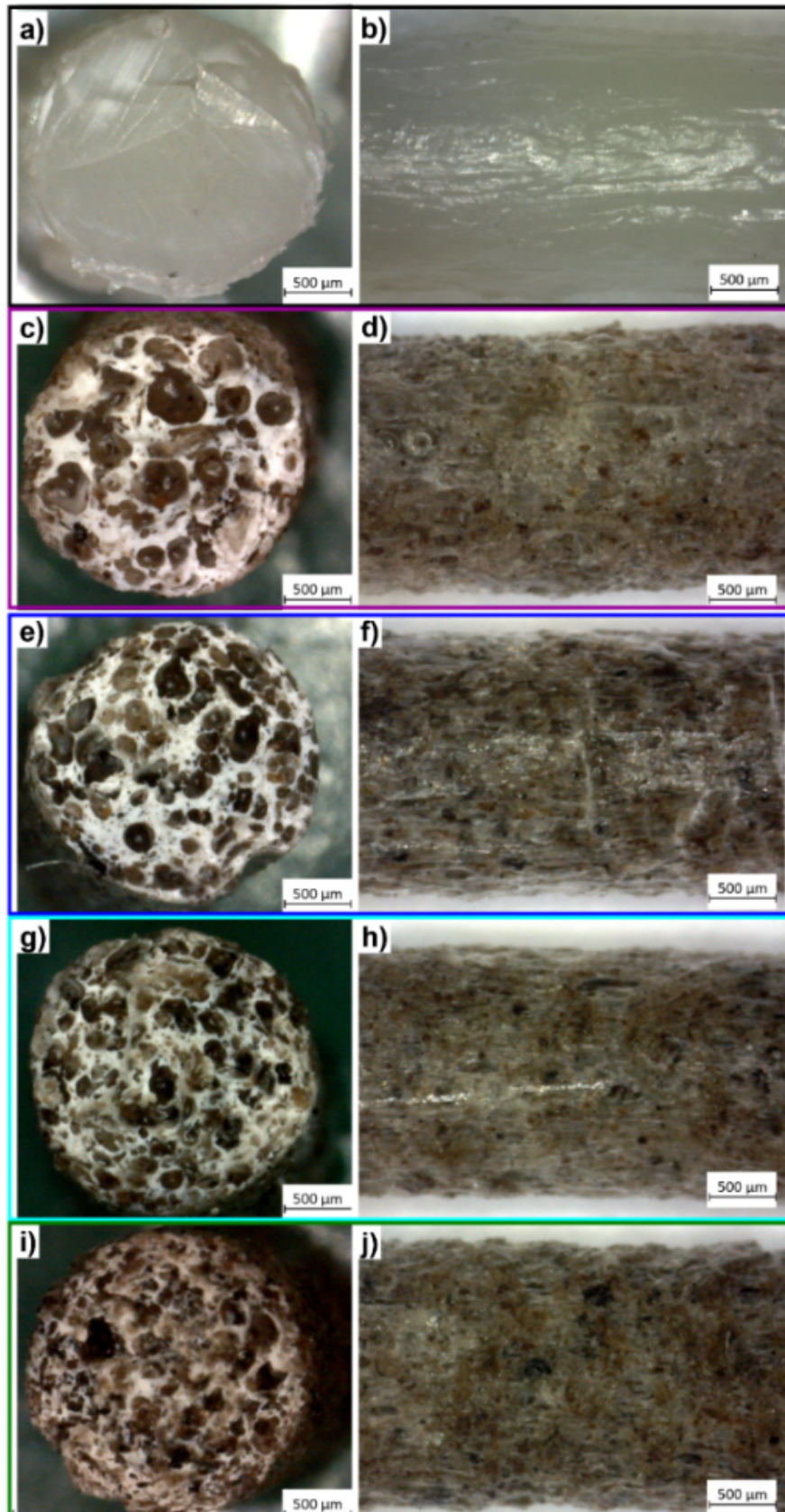
Fonte: O autor, 2022.

Cada tipo de fibra natural tem características diferentes, como variação no comprimento, espessura da parede celular, e até o diâmetro das fibras da mesma amostra, isso ocorre devido à alguns fatores como o local de crescimento, o método de extração e a idade da planta (KARIMAH et al., 2021).

A Figura 23 apresenta as imagens de microscopia óptica dos filamentos a partir da seção transversal e da estrutura dos filamentos. A Figura 23a mostra o filamento ABS puro sem evidências de porosidade ou defeitos, o que ilustra que o processo de fabricação é adequado para a obtenção de filamentos de alta qualidade. Alguns poros foram observados ao longo da seção transversal quando foi incluída a fibra da palmeira na composição dos filamentos. A porosidade observada está relacionada à umidade e compostos voláteis liberados da fibra da palmeira durante o processo de aquecimento na fabricação dos filamentos (FILGUEIRA et al., 2018).

As imagens obtidas foram tratadas para avaliar o tamanho e distribuição dos poros para uma melhor compreensão. E a microscopia dos compósitos apresentou poros maiores localizados no interior do material como o ABS/5%Palmeira (Figura 23c), enquanto as composições ABS/10%Palmeira (Figura 23e), ABS/15%Palmeira (Figura 23g), e ABS/20%Palmeira (Figura 23i) mostraram uma variação na formação de porosidade ao longo do diâmetro dos filamentos.

Figura 23. Ilustração do filamento da seção transversal (esquerda) e a aparência geral do filamento (direita): (a, b) ABS, (c, d) ABS/5%, (e, f) ABS/10%, (g, h) ABS/15% e (i, j) ABS/20%.

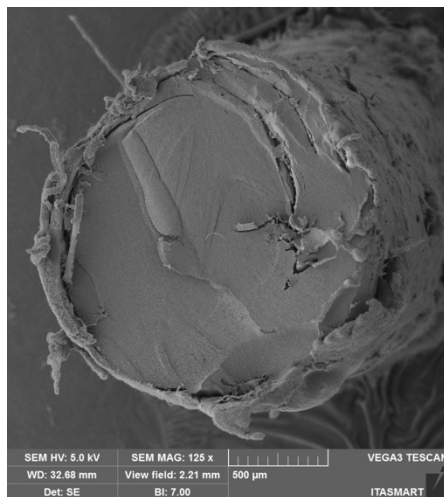


Fonte: O autor, 2022.

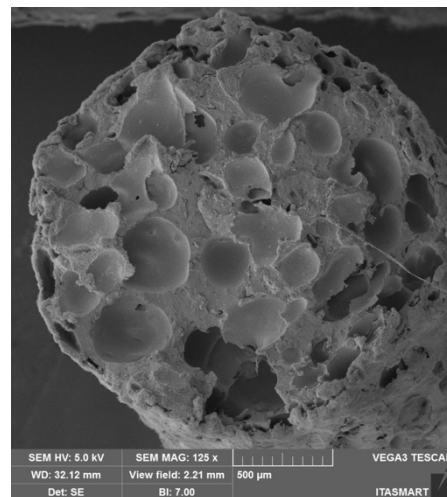
Osman e colaboradores (2018), também identificaram que a porosidade nos compósitos aumentaram à medida que foi adicionado palha de arroz na matriz de ABS, como evidenciado que o reforço foi bem distribuído por toda matriz (OSMAN; ATIA, 2018). Além disso, Ma e colaboradores (2021), concluíram que a viscosidade desempenha um papel crítico no processo, pois aumentando a viscosidade da massa (em altas temperaturas) pois impossibilita os poros de serem descarregados, fazendo com que o conteúdo de vazios aumentasse (MA et al., 2021).

A Figura 24 mostra a área da secção transversal de cada filamento, na qual é possível confirmar uma maior homogeneidade na superfície, como mostrado na Figura 24d (ABS/15%Palmeira). A porosidade torna-se uniformemente distribuída, com uma redução no tamanho e fração ao longo do diâmetro como resposta da quantidade adequada de fibra para conduzir uma viscosidade apropriada para conduzir a descarga de poros. De fato, 15% do teor da fibra resulta numa maior eficiência nas ligações entre fibras/matriz interfaciais.

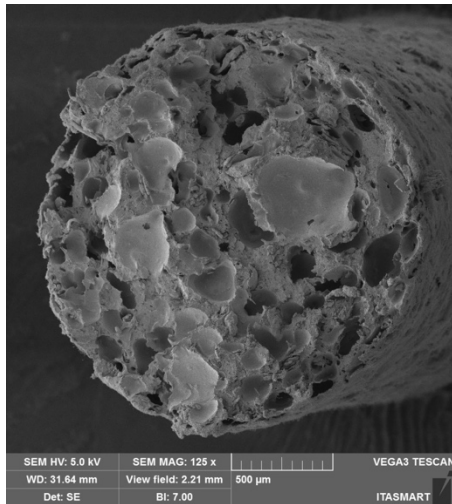
Figura 24. Imagens MEV de seção transversal do ABS puro e dos filamentos compósitos.



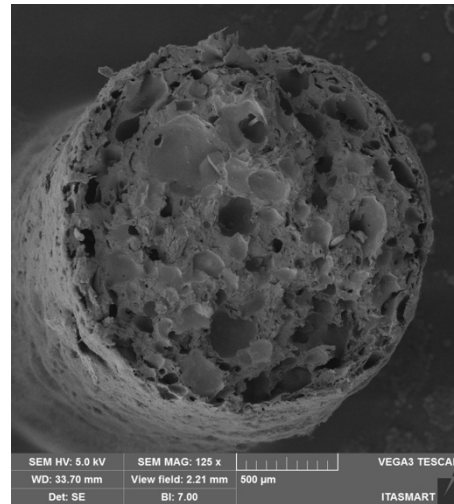
a) ABS puro



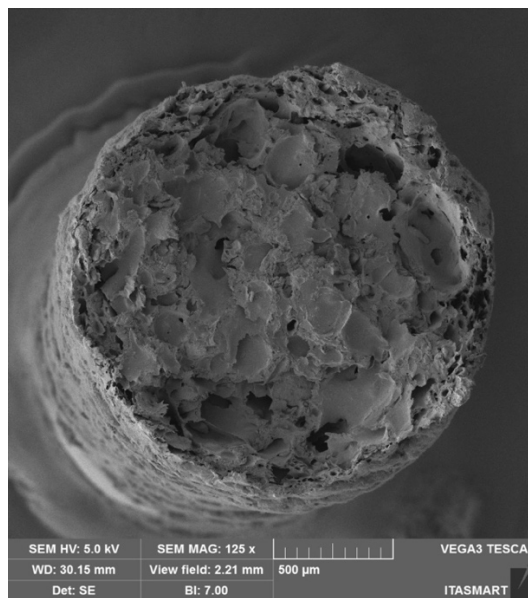
b) ABS/5%Palmeira



c) ABS/10%Palmeira



d) ABS/15%Palmeira



e) ABS/20%Palmeira

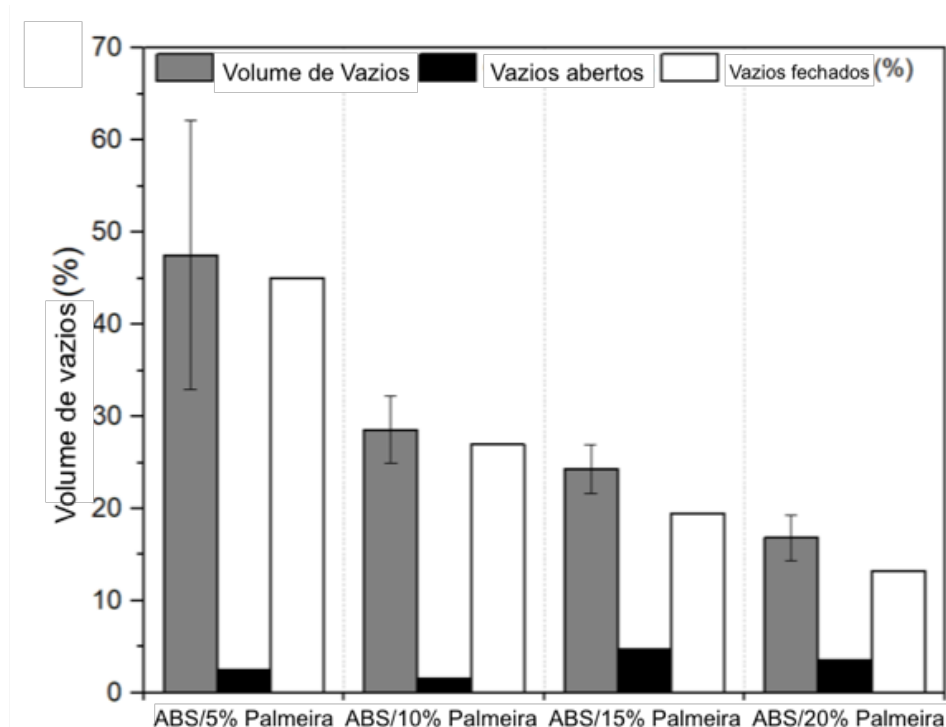
Fonte: O autor, 2022.

A Figura 25 evidencia a fração de volume vazios (poros) para cada compósito. A presença de vazios em ABS foi negligenciada, uma vez que não apresenta porosidade visual. O filamentado ABS/5%Palmeira apresentou maior conteúdo de vazio e variação padrão associados à concentração e coalescência do vazio na região do filamentado central. O tamanho dos poros é consideravelmente reduzido com o aumento da quantidade de fibra adicionada. Embora a maior concentração de fibra da palmeira

resulte em mais umidade, o reforço limita o tamanho do poro. Por outro lado, a menor quantidade de reforço gera maiores espaçamentos para a coalescência de pequenos poros em poros maiores, enquanto maiores quantidades adicionadas de reforço atuam como uma barreira que limita o tamanho dos poros. Assim, foi possível produzir poros com tamanho reduzido e menor desvio padrão com maior quantidade de fibras adicionada no compósito.

Foram medidos os vazios abertos e fechados, a porosidade aberta está ligada aos vazios à superfície do filamento. Normalmente, a maioria dos poros apresenta uma estrutura aberta, uma vez que o gás interno e a umidade são liberados através da superfície durante a formação dos poros. Contudo, poros fechados podem estar presentes quando as cadeias ou fibras poliméricas incorporadas restringem a liberação dos compostos voláteis. Foi observado que os poros abertos aumentaram com o maior teor de fibras, que pode estar associado ao número de compostos voláteis liberados durante o processo (MONTICELI et al., 2019).

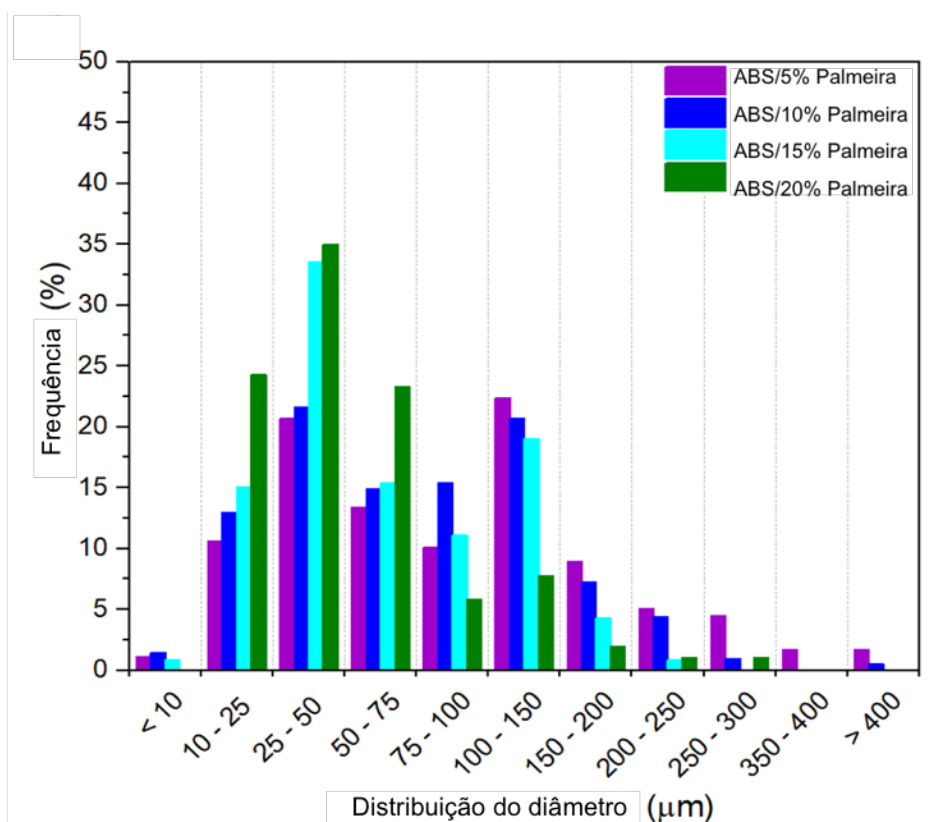
Figura 25. Conteúdo e posição do vazio nos filamentos compósitos.



Fonte: O autor, 2022.

A Figura 26 exibe a distribuição do diâmetro vazio para cada filamento reforçado. O filamento de ABS/5%Palmeira apresenta uma grande quantidade de poros maiores (ou seja $> 250 \mu\text{m}$). A mais alta frequência de diâmetro vazio para ABS/5%Palmeira foi de 22% a 100 - 150 μm de tamanho de poros vazios. Aumentar o conteúdo de fibras (ABS/10%Palmeira) diminuiu os vazios maiores ($> 250 \mu\text{m}$) e aumentou as porosidades médias (50 - 200 μm) e pequenas ($< 50 \mu\text{m}$), mostrando 22 % de frequência de vazios para 25-50 e 100-150 μm intervalos de diâmetro. Observou-se um comportamento semelhante para ABS/15%Palmeira e ABS/20%Palmeira, uma vez que diminuíram significativamente os poros maiores, apresentando maior frequência para os poros menores. A maior frequência de vazios para ABS/15%Palmeira e ABS/20%Palmeira foi de 33 e 34 %, respectivamente, para a gama de diâmetros 25 - 50 μm . Assim, foi possível observar uma diminuição linear de diâmetro maiores do vazio e um aumento dos vazios médios/pequenos com a inclusão da fibra na matriz polimérica.

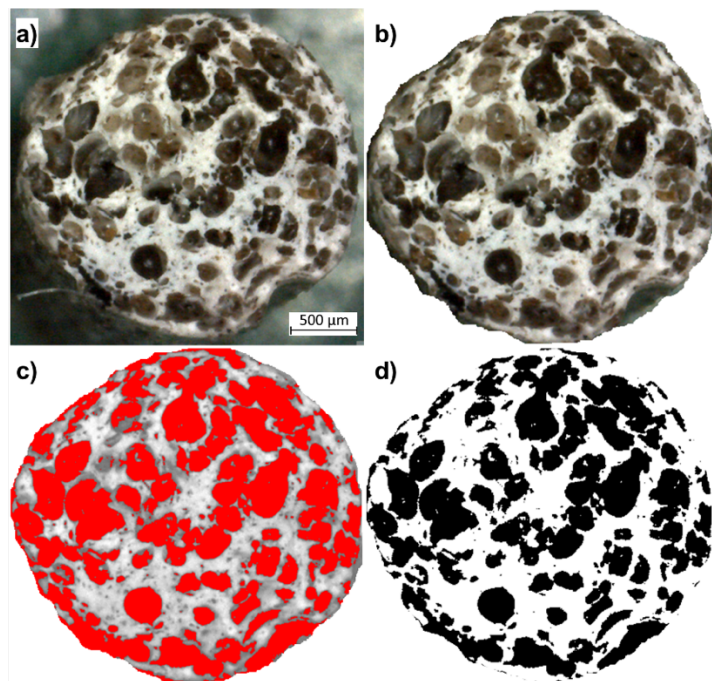
Figura 26. Distribuição do diâmetro do vazio nos compósitos de filamentos.



Fonte: O autor, 2022.

A Figura 27a exibe o filamento e a região da seção de diâmetro do filamento ABS/10%Palmeira. A imagem foi tratada usando *ImageJ* para realçar a porosidade usando limiar (Figura 27c), onde o reforço e matriz poderiam ser removidos da imagem (Figura 27d) para medição da porosidade (conteúdo vazio, morfologia e posição). A porosidade média foi calculada com base nas imagens processadas e utilizada como equivalente à fração vazia e à distribuição do tamanho dos poros.

Figura 27. Medição da porosidade: (a) filamento, (b) secção do diâmetro, (c) porosidade realçada e (d) medição da porosidade através de ImageJ.



Fonte: O Autor, 2022.

Foi realizada uma análise de variância (ANOVA) para os resultados de porosidade através da aplicação da variância intergrupos para análise comparativa das diferentes famílias de filamentos (influência da fração de fibra), e da variância intragrupos para a análise de desvio padrão considerando as diferentes medições no mesmo filamento (Tabela 6).

Tabela 6. Resultados ANOVA.

Formação Vazio	F	p-valor	F_{crítico}	PC (%)
Intergrupo	14.029	0.004	4.757	80.71
Intragrupo	3.395	0.103	5.143	14.02
Erro	-	-	-	5.27

Fonte: O Autor, 2022.

A hipótese nula indica que não há diferença entre a formação nula e a fração de volume de fibra. O valor mais elevado de F (i.e., 14,03) e $F > F_{\text{crítico}}$ ($14,03 > 4,75$) indicaram que o intergrupo apresenta uma influência mais substancial do que o desvio padrão (Intragrupo). A viabilidade da análise é confirmada por um valor p ($0,004 < 0,05$), em que a hipótese nula é rejeitada para a análise intergrupos. Observou-se um comportamento oposto para Intragrupo, onde $F < F_{\text{crítico}}$ ($3,39 < 5,14$) e p-valor ($0,10 < 0,05$) aceitou a hipótese nula, indicando que a heterogeneidade da formação nula através do filamento apresenta menos influência do que a variação da fração de volume da fibra.

A porcentagem de contribuição (PC) também foi medida utilizando a análise de variância, onde o intergrupo apresentou 80,71% de contribuição na formação de vazios; entretanto, o Intragrupo apresentou 14,02%, e o erro de análise apresentou 5,27%. Estes resultados indicaram que a variação da fração de volume da fibra (intergrupo) representa a maior contribuição (ou seja, 80%) na formação do vazio, e a variação intrínseca devido à heterogeneidade do processo do filamento, o qual representa 14%.

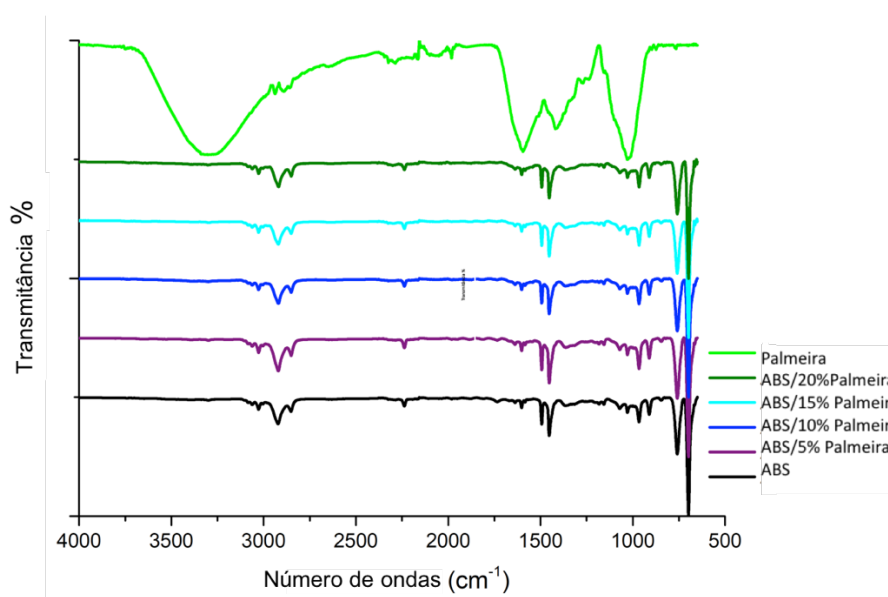
3.3 Espectroscopia de infravermelho de Fourier-transformação (FTIR)

A Figura 28 evidencia os espectros obtidos pela análise de FTIR da fibra da palmeira, ABS puro e dos filamentos compósitos. Os espectros dos filamentos compósitos apresentaram perfis de bandas semelhantes ao ABS puro, o que era esperado devido à matriz predominante em porcentagem de massa. Costa e colaboradores (2021), observaram resultados semelhantes em filamentos de ABS reforçados com resíduos da pinha (COSTA et al., 2021). Neher e colaboradores (2014), também evidenciaram resultados semelhantes ao inseriram fibras da palmeira

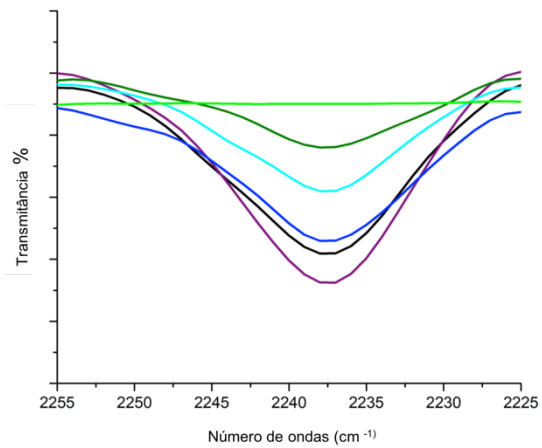
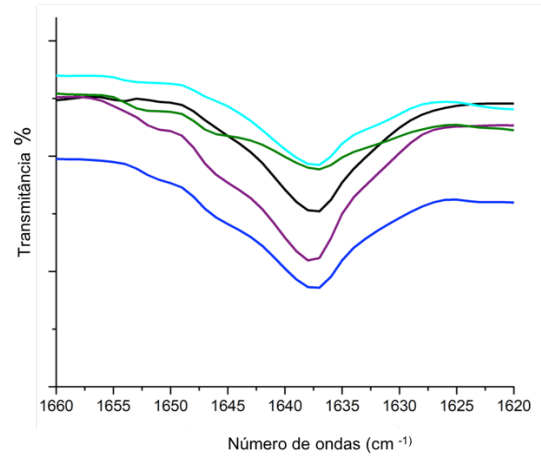
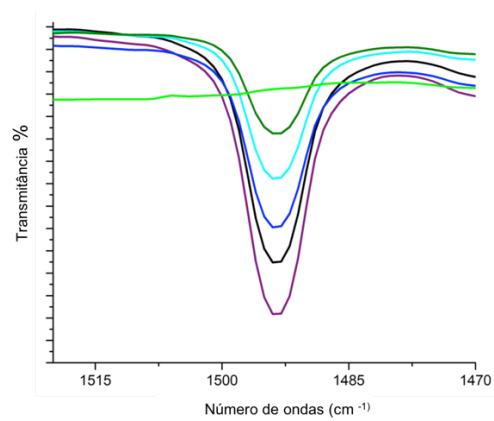
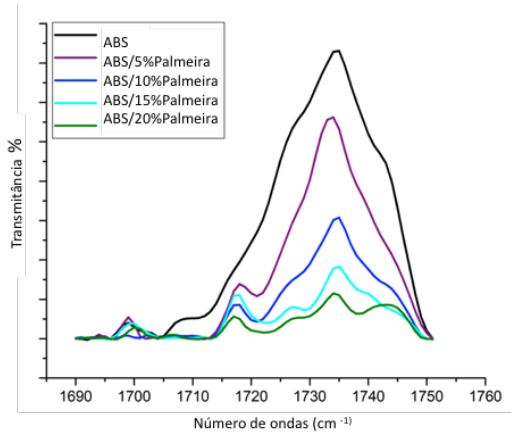
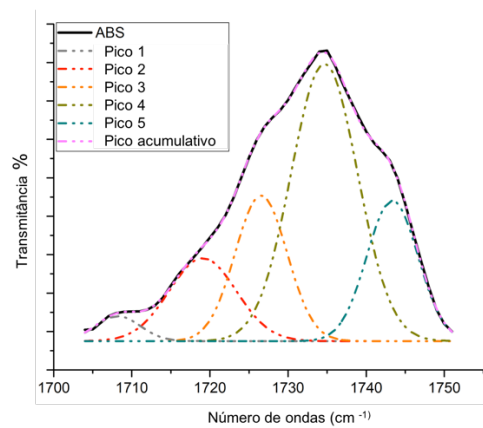
em ABS usando o processo de moldagem por injeção (NEHER et al., 2014). Foi possível notar que as bandas de ABS mostraram alguma interferência devido à presença das fibras da palmeira, como demonstrado na Figura 28b, c, e d. A Figura 28b apresentou uma região associada ao alongamento da unidade de acrilonitrila $C\equiv N$, que mostrou primeiro um aumento de intensidade para ABS/5%Palmeira, e depois uma diminuição de intensidade para os compósitos de 10 a 20% de fibras da palmeira. Comportamento semelhante foi observado na região correspondente ao alongamento do anel aromático da unidade de estireno, Figura 28c, e na região relacionada as características das unidades de butadieno de dupla ligação, apresentada na Figura 28d.

De acordo com Kumar e colaboradores (2019), o ABS é um copolímero com 40 a 60% de estireno, 5 a 35% de butadieno e 15 a 30% de acrilonitrila, que estão de acordo com os espectros observados na Figura 28a (KUMAR et al., 2019). Segundo Cortat e colaboradores (2021), a fibra da palmeira real australiana é um material lignocelulósica que tem um teor de celulose mais elevado do que outras espécies de palmeiras, tais como a tamareira e a palmeira de açúcar (CORTAT et al., 2021). Sousa e colaboradores (2012), investigaram a composição química da palmeira real australiana e indicaram que contém 47,8% de celulose, 25,9% de lignina, 23,7% de hemicelulose e 1,8% de cinzas (SOUSA; HABIBE; MULINARI, 2012).

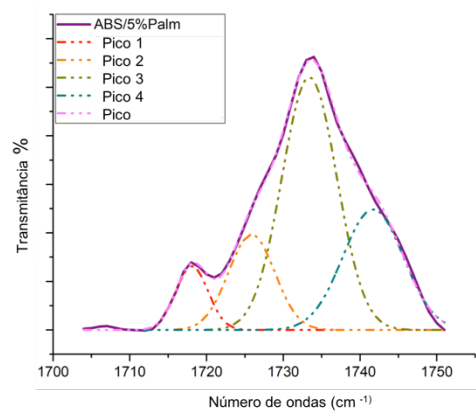
Figura 28. Espectros de FTIR do ABS puro, fibra da palmeira e dos filamentos compósitos com o respectivo pico de deconvolução para os filamentos.



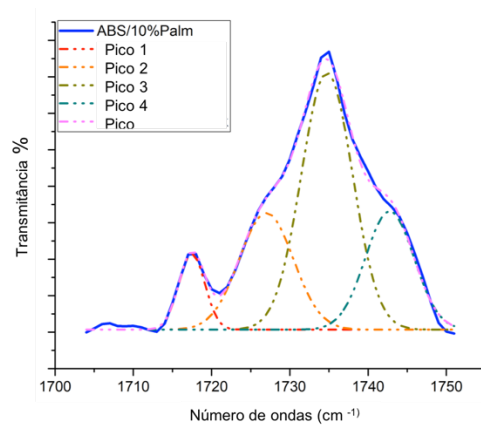
a) Espectros completos

b) zoom a 2255-2225 cm^{-1} c) zoom a 1660-1620 cm^{-1} d) zoom a 1520-1460 cm^{-1} e) zoom a 1750-1690 cm^{-1} 

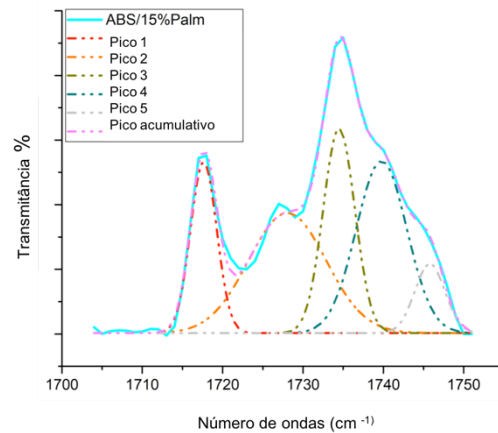
f) ABS puro



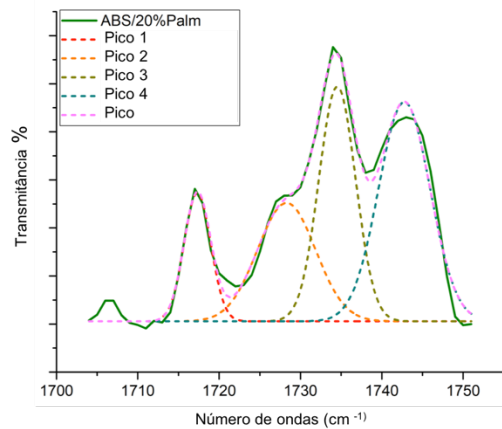
g) ABS/5%Palmeira



h) ABS/10%Palmeira



i) ABS/15%Palmeira,



j) ABS/20%Palmeira.

Fonte: O autor, 2022.

A atribuição detalhada de cada banda, relacionando os grupos funcionais e os modos de vibração, podem ser visualizados na Tabela 7 (NEHER et al., 2014; LI et al., 2017; HARRIS et al., 2020a; NABIPOUR; AKHOUNDI, 2021). As bandas correspondentes as fibras da palmeira apresentadas na Tabela 7, estão de acordo com as bandas apresentadas na literatura (MULINARI et al., 2017; BATTISTI et al., 2019; MANIK; MASHURI; DARMINTO, 2019; MAIA et al., 2021b; ZANINI et al., 2021b).

Tabela 7. Faixas características encontradas nos espectros FTIR de ABS e resíduos de palmeira e seus correspondentes grupos funcionais e os modos de vibração.

Material	Banda (cm ⁻¹)	Grupos Funcionais	Modo de vibrações	Referências
ABS	3200-3000 e 3000-2800	aromático e alifático C-H	-	(LI et al., 2017)
	3092	hidrocarbonetos insaturados	estiramento	(HARRIS et al., 2020)
	2918	Ligação simétrica C-H	estiramento	(NEHER et al., 2014)
	2238	C≡N (unidade de acrilonitrila)	estiramento	(LI et al., 2017; HARRIS et al., 2020; COSTA et al., 2021)
	1638	C=C dupla ligação (unidades de butadieno)	-	(LI et al., 2017)
	1600	cis-1,4-C=C	estiramento	(COSTA et al., 2021)
	1495	anel aromático (unidade de estireno)	estiramento	(LI et al., 2017; HARRIS et al., 2020)
	1450	anel aromático CH	bending	(COSTA et al., 2021)
	966	trans-1,4-C=C	estiramento	(COSTA et al., 2021)
	910	CH	bending	(NEHER et al., 2014)
	759	aromático CH fora-do-plano	bending	(NABI et al., 2021)
	698	aromático CH for a-do-plano	bending	(NABI et al., 2021)
Fibra da Palmeira	3500–3200	-OH grupos de celulose (grupos alcoólicos e fenólicos hidroxílicos correspondentes a ligações de hidrogênio)	estiramento	(MULINARI; GUEDES; SIMBA, 2017; ZANINI et al., 2021a)

	2977–2830	C–H	estiramento	(MULINARI; GUEDES; SIMBA, 2017)
	1595	Lignina C=O	estiramento	(MANIK; MASHURI; DARMINTO, 2019)
	1417	Vibrações do anel aromático no esqueleto de fenilpropano (lignina)	-	(BATTISTI et al., 2019)
	1232	ligação aril-éter alquílico	-	(BATTISTI et al., 2019)
	1020	C–O ligação de compostos orgânicos (álcoois, fenóis, ácidos, éteres ou ésteres)	stretching	(MAIA et al., 2021a)

Fonte: O Autor, 2022.

Os coeficientes das ligações de hidrogênio foram investigados para compreender a influência das fibras e a interação com a matriz de ABS. Para tal, foi analisada a região em $1750 - 1690 \text{ cm}^{-1}$. A Figura 28e, apresentou os grupos C=O livre e C=O ligado a hidrogênio em 1746 e 1725 cm^{-1} (ZHU et al., 2019). Esta região foi desconvolvida para analisar estes picos e calcular o coeficiente de ligação de hidrogênio através da Equação 1, como apresentado na Figura 28f, g, h, i, e j para cada compósito.

O coeficiente de ligação-hidrogênio foi observado em 0,50, 0,43, 0,52, 0,71 e 0,52 para os filamentos de ABS puro, ABS/5%Palmeira, ABS/10%Palmeira, ABS/15%Palmeira, e ABS/20%Palmeira, respectivamente. Estes resultados indicaram uma interação doador-aceitador de prótons entre a fibra e a matriz de ABS através de ligações de hidrogênio (CAMANI et al., 2021). Além disso, observou-se que a carga de ABS/5%Palmeira, apresentou uma interação mínima com a matriz de ABS, provavelmente apenas perturbando a interação natural que esta apresenta. No entanto, o coeficiente aumenta consideravelmente ao aumentar as cargas, indicando

uma interação fibra-matriz, atingindo o seu valor máximo para o ABS/15%Palmeira. Assim, destacou esta concentração como a carga ótima, que poderia levar à formação de uma rede de percolação (ZHU et al., 2019). Resultado semelhante foi encontrado no trabalho de Fonseca e colaboradores (2021), sendo possível uma alta adesão entre a fibra e a matriz para os compósitos de ABS e fibra de celulose com 30% de carga (FONSECA; WALDMAN; DE PAOLI, 2021).

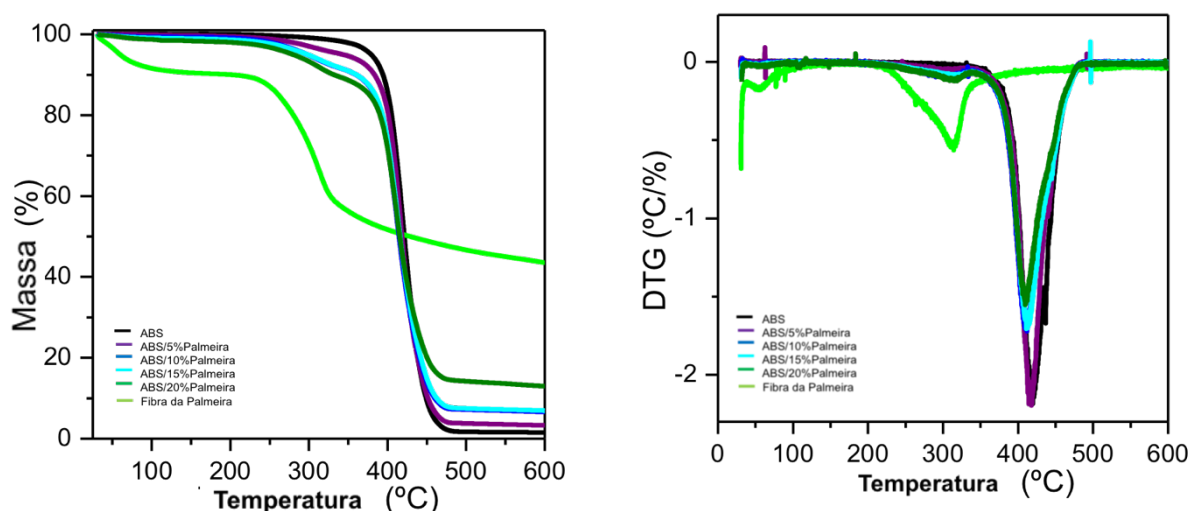
Além disso, observou-se que um teor mais elevado de fibras reduziu consideravelmente o coeficiente de ligação-hidrogênio, possivelmente devido à aglomeração de fibras dentro da matriz polimérica.

3.4 Propriedades térmicas

3.4.1 Termogravimetria

A Figura 29 evidencia as curvas termogravimétricas da fibra de palmeira, do ABS puro e dos filamentos compósitos. A curva relacionada com a fibra da palmeira mostrou dois eventos de perda de massa; o primeiro evento próximo à 130 °C, o qual está relacionado com a perda de água absorvida na fibra, enquanto o segundo evento a 248 °C está relacionado com a degradação da hemicelulose, celulose e lignina (BUFFA et al., 2018; NGAOWTHONG et al., 2019). Resultados semelhantes foram observados por Madhi e colaboradores (2021), o qual a fibra da palmeira de tâmara apresentou dois eventos de perda de massa, o primeiro relacionado à evaporação da água, e o segundo referente a degradação da celulose, hemicelulose e lignina (MAHDI et al., 2021). A curva relacionada à matriz polimérica apresentou um único evento de degradação a 392 °C, o que está de acordo com trabalhos da literatura (FONSECA; WALDMAN; DE PAOLI, 2021). Neher e colaboradores (2016), observaram resultados semelhantes a degradação do ABS em temperaturas próximas a 400 °C, correspondendo à decomposição e despolimerização do ABS e correspondente à perda de massa em 93,2 % (NEHER et al., 2016).

Figura 29. Curvas termogravimétricas (TGA) e suas derivadas (DTG) da fibra da palmeira, do ABS puro e dos filamentos compósitos.



Fonte: O autor, 2022.

As curvas dos filamentos compósitos apresentaram dois eventos principais de degradação, o primeiro pode ser atribuído à degradação da fibra e o segundo está relacionado à degradação do ABS através da decomposição estrutural e formação de butadieno monomérico, estireno e acrilonitrila (COSTA et al., 2021). Resultado semelhante foi encontrado por Fonseca e colaboradores (2021), que ao adicionar fibra de celulose à matriz ABS, o compósito apresentou uma superposição de degradação, ou seja, há uma mudança dos máximos de picos de temperatura (FONSECA; WALDMAN; DE PAOLI, 2021). Além disso, a inclusão da fibra induziu uma formação mais elevada de carbono-resíduo, o que corrobora com o maior teor de cinzas da fibra da palmeira, como apresentado na Tabela 8.

Tabela 8. Parâmetros térmicos obtidos a partir da análise TGA e DSC: Tonset (°C), Tmax (°C), Resíduos (%), valores T₅ e T₃₀ utilizados para obter o índice de resistência térmica (T_{HRI}).

Amostras	T _{onset} (°C)	T _{max} (°C)	Resíduos (%)	T _{5%} (°C)	T _{30%} (°C)	T _{HRI} (°C)
ABS	392,2	420,1	1,5	379,0	41,4	195,2
Fibra da Palmeira	248,4	315,3	43,5	---	---	---
ABS/5%Palmeira	261,2/ 387,9	414,4	3,3	343,1	408,4	187,3
ABS/10%Palmeira	259,5/ 375,4	409,5	6,6	297,8	401,9	176,5
ABS/15%Palmeira	261,7/ 378,8	410,2	6,9	298,1	403,1	176,9
ABS/20%Palmeira	266,2/ 372,3	407,4	13,0	279,8	401,6	172,9

Fonte: O autor, 2022.

Analisando os dados da Tabela 8 observou-se que a temperatura T_{onset}, dos compósitos foi reduzida com o aumento da carga de fibra da palmeira. Martins e colaboradores (2010), também evidenciaram comportamento semelhante em compósitos de ABS e fibra acrílica, fibra de algodão, e resíduos de fibra têxtil (MARTINS et al., 2010).

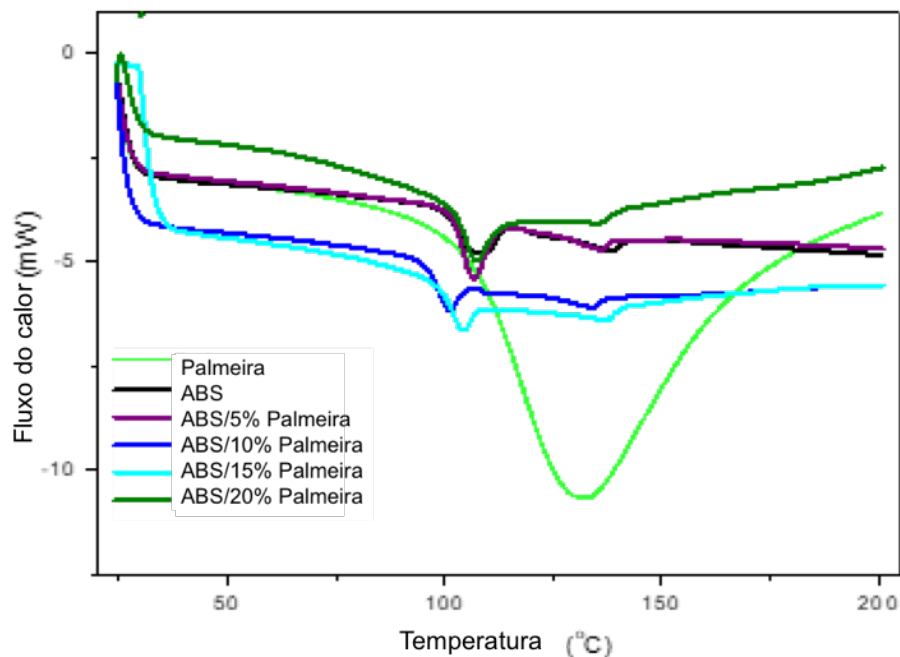
O índice de resistência térmica foi calculado utilizando os valores T₅ e T₃₀, e observou-se que ambos os valores diminuíram nos filamentos compósitos comparados ao ABS puro. O índice de resistência térmica T_{HRI} (~ 176 °C) não variou consideravelmente com a adição gradual de fibra da palmeira, mas apresentou uma tendência de redução com maior teor de fibra. Andrade e colaboradores (2021), evidenciaram comportamento semelhante quando estudaram resíduos de casca de noz de macadâmia como reforço em compósitos de polietileno de baixa densidade (PEBD) (ANDRADE et al., 2021).

3.4.2 Calorimetria exploratória diferencial (DSC)

A Figura 30 evidencia as curvas DSC da fibra de palmeira, do ABS puro e dos filamentos compósitos. A partir das curvas DSC foi possível identificar a temperatura de transição vítrea (T_g) dos filamentos. A T_g é um parâmetro significativo na impressão 3D, porque as peças ao serem impressas pelo sistema FDM devem ser depositadas na plataforma da impressora a uma temperatura acima da T_g do material para uma aderência adequada entre a peça e a superfície da plataforma. Além disso, temperaturas mais baixas na superfície causam um arrefecimento rápido da peça,

resultando em dimensões distorcidas da peça devido ao gradiente de calor (ÇANTI; AYDIN, 2018).

Figura 30. Curvas de DSC da fibra da palmeira, do ABS puro e dos filamentos compósitos.



Fonte: O autor, 2022.

Analisando as curvas de DSC obtidas para o ABS puro e os filamentos compósitos observou-se o mesmo perfil. Por outro lado, a curva DSC da fibra mostrou um pico endotérmico mais elevado (cerca de 130 °C) devido à evaporação de água. A variação gradual do fluxo de calor de 100-110 °C indicou a temperatura de transição vítrea dos materiais (Tabela 9), representando a transição da fase vítrea para o estado de borracha (KUMAR; SINGH; FARINA, 2018). A T_g do ABS puro foi determinada a 105,6°C e corrobora por trabalhos anteriores (PINHO; AMARO; PIEDADE, 2020). Houve um ligeiro aumento da T_g nos compósitos através da adição de fibras da palmeira. Costa e colaboradores (2021), observaram este comportamento ao adicionar fibras de pinha ao ABS (COSTA et al., 2021). Assim, concluiu-se que o reforço na matriz de ABS não comprometeu a T_g dos compósitos, sendo adequado para o processo de impressão 3D.

Tabela 9. Parâmetro térmico obtido a partir da análise TGA e DSC: $T_g(^{\circ}\text{C})$.

Amostras	$T_g (^{\circ}\text{C})$
ABS	105,6
Fibra da Palmeira	--
ABS/5%Palmeira	106,6
ABS/10%Palmeira	108,7
ABS/15%Palmeira	106,2
ABS/20%Palmeira	106,8

Fonte: O autor, 2022.

3.5 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

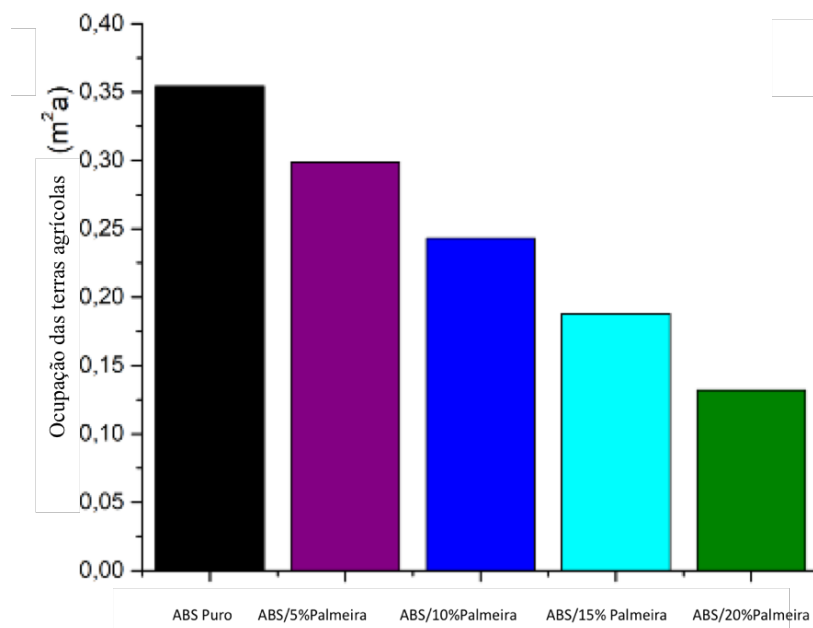
A avaliação do ciclo de vida é uma ferramenta benéfica que verifica os impactos ambientais associados aos produtos, processos e/ou atividades, fornecendo uma compreensão do impacto dos filamentos nas categorias ambientais e avaliando a aplicação sustentável da fibra de palmeira na matriz de ABS. Além disso, a ACV permite a comparação de diferentes materiais, com o objetivo de obter o melhor desempenho aliado ao maior ganho ambiental. Para os filamentos compósitos é crucial realizar uma modelagem de avaliação do ciclo de vida. O reforço de fibras naturais em uma matriz polimérica ajuda a mitigar os impactos ambientais associada à uma melhor qualidade ambiental, a qual promoverá um grande interesse industrial para utilização de reforços naturais (DA LUZ; DE SOUSA, 2018) CHEN et al., 2020).

Ao realizar a avaliação do ciclo de vida de um compósito é necessário avaliar a matriz e o reforço separadamente. Na avaliação do ciclo de vida do ABS puro, observou que possui alto impacto ambiental em todas as categorias, principalmente por ser um material derivado do petróleo e por emitir fumos na atmosfera quando sua temperatura é elevada, considerou-se que todos os resíduos foram incinerados para geração de energia (KUMAR et al., 2022). Ao avaliar os filamentos compósitos, considerou a quantidade de fibra adicionada à matriz para investigar os impactos ambientais associados ao processo (NABAVI-PELESARAEI et al., 2017; RIGAMONTI et al., 2020)

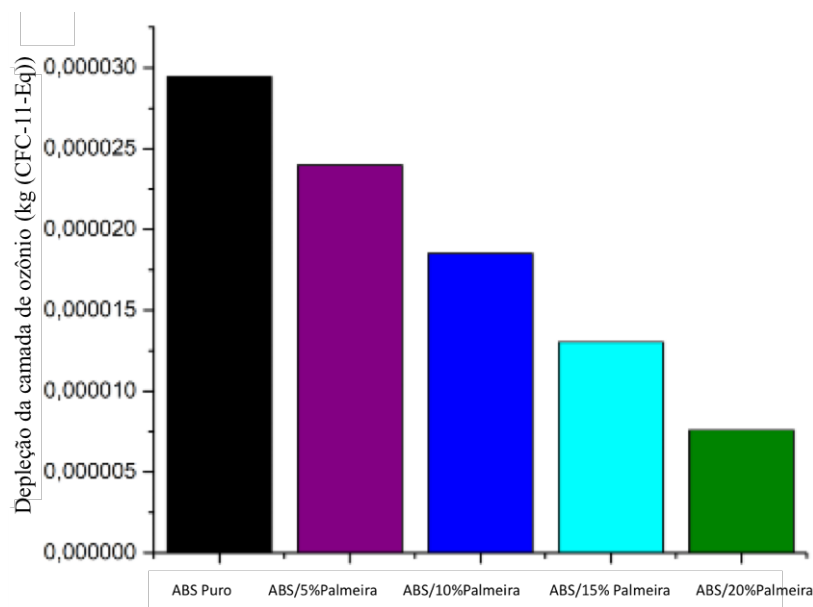
A Figura 31 apresenta os resultados da modelagem ACV considerando as categorias ambientais mais impactadas: ocupação de terrenos agrícolas (unidade de referência metro quadrado ao ano), depleção fóssil (unidade de referência de

quilograma de combustível fóssil – óleo – equivalente), depleção da camada de ozônio (unidade de referência de quilograma equivalente de triclorofluormetano), formação de oxidantes fotoquímicos (unidade de referência de quilograma de composto orgânicos voláteis), ocupação de terrenos urbanos (unidade de referência metro quadrado ao ano) e esgotamento de água (unidade de referência metro cúbico).

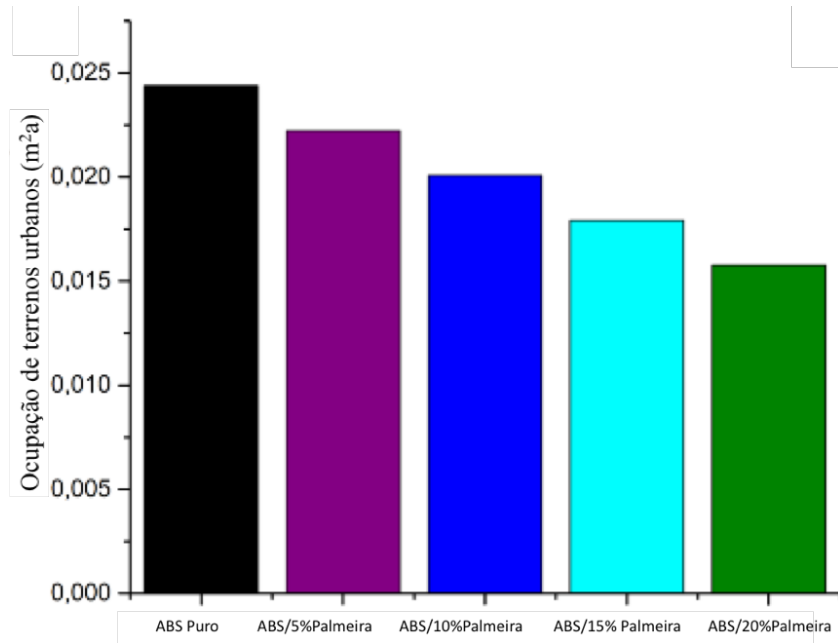
Figura 31. Resultados da avaliação do ciclo de vida de filamentos de ABS sem e com fibra de palmeira com destaque para os impactos ambientais.



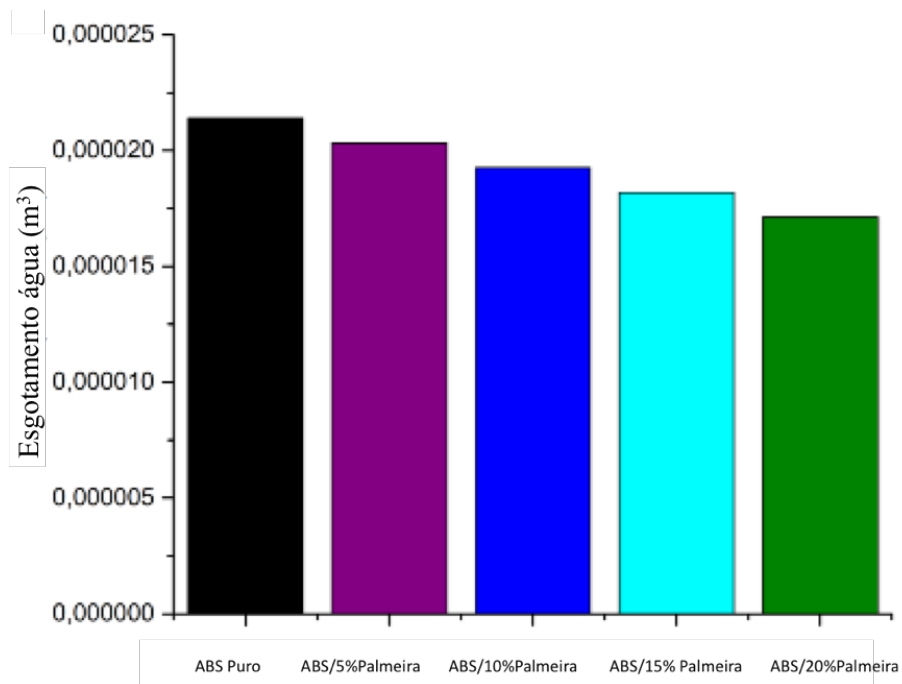
a) Ocupação das terras agrícolas



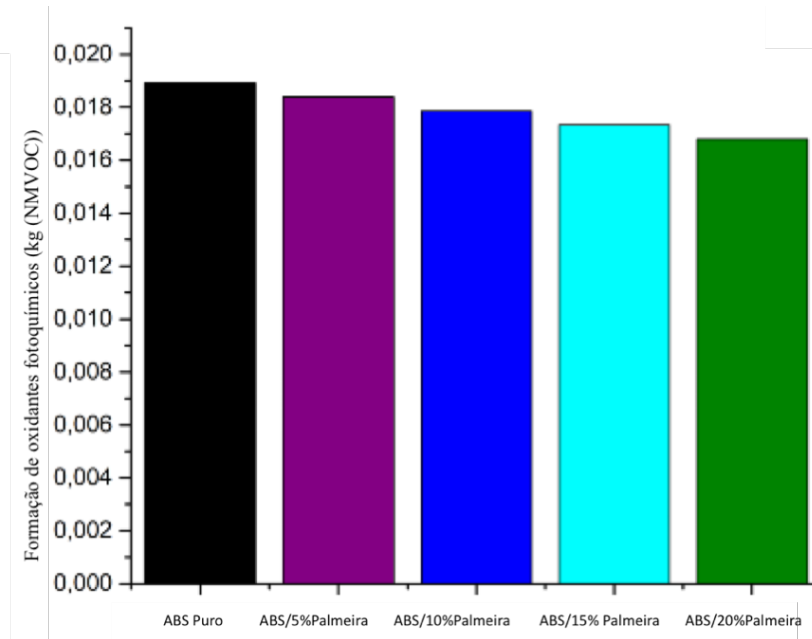
b) Depleção da Camada de ozônio



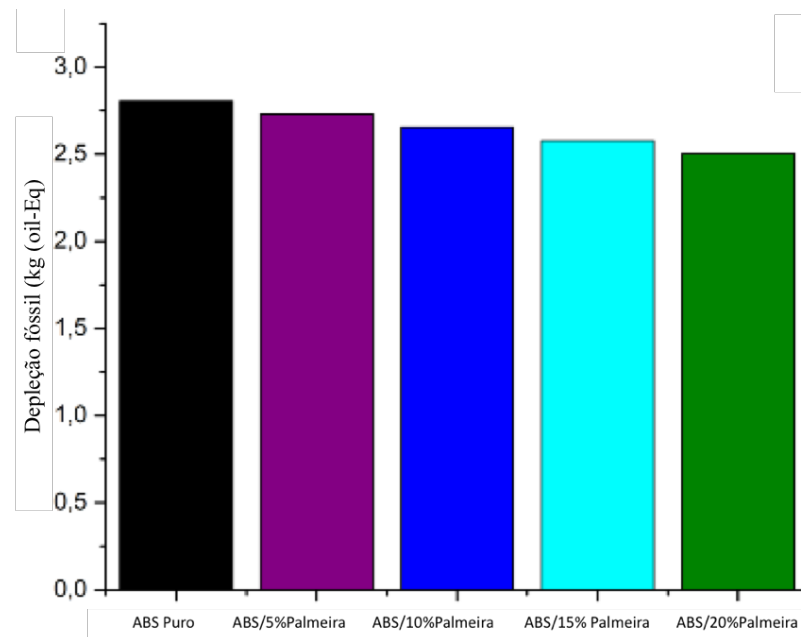
c) Ocupação de terrenos urbanos



d) Esgotamento água



e) Formação de oxidantes fotoquímicos



f) Depleção fóssil

Fonte: O autor, 2022.

Os dados observados na Figura 31 evidenciam que algumas categorias de impacto foram mais sensíveis à incorporação de fibras, com destaque para a ocupação de terrenos agrícolas (Figura 31a) e o empobrecimento da camada de ozônio (Figura 31c). Estas categorias foram altamente afetadas porque estão intrinsecamente associadas à gestão de resíduos. Uma vez que os resíduos da

extração de palmito representam cerca de 80-90% da massa da palmeira, uma grande quantidade de resíduos é gerada e compromete o uso do solo, afetando a ocupação do solo agrícola (CORTAT et al., 2021). Além disso, quando estes resíduos são queimados, uma quantidade razoável de gases é gerada e, portanto, também tem impacto no empobrecimento da camada de ozônio. O impacto promovido é reduzido com a incorporação das fibras na matriz de ABS, uma vez que as fibras são reintroduzidas na cadeia de abastecimento. E o impacto relacionado ao empobrecimento da camada de ozônio também foi observado nos resultados obtidos por Kumar e colaboradores (2022), ao analisar o impacto do ABS puro, apresentando resultados superiores em comparação às resinas PLA e PETG (KUMAR et al., 2022).

Também foi observada uma redução com a incorporação de fibras para as categorias de ocupação de terrenos urbanos (Figura 31e) e esgotamento de água (Figura 31f). A primeira está associada à gestão de resíduos em áreas urbanas, e por isso tem um impacto menor quando comparada à ocupação de terrenos agrícolas. No entanto, é válido salientar que a redução é ainda considerável, uma vez que os resíduos necessitam de transporte para diferentes áreas e podem ocupar depósitos urbanos antes de serem queimados. Além disso, a redução combinada em ambas as categorias indica que a incorporação de resíduos promove uma melhor gestão de resíduos. Para a categoria de esgotamento de água, a redução está associada à reavaliação dos resíduos e à redução da água utilizada durante a produção de ABS. Uma vez que uma menor quantidade de ABS precisa de ser formulada porque a fibra é utilizada, é necessária uma menor quantidade de água na formulação e assim ajuda a diminuir o consumo de água (PARVATKER; ECKELMAN, 2019).

Quanto às categorias de esgotamento fóssil (Figura 31b) e formação de oxidação fotoquímica (Figura 31d), observou-se uma redução inferior com a inserção de fibras. Associa-se este resultado ao complexo processo para a produção de ABS, combinado à extração de monômeros e à produção de copolímeros. Além disso, a gestão das fibras gera um impacto significativo, uma vez que o transporte de resíduos também queima combustíveis fósseis, considerando os veículos convencionais. Assim, a redução observada não foi tão considerável como outras categorias ambientais (CAPPUCCI et al., 2020). No entanto, foi observada uma redução de cerca de 10% em ambas as categorias, que seria mais reduzida com a modificação do combustível utilizado durante o transporte.

Em geral, a Figura 31 destaca uma tendência descendente relacionada aos impactos ambientais avaliados para filamentos contendo fibra de palmeira, indicando que estes materiais seriam uma alternativa para materiais convencionais. As melhores formulações consideram quantidades mais elevadas de fibra, e este processo poderia também ser otimizado em futuras aplicações, de modo a contabilizar um produto mais sustentável.

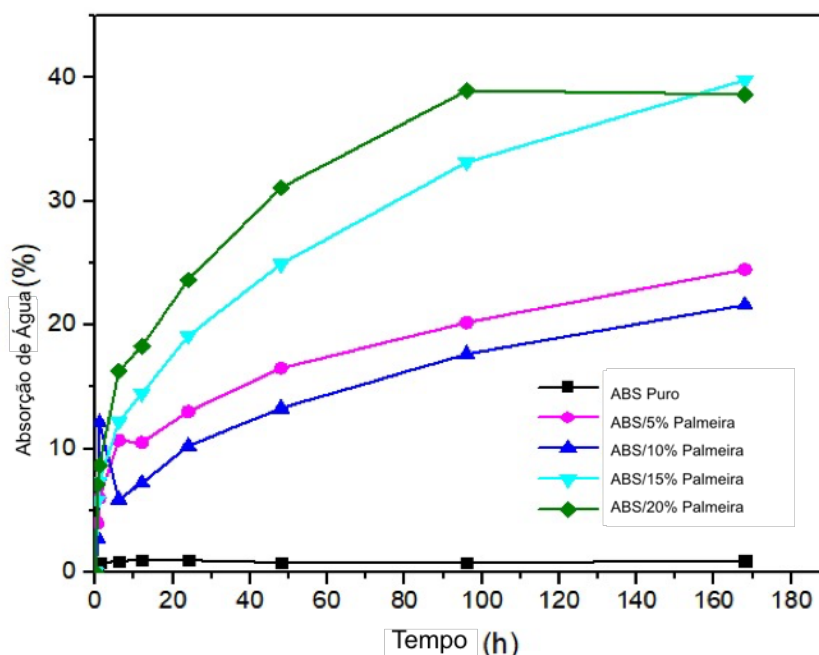
3.6 Absorção de água

O teste de absorção de água é importante para avaliar os filamentos compósitos, uma vez que a introdução de fibras induz a penetração de moléculas de água. Essa absorção de água pode ocorrer por alguns mecanismos como:

- Difusão: a penetração da água acontece nos pequenos espaços entre as cadeias de polímeros.
- Transporte capilar: ocorre nas lacunas e falhas na interface fibra/matriz, no caso de impregnação incompleta do reforço com a matriz durante a fabricação e sob baixa molhabilidade.
- Transporte de moléculas de água: ocorre através das microfissuras que aparecem na matriz e provém do inchaço das fibras, consequência do armazenamento de água (SYAFIQAZ et al., 2021).

Após a realização deste teste, foi possível avaliar os filamentos compósitos que absorveram mais água. Dentre os quais o ABS/15%Palmeira e ABS/20%Palmeira foram os que mais absorveram comparados aos compósitos ABS/5%Palmeira e ABS/10%Palmeira, como apresentado na Figura 32.

Figura 32. Absorção de água do ABS puro e dos filamentos compósitos 5%, 10%, 15% e 20% de fibra da palmeira.



Fonte: O autor, 2022.

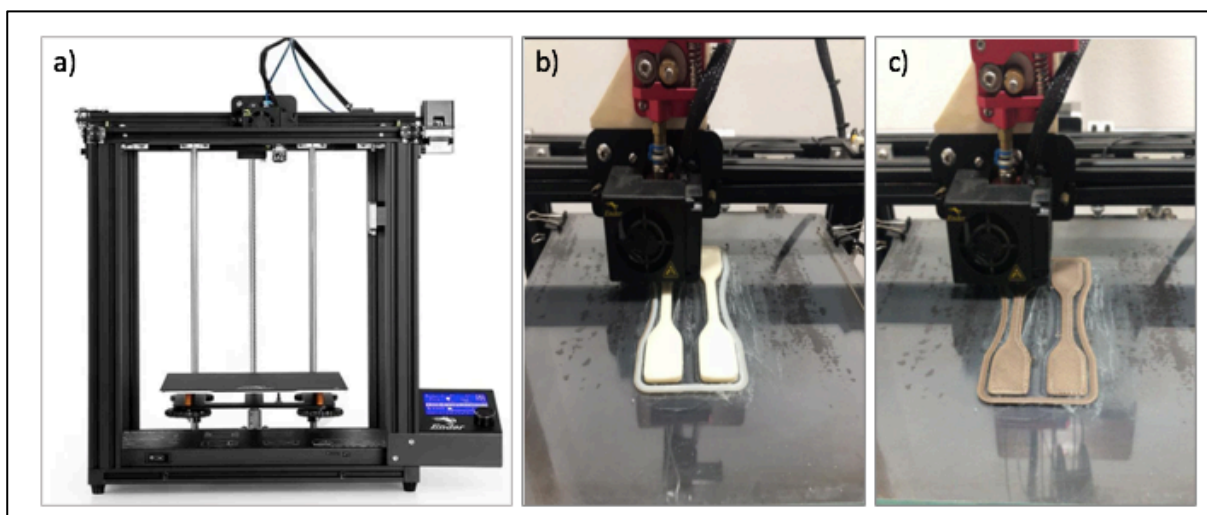
Os resultados mostraram um aumento na absorção de água ao longo do tempo. Além disso, verificou-se que a taxa de absorção de água dos filamentos compósitos aumentou de acordo com a carga de fibra. Este aumento do teor de umidade dos filamentos compósitos é resultado do fato das fibras possuírem a natureza hidrofílica quando comparado ao ABS puro (RAMESH et al., 2020). Resultados semelhantes foram observados por Anbukarasi e Kalaiselvam (2014), a absorção de água com compósitos reforçados com fibra *in natura* foi superior em relação aos compósitos reforçados com fibra tratada, pois o tratamento superficial reduz a absorção de umidade (ANBUKARASI; KALAISELVAM, 2014). Alhijazi e colaboradores (2020), evidenciaram que os compósitos de epóxi reforçados com fibra de lufa *in natura* mostraram uma capacidade de absorção de água 14% maior quando comparados aos compósitos reforçados com fibra de lufa tratada (ALHIJAZI et al., 2020). De acordo com Ngaowthong e colaboradores (2019), assim como o conteúdo de fibra aumenta, o conteúdo de celulose e a área interfacial entre a fibra e o polímero também aumenta e, portanto, mais água se difunde nos compósitos reforçados com fibra natural (NGAOWTHONG et al., 2019). Este resultado revela a falta de necessidade de submeter algumas fibras naturais a tratamentos de modificação de superfície,

evitando assim altos custos de produção e impactos sobre o meio ambiente (ZHANG et al., 2021).

3.7 Impressão dos filamentos

Após a obtenção dos filamentos compósitos, os mesmos foram preparados para serem impressos na impressora 3D através da técnica FDM (Figura 33), a qual apresenta o modelo da impressora e a imagem da impressão do filamento de ABS puro e os filamentos compósitos reforçados com fibra da palmeira.

Figura 33. a) Impressora 3D Ender Pro 5, b) impressão ABS puro e c) impressão compósito de fibra de palmeira.

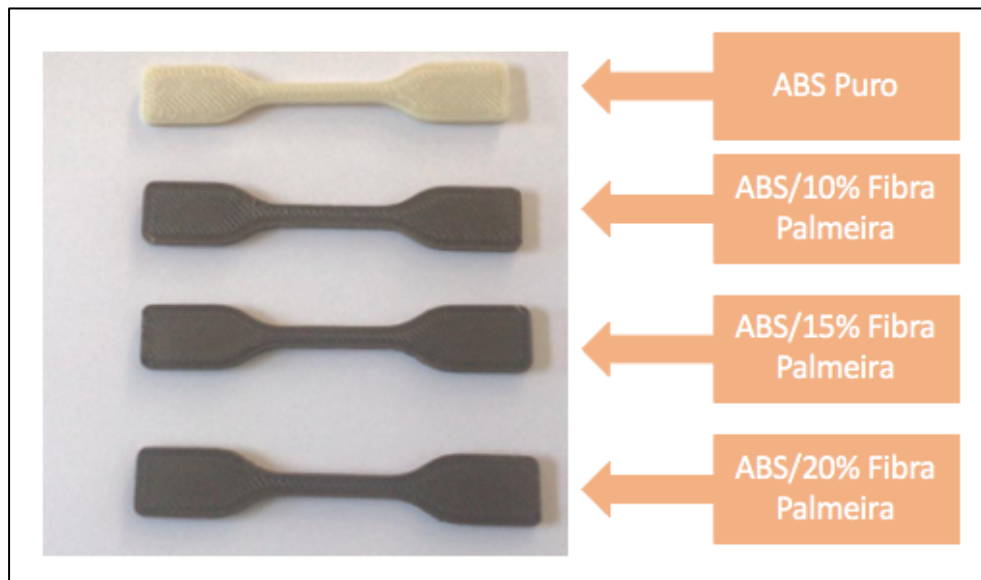


Fonte: O autor, 2022.

A impressão do filamento ABS puro foi bem sucedida, enquanto a impressão do filamento compósito na porcentagem de ABS/5%Palmeira de fibra ocasionou o entupimento do bico da impressora, mesmo apresentando o diâmetro dentro do especificado. A impressão foi iniciada e após um tempo foi interrompido devido ao material acumulado no bico. Os filamentos compósitos nas porcentagens de ABS/10%Palmeira, ABS/15%Palmeira e ABS/20%Palmeira foram impressos com poucas interferências durante a impressão, sendo possível realizar as impressões dos modelos de corpos de prova como apresentados na Figura 34. Notou-se que conforme aumentava a quantidade de fibra havia uma diferença na tonalidade. Essa diferença da coloração dos filamentos também foi observada por Osman e colaboradores

(2018), nos compósitos reforçados com palha de arroz, onde a cor ficou progressivamente mais escura à medida que o conteúdo de palha de arroz era adicionado ao compósito (OSMAN; ATIA, 2018).

Figura 34. Impressão 3D dos corpos de prova.



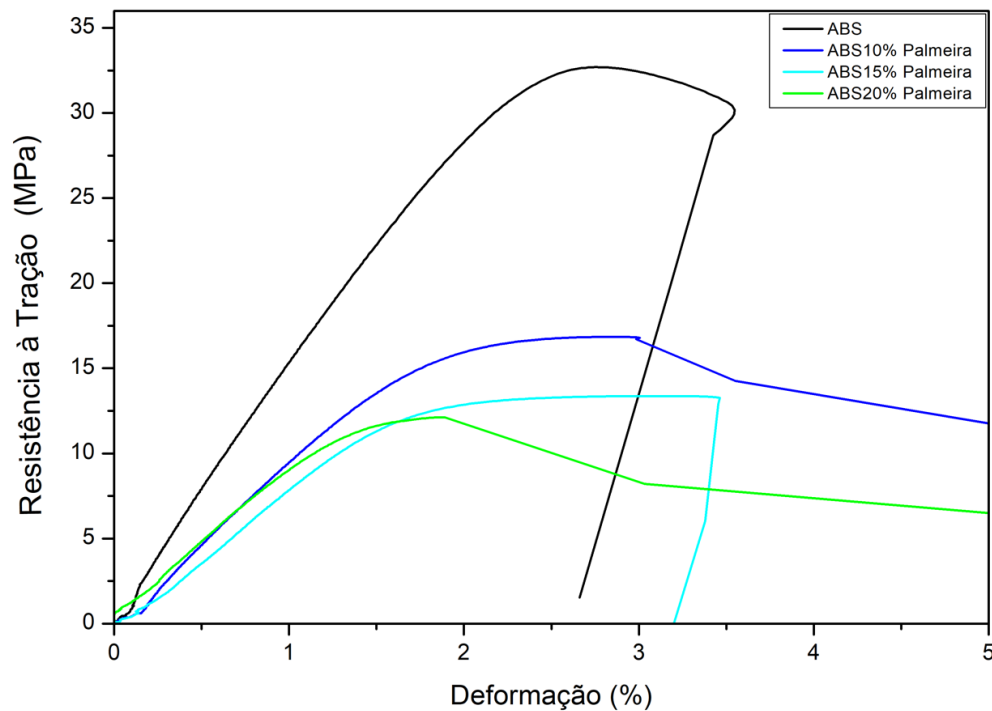
Fonte: O autor, 2022.

3.8 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas são ensaios realizados para avaliar o comportamento mecânico do material, ou seja, a resposta do material quando este é submetido a cargas externas, demonstrando sua capacidade de resistir ou fraturar mediante as forças aplicadas (ALHIJAZI et al., 2020).

O ABS puro e os filamentos compósitos foram analisados para obter as propriedades mecânicas, tais como a resistência à tração, a deformação e o módulo de elasticidade. A Figura 35 apresenta as curvas Tensão x Deformação para o ABS puro e seus filamentos compósitos, de forma a ilustrar o comportamento mecânico dos materiais, que foram semelhantes para todas as amostras. No entanto, observou-se que ao aumentar o teor de fibras na matriz de ABS houve uma redução na resistência dos compósitos e um aumento na deformação, quando comparado ao ABS puro.

Figura 35. Comportamento do ABS e dos filamentos compósitos no ensaio de tração.



Fonte: O autor, 2022.

Analisando as curvas da Figura 35 foi possível observar o comportamento característico de um material plástico, apresentando deformação elástica inicial seguida por escoamento além de uma região de deformação plástica. Para os filamentos compósitos, as curvas apresentaram comportamento semelhante, porém, o teor de fibras inserido na matriz polimérica de ABS alterou a deformação do material até a tensão máxima provocando uma redução em torno de 22,2% na deformação total do material. Este fato foi associado ao fato de que o reforço promoveu uma redução da ductilidade do material. O efeito da adição de fibras pode ser observado através das propriedades mecânicas do ABS puro e dos filamentos compósitos, obtidas a partir do ensaio de tração, apresentadas na Tabela 10, respectivamente.

A Tabela 10 evidencia os valores do limite de resistência à tração, obtidos dos ensaios mecânicos das misturas preparadas com diferentes quantidades de reforço.

Tabela 10. Propriedades mecânicas do ABS puro e dos filamentos compósitos.

Propriedades Mecânicas			
Amostras	Resistência à tração (MPa)	Deformação na σ_{max} (%)	Módulo de Elasticidade (MPa)
ABS	32,5 ± 0,6	2,2 ± 0,1	2304 ± 290
ABS/10% Palmeira	15,5 ± 1,9	2,3 ± 0,2	1050 ± 164
ABS/15% Palmeira	13,7 ± 0,4	2,4 ± 0,1	1214 ± 100
ABS/20% Palmeira	12,4 ± 0,4	1,8 ± 0,5	1162 ± 60

Fonte: O autor, 2022.

Analisando os dados da Tabela 10, observou-se um decréscimo significativo na resistência à tração ao inserir as fibras da palmeira na matriz de ABS. Balla e colaboradores (2019) também obtiveram resultados semelhantes quando estudaram filamentos reforçados com fibras mais longas (BALLA et al., 2019). Esta queda da resistência à tração pode ter ocorrido devido à falta de compatibilidade entre matriz e reforço (AL-OTAIBI et al., 2020).

Além disso, foi observado uma queda na rigidez dos filamentos compósitos, apresentando uma redução em torno de 50% quando comparado ao ABS puro. Ahmed e colaboradores (2020), observaram que materiais baseados em ABS reforçados com fibras naturais apresentaram resultados não satisfatórios sobre as propriedades mecânicas, ou seja, quanto maior o teor de fibra é adicionado a matriz, menor a resistência dos compósitos, comparado com o ABS puro. Além disso, foi observado que as propriedades mecânicas dos objetos impressos através da impressão 3D foram afetadas por fatores estruturais e de impressão. Estes fatores afetam a estrutura interna do objeto, que está ligado diretamente com o material (AHMED et al., 2020).

Al-Oitabi e colaboradores (2020) também observaram uma redução da resistência à tração entre as fibras da palmeira de tâmara e as matrizes de polímeros hidrofóbicos devido à interação interfacial deficiente (AL-OTAIBI et al., 2020). Osman e colaboradores (2018), explica que a resistência à tração das amostras reduz significativamente quando a palha de arroz foi adicionada à matriz de ABS, devido aos espaços em torno da partícula de palha de arroz embutida na matriz de ABS,

implicando em uma ligação pobre entre as duas. A porosidade e as partículas de palha de arroz diminuem a ligação e difusão no caminho, evidenciando a diminuição da resistência mecânica dos corpos de prova quando o reforço é adicionado (OSMAN; ATIA, 2018).

Girdis e colaboradores (2017) concluíram que o aumento do reforço de casca de macadâmia na matriz de ABS causou uma diminuição da resistência em todas as amostras dos filamentos impressos (GIRDIS et al., 2017).

Balla e colaboradores (2019), relatou que fibras naturais com alta concentração de grupos hidroxil em sua superfície resultam em hidrofilicidade e, portanto, sua molhabilidade com matrizes de polímeros hidrofóbicos é muito pobre, resultando em uma redução significativa da resistência à tração, próxima a 39% (BALLA et al., 2019).

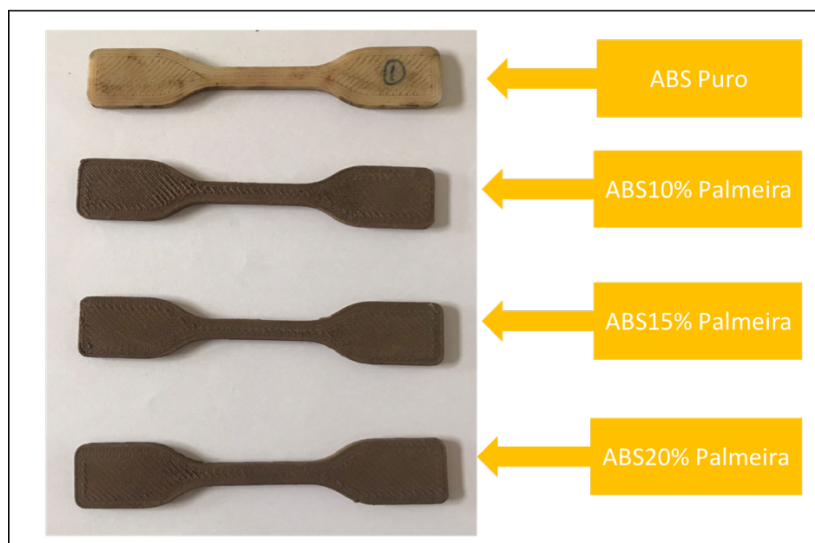
Dessa forma, pode-se afirmar que filamentos compósitos propostos serão usados sem que exija muito esforço, ou seja, serão usados como enchimento de material, uma vez que aumentando o teor de fibra no ABS a deformação dos filamentos compósitos foi diminuída, o que impactará na rigidez dos mesmos.

3.9 Teste de Biodegradação

O teste de biodegradação dos materiais foi determinado pela perda de massa em decorrência da umidade e da atividade de microrganismos durante a fase em que as amostras foram enterradas no solo simulado como descrito no item 3.4.9. O solo utilizado foi analisado inicialmente e após a finalização do ensaio.

A Figura 36 elucida os corpos de prova utilizados no ensaio de biodegradação após 180 dias, notando uma coloração diferente da inicial: o corpo de prova de ABS foi o mais claro, e os corpos de prova dos compósitos de 10%, 15% e 20% de fibra da palmeira apresentam a coloração mais escura. A alteração da cor do corpo de prova do ABS puro foi uma indicação de que houve absorção de umidade enquanto estava enterrado no solo. Notou-se que o corpo de prova do ABS, mesmo fazendo a limpeza, o mesmo apresentou pequenas saliências indicando que houve o processo de biodegradação. Os corpos de prova dos compósitos apresentaram uma coloração mais escura que a inicial, confirmando os mesmos também absorveram umidade do solo.

Figura 36. Corpos de prova do ABS puro, ABS10%, ABS15% e ABS20% após o ensaio de biodegradação de 180 dias das amostras enterradas.



Fonte: O autor, 2022.

A Tabela 11 apresenta um comparativo das análises de solo na fase inicial e final do ensaio de biodegradação e notou-se uma diminuição de 47% da umidade do solo, conforme valores obtidos após o encerramento do ensaio.

Tabela 11. Comparativo das análises de solo na fase inicial e final do ensaio de biodegradação.

	Solo Inicial	Solo Final
Umidade	5,9%	2,8%
pH	7	6
C/N	54,65 mg/Kg	100,04 mg/Kg

Fonte: O autor, 2022.

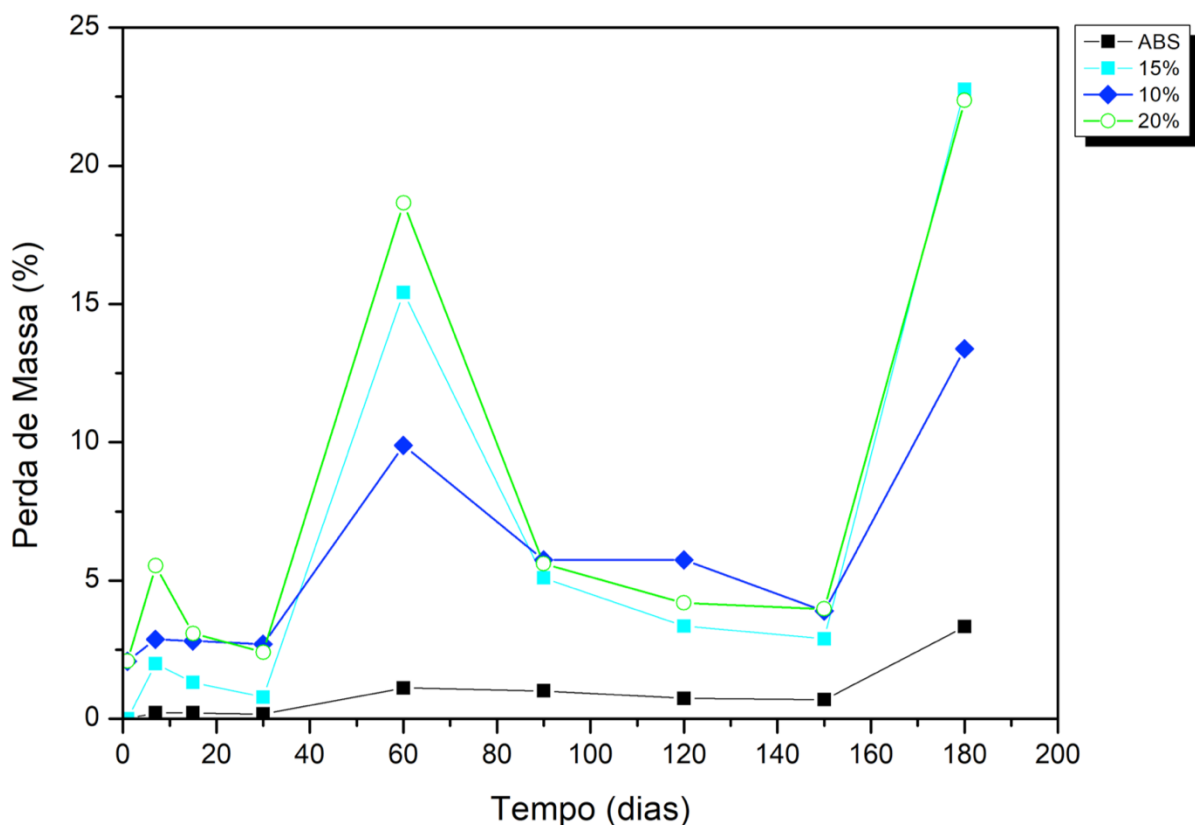
Apesar da diminuição da umidade, foi possível obter uma redução da massa nos corpos de prova, confirmando que a presença da fibra na matriz de ABS foi fortemente favorável para que o material degradasse mais rapidamente. Os compósitos obtiveram uma perda de massa de quase 25% quando comparados ao seu peso inicial (Figura 37). Uma das características do teste de biodegradação é a perda de massa, causada pela umidade e atividade dos microorganismos durante a fase em que o material se encontra enterrado (JUMAIDIN et al., 2020). Notou-se também que quanto maior a quantidade de fibra adicionada à matriz, maior foi a atividade dos microorganismos que aceleraram a degradação do material. A umidade

favorece consideravelmente a biodegradação, um alto teor de umidade promove o crescimento de microrganismos que irão agir favoravelmente na degradação do material, enquanto o baixo teor acaba sendo um fator que irá conservar a matriz polimérica. A temperatura ambiente do solo foi um fator que impactou na diminuição da umidade, afetando diretamente na atividade dos microrganismos envolvidos na biodegradação, considerando o tempo em que o material ficou enterrado. Resultados semelhantes foram observados através do estudo de compósitos à base de mandioca e milho (ZOUNGRANAN et al., 2020). Foi observado resultado semelhante no compósito de poliéster com fibra da palmeira real australiana na fabricação de composteira, que a umidade favoreceu a proliferação de microorganismos (ARAÚJO e MULLINARI, 2015).

O pH obtido apresentou uma pequena queda de 15% comparado ao seu valor inicial. Esta diminuição mostra que os compósitos passaram por um processo de biodegradação, os microrganismos presentes no solo, catalisaram a degradação através da cisão hidrolítica de grupos de ésteres em ácido e álcool, convertendo em moléculas de dióxido de carbono (CO_2) e água (H_2O) (JI et al., 2021). E com a presença da fibra da palmeira na matriz ABS, apressaria o processo de degradação do material (SIKENG et al., 2020). Considerando que o ABS é como grau 0, ou seja, não é biodegradável, porém ao adicionar uma fibra vegetal passa a apresentar um avanço para categoria ambiental, pois produzirão menos CO_2 no meio ambiente (DE PAOLI, 2009).

A relação de C/N é um indicador importante na decomposição da matéria orgânica do solo. Essa relação determina quais os nutrientes serão essenciais para a atividade dos microrganismos do solo. E de acordo com o resultado obtido, observou que houve um aumento na relação de C/N passando de 54,65 mg/Kg para 100,04 mg/Kg, um aumento de aproximadamente 98%, e quando essa taxa aumenta apresenta menores taxas de degradação, e os resíduos permanecem por mais tempo no solo, e quando essa taxa é menor, apresenta uma rápida degradação, aumentando as fontes de nutrientes para o solo. E mesmo assim foi possível obter uma perda de massa dos compósitos em 25%, o que confirma que a presença da fibra contribui para que o material seja mais biodegradável (OLIVEIRA et al., 2019).

Figura 37. Resultado do teste de biodegradação do ABS puro e dos filamentos compósitos.



Fonte: O autor, 2022.

Analisando a Figura 37, o ABS puro mostra quase nenhuma perda de massa, mesmo em períodos que foram afetados pelas chuvas, o que poderia impactar no seu peso final. Por outro lado, os compósitos mostram perda de massa e gradual degradação com tempo de enterramento. A porcentagem de perda de massa em todos os compósitos foi relacionada com o número de dias de enterramento no solo e apresentam o impacto dos dias chuvosas, os quais absorveram mais água, enquanto os dias de sol. O ABS puro apresentou uma perda de massa com um máximo de 3,33%, enquanto o compósito de 10% apresentou 13,55%, de 15% apresentou 22,76% e o de 20% apresentou 24,34% de perda de massa.

A biodegradabilidade de um compósito com fibra natural depende em grande parte de sua matriz polimérica, e a taxa de biodegradação dependerá de vários fatores ambientais, como umidade, luz, (radiação), temperatura e microrganismos presentes no solo (SIKENG et al., 2020).

CONCLUSÕES

Este trabalho incorporou resíduos da palmeira real australiana na matriz de ABS com diferentes proporções (5, 10, 15, e 20%) com o objetivo de desenvolver filamentos compósitos para impressão 3D. Após a extrusão dos filamentos compósitos foi possível analisar o diâmetro, e notou-se que houve uma pequena diferença em comparação ao ABS puro, mas os valores obtidos estão dentro do especificado 1,75mm. A densidade dos filamentos compósitos mostrou um acréscimo à medida que a quantidade de fibra foi adicionada. O índice de fluidez foi analisado e observou um decréscimo nos valores, indicando um aumento da viscosidade dos filamentos compósitos.

Observou-se que o ABS puro apresentava uma estrutura sólida sem aparência de porosidade. Entretanto, ao adicionar a fibra, notou-se que os filamentos compósitos apresentaram porosidade relacionada à umidade e compostos voláteis liberados da fibra da palmeira durante o processamento. Além disso, observou-se que maiores cargas promoviam poros menores, possivelmente devido à restrição da matriz imposta pela presença da fibra.

A análise do FTIR mostrou que as fibras apresentavam pouco impacto nos espectros típicos de ABS puro, resultado esperado devido à matriz ser predominante na porcentagem de massa. No entanto, algumas variações de intensidade foram observadas em regiões relacionadas às faixas típicas de ABS. Além disso, o coeficiente de ligação de hidrogênio foi usado para avaliar a interação da fibra com a matriz de ABS, mostrando que o ABS/15% Palmeira apresentou a maior interação.

As propriedades térmicas apresentaram pequenas variações, o que é interessante, pois indica que a presença de fibras não comprometeu as condições de processamento do filamento. Pode-se observar dois eventos, o primeiro referente a degradação da fibra e o segundo da matriz ABS. E mesmo com a adição da fibra, não houve comprometimento da T_g dos filamentos compósitos, os mesmos são adequados para impressão 3D.

A avaliação do ciclo de vida mostrou benefícios ambientais, uma vez que a incorporação da fibra resulta numa quantidade menor de resina polimérica utilizada e na redução do descarte inadequado de resíduos. Impactos positivos foram observados nas categorias de ocupação de terrenos agrícolas e o empobrecimento da camada de ozônio. O teste de absorção de água resultou na compreensão de que

não foi preciso fazer nenhum tratamento nas fibras, pois mesmo in natura, elas absorveram água de acordo com a carga adicionada na matriz. Os corpos de provas foram impressos na impressora 3D, através da tecnologia FDM, e com boa qualidade e fácil impressão dos filamentos compósitos.

Os resultados das propriedades mecânicas não foram o esperado para este trabalho, observou que os resultados tiveram um decréscimo nos filamentos compósitos em comparação ao ABS puro, com relação a deformação e rigidez do material, porém o material pode ser aplicado sem que seja exigido essas características do material.

O estudo de biodegradação dos filamentos compósitos mostrou que foi possível observar a influência da umidade do solo, o pH e a relação de C/N como fatores impactantes para esse processo. A comparação entre o ABS puro e os filamentos compósitos apresentaram valores eficientes na perda de massa dos materiais.

Os filamentos compósitos desenvolvidos mostram uma oportunidade de reduzir a demanda de polímeros e promover a valorização dos resíduos de fibras, apresentando ganhos ambientais de materiais convencionais, reduzindo custos e promovendo novas aplicações.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA BRASIL. **Destinação inadequada de lixo cresce 16% em uma década.** 2020. Disponível em: <https://agenciabrasil-ebc-com-br.cdn.ampproject.org/c/s/agenciabrasil.ebc.com.br/saude/noticia/2020-12/destinacao-inadequada-de-lixo-cresce-16-em-uma-decada?amp>. Acesso em: 27 de abr. 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14044: 2009.** Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASTM D1238. Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer. ASTM Stand, USA, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1520/D1238-13> . Acesso em: 23 ago. 2021.
- ASTM D570. Standard Test Method for Water Absorption of Plastics. ASTM Stand. USA, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1520/D0570-98R10E01>. Acesso em: 18 jan. 2022.
- ASTM D638. Standard Test Method for Water Absorption of Plastics. ASTM Stand. USA, 2014. Disponível em: <https://www.astm.org/d0638-14.html>. Acesso em: 13 jan. 2022.
- AGARWAL, J.; MOHANTY, S.; NAYAK, S. K. Influence of cellulose nanocrystal/sisal fiber on the mechanical, thermal, and morphological performance of polypropylene hybrid composites. **Polymer Bulletin**, v. 78, n. 3, p. 1609–1635, 2020.
- AHMED, S. A.; TIRKES, S.; TAYFUN, U. Reinforcing effect of polyurethane sizing on properties of acrylonitrile–butadiene–styrene composites involving short carbon fiber. **SN Applied Sciences**, v. 2, n. 12, p. 1–9, 2020.
- AHMED, W.; ZANELDIN, E.; AL-MARZOUQI, A.H.; GOCHOO, M.; KHALID, S. Implementing FDM 3D printing strategies using natural fibers to produce biomass composite. **Materials**, v. 13, n. 18, 2020.
- AL-OQLA, F. M.; SAPUAN, S. M. Natural fiber reinforced polymer composites in industrial applications: Feasibility of date palm fibers for sustainable automotive industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 66, p. 347–354, 2014.
- AL-OTAIBI, M. S.; ALOTHMAN, O.Y.; ALRASHED, M.M.; ANIS, A.; NAVEEN, J.; JAWAID, M. Characterization of date palm fiber-reinforced different polypropylene matrices. **Polymers**, v. 12, n. 3, 2020.
- ALHIJAZI, M.; SAFAEI, B.; ZEESHAN, Q.; ASMAEL, M.; EYVAZIAN, A.; QIN, Z. Recent developments in Luffa natural fiber composites: Review. **Sustainability**, v. 12, n. 18, p. 1–25, 2020.

AMIANDAMHEN, S. O.; MEINCKEN, M.; TYHODA, L. Natural fibre modification and its influence on fibre-matrix interfacial properties in biocomposite materials. **Fibers and Polymers**, v. 21, n. 4, p. 677–689, 2020.

ANBUKARASI, K.; KALAISELVAM, S. Study of effect of fibre volume and dimension on mechanical, thermal, and water absorption behaviour of luffa reinforced epoxy composites. **Journal of Materials & Design**, v.66, p. 321-330, 2014.

ANDRADE, L. dos S.; SILVA, N.G.S.; CORTAT, L.I.C.O.; MULINARI, D.R. Approach in Macadamia integrifolia residue based low-density polyethylene composites on mechanical and thermal performance. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 138, n. 26, p. 50613, 2021.

ANGELOPOULOS, P. M.; KENANAKIS, G.; VISKADOURAKIS, Z.; TSAKIRIDIS, P.; VASILOPOULOS, K.C.; KARAKASSIDES, M.A.; TAXIARCHOU, M. Manufacturing of ABS/expanded perlite filament for 3D printing of lightweight components through fused deposition modeling. **Materials Today: Proceedings**, v. 54, p. 14–21, 2021.

ARAUJO, M.J.F.; MULLINARI, D.R. Estudo da biodegradabilidade de compósitos poliméricos reforçados fibras naturais na concepção de composteiras. **Revista Iberoamericana de Polímeros**, v.16, 2015.

ASHOTHAMAN, A.; SUDHA, J.; SENTHILKUMAR, N. A comprehensive review on biodegradable polylactic acid polymer matrix composite material reinforced with synthetic and natural fibers. **Materials Today: Proceedings**, 2021.

ASYRAF, M. R. M.; ISHAK, M.R.; SYAMSIR, A.; NURAZZI, N.M., SABARUDDIN, F.A.; SHAZLEEN, S.S.; NORRAHIM, M.N.F.; RAFIDAH, M.; ILYAS, R.A.; RASHID, M.Z.A.; RAZMAN, M.R. Mechanical properties of oil palm fibre-reinforced polymer composites: a review. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 17, p. 33–65, 2022.

AWAIS, H. NAWAB, Y.; AMJAD, A.; ANJANG, A.; AKIL, M.H.; ABIDIN, M.S.Z. Environmental benign natural fibre reinforced thermoplastic composites: A review. **Composites Part C: Open Access**, v.4, p.100082, 2021.

AWOYERA, P. O.; ADESINA, A. Plastic wastes to construction products: Status, limitations and future perspective. **Case Studies in Construction Materials**, v. 12, p. e00330, 2020.

AZMAN, M. A.; ASYRAF, M.R.M.; KHALINA, A.; PETRU, M.; RUZAIDI, C.M.; SAPUAN, S.M.; WAN NIK, W.B.; ISHAK, M.R.; ILYAS, R.A.; SURIANI, M.J. Natural fiber reinforced composite material for product design: A short review. **Polymers**, v. 13, n. 12, 2021.

BALLA, V. K.; KATE, K.H.; SATYAVOLU, J.; SINGH, P.; TADIMETI, J.G.D. Additive manufacturing of natural fiber reinforced polymer composites: Processing and prospects. **Composites Part B: Engineering**, v. 174, p. 106956, 2019.

BAPTISTA, V. F. A relação entre o consumo e a escassez dos recursos naturais: uma abordagem histórica. **Saúde & Ambiente em Revista**, v. 5, n. 1, p. 8–14, 2010.

BATTISTI, R.; HAFEMANN, E.; CLAUMANN, C.A.; MACHADO, R.A.F.; MARANGONI, C.; Synthesis and characterization of cellulose acetate from royal palm tree agroindustrial waste. **Polymer Engineering and Science**, v. 59, n. 5, p. 891–898, 2019.

BILLAH, K. M. M.; LORENZANA, F.A.R.; MARTINEZ, N.L.; WICKER, R.B.; ESPALIN, D. Thermomechanical characterization of short carbon fiber and short glass fiber-reinforced ABS used in large format additive manufacturing. **Additive Manufacturing**, v. 35, 101299, 2020.

BORA, R. R.; WANG, R.; YOU, F. Waste Polypropylene Plastic Recycling toward Climate Change Mitigation and Circular Economy: Energy, Environmental, and Technoeconomic Perspectives. **Sustainable Chemistry & Engineering**, v.8, n.43, p.16350-16363, 2020.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. **POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS - PNRS**, Brasília, DF, ano 189, 23 dez. 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 13 de abr. 2021.

BUFFA, J. M.; MONDRAGON, G.; CORCUERA, M.A.; ECEIZA, A.; MUCCI, V.; ARANGUREN, M.I. Physical and mechanical properties of a vegetable oil-based nanocomposite. **European Polymer Journal**, v. 98, p. 116–124, 2018.

BYRNE, B.; BEATTIE, J.W.; SONG, C.L.; KAZARIAN, S.G. ATR-FTIR spectroscopy and spectroscopic imaging of proteins. **Vibrational Spectroscopy in Protein Research**, p.1-22, 2020.

CABRALES, H.; ARZOLA, N.; ARAQUE, O. The effects of moisture content, fiber length and compaction time on African oil palm empty fruit bunches briquette quality parameters. **Heliyon**, v. 6, n. 12, p. e05607, 2020.

CAMANI, P. H.; Souza, A.G.; Barbosa, R.F.S.; Zanini, N.C.; Mulinari, D.R.; Rosa, D.S. Comprehensive insight into surfactant modified-PBAT physico-chemical and biodegradability properties. **Chemosphere**, v. 269, p. 128708, 2021.

ÇANTI, E.; AYDIN, M. Effects of micro particle reinforcement on mechanical properties of 3D printed parts. **Rapid Prototyping Journal**, v. 24, n. 1, p. 171–176, 2018.

CAPPUCCI, G. M.; AVOLIO, R.; CARFAGNA, C.; COCCA, M.C.; GENTILE, G.; SCARPELLINI, S.; SPINA, F.; TEALDO, G.; ERRICO, M.E.; FERRARI, A.M. Environmental life cycle assessment of the recycling processes of waste plastics recovered by landfill mining. **Waste Management**, v. 118, p. 68–78, 2020.

CERQUEIRA, F. G.; DE SOUZA, A.C.S.S.; THOMPSON, B.B.; MICHALICHEN, G.; BRITO, G.G.S.; PEREIRA, M.O.F.; KRECZKIUSKI, C.; CANONICO, C.M.; PORRUA, D.A.; BIOLCHI, G.; DIAS, H.M.; ARANCIBIA, I.A.L.; RIBEIRO, J.C.B.; MINOZZO, M.; REIS, M.E.M.; FELIPE, N.A.; KREFTA, S.C.; POTRICH, M.; TESSARO, D.; Educação

Ambiental - Percepções e reflexões pautadas no projeto “Plante Essa Ideia”. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 9, p. e746997710, 6 set. 2020.

CHAROO, N. A.; BARAKH ALI, S.F.; MOHAMED, E.M.; KUTTOLAMADOM, M.A.; OZKAN, T.; KHAN, M.A.; RAHMAN, Z. Selective laser sintering 3D printing—an overview of the technology and pharmaceutical applications. **Drug Development and Industrial Pharmacy**, v. 46, n. 6, p. 869–877, 2020.

CHEN, W.; OLDFIELD, T.L.; CINELLI, P.; RIGHETTI, M.C.; HOLDEN, N.M. Hybrid life cycle assessment of potato pulp valorisation in biocomposite production. **Journal of Cleaner Production**, v. 269, 2020.

CORTAT, L. O.; ZANINI, N.C.; BARBOSA, R.F.S., de SOUZA, A.G.; ROSA, D.S.; MULINARI, D.R. A Sustainable Perspective for Macadamia Nutshell Residues Revalorization by Green Composites Development. **Journal of Polymers and the Environment**, v.29, n. 0123456789, p. 3210-3226, 2021.

COSENZA, J. P.; DE ANDRADE, E. M.; DE ASSUNÇÃO, G. M. A circular economy as an alternative for Brazil’s sustainable growth: Analysis of the national solid waste policy. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 9, n. 1, 2020.

COSMI, F.; DAL MASO, A. A mechanical characterization of SLA 3D-printed specimens for low-budget applications. **Materials Today: Proceedings**, v. 32, part 2, p. 194–201, 2019.

COSTA-TRIGO, I.; OTERO-PENEDO, P.; OUTEIRIÑO, D.; PAZ, A.; DOMÍNGUEZ, J.M.; Valorization of chestnut (*Castanea sativa*) residues: Characterization of different materials and optimization of the acid-hydrolysis of chestnut burrs for the elaboration of culture broths. **Waste Management**, v. 87, p. 472–484, 2019.

COSTA, I. L. M.; PEREIRA, P.H.F.; CLARO, A.M.; AMARAL, N.C.; BARUD, H.S.; RIBEIRO, R.B.; MULINARI, D.R. 3D-printing pen from valorization of pine cone residues as reinforcement in acrylonitrile butadiene styrene (ABS): Microstructure and thermal properties. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, p. 1-20, 2021.

CRESS, A. K.; HUYNH, J.; ANDERSON, E.H.; O’NEIL, R.; SCHNEIDER, Y.; KELES, O. Effect of recycling on the mechanical behavior and structure of additively manufactured acrylonitrile butadiene styrene (ABS). **Journal of Cleaner Production**, v. 279, p. 123689, 2021.

DA LUZ, S. M.; DE SOUSA, V. M. Z. LCA modelling for natural fiber composites. **International Journal of Computer Aided Engineering and Technology**, v. 10, n. 1–2, p. 166–178, 2018.

DANUT MAZURCHEVICI, A.; NEDELCU, D.; POPA, R. Additive manufacturing of composite materials by FDM technology: A review. **Indian Journal of Engineering & Materials Sciences**, v.27, p. 179-192, 2020.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia Eletrônica de Varredura - Aplicações e preparação de amostras** - Materiais Poliméricos, metálicos e

semicondutores. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007. E-book. Disponível em: <https://bibliodigital.unijui.edu.br:8443/xmlui/handle/123456789/1447>. Acesso em: 24 fev. 2022.

DEKKER, E.; ZIJP, M.C.; VAN DE KAMP, M.E.; TEMME, E.H.M.; VAN ZELM, R. A taste of the new ReCiPe for life cycle assessment: consequences of the updated impact assessment method on food product LCAs. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 25, n. 12, p. 2315–2324, 2020.

DIAZ, A. B.; BLANDINO, A.; CARO, I. Value added products from fermentation of sugars derived from agro-food residues. **Trends in Food Science and Technology**, v. 71, p. 52–64, 2018.

DO NASCIMENTO E SILVA ALENCAR, V.; BATISTA, J.M.S.; NASCIMENTO, T.P.; DA CUNHA, M.N.; LEITE, A.C.L. Resíduos Agroindustriais: Uma Alternativa Promissora E Sustentável Na Produção De Enzimas Por Microrganismos. **CIAGRO**, 2020.

DUNNE, R.; DESAI, D.; SADIKU, R. Material characterization of blended sisal-kenaf composites with an ABS matrix. **Applied Acoustics**, v. 125, p. 184–193, 2017.

EAD, A. S.; APPEL, R.; ALEX, N.; AYRANCI, C.; CAREY, J.P. Life cycle analysis for green composites: A review of literature including considerations for local and global agricultural use. **Journal of Engineered Fibers and Fabrics**, v. 16, P. 1-20, 2021.

ERDOGAN, S.; HUNER, U. Physical and Mechanical Properties of PP Composites based on Different Types of Lignocellulosic Fillers. **Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition**, v. 33, n. 6, p. 1298–1307, 2018.

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood. Chemistry: Ultrastructure: Reactions**. New York: Walter de Gruyter, p. 188, 1989.

FERREIRA, R. T. L.; AMATTE, I.C.; DUTRA, T.A.; BURGER, D. Experimental characterization and micrography of 3D printed PLA and PLA reinforced with short carbon fibers. **Composites Part B: Engineering**, v. 124, p. 88–100, 2017.

FILGUEIRA, D.; HOLMEN, S.; MELBO, J.K.; MOLDES D.; ECHTERMEYER, A.T.; CHINGA-CARRACO, G. 3D printable filaments made of biobased polyethylene biocomposites. **Polymers**, v. 10, n. 3, 2018.

IORE, V.; SCALICI, T.; NICOLETTI, F.; VITALE, G.; PRESTIPINO, M.; VALENZA, A. A new eco-friendly chemical treatment of natural fibers: Effect of sodium bicarbonate on properties of sisal fiber and its epoxy composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 85, p. 150–160, 2016.

FONSECA, L. P.; WALDMAN, W. R.; DE PAOLI, M. A. ABS composites with cellulose fibers: Towards fiber-matrix adhesion without surface modification. **Composites Part C: Open Access**, v. 5, p. 100142, 2021.

GHOLAMPOUR, A.; OZBAKKALOGLU, T. A review of natural fiber composites: properties, modification and processing techniques, characterization, applications. **J Mater SCI**, v. 55, p. 829-892, 2020.

GIRDIS, J.; GAUDION, L.; PROUST, G.; LOSCHKE, S.; DONG, A. Rethinking Timber: Investigation into the Use of Waste Macadamia Nut Shells for Additive Manufacturing. **Journal of Materials Science**, v. 69, n. 3, p. 575–579, 2017.

GUECHE, Y. A.; SANCHEZ-BALLESTER, N.M.; CAILLEAUX, S.; BATAILLE, B.; SOULAIROL, I. Selective laser sintering (SIS), a new chapter in the production of solid oral forms (SOFs) by 3D printing. **Pharmaceutics**, v. 13, n. 8, 2021.

HAFEMANN, E.; BATTISTI, R.; MARANGONI, C.; MACHADO, A.F. Valorization of royal palm tree agroindustrial waste by isolating cellulose nanocrystals. **Carbohydrate Polymers**, v. 218, p. 188–198, 2019.

HARRIS, M.; POTGIETER, J.; ARCHER, R.; ARIF, K.M. Effect of material and process specific factors on the strength of printed parts in fused filament fabrication: A review of recent developments. **Materials**, v. 12, n. 10, 2019.

HARRIS, M.; POTGIETER, J.; RAY, S.; ARCHER, R.; ARIF, K.M. Preparation and characterization of thermally stable ABS/HDPE blend for fused filament fabrication. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 35, n. 2, p. 230–240, 2020.

HATTI-KAUL, R.; NILSSON, L.J.; ZHANG, B.; REHNBERG, N.; LUNDMARK, S. Designing Biobased Recyclable Polymers for Plastics. **Trends in Biotechnology**, v. 38, p. 50-67, 2019.

HORST, D. J.; DE ANDRADE JUNIOR, P.P.; DUVOISIN, C.A.; VIEIRA, R.A. Fabrication of conductive filaments for 3d-printing: Polymer nanocomposites. **Biointerface Research in Applied Chemistry**, v. 10, n. 6, p. 6577–6586, 2020.

HU, Q.; DUAN, Y.; ZHANG, H.; LIU, D.; YAN, B.; PENG, F. Manufacturing and 3D printing of continuous carbon fiber prepreg filament. **Journal of Materials Science**, v. 53, n. 3, p. 1887–1898, 2018.

IBGE – **Produção Agrícola**. Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1613#resultado>. Acesso em: 17 Fev. 2022.

IPEA – **Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada**, Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/ods/ods13.html>. Acesso em: 20 mar. 2022.

ILYAS, R. A.; ZUHRI, M.Y.M.; AISYAH, H.A.; ASYRAF, M.R.M.; HASSAN, S.A.; ZAINUDIN, E.S.; SAPUAN, S.M.; SHARMA, S.; BANGAR, S.P.; JUMAIDIN, R.; NAWAB, Y.; FAUDZI, A.A.; ABRAL, H.; ASROFI, M.; SYAFRI, M.; SARI, N.H. Natural Fiber-Reinforced Polylactic Acid, Polylactic Acid Blends and Their Composites for Advanced Applications. **Polymers**, v. 14, n. 1, p. 1-39, 2022.

JESUAROCKIAM, N.; JAWAID, M.; ZAINUDIN, E.S.; SULTAN, M.T.H.; YAHAYA, R. Enhanced thermal and dynamic mechanical properties of synthetic/natural hybrid composites with graphene nanoplatelets. **Polymers**, v. 11, n. 7, p. 1-18, 2019.

JI, M.; LI, F.; LI, J.; LI, J.; ZHANG, C.; SUN, K.; GUO, Z. Enhanced mechanical properties, water resistance, thermal stability, and biodegradation of the starch-sisal fiber composites with various fillers. **Materials and Design**, v. 198, p. 109373, 2021.

JUMAIDIN, R.; KHIRUDDIN, M.A.A.; SAIDI, Z.A.S.; SAPUAN, S.M.; ILYAS, R.A. Effect of cogon grass fibre on the thermal, mechanical and biodegradation properties of thermoplastic cassava starch biocomposite. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 146, p. 746–755, 2020.

KARIMAH, A.; RIDHO, M.R.; MUNAWAR, S.S.; ADI, D.S.; ISMADI; DAMAYANTI, R.; SUBIYANTO, B.; FATRIASARI, W.; FUDHOLI, A. A review on natural fibers for development of eco-friendly bio-composite: characteristics, and utilizations. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 13, p. 2442–2458, 2021.

KOOHESTANI, B.; DARBAN, A.K.; MOKHTARI, P.; YILMAZ, E.; DAREZERESHKI, E. Comparison of different natural fiber treatments: a literature review. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 16, n. 1, p. 629–642, 2019.

KUMAR, R.; SHARMA, H.; SARAN, C.; TRIPATHY, T.S.; SANGWAN, K.S.; HERRMANN, C. A Comparative Study on the Life Cycle Assessment of a 3D Printed Product with PLA, ABS & PETG Materials. **Procedia CIRP**, v. 107, p. 15–20, 2022.

KUMAR, R. M.; RAJINI, N.; KUMAR, T.S.M.; MAYANDI, K.; SIENGCHIN, S.; ISMAIL, S.O. Thermal and structural characterization of acrylonitrile butadiene styrene (ABS) copolymer blended with polytetrafluoroethylene (PTFE) particulate composite. **Materials Research Express**, v. 6, n. 8, 2019.

KUMAR, R.; SINGH, R.; FARINA, I. On the 3D printing of recycled ABS, PLA and HIPS thermoplastics for structural applications. **PSU Research Review**, v. 2, n. 2, p. 115–137, 2018.

LA ROSA, A. D.; COZZO, G.; LATTERI, A.; MANCINI, G.; RECCA, A.; CICALA, G. A comparative life cycle assessment of a composite component for automotive. **Chemical Engineering Transactions**, v. 32, p. 1723–1728, 2013.

LA ROSA, A. D.; CICALA, G. LCA of fiber-reinforced composites. **Handbook of Life Cycle Assessment (LCA) of Textiles and Clothing**, p. 301–323, 2015.

LEE, J. Y.; AN, J.; CHUA, C. K. Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials. **Applied Materials Today**, v. 7, p. 120–133, 2017.

LEKURWALE, S.; KARANWAD, T.; BANERJEE, S. Selective laser sintering (SLS) of 3D printlets using a 3D printer comprised of IR/red-diode laser. **Annals of 3D Printed Medicine**, v. 6, p. 100054, 2022.

LEYNAUD KIEFFER CURRAN, L. M. C.; MAI OHAM, L.T.; SALE, K.L.; SIMMONS, B.A.; Review of advances in the development of laccases for the valorization of lignin to enable the production of lignocellulosic biofuels and bioproducts. **Biotechnology Advances**, v. 54, p. 107809, 2022.

LI, J.; CHEN, F.; YANG, L.; JIANG, L.; DAN, Y. FTIR analysis on aging characteristics of ABS/PC blend under UV-irradiation in air. **Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, v. 184, p. 361–367, 2017.

LI, J.; WU, C.; CHU, P.K.; GELINSKY, M. 3D printing of hydrogels: Rational design strategies and emerging biomedical applications. **Materials Science and Engineering R: Reports**, v. 140, p. 100543, 2020a.

LI, M.; PU, Y.; THOMAS, V.M.; YOO, C.G.; OZCAN, S.; DENG, Y.; NELSON, K.; RAGAUSKAS, A.J. Recent advancements of plant-based natural fiber-reinforced composites and their applications. **Composites Part B: Engineering**, v. 200, p. 108254, 2020b.

LUCENIUS, J.; VALLE-DELGADO, J.J.; PARIKKA, K.; OSTERBERG, M. Understanding hemicellulose-cellulose interactions in cellulose nanofibril-based composites. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 555, p. 104–114, 2019.

M, PADMAKUMAR. Additive Manufacturing of Tungsten Carbide Hardmetal Parts by Selective Laser Melting (SLM), Selective Laser Sintering (SLS) and Binder Jet 3D Printing (BJ3DP) Techniques. **Lasers in Manufacturing and Materials Processing**, v. 7, n. 3, p. 338–371, 2020.

MA, S.; FU, S.; ZHAO, S.; HE, P.; MA, G.; WANG, M.; JIA, D.; ZHOU, Y. Direct ink writing of geopolymer with high spatial resolution and tunable mechanical properties. **Additive Manufacturing**, v. 46, p. 102202, 2021.

MACHMUDAH, S.; WAHYUDIONO, KANDA, H.; GOTO, M.; Hydrolysis of Biopolymers in Near-Critical and Subcritical Water. Water Extraction of Bioactive Compounds, p. 69-109, 2017.

MADKOUR, S. A.; TIRKES, S.; TAYFUN, U. Development of barite-filled acrylonitrile butadiene styrene composites: Mechanical, thermal, melt-flow and morphological characterizations. **Applied Surface Science Advances**, v. 3, p. 100042, 2021.

MAHDI, E.; OCHOA, D.R.H.; VAZIRI, A.; DEAN, A.; KUCUKVAR, M. Khalasa date palm leaf fiber as a potential reinforcement for polymeric composite materials. **Composite Structures**, v. 265, p. 113501, 2021.

MAIA, L. S.; ZANINI, N.C.; CLARO, A.M.; DO AMARAL, N.C.; BARUD, H.S.; MULINARI, D.R. Eco-friendly foams of castor oil based-polyurethane with Artemisia residue fillers for discarded vegetable oil sorption. **Journal of Applied Polymer Science**, p. 51259, 2021a.

MAIA, L. S.; DA SILCA, A.I.C.; CARNEIRO, E.S.; MONTICELLI, F.M.; PINHATI, F.R.; MULINARI, D.R. Activated carbon from palm fibers used as an adsorbent for

methylene blue removal. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 29, n. 4, p. 1162–1175, 2021b.

MALAVOLTA, A. T.; MÜLLER, Á. de G. Estudo das tensões residuais e distorções de peças produzidas por impressão FDM utilizando o método dos elementos. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 6, n. 5, p. 0717–0722, 2020.

MANIK, T. N.; MASHURI; DARMINTO. Study on formalization of oil palm trunk modified by melamine formaldehyde. **Materials Science Forum**, v. 966, p. 151–156, 2019.

MARTI, L.; PUERTAS, R. Influence of environmental policies on waste treatment. **Waste Management**, v. 126, p. 191–200, 2021.

MARTINS, J. N.; KLOHN, T.G.; BIANCHI, O.; FIORIO, R.; FREIRE, E. Dynamic mechanical, thermal, and morphological study of ABS/textile fiber composites. **Polymer Bulletin**, v. 64, n. 5, p. 497–510, 2010.

MARTINS, L. S.; SILVA, N.G.S.; CLARO, A.M.; AMARAL, N.C.; BARUD, H.S.; MULINARI, D.R. Insight on açai seed biomass economy and waste cooking oil: Eco-sorbent castor oil-based. **Journal of Environmental Management**, v. 293, p. 112803, 2021.

MARTINS, L. S.; MONTICELLI, F. M.; MULINARI, D. R. Influence of the granulometry and fiber content of palm residues on the diesel S-10 oil sorption in polyurethane /palm fiber biocomposites. **Results in Materials**, v. 8, p. 100143, 2020.

MAZZANTI, V.; MALAGUTTI, L.; MOLLIKA, F. FDM 3D printing of polymers containing natural fillers: A review of their mechanical properties. **Polymers**, v.11, n. 7, p. 1094, 2019.

MD. TAHIR, P.; LIEW W.-P.-P.; LEE, S.Y.; ANG, A.F.; LEE, S.H.; MOHAMED, R.; HALIS, R. Diversity and characterization of lignocellulolytic fungi isolated from oil palm empty fruit bunch, and identification of influencing factors of natural composting process. **Waste Management**, v. 100, p. 128–137, 2019.

MIKULA, K.; SKRZYPCZAK, D.; IZYDORCZYK, G.; WARCHOL, J.; MOUSTAKAS, K.; CHOJNACKA, K.; WITEK-KROWIAK, A. 3D printing filament as a second life of waste plastics—a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 10, p. 12321–12333, 2021.

MILOSEVIC, M.; STOOF, D.; PICKERING, K. L. Characterizing the mechanical properties of fused deposition modelling natural fiber recycled polypropylene composites. **Journal of Composites Science**, v. 1, n. 1, 2017.

MONTICELI, F. M.; ORNAGHI JUNIOR, H.L.; VOORWALD, H.J.C.; CIOFFI, M.O.H. Three-dimensional porosity characterization in carbon/glass fiber epoxy hybrid composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 125, p. 105555, 2019.

MULINARI, D. R.; GUEDES, J. R.; SIMBA, B. G. Low density polyethylene composites reinforced with Australian King Palm fibers: mechanical and thermal properties. **Polymer Bulletin**, v. 74, n. 11, p. 4549–4559, 2017.

NABAVI-PELESARAEI, A.; BAYAT, R.; HOSSEINZADEH-BANDBAFTHA, H.; AFRASYABI, H.; CHAU, K.W. Modeling of energy consumption and environmental life cycle assessment for incineration and landfill systems of municipal solid waste management - A case study in Tehran Metropolis of Iran. **Journal of Cleaner Production**, v. 148, p. 427–440, 2017.

NABI, G.; MALIK, N.; TAHIR, M.B.; RAZA, W.; RIZWAN, M.; MARAJ, M.; SIDDIQA, A.; AHMED, R.; TANVEER, M. Synthesis of graphitic carbon nitride and industrial applications as tensile strength reinforcement agent in red Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS). **Physica B: Physics of Condensed Matter**, v. 602, p. 412556, 2021.

NABIPOUR, M.; AKHOUNDI, B. An experimental study of FDM parameters effects on tensile strength, density, and production time of ABS/Cu composites. **Journal of Elastomers and Plastics**, v. 53, n. 2, p. 146–164, 2021.

NEHER, B.; GAFUR, MD.A.; AL-MANSUR, M.A.; BHUIYAN, MD.M.R.; QADIR, MD.R.; AHMED, F. Investigation of the surface morphology and structural characterization of palm fiber reinforced acrylonitrile butadiene styrene (PF-ABS) Composites. **Materials Sciences and Applications**, v. 5, n. 6, p. 378–386, 2014.

NEHER, B.; BHUIYAN, MD.M.R.; KABIR, H.; GAFUR, MD.A.; QADIR, MD.R.; AHMED, F. Thermal properties of palm fiber and palm fiber-reinforced ABS composite. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 124, n. 3, p. 1281–1289, 2016.

NEHER, B.; NOVA, N.T.; HOSSAIN, R.; GAFUR, M.A.; AHMED, F. Fabrication and characterization on physico-mechanical and structural properties of sawdust reinforced acrylonitrile butadiene styrene (ABS) composites. **Materials Sciences and Applications**, v. 11, n. 09, p. 644–658, 2020.

NELSON, J. W.; RIDDLE, T. W. Comparison of analytical assessment of composite properties utilizing short discontinuous bamboo fibers. **Composites Part C: Open Access**, v. 8, p. 100262, 2022.

NGAOWTHONG, C.; BORUVKA, M.; BEHALEK, L.; LENFEL, P.; SVEC, M.; DANGTUNGEE, R.; SIENGCHIN, S.; RANGAPPA, S.M.; PARAMESWARANPILLAI, J. Recycling of sisal fiber reinforced polypropylene and polylactic acid composites: Thermo-mechanical properties, morphology, and water absorption behavior. **Waste Management**, v. 97, p. 71–81, 2019.

NGUYEN, N. A.; BOWLAND, C. C.; NASKAR, A. K. A general method to improve 3D-printability and inter-layer adhesion in lignin-based composites. **Applied Materials Today**, v. 12, p. 138–152, 2018.

OLIVEIRA, Daniel Magalhães de. **Influência do tratamento físico da fibra de coco nas propriedades mecânicas do biocompósito com matriz de poliéster insaturada**. 2018. Dissertação de Mestrado para obtenção do título de Mestre em

Engenharia Mecânica na área de Materiais. Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, do Campus de Guaratinguetá, 2018.

OLIVEIRA DE, G. C.; PEREIRA, L.C.; SILVA, A.L.; SEMAAN, F.S.; CASTILHO, M.; PONZIO, E.A. Acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) composite electrode for the simultaneous determination of vitamins B2 and B6 in pharmaceutical samples. **Journal of Solid State Electrochemistry**, v. 22, n. 5, p. 1607–1619, 2018.

OLIVEIRA, A.B.; LEITE, R.M.V.B.C.; JUNIOR, A.A.B.; SEIXAS, C.D.S.; SOARES, H. Coleção 500 perguntas, 500 respostas. **Embrapa**, p. 274, 2019.

OSMAN, M. A.; ATIA, M. R. A. Investigation of ABS-rice straw composite feedstock filament for FDM. **Rapid Prototyping Journal**, v. 24, n. 6, p. 1067–1075, 2018.

PAKKANEN, J.; MANFREDI, D.; MINETOLA, P.; IULIANO, L. About the use of recycled or biodegradable filaments for sustainability of 3D printing: State of the art and research opportunities. **International conference on sustainable design and manufacturing**, v. 68, p. 776-785, 2017.

PARVATKER, A. G.; ECKELMAN, M. J. Comparative Evaluation of Chemical Life Cycle Inventory Generation Methods and Implications for Life Cycle Assessment Results. **ACS Sustainable Chemistry and Engineering**, v. 7, n. 1, p. 350–367, 2019.

PILGAR, C. M.; FERNANDEZ, A.M.; LUCARINI, S.; SEGURADO, J. Effect of printing direction and thickness on the mechanical behavior of SLM fabricated Hastelloy-X. **International Journal of Plasticity**, v. 153, p. 103250, 2022.

PINHO, A. C.; AMARO, A. M.; PIEDADE, A. P. 3D printing goes greener: Study of the properties of post-consumer recycled polymers for the manufacturing of engineering components. **Waste Management**, v. 118, p. 426–434, 2020.

PONSAR, H.; WIEDEY, R.; QUODBACH, J. Hot-melt extrusion process fluctuations and their impact on critical quality attributes of filaments and 3d-printed dosage forms. **Pharmaceutics**, v.12, p.1–15, 2020.

PONSURIYAPRAKASH, S.; UDHAYAKUMAR, P.; PANDIYARAJAN, R. Experimental Investigation of ABS Matrix and Cellulose Fiber Reinforced Polymer Composite Materials. **Journal of Natural Fibers**, v. 118, p. 426-434, 2020.

PRABHU, L.; KRISHNARAJ, V.; SATHISH, S.; GOKULKUMAR, S.; KARTHI, N.; RAJESHKUMAR, L.; BALAJI, D.; VIGNESHKUMAR, N.; ELANGO, K.S. A review on natural fiber reinforced hybrid composites: Chemical treatments, manufacturing methods and potential applications. **Materials Today: Proceedings**, v. 45, p. 8080–8085, 2021.

PRAVEENA, B. A.; KUMAR, S.V.; MANJUNATH, H.N.; SACHIN, B.; YADAV, S.P.S.; LOCHAN, B.R.; KUMAR, A.G.L.; REDDY, J.S. Investigation of moisture absorption and mechanical properties of natural fiber reinforced polymer hybrid composite. **Materials Today: Proceedings**, v. 45, p. 8219–8223, 2021.

PROGRAMA LIXÃO ZERO, Brasília, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/meio-ambiente-e-clima/2021/02/programa-lixao-zero-reduziu-em-17-a-quantidade-de-lixoes-em-2020>. Acesso em: 08 dez. 2021.

RAJESHKUMAR, G.; SESHADRI, S.A.; DEVNANI, G.L.; SANJAY, M.R.; SIENGHEIN, S.; MARAN, J.P.; AL-DHABI, N.A.; KARUPPIAH, P.; MARIADHAS, V.A.; SIVARAJASEKAR, N.; ANUF, A.R. Environment friendly, renewable and sustainable poly lactic acid (PLA) based natural fiber reinforced composites – A comprehensive review. **Journal of Cleaner Production**, v. 310, P. 127483, 2021.

RAMADA RODILLA, J. M.; CERRADA, B.C.; PUJADAS, C.S.; DELCLOS, G.; BENAVIDES, F.G. Fiber burden and asbestos-related diseases: an umbrella review. **Gaceta Sanitaria**, v. 36, n. 2, p. 173–183, 2022.

RAMESH, M.; DEEPA, C.; SELVAN, M.T.; RAJESHKUMAR, L.; BALAJI, D.; BHUVANESWARI, V. Mechanical and water absorption properties of Calotropis gigantea plant fibers reinforced polymer composites. **Materials Today: Proceedings**, v. 46, n. 9, p. 3367-3372, 2021.

RAMOS, S. P.; SANTOS, S.L.S.; OLIVEIRA, F.A. Lei da política nacional de resíduos sólidos: análise conceitual de destinação e disposição adequadas de resíduos sólidos. **Revista Interdisciplinar Científica Aplicada**, v.14, n.1, p.1-14, 2020.

RES, D. O. S.; BRASIL, L. N. O. Panorama 2021. 2021, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. São Paulo: Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, versão online. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: 08 dez. 2021.

RIGAMONTI, L.; TAELEMAN, S.E.; HUYSVELD, S.; SFEZ, S.; RAGAERT, K.; DEWULF, J. A step forward in quantifying the substitutability of secondary materials in waste management life cycle assessment studies. **Waste Management**, v. 114, p. 331–340, 2020.

ŠAFKA, J.; ACKERMANN, M.; BOBEK, J.; SEIDL, M.; HABR, J.; BEHALEK, L.; Use of composite materials for FDM 3D print technology. **Materials Science Forum**, v. 862, p. 174–181, 2016.

SEDDIQI, H.; OLIAEI, E.; HONARKAR, H.; JIN, J.; GEONZON, L.C.; BACABAC, R.G.; KLEIN-NULEND, J. Cellulose and its derivatives: towards biomedical applications. **Cellulose**, v. 28, p. 1893-1931, 2021.

SEZER, H. K.; EREN, O. FDM 3D printing of MWCNT re-inforced ABS nano-composite parts with enhanced mechanical and electrical properties. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 37, p. 339–347, 2019.

SH. AL-OTAIBI, M.; ALOTHMAN, O.Y.; ALRASHED, M.M.; ANIS, A.; NAVEEN, J.; JAWAID, M. Characterization of date palm fiber-reinforced different polypropylene matrices. **Polymers**, v. 12, n. 3, p. 597, 2020.

SILVA, I. de O.; TAGLIAFERRO, E. R.; OLIVEIRA, A. J. de. Gerenciamento dos resíduos sólidos domiciliares no município de Jales – SP e sua relação para com a Política nacional de resíduos sólidos (PNRS). **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 1, p. 11475–11499, 2021.

SINGH, R.; GARG, H.; SINGH, S. Process capability comparison of fused deposition modelling for ABS and Fe-Nylon (6) feedstock filaments. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 2, p. 4258–4268, 2018.

SOUSA, T. A. de; HABIBE, A. F.; MULINARI, D. R. Characterization of palm fibers and foundry residue for briquettes production. **Cadernos UniFOA**, v. 7, p. 61–67, 2012.

SYAFIQAZ NOR ARMAN, N.; CHEN, R.S.; AHMAD, S. Review of state-of-the-art studies on the water absorption capacity of agricultural fiber-reinforced polymer composites for sustainable construction. **Construction and Building Materials**, v. 302, p. 124174, 2021.

TEKINALP, H. L.; KUNC, V.; VELEZ-GARCIA, G.M.; DUTY, C.E.; LOVE, L.J.; NASKAR, A.K.; BLUE, C.A.; OZCAN, S. Highly oriented carbon fiber-polymer composites via additive manufacturing. **Composites Science and Technology**, v. 105, p. 144–150, 2014.

THYAVIHALLI GIRIJAPPA, Y. G.; RANGAPPA, S.M.; PARAMESWARANPILLAI, J.; SIENGCHIN, S. Natural fibers as sustainable and renewable resource for development of eco-friendly composites: A comprehensive review. **Frontiers in Materials**, v. 6, p. 1–14, 2019.

VÄISÄNEN, T.; DAS, O.; TOMPPA, L. A review on new bio-based constituents for natural fiber-polymer composites. **Journal of Cleaner Production**, v. 149, p. 582–596, 2017.

WANG, K.; LI, S.; RAO, Y.; WU, Y.; PENG, Y.; YAO, S.; ZHANG, H.; AHZI, S. Flexure behaviors of ABS-based composites containing carbon and Kevlar fibers by material extrusion 3D printing. **Polymers**, v. 11, n. 11, p. 1–12, 2019.

WANG, Y.; XU, Z.; WU, D.; BAI, J.; Current status and prospects of polymer powder 3D printing technologies. **Materials**, v. 13, n. 10, p. 2406, 2020.

WICKRAMASINGHE, S.; DO, T.; TRAN, P. FDM-based 3D printing of polymer and associated composite: A review on mechanical properties, defects and treatments. **Polymers**, v. 12, n. 7, p. 1529, 2020.

WIEBECK, H.; HARADA, J.; **Plásticos de Engenharia Tecnologia e Aplicações**. 2005. Artliber, 2005, p.56-62.

Wikipédia. **Acrilonitrila butadieno estireno**. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Acrilonitrila_butadieno_estireno#/media/Ficheiro:Polimerizacao_do_ABS.png. Acesso em: 31 de mai. 2022.

XU, X.; GOYANES, A.; TRENFELD, S.J.; DIAZ-GOMEZ, L.; ALVAREZ-LORENZO, C.; GAISFORD, S.; BASIT, A.W. Stereolithography (SLA) 3D printing of a bladder device for intravesical drug delivery. **Materials Science and Engineering C**, v. 120, p. 111773, 2021.

YASHAS GOWDA, T. G.; SANJAY, M.R.; BHAT, K.S.; MADHU, P.; SENTHAMARAIKANNAN, P.; YOGESHA, B. Polymer matrix-natural fiber composites: An overview. **Cogent Engineering**, v. 5, n. 1, 2018.

ZANINI, N. C.; BARBOSA, R.F.S.; DE SOUZA, A.G.; ROSA, D.S.; MULINARI, D.R. Revaluation of Australian palm residues in polypropylene composites: Statistical influence of fiber treatment. **Journal of Composite Materials**, v. 55, n. 6, p. 813–826, 2021a.

ZANINI, N. C.; DE SOUZA, A.G.; BARBOSA, R.F.S.; ROSA, D.S.; MULINARI, D.R. Eco-friendly composites of polyurethane and sheath palm residues. **Journal of Cellular Plastics**, v. 58, n. 1, p. 139-158, 2021b.

ZENNI, R. D. S.; HELM, C. V.; TAVARES, L. B. B. Cascas do processamento de palmito para uso na alimentação humana: Uma abordagem socioambiental. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 7, n. 2, p. 276-299, 2018.

ZHANG, B.; JIA, L.; TIAN, M.; NING, N.; ZHANG, L.; WANG, W. Surface and interface modification of aramid fiber and its reinforcement for polymer composites: A review. **European Polymer Journal**, v. 147, p. 110352, 2021.

ZHOU, Y.; LU, H.; WANG, G.; WANG, J.; LI, W. Voxelization modelling based finite element simulation and process parameter optimization for fused filament fabrication. **Materials and Design**, v. 187, p. 108409, 2020.

ZHU, J.; CHEN, Y.; YU, H.Y.; GUAN, Y.; ZHOU, Y.; YANG, X.; ZOU, Z.Y.; TAM, K.C. Comprehensive Insight into Degradation Mechanism of Green Biopolyester Nanocomposites Using Functionalized Cellulose Nanocrystals. **ACS Sustainable Chemistry and Engineering**, v. 7, n. 18, p. 15537–15547, 2019.

ZOUNGRANAN, Y.; LYNDIA, E.; DOBI-BRICE, K.K.; TCHIRIOUA, E.; BAKARY, C.; YANNICK, D.D. Influence of natural factors on the biodegradation of simple and composite bioplastics based on cassava starch and corn starch. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 8, n. 5, p. 104396, 2020.