

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 05/06/2026.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP

LUÍS GUILHERME LEITE FERNANDES

**DESENVOLVIMENTO DE BIOCMPÓSITOS MECANICAMENTE VIÁVEIS
PARA A APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA**

BOTUCATU - SP

2024

LUÍS GUILHERME LEITE FERNANDES

**DESENVOLVIMENTO DE BIOCAMPÓSITOS MECANICAMENTE VIÁVEIS
PARA A APLICAÇÃO INDÚSTRIA AUTOMOTIVA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia do Instituto de Biociências - Campus Botucatu da Universidade Estadual Paulista, como requisito obrigatório para a obtenção do título de Mestre.

Orientadora: Ivana Cesarino Leão

Co-orientador: Alcides Lopes Leão

BOTUCATU - SP

2024

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉC. AQUIS. TRATAMENTO DA INFORM.
DIVISÃO TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - CÂMPUS DE BOTUCATU - UNESP

BIBLIOTECÁRIA RESPONSÁVEL: ROSANGELA APARECIDA LOBO-CRB 8/7500

Fernandes, Luís Guilherme Leite.

Desenvolvimento de biocompósitos mecanicamente viáveis
para a aplicação na indústria automotiva / Luís Guilherme
Leite Fernandes. - Botucatu, 2024

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista
(UNESP), Instituto de Biociências, Botucatu

Orientador: Ivana Cesarino Leão

Coorientador: Alcides Lopes Leão

Capes: 90300009

1. Bambu. 2. Resinas compostas. 3. Eucalipto. 4. Sisal.

Palavras-chave: Bambu; Compósitos; Eucalipto; Fibras
naturais; Sisal.

ATA DA DEFESA EM SESSÃO FECHADA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE LUÍS GUILHERME LEITE FERNANDES, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOTECNOLOGIA, DO INSTITUTO DE BIOCIÊNCIAS - CÂMPUS DE BOTUCATU.

Aos 05 dias do mês de junho do ano de 2024, às 14:00 horas, no(a) Sala de Seminários do LACEN - FCA, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de LUÍS GUILHERME LEITE FERNANDES, intitulada **Desenvolvimento de biocompósitos mecanicamente viáveis para a aplicação indústria automotiva**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Profa. Dra. IVANA CESARINO LEÃO (Orientador(a) - Participação Presencial) do(a) Depto. de Bioprocessos e Biotecnologia / FCA/Botucatu - Unesp, Profa. Dra. CARLA DOS SANTOS RICCARDI (Participação Presencial) do(a) Depto. de Bioprocessos e Biotecnologia / FCA/Botucatu - Unesp, Prof. Dr. RAFAEL PLANA SIMÕES (Participação Presencial) do(a) Depto. de Bioprocessos e Biotecnologia / FCA/Botucatu - Unesp. Após a exposição pelo mestrando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: APROVADO . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Profa. Dra. IVANA CESARINO LEÃO

Ivana Cesarino

AGRADECIMENTOS

A execução desse trabalho não seria possível sem o apoio de várias pessoas e entidades, que contribuíram das mais diversas formas para que tudo ocorresse da melhor forma possível. Agradeço aos professores Ivana Cesarino e Alcides Leão que, mesmo sem me conhecerem pessoalmente, me abraçaram e me colocaram a frente deste projeto incrível. Agradeço aos meus pais, Guilherme e Edileuza, por todo o apoio e incentivo prestado ao longo de toda a minha trajetória acadêmica e durante o mestrado, mesmo nos momentos mais difíceis.

Sou grato também a toda a equipe do laboratório Residual, por toda a ajuda e pelos anos de companheirismo. Todos contribuíram para que a jornada fosse mais leve e que o conhecimento fosse construído em conjunto, na medida do possível.

Por fim, agradeço à Volkswagen, responsável pelo financiamento do projeto, e à Fepaf e à Auin, como agências de fomento de parcerias público-privadas e das quais fui bolsista durante este período.

RESUMO

A descoberta dos plásticos como o polipropileno moldou a forma de consumo, presente até os dias de hoje na forma de plásticos de uso único. Contudo, da mesma forma em que os plásticos impactaram o mercado, os impactos ambientais resultantes dessa exploração se fazem presentes e constituem cada vez mais uma preocupação para a humanidade. Medidas como reciclagem, reutilização e alternativas sustentáveis têm sido cada vez mais valorizadas. Neste contexto, polímeros reforçados com fibras naturais surgem como alternativa aos materiais tradicionais como a fibra de vidro, devido ao seu menor impacto ambiental, menor densidade e boas propriedades mecânicas. O presente trabalho tem como motivação o desenvolvimento de compósitos à base de fibras naturais de bambu, eucalipto e sisal, com matriz polimérica de copolímero de polipropileno para a fabricação de peças automotivas. As formulações foram desenvolvidas com teor de 20 e 40% de fibras naturais, além de outros aditivos pertinentes, como agente compatibilizante, retardante de chamas, pigmento e modificador de impacto. A metodologia de preparo dos compósitos inclui a pesagem dos componentes, mistura mecânica, homogeneização, moagem e injeção dos corpos de prova. Os ensaios mecânicos realizados foram os ensaios de tração, de flexão, de resistência ao impacto Izod e os de dureza *Shore D*, seguindo as determinações das respectivas normas ASTM. Os resultados encontrados foram analisados um a um, comparando-se as propriedades das composições com as de um material de referência fornecido pela indústria, por meio de testes estatísticos adequados. Os resultados apontaram diferenças estatísticas significativas entre as composições e os materiais de referência na grande maioria das análises. As composições mostraram bons resultados para os ensaios de resistência à tração, à flexão e dureza, mas foram inferiores nos ensaios de resistência ao impacto. No que se refere à processabilidade, as fibras de bambu e de eucalipto não apresentaram dificuldades expressivas. As fibras de sisal, entretanto, se mostraram desafiadoras durante as etapas de fabricação.

Palavras-chave: Compósitos; Fibras naturais; Bambu; Eucalipto; Sisal; Indústria automotiva

ABSTRACT

The discovery of plastics like polypropylene shaped the way of consumption, which persists to this day in the form of single-use plastics. However, just as plastics impacted the market, the resulting environmental impacts of this exploitation are evident and increasingly concerning for humanity. Measures such as recycling, reuse, and sustainable alternatives have been increasingly valued. In this context, polymers reinforced with natural fibers emerge as an alternative to traditional materials like fiberglass due to their lower environmental impact, lower density, and good mechanical properties. This study is motivated by the development of composites based on natural fibers of bamboo, eucalyptus, and sisal, with a polypropylene copolymer matrix for the manufacture of automotive parts. The formulations were developed with 20% and 40% natural fiber content, in addition to other relevant additives such as a compatibilizer, flame retardant, pigment, and impact modifier. The methodology for preparing the composites includes weighing the components, mechanical mixing, homogenization, milling, and injection molding of the test specimens. The mechanical tests conducted were tensile, flexural, Izod impact resistance, and Shore D hardness tests, following the determinations of the respective ASTM standards. The results were analyzed individually, comparing the properties of the compositions with those of a reference material provided by the industry, through appropriate statistical tests. The results indicated statistically significant differences between the compositions and the reference materials in the vast majority of analyses. The compositions showed good results in the tensile, flexural, and hardness tests but were inferior in the impact resistance tests. Regarding processability, bamboo and eucalyptus fibers did not present significant difficulties. Sisal fibers, however, proved challenging during the manufacturing stages.

Keywords: Composites; Natural fibers; Bamboo; Eucalyptus; Sisal; Automotive industry.

SUMÁRIO

1. Introdução.....	5
2. Objetivos.....	11
2.1. Objetivo geral	11
2.2. Objetivos específicos.....	11
3. Revisão bibliográfica	11
3.1. Polímeros e EPR	11
3.2. Aditivos	13
3.3. Modificador de impacto.....	16
3.4. Fibras naturais.....	17
4. Materiais e métodos.....	20
4.1. Materiais	20
4.2. Composições e Etapas do Trabalho	24
4.3. Processamento e fabricação.....	27
4.4. Ensaio mecânicos.....	31
5. Resultados e discussão	34
5.1. Primeira Etapa.....	35
5.2. Segunda Etapa.....	60
5.3. Terceira Etapa	64
6. Conclusão.....	86
7. Sugestões para trabalhos futuros.....	89

8. Referências bibliográficas	91
-------------------------------------	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Produção global e destino de polímeros e resinas sintéticas, em milhões de metros cúbicos. Fonte: Geyer et al., 2017	5
Figura 2 - Manejo de resíduos plásticos na Europa em 2016. Fonte: D'ambrières, 2019	7
Figura 3 - Diferentes tipos de fibra de vidro utilizadas na fabricação de compósitos (filamentos e manta). Fonte: Sathishkumar et al., 2014	9
Figura 4 - Ilustração de diversos componentes automotivos reforçados com fibras naturais. Fonte: Mohammed et al., 2015	10
Figura 5 - Estrutura macromolecular do polipropileno. Fonte: (Maddah & Maddah, 2016)	12
Figura 6 - Diferentes estruturas macromoleculares do polietileno. Fonte: (Coutinho et al., 2003).	13
Figura 7 - Esquema representativo da reação química entre a fibra natural e o MAPP, além da interação intermolecular resultante. Fonte: (Adaptado de Park et al., 2006).	15
Figura 8 - Fluxo de operações para a obtenção de materiais e obtenção.....	27
Figura 9 - Misturador da marca MH Equipamentos, modelo MH-4, utilizado para a mistura mecânica dos componentes da formulação	28
Figura 10 - Extrusora monorosca da marca LGMT, modelo LGEX - SIV 0V 060/36D, utilizada para a fabricação dos compósitos em regime contínuo.....	29
Figura 11 - Homogeneizador Drais da MH Equipamentos, modelo MH-100, utilizado para a fabricação dos compósitos em batelada.....	29
Figura 12 - Moinho de facas Seibt MGH 6/230, utilizado para a cominuição dos compósitos fabricados.....	30

Figura 13 - Injetora de plásticos da marca Semeraro, modelo 650/247, utilizada para a injeção dos corpos de prova conforme as normas ASTM.....	31
Figura 14 - Molde utilizado para a injeção de corpos de prova para os ensaios de flexão de três pontos conforme a norma ASTM D790-17.....	31
Figura 15 - Equipamento da Emic DL-3000 para a realização de ensaios de tração e de flexão, com a configuração para o ensaio de tração.....	32
Figura 16 - Equipamento da Tinius Olsen, modelo 892, utilizado para a realização dos ensaios de impacto com pêndulo.....	33
Figura 17 - Durômetro da Zwick, utilizado para a realização dos ensaios de dureza Shore D.....	34
Figura 18 - Apresentação das fibras utilizadas no projeto. À esquerda, as fibras de bambu como obtidas do fornecedor. No centro, as fibras de eucalipto micronizadas e à direita as fibras de sisal também obtidas após a micronização	34
Figura 19 - Resultados dos ensaios de tração da Primeira Etapa	40
Figura 20 - Exemplo de execução do Teste F e do Teste T no Excel para a comparação entre os resultados dos módulos de tensão para as composições B1-R0.....	41
Figura 21 - Resultados da ANOVA para os dados de módulo de tração das composições da Primeira Etapa, com significância de 95%.....	43
Figura 22 - Resultados do Teste de Tukey para os dados de módulo de tração das composições da Primeira Etapa, com significância de 95%.....	43
Figura 23 - Exemplo de execução do Teste F e do Teste T no Excel para a comparação entre os resultados dos módulos de elasticidade para as composições B1-R0.....	45
Figura 24 - ANOVA dos valores de módulo de elasticidade das composições da Primeira Etapa, com nível de significância de 95%.....	46

Figura 25 - Resultados do Teste de Tukey para os dados de módulo de elasticidade das composições da Primeira Etapa, com significância de 95%.	47
Figura 26 - Resultados dos ensaios de flexão para as composições da Primeira Etapa.....	48
Figura 27 - ANOVA dos valores de tensão de flexão das composições da Primeira Etapa, com nível de significância de 95%.....	49
Figura 28 - Resultados do Teste de Tukey para os dados de tensão de flexão das composições da Primeira Etapa, com significância de 95%.	50
Figura 29 - Resultado do teste ANOVA para os módulos de flexão das composições da Primeira Etapa.....	52
Figura 30 - Resultados do Teste de Tukey para os dados de módulo de flexão das composições da Primeira Etapa, com significância de 95%.	53
Figura 31 - Resultados dos ensaios de impacto das composições da Primeira Etapa.	54
Figura 32 - Resultado do teste ANOVA para os ensaios de impacto das composições da Primeira Etapa.....	56
Figura 33 - Resultados do Teste de Tukey para os dados de resistência ao impacto das composições da Primeira Etapa, com significância de 95%.	56
Figura 34 - Resultados dos ensaios de dureza Shore D das composições da Primeira Etapa.....	58
Figura 35 - Resultado do teste ANOVA para os resultados dos ensaios de dureza Shore D das composições da Primeira Etapa	59
Figura 36 - Resultados do Teste de Tukey para os dados de dureza Shore D das composições da Primeira Etapa, com significância de 95%.	60
Figura 37 - Resultados dos ensaios de resistência de impacto das composições da Segunda Etapa.....	62

Figura 38 - Realização da Análise de Variância nas composições da Segunda Etapa.	62
Figura 39 - Resultados do Teste de Tukey para a comparação das composições da Segunda Etapa.....	63
Figura 40 - Resultados dos ensaios de tração para as composições da Terceira Etapa.....	66
Figura 41 - Resultados da ANOVA para as tensões máximas dos ensaios de tração dos materiais da Terceira Etapa, com significância de 95%.	68
Figura 42 - Teste de Tukey para análise das tensões máximas dos materiais da Terceira Etapa.....	68
Figura 43 - Resultados do método ANOVA para os módulos de elasticidade das composições da Terceira Etapa, com significância de 95%.	71
Figura 44 - Teste de Tukey para análise dos módulos de elasticidade dos materiais da Terceira Etapa.....	71
Figura 45 - Resultados dos ensaios de flexão para as composições da Terceira Etapa.....	73
Figura 46 - Resultados do método ANOVA para os valores de tensão de flexão das composições da Terceira Etapa, com significância de 95%.	75
Figura 47 - Teste de Tukey para análise dos valores de tensão de flexão dos materiais da Terceira Etapa.....	75
Figura 48 - Resultados do método ANOVA para os valores dos módulos de flexão das composições da Terceira Etapa, com significância de 95%.....	78
Figura 49 - Teste de Tukey para análise dos valores dos módulos de flexão dos materiais da Terceira Etapa.....	78
Figura 50 - Resultados dos ensaios de impacto das composições da Terceira Etapa.	79

Figura 51 - Resultados do método ANOVA para os valores dos ensaios de resistência ao impacto das composições da Terceira Etapa, com significância de 95%.	81
Figura 52 - Teste de Tukey para análise dos valores dos valores de resistência ao impacto dos materiais da Terceira Etapa	82
Figura 53 - Resultados dos ensaios de dureza Shore D das composições da Terceira Etapa.....	83
Figura 54 - Resultados do método ANOVA para os valores dos de dureza das composições da Terceira Etapa, com significância de 95%.	85
Figura 55 - Teste de Tukey para análise dos valores dos valores de dureza Shore D dos materiais da Terceira Etapa	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades físico-químicas do copolímero comercial SABIC® PP 57MNK10 da SABIC.....	22
Tabela 2 - Propriedades físico-químicas do agente acoplante comercial BONDYRAM® 1001, do Polyram Group	23
Tabela 3 - Propriedades físico-químicas do modificador de impacto comercial Daplen™ EG251AIB, da Borealis.....	24
Tabela 4 - Resumo dos compósitos planejados.....	26
Tabela 5 - Resumo atualizado dos compósitos a serem desenvolvidos.	38
Tabela 6 - Resultados dos Testes T e F para os módulos de tensão entre as composições base e a referência, com intervalo de confiança de 95% ($\alpha = 0,05$)....	42
Tabela 7 - Compilação dos resultados do Teste de Tukey para os módulos de tração da Primeira Etapa. $b>a$	44
Tabela 8 - Resultados dos Testes T e F para os módulos de elasticidade entre as composições base e a referência, com intervalo de confiança de 95% ($\alpha = 0,05$)...	45
Tabela 9 - Compilação dos resultados do Teste de Tukey para os módulos de elasticidade da Primeira Etapa. $b>a$	47
Tabela 10 - Resultados dos Testes T e F para os módulos de flexão entre as composições base e a referência, com intervalo de confiança de 95% ($\alpha = 0,05$).	49
Tabela 11 - Compilação dos resultados do Teste de Tukey para a tensão de flexão da Primeira Etapa. $b>a$	50
Tabela 12 - Resultados dos Testes T e F para os módulos de flexão entre as composições base e a referência, com intervalo de confiança de 95% ($\alpha = 0,05$)...	51
Tabela 13 - Compilação dos resultados do Teste de Tukey para o módulo de flexão da Primeira Etapa. $b>a$	53

Tabela 14 - Resultados dos Testes T e F para os resultados dos ensaios de impacto entre as composições base e a referência, com intervalo de confiança de 95% ($\alpha = 0,05$).	55
Tabela 15 - Compilação dos resultados do Teste de Tukey para a resistência ao impacto da Primeira Etapa. $b>a$	57
Tabela 16 - Resultados dos Testes T e F para a dureza Shore D entre as composições base e a referência, com intervalo de confiança de 95% ($\alpha = 0,05$)... ..	58
Tabela 17 - Compilação dos resultados do Teste de Tukey para os ensaios de dureza Shore D da Primeira Etapa. $b>a$	60
Tabela 18 - Planejamento do experimento da segunda Etapa.....	61
Tabela 19 - Compilação dos resultados do Teste de Tukey para os ensaios de impacto Izod da Segunda Etapa. $b>a$	63
Tabela 20 - Formulações definidas das composições da Terceira Etapa	64
Tabela 21 - Resultados dos testes F e T de Student para as tensões máximas das composições da Terceira Etapa em relação a R0, com significância de 95%.	67
Tabela 22 - Compilação dos resultados do Teste de Tukey para as tensões máximas da Terceira Etapa. $c>b>a$	69
Tabela 23 - Resultados dos testes F e T de Student para os módulos de elasticidade das composições da Terceira Etapa em relação a R0, com significância de 95%.	70
Tabela 24 - Compilação dos resultados do Teste de Tukey para os módulos de elasticidade da Terceira Etapa. $b>a$	72
Tabela 25 - Resultados dos testes F e T de Student para as tensões de flexão das composições da Terceira Etapa em relação a R0, com significância de 95%.	74
Tabela 26 - Compilação dos resultados do Teste de Tukey para as tensões de flexão da Terceira Etapa. $c>b>a$	76

Tabela 27 - Resultados dos testes F e T de Student para os módulos de tensão das composições da Terceira Etapa em relação a R0, com significância de 95%. 77

Tabela 28 - Compilação dos resultados do Teste de Tukey para os módulos de flexão da Terceira Etapa. $c > b > a$ 79

Tabela 29 - Resultados dos testes F e T de Student para os valores dos ensaios de resistência ao impacto das composições da Terceira Etapa em relação a R0, com significância de 95%. 80

Tabela 30 - Compilação dos resultados do Teste de Tukey para as resistências ao impacto da Terceira Etapa. $c > b > a$ 82

Tabela 31 - Resultados dos testes F e T de Student para os valores dos ensaios de dureza das composições da Terceira Etapa em relação a R0, com significância de 95%. 84

Tabela 32 - Compilação dos resultados do Teste de Tukey para durezas Shore D da Terceira Etapa. $b > a$ 86

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APP	Polifosfato de amônio
ASTM	<i>American society for testing and materials</i>
EPR	Elastômero do tipo etileno-propileno
MAPP	Polipropileno tratado com anidrido maleico
PE	Poliétileno
PEAD	Poliétileno de alta densidade
PEBD	Poliétileno de baixa densidade
PELBD	Poliétileno linear de baixa densidade
PEUBD	Poliétileno de ultra baixa densidade
PET	Poliétileno de tereftalato
PLA	Ácido polilático
PP	Polipropileno
PRFN	Polímero reforçado com fibra natural
PRFV	Polímero reforçado com fibra de vidro
PS	Poliestireno
PVC	Policloreto de vinila
PU	Poliuretano
TDI	2,4-diisocianato de tolueno
TPO	Elastômero a base de poliolefinas termoplásticas

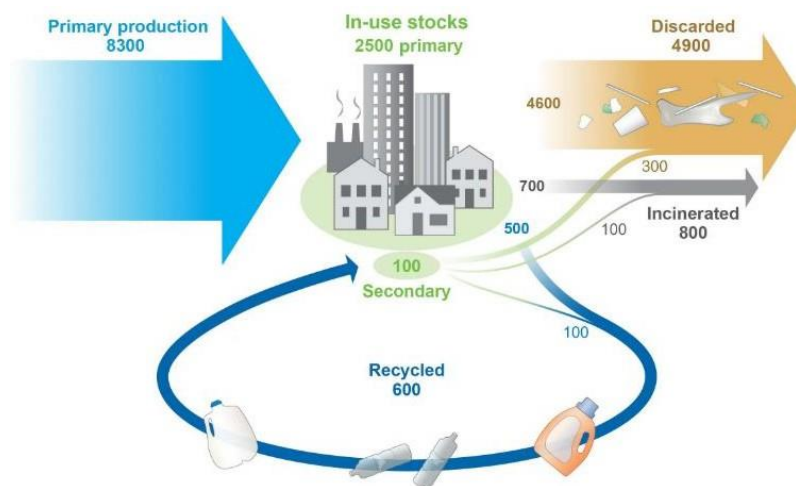
Zb

Borato de zinco

1. Introdução

O uso de plásticos derivados do petróleo revolucionou a indústria global, especialmente após os anos 1950, logo após o advento da Segunda Guerra Mundial. Os plásticos rapidamente se tornaram um dos principais materiais utilizados pelo homem. Tal fato se deve em grande parte às mudanças nos hábitos de consumo e nas necessidades da indústria, uma vez que, até então, era comum que os recipientes utilizados para o acondicionamento de bens e produtos fossem reutilizados. Houve, contudo, um forte movimento de mudança de recipientes reutilizáveis para aqueles descartáveis (Geyer *et al.*, 2017), como indicado na Figura 1. Esta mudança viabilizou a produção em larga escala e consolidou a forma de consumo como conhecida atualmente. Dentre os aspectos positivos que culminaram na ampla utilização de materiais plásticos atual, tem-se o baixo custo destes materiais, o fato de serem extremamente versáteis em aplicações e processamento, a leveza dos produtos obtidos e a sua resistência e durabilidade (Thompson *et al.*, 2009).

Figura 1 - Produção global e destino de polímeros e resinas sintéticas, em milhões de metros cúbicos. Fonte: Geyer *et al.*, 2017.



Há mais de 300 tipos de plásticos produzidos, dos quais 60 são os mais utilizados, como o polietileno (PE), o polipropileno (PP), o policloreto de vinila (PVC), o poliestireno (PS), o poliuretano (PU) e resinas fenólicas no geral (Chen *et al.*, 2021). Estes plásticos são utilizados em larga escala, especialmente para a fabricação de

bens de uso único, como garrafas, embalagens e outras variedades de produtos descartáveis (Giacovelli, 2018). O uso desenfreado destes materiais relaciona-se intimamente com os hábitos modernos de consumo. Em 2016, estima-se que a produção de plásticos atingiu 335 milhões de toneladas por ano, revelando como esses recursos são importantes para a economia e extremamente explorados em escala global (Drzyzga & Prieto, 2019). Em 2015, este número havia sido ainda maior, atingindo 400 milhões de toneladas produzidas. Um dado preocupante, contudo, é como esta produção se distribui ao longo do tempo: desde o surgimento da indústria de polímeros, na década de 50, até os períodos atuais, verifica-se que há uma grande concentração do histórico dos plásticos produzidos nos últimos anos. De toda a produção até 2015, verifica-se que 50% dos plásticos produzidos foram fabricados nos 13 anos anteriores (Shershneva, 2021). Estes materiais são utilizados nos mais diversos setores, para os mais diversos fins, como embalagens, itens para transporte, produção de equipamentos, produção de eletrônicos, produção de têxteis e para construção.

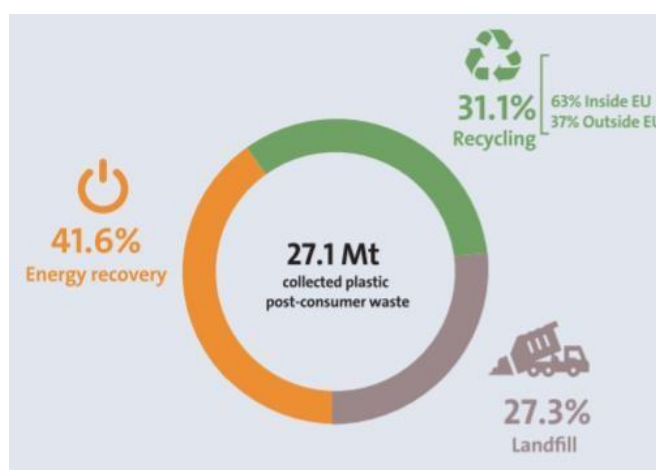
A grande questão por trás do uso de plásticos, contudo, são os longos períodos para degradação destes materiais no meio-ambiente. Além disso, os tempos de meia-vida para cada polímero variam conforme a sua natureza. O polietileno de tereftalato (PET), comumente utilizado para a fabricação de garrafas plásticas, pode ter um tempo de meia-vida de superior a 2500 anos quando enterrado. O polipropileno, por sua vez, apresenta um tempo de meia-vida de 780 anos sob as mesmas condições, enquanto o policloreto de vinila e o poliestireno apresentam valores semelhantes ao polietileno de tereftalato. Estes valores podem variar, dependendo das condições às quais os polímeros são submetidos, como a radiação ultravioleta e em ambientes marinhos (Chamas *et al.*, 2020). Quando os altos volumes de produção são considerados juntamente com os dados de degradação destes materiais, verifica-se o motivo pelos quais o uso de plásticos constitui uma questão ambiental tão relevante.

Somadas às questões ambientais sobre o descarte inadequado e a alta durabilidade dos polímeros na natureza, há outros impactos que também devem ser avaliados. Somente na cadeia de suprimentos de polímeros dos Estados Unidos, são consumidos 3400 quatrilhões de joules de energia por ano, sendo liberadas 104 milhões de toneladas de CO₂ equivalente de gases de efeito estufa (Nicholson *et al.*,

2021). Estes dados somados aos apresentados anteriormente revelam a natureza multidimensional dos impactos ambientais causados pela utilização excessiva de plásticos.

Há, contudo, algumas ações que podem ser tomadas ao menos para se diminuir os impactos do descarte inapropriado desses materiais no meio ambiente, como a reciclagem e o reaproveitamento energético dos compostos. Na Europa, em 2016, 27,1 milhões de toneladas de plástico foram coletadas pós-uso, dos quais 72,7% foram reciclados ou reaproveitados energeticamente, como mostrado na Figura 2 (D'ambrières, 2019). Mas apesar dos esforços, quando comparado com o volume total produzido mundialmente, os trabalhos de reaproveitamento não são capazes de absorver toda a produção anual destes materiais. Além disso, em países em desenvolvimento, há problemas estruturais relacionados à coleta, reuso e reciclagem de materiais, gerando desafios ainda maiores no contexto global. Muitas das soluções para o manejo de plásticos aplicadas em países desenvolvidos não são viáveis para as nações menos desenvolvidas. A maior parte dos resíduos plásticos de manejo inadequado são encontrados nos países em desenvolvimento (Browning *et al.*, 2021). Por conta disso, é interessante se levar em consideração alternativas no que se refere à redução do uso de plásticos.

Figura 2 - Manejo de resíduos plásticos na Europa em 2016. Fonte: D'ambrières, 2019.



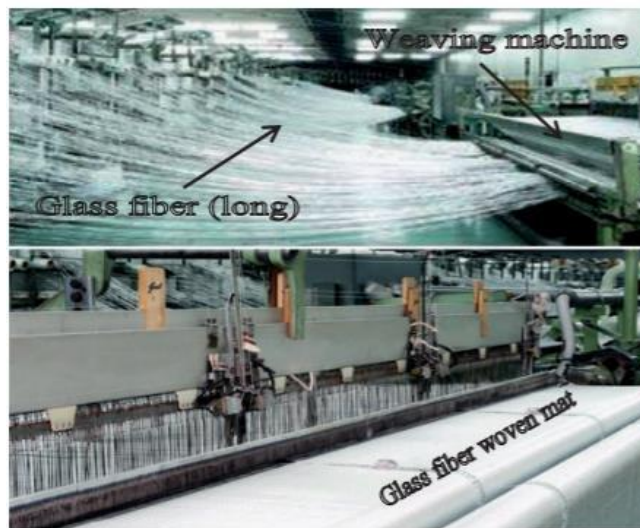
Além do seu uso tradicional, os plásticos também podem ser combinados com outros compostos, dando origem a materiais com propriedades distintas das originais,

como no caso dos compósitos e biocompósitos. Os compósitos podem ser definidos como materiais obtidos a partir da mistura de dois ou mais compostos distintos, resultando em um produto com características distintas daquelas observadas em seus constituintes separados (Hsissou *et al.*, 2021). Materiais compósitos obtidos com reforços como a aramida, as fibras de carbono e as fibras de vidro são amplamente utilizados na indústria, especialmente a última, devido ao seu custo relativamente inferior às outras duas (Wambua *et al.*, 2003). Além disso, há, portanto, uma redução na utilização de plásticos, uma vez que parte do peso do material final é compreendido pelo reforço.

Os compósitos podem também ser classificados como materiais reforçados, compostos por uma fase dispersa, chamada de carga, que é envolta em uma matriz contínua. A natureza da matriz e da carga, o formato que apresentam em sua utilização e a proporção de cada componente estão entre os fatores que determinarão as propriedades do material resultante. Além disso, o compósito pode ser obtido através da utilização de metais, cerâmicos ou polímeros, tanto como carga como matriz, tornando as combinações possíveis virtualmente infinitas (Hsissou *et al.*, 2021).

Dentre os compósitos amplamente utilizados, têm-se aqueles obtidos através do reforço de polímeros com fibra de vidro. O comportamento do material resultante depende basicamente da resistência da fibra, da sua estabilidade química, da resistência do polímero e da interação superficial entre a fibra e a matriz. Além disso, a orientação e o tipo de fibras utilizados também pode impactar as propriedades finais do compósito, que pode ter características como a resistência superiores às de determinados aços e do alumínio, possuindo massa específica muito menor do que estes materiais (Sathishkumar *et al.*, 2014). A Figura 2 ilustra diferentes formas de produção de fibra de vidro que podem ser utilizadas como reforço.

Figura 3 - Diferentes tipos de fibra de vidro utilizadas na fabricação de compósitos (filamentos e manta). Fonte: Sathishkumar et al., 2014



Essas propriedades fazem com que os polímeros reforçados com fibra de vidro (PRFV), por exemplo, possuam alto valor agregado nas indústrias automotiva, aeronáutica e naval (Prashanth *et al.*, 2017), uma vez que um dos grandes desafios destes setores é a aplicação de materiais de alta resistência e baixa densidade, garantindo a segurança dos usuários ao mesmo tempo em que proporcionam maior eficiência no consumo de combustíveis (Lipman, 2017). Há, contudo, um grande apelo ambiental contra o uso de PRFVs na indústria, uma vez que estes materiais não são biodegradáveis e apresentam altos custos e impactos ambientais para a sua reciclagem. Além disso, o método mais consolidado para a reciclagem de PRFVs consiste na moagem mecânica do compósito, mas que resulta em um material com propriedades distintas e que por conta disso é viável para novas aplicações, diferentes das originais (Job, 2013).

Neste contexto, os polímeros reforçados com fibras naturais (PRFNs) surgem como uma alternativa aos PRFVs. Os PRFNs consistem em uma matriz polimérica que possui como carga fibras naturais. Estas fibras por sua vez são definidas como fibras que não são sintéticas ou fabricadas pelo homem (Ahmad *et al.*, 2014). Em geral, as plantas, que produzem fibras de celulose, podem ser utilizadas como fontes naturais para estas fibras, e conseqüentemente para os PRFNs. A classificação do tipo de fibra é dada pela sua origem na planta, sendo que elas podem ser obtidas da

casca da planta, das sementes, da folhagem, da palha e do seu núcleo, dentre outros (como da madeira e das raízes, por exemplo) (Mohammed *et al.*, 2015)

Os PRFNs apresentam propriedades estratégicas em diversos âmbitos para a aplicação em engenharia, como baixa densidade, baixo custo e menor impacto ambiental em geral, uma vez que eles possuem uma significativa proporção de reforço em relação à matriz polimérica para uma performance equivalente àquela apresentada pelos PRFVs. Por conta disso, tais compostos apresentam grande valor e potencial em aplicações na indústria automobilística (Joshi *et al.*, 2004).

No contexto da indústria automotiva, verifica-se que há uma busca constante por materiais avançados e sustentáveis, que apresentem boas propriedades mecânicas e baixo peso (Akar *et al.*, 2022). Soma-se a isso as crescentes preocupações globais no que se refere a geração de resíduos, especialmente os de difícil reaproveitamento. Esta busca se justifica pelo fato de que o peso veicular está diretamente relacionado com o consumo de combustível do carro, e, conseqüentemente, com as emissões de gases de efeito estufa associadas. Ambos os fatores levam a busca por alternativas que reduzam os impactos ambientais das atividades desenvolvidas (Alias *et al.*, 2018). Diversas peças do veículo podem ser reforçadas com fibras naturais, como mostrado na Figura 4. Por conta desses fatores, verificar a viabilidade de novos materiais como polímeros reforçados com fibras naturais torna-se imperativo.

Figura 4 - Ilustração de diversos componentes automotivos reforçados com fibras naturais. Fonte: Mohammed *et al.*, 2015.



6. Conclusão

Frente a todos os ensaios e análises realizadas, verificou-se que as composições apresentam potencial para a utilização na fabricação de peças para a indústria automotiva, com algumas ressalvas. As composições da Terceira Etapa – no caso, as formulações finais deste trabalho – apresentaram propriedades mecânicas notáveis em relação ao material de referência utilizado atualmente. As análises e conclusões obtidas em cada etapa serão tratados a seguir.

No que se refere aos resultados dos ensaios de tração, parte das comparações realizadas entre as composições e a referência apresentaram diferenças estatisticamente significativas. Este comportamento só não foi observado nos resultados das comparações dos módulos de elasticidade de B7-R0 (Bambu 20%), S1-R0 (Sisal 20%) e S2-R0 (Sisal 40%). Contudo, é importante ressaltar que a utilização do extensômetro neste caso pode ter impacto direto sobre estas conclusões,

uma vez que os altos valores de desvio padrão podem ter impacto significativo nas análises. Quando analisados os módulos de tensão entre as próprias composições, verificou-se que o tipo de fibra utilizado, bem como o teor de fibras e a interação entre esses dois fatores resultam em diferenças significativas entre os materiais, excetuando-se para Bambu – Sisal a 40%, e que as composições com maior teor de fibras costumam apresentar propriedades superiores, assim como aquelas à base de eucalipto. Já para a comparação entre as formulações para os módulos de elasticidade, as comparações entre Bambu – Sisal a 20% e Bambu – Eucalipto a 40% foram as únicas equivalentes entre si, todas as outras foram significativamente diferentes, mas mais uma vez, estes resultados devem ser tomados com cautela.

Para os ensaios de flexão, todas as fibras apresentaram propriedades superiores e significativamente diferentes daquelas da referência, tanto para as tensões de flexão como para os módulos de flexão. Já na comparação entre as formulações, verificou-se diferenças significativas entre todas as composições, exceto Bambu – Sisal a 40%. Já para as comparações entre composições no que se refere ao módulo de flexão, verificou-se que todos os resultados indicaram diferenças significativas entre si. A variedade e teor de fibras, bem como as interações entre os dois fatores foram relevantes para ambas as análises, tanto a da tensão de flexão como o do módulo de elasticidade. Mais uma vez, as composições com teor mais elevado de fibra (40%, B8, E4 e S2) apresentaram desempenho melhor do que as outras.

Os ensaios de resistência ao impacto foram os únicos em que todas as composições apresentaram resultados inferiores e significativamente diferentes da referência. A utilização do modificador de impacto, neste caso, não se mostrou suficiente para igualar ou superar o desempenho das formulações em relação ao material original. Além disso, todas as composições analisadas apresentaram diferenças significativas entre si, exceto por Bambu – Eucalipto a 40%. Para este teste específico, verifica-se que as composições à base de sisal foram aquelas que apresentaram os melhores resultados dentre as formulações, contudo, ainda inferiores à referência. Uma sugestão para o aproveitamento das composições fornecidas é utilizá-las para a fabricação de peças em que os requisitos mecânicos de resistência ao impacto sejam menos rigorosos. Testes com outros modificadores de

impacto, ou variando o comprimento da fibra também podem ser pesquisados com o intuito de desenvolver materiais com maior resistência ao impacto.

Para os ensaios de dureza, verificou-se que todas as composições apresentaram diferenças significativas em relação à referência. Contudo, para o caso de B7 – R0 (Bambu 20%) a formulação se mostrou inferior a R0, diferentemente de todas as outras. Já na comparação entre as composições, os resultados indicaram que há diferenças significativas entre as formulações de diferentes concentrações de fibras, mas no que se refere à variedade, as formulações Eucalipto – Sisal a 20% e Bambu – Eucalipto a 40% se mostraram equivalentes. As formulações com 40% de fibras (B8, E4 e S2) apresentaram resultados superiores às aquelas com 20% (B7, E3 e S1).

No que se refere à processabilidade, a utilização de fibras de bambu e de eucalipto se mostrou viável, e o processo é passível de escalonamento. Todos os processos executados ocorreram dentro da normalidade, não havendo maiores dificuldades. A utilização das fibras de sisal, contudo, se mostrou desafiadora. Através da execução do estudo em escala laboratorial, verificou-se que elaborar um fluxo industrial para estas composições seria bastante complexo. Para viabilizar a utilização das fibras de sisal nos materiais compósitos, pode ser interessante utilizar métodos de cominuição mais agressivos, em que fibras de menor comprimento sejam obtidas. Alternativamente, outros processos industriais, como a extrusão de chapas e a utilização de processos de fabricação de peças via termomoldagem podem ser testados.

No que diz respeito à escalabilidade da produção, há uma íntima relação com a capacidade de processamento de cada composição. Isso se deve ao fato de que dificuldades pontuais e gargalos observados durante a fase laboratorial podem se tornar grandes empecilhos para um regime industrial de produção. Ao se levar em consideração que os compósitos a base de fibras de bambu e de eucalipto apresentaram razoável fluidez e processos de fabricação sem grandes dificuldades, pode-se dizer que um eventual escalonamento é a princípio viável. Contudo, uma vez que as etapas de alimentação e incorporação das fibras de sisal foram desafiadoras, é sensato assumir que a produção desses compósitos apresentará dificuldades

semelhantes ou mesmo agravadas em larga escala. Dessa forma, conclui-se que tais composições podem não ser factíveis em processos industriais.

Ademais, destaca-se o interesse ambiental na utilização das composições a base de fibras naturais como substitutos aos materiais tradicionais da indústria. Os ganhos relacionados ao peso dos componentes, redução do uso de plásticos e outros compostos de difícil degradação natural ou reaproveitamento e a incorporação de resíduos em materiais com maior valor agregado podem, por si só, justificar o uso de materiais que possam possuir propriedades mecânicas inferiores para determinadas aplicações ou de processabilidade mais complexa.

Conclui-se que, no geral, as composições à base de eucalipto e de bambu apresentaram resultados razoáveis para todas as análises e avaliações, exceto os ensaios de resistência ao impacto. Por conta disso, é importante reavaliar as estratégias e verificar os requisitos mínimos de resistência ao impacto, bem como a possibilidade de utilização de outros aditivos para melhorar esta propriedade, considerando-se os prós e contras da utilização das composições reforçadas com fibras naturais. A determinação de qual o teor de fibra é mais adequado, contudo, dependerá das exigências industriais, e da necessidade ou não de propriedades semelhantes ou muito superiores àquelas das composições.

7. Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros seria interessante explorar o uso de diferentes modificadores de impacto, de forma a se obter melhores resultados de resistência ao impacto. Neste sentido, incluir as fibras de sisal no trabalho se mostra estratégico, uma vez que as composições a base dessa fibra foram aquelas com as melhores propriedades de resistência ao impacto. Uma alternativa para melhorar a resistência ao impacto das composições é utilizar fibras de maior comprimento, capazes de distribuir a energia do impacto ao longo do material. Além disso, acompanhar a influência de mais fatores nas propriedades dos materiais obtidos pode ser vantajoso, como a verificação da umidade das fibras utilizadas e de cada compósito antes do processamento.

Alinhada com a sugestão anterior, tem-se também o aprofundamento dos

estudos na processabilidade das fibras de sisal. As fibras de sisal são um material bastante promissor, e com a abordagem e operações adequadas, podem se tornar viáveis em um eventual escalonamento de produção. Para viabilizar a sua aplicação, é possível explorar processos de cominuição mais agressivos, como citado anteriormente, de forma a se obter um particulado passível de processamento. Além disso, alternativas no processo de fabricação do material e de peças, como a extrusão de chapas e a termomoldagem a vácuo, podem ser testados com o intuito de se utilizar as composições baseadas na fibra.

8. Referências bibliográficas

- Ahmad, F., Choi, H., and, M. P.-M. materials, & 2015, undefined. (2014). A review: natural fiber composites selection in view of mechanical, light weight, and economic properties. *Wiley Online Library*. <https://doi.org/10.1002/mame.201400089>
- Akar, M., Tosun, A., Symposia, F. Y.-M., & 2022, undefined. (2022). The usage of natural fibers for automotive applications. *Wiley Online LibraryPaperpileMA Akar, AT Tosun, F Yel, U KumluMacromolecular Symposia, 2022. Wiley Online Library*. <https://doi.org/10.1002/masy.202100414>
- Alias, N., Mohd Fauzi, N., Yusuf, B., -, al, Liang, X., Wu, X., Zeng, K., Ramli, N., Mazlan, N., Ando, Y., Leman, Z., Abdan, K., Aziz, A. A., & Sairy, N. A. (2018). Natural fiber for green technology in automotive industry: a brief review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/368/1/012012>
- Ao, X., Vázquez-López, A., Mocerino, D., González, C., & Wang, D. Y. (2024). Flame retardancy and fire mechanical properties for natural fiber/polymer composite: A review. *Composites Part B: Engineering*, 268. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.111069>
- Assis, Teotonio Francisco de. Production and use of eucalyptus hybrids for industrial purposes. Guaíba-RS: Riocell S/A, 2000.
- Bazan, P., Salasińska, K., & Kuciel, S. (2021). Flame retardant polypropylene reinforced with natural additives. *Industrial Crops and Products*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669021001205?casa_token=Qw4h_K1SauEAAAAA:qsNMzzH3Mbk1aHk36jfiCKg7K4cR98vn3C47Gxw77auWLXlIiWtiwRBgFqZfjiRgUoWLGx0
- Browning, S., Beymer-Farris, B., & Seay, J. R. (2021). Addressing the challenges associated with plastic waste disposal and management in developing countries. In *Current Opinion in Chemical Engineering* (Vol. 32). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2021.100682>

- Chamas, A., Moon, H., Zheng, J., Qiu, Y., Tabassum, T., Jang, J. H., Abu-Omar, M., Scott, S. L., & Suh, S. (2020). Degradation Rates of Plastics in the Environment. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 8(9), 3494–3511. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b06635>
- Chen, Y., Awasthi, A. K., Wei, F., Tan, Q., & Li, J. (2021). Single-use plastics: Production, usage, disposal, and adverse impacts. In *Science of the Total Environment* (Vol. 752). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141772>
- Coleman Ernest A. (2017). Plastics additives. *Applied Plastics Engineering*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323390408000213>
- Coutinho, F. M. B., Mello, I. L., & Maria, L. C. de S. (2003). Polietileno - Principais Tipos, Propriedades e Aplicações. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 13, 1–13.
- D'ambrières, W. (2019). Plastics recycling worldwide: current overview and desirable changes. *Field Actions Science Reports*.
- Darie, R. N., Bodirlau, R., Teaca, C. A., Macyszyn, J., Kozlowski, M., & Spiridon, I. (2013). Influence of Accelerated Weathering on the Properties of Polypropylene/Polylactic Acid/Eucalyptus Wood Composites. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 18(4), 315–327. <https://doi.org/10.1080/1023666X.2013.784936>
- Drzyzga, O., & Prieto, A. (2019). Plastic waste management, a matter for the 'community.' In *Microbial Biotechnology* (Vol. 12, Issue 1, pp. 66–68). John Wiley and Sons Ltd. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13328>
- Fu, Shao-Yun; Hu, Xiao; Yue, Chee-Yoon. Effects of fiber length and orientation distributions on the mechanical properties of short-fiber-reinforced polymers: A review. *Journal of the Society of Materials Science*, v. 48, n. 6, p. 74-83, 1999. Disponível em: https://doi.org/10.2472/jsms.48.6Appendix_74.
- Fuqua, M. A., Huo, S., & Ulven, C. A. (2012). Natural fiber reinforced composites. In *Polymer Reviews* (Vol. 52, Issues 3–4, pp. 259–320). <https://doi.org/10.1080/15583724.2012.705409>

- Gahleitner, M., & Paulik, C. (2017). Polypropylene and other polyolefins. *Brydson's Plastics Materials*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323358248000116>
- Gahleitner, M., Tranninger, C., & Doshev, P. (2013). Heterophasic copolymers of polypropylene: Development, design principles, and future challenges. In *Journal of Applied Polymer Science* (Vol. 130, Issue 5, pp. 3028–3037). <https://doi.org/10.1002/app.39626>
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). *Production, use, and fate of all plastics ever made*. <https://www.science.org>
- Giacovelli, C. (2018). *Single-use plastics, a roadmap for sustainability*.
- Hsissou, R., Seghiri, R., Benzekri, Z., Hilali, M., Rafik, M., & Elharfi, A. (2021). Polymer composite materials: A comprehensive review. In *Composite Structures* (Vol. 262). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113640>
- Huang, Z.-M.; Guo, W.-J.; Huang, H.-B.; Zhang, C.-C. Tensile Strength Prediction of Short Fiber Reinforced Composites. *Materials*, v. 14, n. 11, p. 2708, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma14112708>.
- Jeencham, R., Suppakarn, N., & Jarukumjorn, K. (2014). Effect of flame retardants on flame retardant, mechanical, and thermal properties of sisal fiber/polypropylene composites. *Composites Part B: Engineering*, 56, 249–253. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.08.012>
- Job, S. (2013). Recycling glass fibre reinforced composites - history and progress. *Reinforced Plastics*.
- Joshi, S. V., Drzal, L. T., Mohanty, A. K., & Arora, S. (2004). Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites? *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 35(3), 371–376. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2003.09.016>
- Kaminsky, W. (2008). Trends in polyolefin chemistry. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 209(5), 459–466. <https://doi.org/10.1002/macp.200700575>

- Lipman, T. E. (2017). Emerging technologies for higher fuel economy automobile standards. *Annual reviews*. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ>
- Lokesh, P., Surya Kumari, T. S. A., Gopi, R., & Loganathan, G. B. (2020). A study on mechanical properties of bamboo fiber reinforced polymer composite. *Materials Today: Proceedings*, 22, 897–903. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.100>
- Maddah, H., & Maddah, H. A. (2016). Polypropylene as a Promising Plastic: A Review. *American Journal of Polymer Science*, 6(1), 1–11. <https://doi.org/10.5923/j.ajps.20160601.01>
- Mihalic, M., Sobczak, L., Pretschuh, C., & Unterweger, C. (2019). Increasing the impact toughness of cellulose fiber reinforced polypropylene composites—influence of different impact modifiers and production scales. *Journal of Composites Science*, 3(3). <https://doi.org/10.3390/jcs3030082>
- Mohammed, L., Ansari, M. N. M., Pua, G., Jawaid, M., & Islam, M. S. (2015). A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composite and Its Applications. In *International Journal of Polymer Science* (Vol. 2015). Hindawi Limited. <https://doi.org/10.1155/2015/243947>
- Mohanty, S., Nayak, S. K., Verma, S. K., & Tripathy, S. S. (2004). Effect of MAPP as a Coupling Agent on the Performance of Jute-PP Composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 23(6), 625–637. <https://doi.org/10.1177/0731684404032868>
- Nayak, S., & Mohanty, S. (2010). Sisal glass fiber reinforced PP hybrid composites: effect of MAPP on the dynamic mechanical and thermal properties. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29(10), 1551–1568. <https://doi.org/10.1177/0731684409337632>
- Nicholson, S. R., Rorrer, N. A., Carpenter, A. C., & Beckham, G. T. (2021). Manufacturing energy and greenhouse gas emissions associated with plastics consumption. *Joule*, 5(3), 673–686. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.12.027>
- Park, J. M., Quang, S. T., Hwang, B. S., & DeVries, K. L. (2006). Interfacial evaluation of modified Jute and Hemp fibers/polypropylene (PP)-maleic anhydride polypropylene

copolymers (PP-MAPP) composites using micromechanical technique and nondestructive acoustic emission. *Composites Science and Technology*, 66(15), 2686–2699. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.03.014>

Prashanth, S., Subbaya, K., Nithin K, & Sachhidananda S. (2017). Fiber reinforced composites - A review. *Journal of Material Sciences & Engineering*, 6, 341. <https://doi.org/10.4172/2169-0022.1000341>

Pritchard, Geoffrey. *Plastic Additives: An A-Z Reference*. Dordrecht: Springer, 1998.

Rana, A. K., Mandal, A., & Bandyopadhyay, S. (2003). *Short jute fiber reinforced polypropylene composites: effect of compatibiliser, impact modifier and fiber loading*. www.elsevier.com/locate/compscitech

Ronca, S. (2017). Polyethylene. In *Brydson's Plastics Materials: Eighth Edition* (pp. 247–278). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-35824-8.00010-4>

Roslan, S. A. H., Rasid, Z. A., & Hassan, M. Z. (2018). Bamboo reinforced polymer composite - A comprehensive review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 344(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/344/1/012008>

Sathishkumar, T. P., Satheeshkumar, S., & Naveen, J. (2014). Glass fiber-reinforced polymer composites - A review. In *Journal of Reinforced Plastics and Composites* (Vol. 33, Issue 13, pp. 1258–1275). SAGE Publications Ltd. <https://doi.org/10.1177/0731684414530790>

Senthilkumar, K., Saba, N., Rajini, N., Chandrasekar, M., Jawaid, M., Siengchin, S., & Alotman, O. Y. (2018). Mechanical properties evaluation of sisal fibre reinforced polymer composites: A review. In *Construction and Building Materials* (Vol. 174, pp. 713–729). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.143>

Shershneva, E. G. (2021). Plastic Waste: Global Impact and Ways to Reduce Environmental Harm. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1079(6), 062047. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1079/6/062047>

Srinivasakumar, P., Nandan, M. J., Kiran, C. U., & Rao, K. P. (2013). Sisal and its Potential for Creating Innovative Employment Opportunities and Economic Prospects. In *IOSR*

Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE (Vol. 8, Issue 6).
www.iosrjournals.orgwww.iosrjournals.org

Thompson, R. C., Swan, S. H., Moore, C. J., & Vom Saal, F. S. (2009). Our plastic age. In *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* (Vol. 364, Issue 1526, pp. 1973–1976). Royal Society. <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0054>

Unterweger, C.; Brüggemann, O.; Fürst, C. Effects of different fibers on the properties of short-fiber-reinforced polypropylene composites. *Composites Science and Technology*, v. 103, p. 49-55, 28 out. 2014.

Wambua, P., Ivens, J., & Verpoest, I. (2003). Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics? *Composites Science and Technology*, 63(9), 1259–1264. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00096-4](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00096-4)