

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP

LUÍS GUILHERME LEITE FERNANDES

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

BOTUCATU - SP

2024

LUÍS GUILHERME LEITE FERNANDES

**DESENVOLVIMENTO DE BIOCOMPÓSITOS 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 dedureza 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	Polietileno
PEAD	Polietileno de alta densidade
PEBD	Polietileno de baixa densidade
PELBD	Polietileno linear de baixa densidade
PEUBD	Polietileno de ultra baixa densidade
PET	Polietileno 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

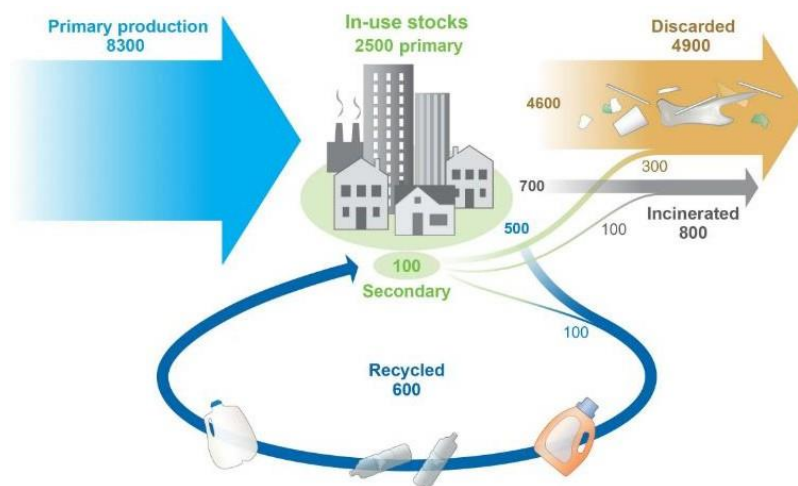
Zb

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.

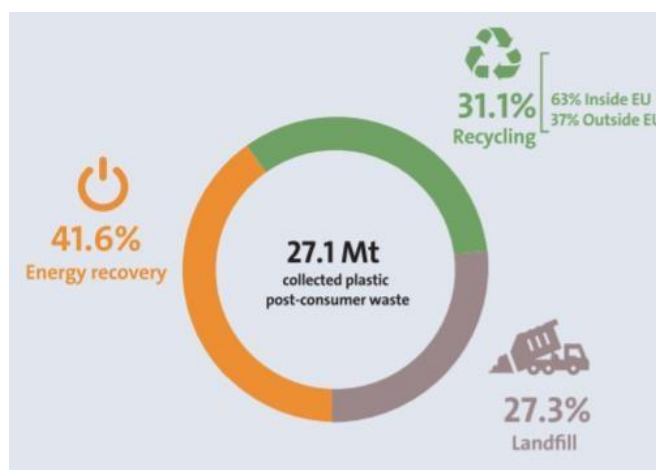
A grande questão por trás do uso de plásticos, contudo, são os longos períodos para degradação destes materiais no meio-ambiente. Além disso, os tempos de meia-vida para cada polímero variam conforme a sua natureza. O polietileno de tereftalato (PET), comumente utilizado para a fabricação de garrafas 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.



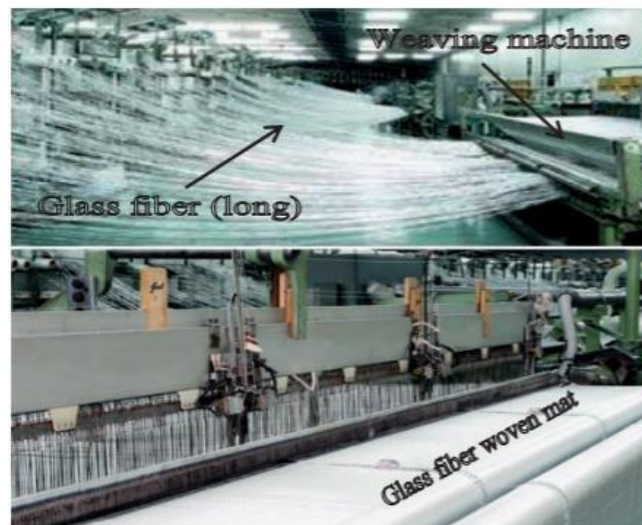
Além do seu uso tradicional, os plásticos também podem ser combinados com outros compostos, dando origem a materiais com propriedades distintas das originais,

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 consequentemente 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.



2. Objetivos

2.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho consiste na obtenção de um material compósito obtido através da incorporação de fibras naturais em base polimérica que seja viável mecanicamente para a aplicação na indústria automotiva, bem como avaliar qualitativamente a viabilidade de escalonamento dos processos executados.

2.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos do presente trabalho consistem em:

- Produzir, analisar e estudar PRFNs com matriz em polipropileno e reforçados com fibra de eucalipto, bambu e sisal, bem como aditivos pertinentes;
- Verificar propriedades mecânicas como a resistência à tração, à flexão, ao impacto e a dureza de cada material estudado, com o intuito de validar as composições desenvolvidas frente ao material de resistência;
- Apresentar as melhores composições, desde a concentração de fibras, os aditivos utilizados e as suas respectivas quantidades, para a aplicação em peças específicas na indústria automobilística de acordo com as propriedades mecânicas observadas nas composições e no material de referência;
- Analisar qualitativamente os processos executados para cada composição, avaliando a viabilidade de escalonamento da produção dos compósitos de cada fibra em um eventual cenário de abastecimento industrial para o setor automotivo.

3. Revisão bibliográfica

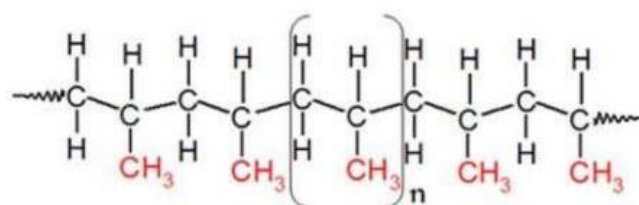
3.1. Polímeros e EPR

Os plásticos podem ser classificados em quatro grandes grupos, de acordo com a sua natureza química, comportamento mecânico e composição: termoplásticos, termofixos, elastômeros e compostos poliméricos. Os últimos, por sua vez, englobam

os compostos plásticos adicionados de outros compostos. São as estruturas macromoleculares destes materiais que ditarão não só a classe do material, como também as suas propriedades físicas (Maddah & Maddah, 2016).

O polipropileno (PP) é um composto termoplástico semicristalino, descoberto em 1954 e composto por unidades de propeno. Rapidamente ganhou espaço na indústria, por conta de sua baixa densidade. Além disso, este material possui excelente resistência química, e pode ser processado de várias formas, como extrusão e injeção, o polipropileno também apresenta alta resistência térmica, sendo que a sua forma perfeitamente isotática apresenta temperatura de fusão de 165°C (Gahleitner & Paulik, 2017). A Figura 5 apresenta a estrutura macromolecular do polímero.

Figura 5 - Estrutura macromolecular do polipropileno. Fonte: (Maddah & Maddah, 2016)



Dentre as poliolefinas, o polipropileno é extremamente estratégico pois, além de apresentar elevada resistência química e boas propriedades mecânicas, é também demasiado versátil. O polímero pode ser obtido através de várias rotas, obtendo-se compostos de diferentes morfologias e consequentemente propriedades mecânicas diversas. A versatilidade do PP se reflete na possibilidade de utilização de vários aditivos, de reforço com diversos materiais e na utilização conjunta com outros polímeros. Dentre os exemplos de materiais que podem ser obtidos, tem-se o PP reforçado com fibra de vidro e outros materiais, PP retardante de chamas etc. (Bazan *et al.*, 2021)

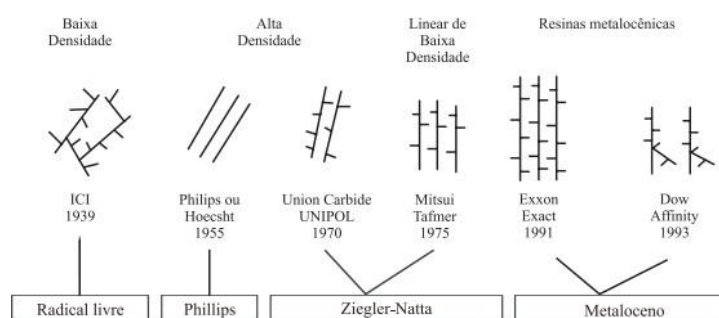
Contudo, para viabilizar aplicações do PP em temperaturas negativas, é necessário utilizar-se de elastômeros do tipo etileno-propileno (EPR), uma vez que há algumas limitações na utilização do PP em aplicações que demandem exposição do material a temperaturas abaixo de 0°C. Isso se deve ao fato de que, sob estas condições, a temperatura de transição vítrea do polipropileno inviabiliza a sua utilização. Para tornar a utilização do PP viável, é necessário utilizar-se de aditivos e

outros compostos que garantam características de interesse sob tais circunstâncias, como o (Gahleitner *et al.*, 2013).

O polietileno (PE), por sua vez, apresenta a mais simples estrutura básica - ou monômero - que pode ser encontrada em um polímero, o etileno. Assim como o PP, o polietileno é uma poliolefina (Kaminsky, 2008), ou seja, também é um polímero obtido através de uma olefina, como são chamados os hidrocarbonetos que possuem cadeias abertas e ligações duplas. Além disso, o PE também apresenta excelentes propriedades, como alta resistência química, boa processabilidade, boa rigidez e ao mesmo tempo flexibilidade. Uma característica interessante do polietileno, contudo, é a sua capacidade de ser obtido como polietileno de alta densidade (PEAD) ou como polietileno de baixa densidade (PEBD). Outras variações, como o polietileno linear de baixa densidade (PELBD), que possui densidade intermediária e o polietileno de ultra baixa densidade (PEUBD), também são possíveis (Ronca, 2017).

São, na verdade, as diferentes configurações possíveis em termos de ramificações e ligações, estas por sua vez obtidas através de diferentes rotas de polimerização, que geram os polímeros de diferentes densidades (Coutinho *et al.*, 2003). A Figura 6 apresenta de forma ilustrativa a correspondência entre a estrutura macromolecular, o tipo de PE obtido e o método utilizado para a polimerização.

Figura 6 - Diferentes estruturas macromoleculares do polietileno. Fonte: (Coutinho *et al.*, 2003).



3.2. Aditivos

Os aditivos têm por objetivo final melhorar propriedades de interesse do material alvo (Coleman Ernest A., 2017). A seguir, serão tratados aditivos específicos e classes de aditivos que serão utilizados neste trabalho, bem como as suas funções no material final obtido.

3.2.1. MAPP

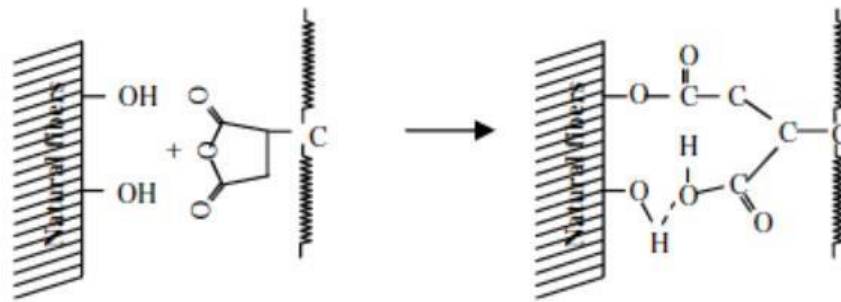
Embora apresentem alto potencial para substituir as fibras artificiais, como a fibra de vidro, as fibras naturais apresentam uma incompatibilidade química intrínseca com as matrizes poliméricas. Isso se deve ao fato de que as fibras naturais possuem natureza polar e hidrofílica, apresentando comportamento polar. Em contrapartida, plásticos como o PP e o PE apresentam comportamento apolar, dificultando a interação entre a fibra natural e o polímero (Mohanty *et al.*, 2004).

Isso se deve ao fato de que é necessário garantir uma boa adesão entre a fibra e a matriz polimérica. Para tal, as superfícies da fibra e do polímero precisam possuir uma boa afinidade, fator extremamente dependente da presença de grupos funcionais que contribuam para uma interação intermolecular na área de contato entre os dois materiais. Uma vez que a natureza dos polímeros e das fibras difere no que diz respeito à polaridade, é necessário utilizar-se de alternativas que promovam essa compatibilidade. Portanto, é necessário promover uma modificação da matriz, conferindo ao polímero um caráter polar; do substrato, diminuindo-se a sua polaridade; ou utilizar-se um agente intermediário, capaz de interagir satisfatoriamente com ambos substrato e reforço.

Dentre as diversas técnicas para aumentar a interação fibra-polímero, tem-se a utilização do polímero tratado com anidrido maleico (MAPP) (Nayak & Mohanty, 2010). Neste caso, o MAPP age como um agente intermediário, possuindo porções apolares, graças a sua natureza original de um composto a base de PP, mas dotado de grupos funcionais polares capazes de interagir com a fibra. Em seu estudo, Mohanty & Nayak (2010) utilizaram o MAPP a uma concentração de 2% para a compatibilização das fibras de sisal e a matriz polimérica.

De acordo com Park *et al.* (2006), o MAPP apresenta grupos funcionais que reagem com os grupos álcoois disponíveis na superfície da fibra natural. Dessa forma, há a formação de ésteres entre a cadeia do MAPP e a da fibra, além de interações intermoleculares do tipo ligação de hidrogênio entre grupos álcoois remanescentes na fibra e o oxigênio dos grupos carboxila formados, conforme ilustrado na Figura 7.

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).



Como resultado, o uso de pequenas concentrações do MAPP é capaz de aumentar a interação superficial entre a fibra e a matriz polimérica, promovendo uma interação química entre as diferentes fases que aumenta a aderência do reforço na matriz. Uma vez que as propriedades mecânicas de um compósito dependem em grande parte da adesão entre as fases constituintes, aumentar a adesão superficial se traduz em melhores propriedades mecânicas (Park *et al.*, 2006).

3.2.2. Antichamas

Para viabilizar a aplicação em diversos setores, é necessário que o material atenda a certos requisitos de segurança, além das já citadas propriedades mecânicas. Dentre esses requisitos, tem-se a flamabilidade. A flamabilidade diz respeito à resistência que um material possui de entrar em combustão quando em contato com chamas ou com fontes de calor intenso. Uma vez que tanto as fibras naturais quanto o polipropileno são materiais inflamáveis, é necessário utilizar-se de aditivos que sejam capazes de conferir ao PRFN propriedades retardantes a chamas, ou idealmente que sejam capazes de extingui-las (Ao *et al.*, 2024).

Em seu estudo, Jeencham *et al.* (2014) concluíram que o uso de polifosfato de amônio (APP), de hidróxido de magnésio ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) e de borato de zinco (Zb), bem como as combinações APP/ $\text{Mg}(\text{OH})_2$ e APP/Zb aumentaram a resistência a chamas do PP reforçado com fibras de sisal, sem afetar as propriedades mecânicas do material.

3.3. Modificador de impacto

A resistência a impacto é uma propriedade mecânica bastante relevante para diversas aplicações de materiais. Por conta disso, é de interesse da indústria que o material apresente uma boa resistência, especialmente na indústria automobilística, em que os veículos estão sujeitos a impactos constantemente (Mihalic *et al.*, 2019).

Embora apresentem propriedades de dureza e resistência comparáveis a compósitos obtidos a partir da fibra de vidro e talco, no que se refere à resistência ao impacto com entalhe, os compósitos obtidos a partir de fibras naturais se mostram inferiores. Além disso, agentes compatibilizantes como o MAPP, utilizados especificamente para melhorar as propriedades mecânicas do material, podem impactar negativamente essa propriedade em específico. Isso ocorre pois, para a propagação de uma fratura no material, é necessário que haja o rompimento de interações entre as fases e que as fibras sejam arrancadas da matriz. Quando a interação superficial é fortalecida, a fratura ocasiona o rompimento das fibras, resultado em menor resistência ao impacto (Mihalic *et al.*, 2019).

Rana *et al.* (2003) cita que compósitos feitos à base de juta e PP apresentam menor resistência ao impacto quando comparados com compósitos a base de fibra de vidro e PP. Para contornar este problema, os modificadores de impacto são utilizados. Os modificadores de impacto são aditivos responsáveis por conferir maior resistência ao impacto a um material. Em seu estudo, Rana *et al.* (2003) chegou à conclusão de que a utilização de modificadores de impacto comerciais resultou em um aumento no compósito juta-PP analisado, apesar de encarecer o processo.

3.3.1. Pigmento

Pigmentos são aditivos essencialmente indivisíveis, e insolúveis no meio polimérico. Eles são incorporados no meio através de um processo de dispersão no material fundido, mantendo-se dispersos e retidos na matriz após o seu processo de solidificação. A principal razão para a adição de pigmentos em plásticos é a introdução de cor ao meio. Essa adição, por sua vez, pode ser motivada por razão estética, ou para aplicações específicas que dependam do nível de opacidade do material, outra

função atribuição relevante dos pigmentos. Além disso, o uso dos pigmentos apóscita algumas utilidades, como é a utilização da matéria-prima (Pitckaíd, 1998).

As propriedades óticas de um material são obtidas a partir da combinação de dois fatores: absorção e espalhamento da luz. A cor de um objeto é determinada através da absorção seletiva de determinados comprimentos de onda da luz por parte dos seus constituintes químicos. Já a transparência ou opacidade do material é determinada pela presença ou ausência de centros capazes de espalhar a luz (Pitckaíd, 1998).

3.4. Fibras naturais

Com o aumento do apelo por materiais que sejam ambientalmente amigáveis, a procura por alternativas àqueles compostos com maior impacto ambiental, como derivados de petróleo e fibras sintéticas, também aumentou. Dentre as opções disponíveis, as fibras naturais se mostram materiais de baixo impacto ambiental e com propriedades mecânicas relevantes para diversas aplicações (Park *et al.*, 2006).

As fibras naturais são definidas como fibras que não são sintéticas, ou produzidas pelo homem. Desta forma, estes materiais podem ser obtidos a partir de plantas e/ou animais. Em se tratando de fibras obtidas a partir de plantas, ainda é possível categorizá-las a partir da fonte de extração explorada na planta, como por exemplo a partir das sementes, da casca, da palha, do floema e do núcleo da planta, dentre outros, como da própria madeira ou de suas raízes. As possibilidades de exploração de fibras naturais são, portanto, virtualmente infinitas, dado que em uma mesma variedade de planta, pode-se obter fibras de diferentes partes (Mohammed *et al.*, 2015).

Se por um lado, contudo, há diversos benefícios na utilização das fibras naturais, como boas propriedades mecânicas, abundância de recursos, alta biodegradabilidade e baixo impacto ambiental, é necessário levar em conta que há alguns aspectos deficitários nos materiais dessa natureza. Por serem materiais naturalmente hidrofílicos, as fibras naturais podem absorver água do ambiente, o que

pode comprometer as propriedades do material. Por conta disso, o tratamento das fibras ou a utilização de aditivos se faz indispensável (Fuqua *et al.*, 2012).

A escolha das fibras de bambu, eucalipto e sisal para a execução desse trabalho se deve à facilidade de cultivo, rapidez de crescimento, alta disponibilidade no mercado e boas propriedades mecânicas, como será explicado nas seções a seguir.

3.4.1. Eucalipto

O eucalipto é uma espécie de angiosperma com origem na Oceania. Constituem o gênero *Eucalyptus*, e apresentam atualmente a segunda maior plantação com fins industriais em escala global. Isso se deve ao rápido crescimento da planta, além da qualidade elevada das fibras obtidas. Além disso, o eucalipto é utilizado para a obtenção de diversos produtos, como na indústria de polpa de celulose (Assis, 2000).

Darje *et al.*, 2013 realizaram um estudo em um compósito preparado a partir de polipropileno (PP), ácido polilático (PLA) e fibra obtida da madeira de eucalipto. Neste trabalho, foi constatado que a substituição de 15% de PP por PLA resultou em um material com propriedades mecânicas aceitáveis. Além disso, com o objetivo de melhorar a compatibilidade entre a matriz polimérica e o eucalipto, foi realizado um tratamento das fibras visando uma modificação química da fibra utilizando 2,4-diisocianato de tolueno (TDI). Embora o tratamento tenha resultado em uma maior adesão interfacial entre a fibra e a matriz, o ganho nas propriedades mecânicas não foi significativo. Por fim, foi verificado que o material composto por 15% PLA, 15% de fibra de eucalipto tratada com TDI e PP apresentou as melhores propriedades mesmo sob condições de envelhecimento acelerado, com temperatura, umidade e radiação UV controlados.

3.4.2. Bambu

O bambu é uma planta que sempre foi alvo de exploração e aplicações em diversas formas de construção e estruturação de materiais. Isso se deve às diversas vantagens relacionadas à produção dessa planta, como a facilidade e rapidez de

crescimento em diversos climas. O bambu é um material tradicionalmente utilizado como material de construção, que continua sendo amplamente utilizado até hoje.

O bambu pode ser dividido em sua morfologia em duas principais partes, o rizoma (porção da raiz especializada que pode se transformar em caules) e o colmo (caule aéreo presente em plantas, que é notoriamente dividido por nós e entrenós). Outra forma de classificação da planta é entre a sua porção aérea composta por caules, galhos e folhagem, e a porção subterrânea, composta por rizomas, raízes e brotos. O bambu apresenta propriedades mecânicas comparáveis às da madeira, sendo muitas vezes até melhores que aquelas encontradas na madeira tradicional (Roslan *et al.*, 2018).

Lokesh *et al.* (2020) desenvolveram um trabalho estudando as propriedades de um compósito baseado em resina epóxi e fibras de bambu. O material foi construído através do método de *hand lay-up*, em que o compósito é construído através da aplicação de diversas camadas de fibra intercaladas que são então cobertas com a resina já aditivada com catalisador. Após determinado tempo de cura, o material está pronto para a realização dos testes necessários. Nos resultados obtidos, os autores chegaram à conclusão de que o tratamento prévio da fibra com NaOH é altamente relevante para que bons resultados nas propriedades mecânicas do material sejam obtidas. Além disso, foi verificado que o excesso de carga (no caso, as fibras de bambu) acaba por deteriorar os resultados obtidos nos ensaios mecânicos. No geral, contudo, a utilização de fibras de bambu como reforço para o polímero levou a ganhos nos testes de impacto, de tensão e de flexão com o aumento do teor de fibras tratadas no material.

3.4.3. Sisal

Assim como o eucalipto e o bambu, o sisal dá origem a uma das fibras naturais mais amplamente utilizadas atualmente, apresentando facilidade de cultivo em diversas partes do mundo (Srinivasakumar *et al.*, 2013). Além disso, dentre as fibras naturais obtidas a partir da folhagem de plantas, a fibra de sisal é aquela que apresenta a maior composição de celulose, composto este a que se atribui relação direta com a melhora das propriedades mecânicas do material.

O Sisal é uma planta de crescimento rápido, sendo cultivado em regiões tropicais, como em algumas nações africanas, no Caribe e em nações orientais. As fibras extraídas do vegetal são classificadas em três tipos: as mecânicas, as fitas e as provenientes do xilema. As fibras mecânicas são extraídas da periferia das folhas. Já as fibras do tipo fita são as mais longas obtidas da planta, podendo ser separadas longitudinalmente no processamento. Por fim, as fibras do xilema são irregulares e quebradiças, especialmente durante o processo de extração/processamento (Senthilkumar *et al.*, 2018).

Senthilkumar *et al.* (2018), em seu artigo de revisão, constataram que a introdução de fibras de sisal em uma matriz polimérica melhora as propriedades mecânicas do material, sendo que esta melhoria depende da arquitetura da fibra, da sua orientação, do seu comprimento e da carga utilizada, assim como o uso de aditivos e tratamentos que afetem a interação fibra/matriz. Os autores concluem que devido à sua natureza sustentável, baixa densidade e o fato de não ser abrasiva, a fibra de sisal pode ser usada em uma ampla faixa de aplicações industriais e de construção civil.

4. Materiais e métodos

4.1. Materiais

Os materiais utilizados para a obtenção dos compósitos foram constituídos pelas matérias-primas utilizadas nos respectivos processos de fabricação, como o copolímero de polipropileno utilizado como matriz, as diversas fibras naturais e suas respectivas granulometrias e estados iniciais e os aditivos, como o MAPP e o modificador de impacto. Todos os materiais foram obtidos através de fornecedores com alta capacidade de oferta - acima de duas toneladas por mês - para viabilizar uma eventual produção industrial do material.

4.1.1. Fibras de eucalipto

As fibras de eucalipto foram obtidas já cominuídas, da Eucatex, empresa do ramo de materiais em Botucatu-SP. As fibras foram obtidas já cominuídas, resultantes do processo de micronização. Tal processo garante que o material apresentará um diâmetro médio menor do que 1 mm (mesh #42). Reforços compostos por fibras curtas

são conhecidos pela sua excelente processabilidade nos equipamentos e boas propriedades mecânicas (H"arig et al., 2021), facilitando um eventual processo de escalonamento da produção (Büggemaier e Füst 2014). Além disso, o processo de dispersão de fibras curtas é facilitado, resultando em um compósito mais uniforme. Por fim, a utilização de fibras mais longas é um fator de complexidade, uma vez que o cisalhamento do material durante o processamento é responsável por quebrar as fibras de reforço, o que pode impactar as propriedades mecânicas do compósito (F" et al.,1999).

4.1.2. Fibras de bambu

As fibras de bambu utilizadas no processo de fabricação dos compósitos também foram obtidas após sofrerem o processo de cominuição. As fibras foram obtidas do Viveiro da Taboca, em Tatuí-SP. De forma semelhante ao eucalipto, o particulado a ser utilizado deverá ter um diâmetro médio menor do que 1 mm.

4.1.3. Fibras de sisal

As fibras de sisal também foram obtidas já cominuídas. Diferentemente das outras fibras, não foi possível obter as fibras de um fornecedor local. Por conta disso, o material foi adquirido de um fornecedor na Bahia. Se tratando de uma fibra de alta resistência e uma relação de aspecto naturalmente maior do que as outras fibras, é natural que a fibra de sisal apresente um aspecto diferente tanto das fibras de eucalipto, mais homogêneas e com relação de aspecto próxima a um, quanto as do bambu, mais heterogêneas naturalmente. O material utilizado, portanto, apresentou alta relação de aspecto, mas com elevada homogeneidade.

4.1.4. Copolímero de polipropileno

Como matriz para os compósitos a base de fibras naturais, foi utilizado um copolímero de polipropileno e polietileno comercial, da fornecedora SABIC, o SABIC® PP 57MNK10 - *POLYPROPYLENE IMPACT COPOLYMER FOR INJECTION MOLDING*. Além de ser reconhecida como uma grande fornecedora de insumos químicos, a SABIC apresenta alta capacidade de oferta do produto, garantindo o

abastecimento em um eventual escalonamento da produção. A Tabela 1 apresenta a ficha técnica do material.

Tabela 1 - Propriedades físico-químicas do copolímero comercial SABIC® PP 57MNK10 da SABIC.

Propriedade	Valor	Unidade
Índice de fluidez	12	g/10min
Densidade	905	kg/m ³
Resistência à tração	24	MPa
Alongamento máximo	4	%
Módulo de flexão	1150	MPa
Resistência ao impacto Izod	115	J/m
Temperatura de Vicat	90	°C

4.1.5. MAPP

O agente compatibilizante a base de anidrido maleico utilizado para promover a interação entre a matriz polimérica e o reforço celulósico foi o MAPP comercial do *Polyram Group*, o BONDYRAM® 1001. A Tabela 2 apresenta as propriedades do material.

Tabela 2 - Propriedades físico-químicas do agente acoplante comercial BONDYRAM® 1001, do Polyram Group.

Propriedade	Valor	Unidade
Índice de fluidez	100	g/10min
Densidade	0,9	g/cm ³
Teor de anidrido maleico	1	%
Ponto de fusão	160	°C

4.1.6. Antichamas

O retardante de chamas utilizado foi o composto comercial *Hydrogard GP*, da Alcoa. Este produto é composto por alumina hidratada (hidróxido de alumínio), sendo aplicável em formulações em que a temperatura de processo do polímero não ultrapasse 230 °C.

4.1.7. Pigmento

O pigmento utilizado para função estética nos compósitos tem como base negro de fumo, conhecido na indústria por conferir a cor preta a diferentes materiais poliméricos.

4.1.8. Modificador de impacto

Por fim, o modificador de impacto utilizado foi o Daplen™ EG251AIB, da Borealis. A Tabela 3 traz os dados técnicos deste material.

Tabela 3 - Propriedades físico-químicas do modificador de impacto comercial Daplen™ EG251AIB, da Borealis.

Propriedade	Valor	Unidade
Índice de fluidez	20	g/10min
Densidade	1040	kg/m ³
Módulo de flexão	1750	MPa
Tensão de flexão	28	MPa
Alongamento máximo	5	%
Resistência à tração	22	MPa
Resistência ao impacto Izod	22	kJ/m ²

4.2. Composições e Etapas do Trabalho

As composições foram desenvolvidas seguindo diferentes estratégias de variabilidade, de forma a se avaliar diferentes propriedades e se obter os melhores resultados no(s) material(is) finais. Para isso, foram definidas formulações específicas, com diferentes proporções dos elementos descritos no item 4.1.

A primeira etapa de desenvolvimento constitui-se das chamadas composições base. As composições base serão aquelas que apresentarão teores fixos do agente compatibilizante, do antichamas e de pigmento, de acordo com o que é praticado na literatura e na indústria. A diferença entre elas está na variedade de fibra utilizada, no teor de fibras, e consequentemente no teor do copolímero que constitui a matriz do material. Além disso, um material de referência utilizado para a fabricação de peças na indústria automotiva foi utilizado para a fabricação de corpos de prova, servindo como referencial de propriedades mecânicas para as formulações criadas nesta etapa e nas próximas.

A segunda etapa dos testes teve por objetivo a definição da concentração adequada de modificador de impacto para melhorar o desempenho dos compósitos no que se refere à resistência ao impacto. Para isso, o material a base de fibra de bambu, com 20% de teor de fibras, foi arbitrado juntamente com a montadora

responsável por patrocinar o projeto como base para os testes, apenas para fins de determinação do teor de elastômero.

Por fim, na terceira etapa, novos materiais foram desenvolvidos, com a concentração ótima de modificador de impacto. As formulações obtidas a partir da utilização nesta etapa constituirão o resultado final do presente trabalho. A Tabela 4 sintetiza as informações descritas acima, apresentando as concentrações de cada um dos componentes que foram utilizadas. As formulações indicadas pela letra B são aquelas obtidas a partir das fibras de bambu, já as indicadas pela letra E são aquelas fabricadas com fibras de eucalipto e aquelas indicadas com a letra S são as que possuem as fibras de sisal em sua composição. A formulação de referência está indicada pela letra R. Para cada formulação, o teor de copolímero utilizado como matriz foi o necessário para atingir 100% e fechar a composição.

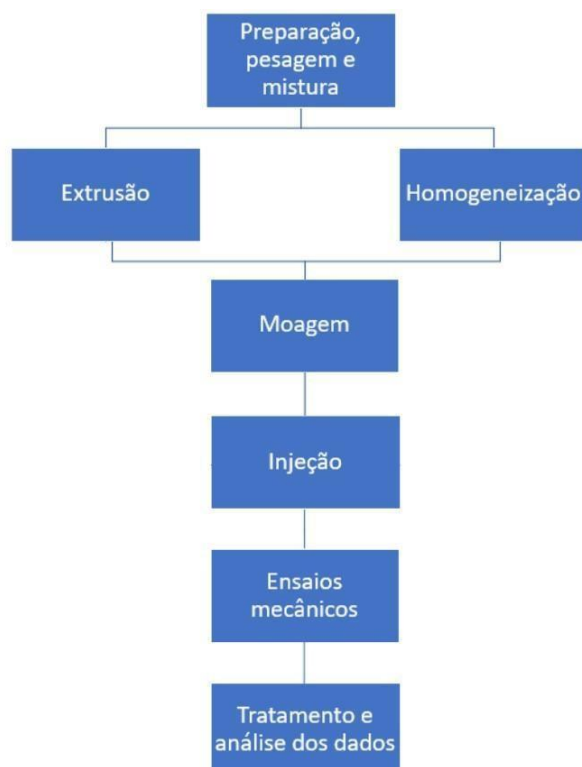
Tabela 4 - Resumo dos compósitos planejados.

	Rótulo	Fibra	Granulometria (mesh)	Teor de fibras	Teor de MAPP	Teor de antichamas	Teor de pigmento	Teor de elastômero
1ª Etapa	R0	-	-	-	2,00%	1,50%	1,00%	0%
	B1	Bambu	<42	20%	2,00%	1,50%	1,00%	0%
	B2	Bambu	<42	40%	2,00%	1,50%	1,00%	0%
	E1	Eucalipto	<42	20%	2,00%	1,50%	1,00%	0%
	E2	Eucalipto	<42	40%	2,00%	1,50%	1,00%	0%
	S1	Sisal	<42	20%	2,00%	1,50%	1,00%	0%
	S2	Sisal	<42	40%	2,00%	1,50%	1,00%	0%
2ª Etapa	B3	Bambu	<42	20%	2,00%	1,50%	1,00%	1%
	B4	Bambu	<42	20%	2,00%	1,50%	1,00%	2%
	B5	Bambu	<42	20%	2,00%	1,50%	1,00%	4%
	B6	Bambu	<42	40%	2,00%	1,50%	1,00%	6%
3ª Etapa	B7	Bambu	<42	20%	2,00%	1,50%	1,00%	X
	B8	Bambu	<42	40%	2,00%	1,50%	1,00%	X
	E3	Eucalipto	<42	20%	2,00%	1,50%	1,00%	X
	E4	Eucalipto	<42	40%	2,00%	1,50%	1,00%	X
	S3	Sisal	<42	20%	2,00%	1,50%	1,00%	X
	S4	Sisal	<42	40%	2,00%	1,50%	1,00%	X

4.3. Processamento e fabricação

O fluxo de operações necessário para a obtenção das composições está apresentado na Figura 8. A seguir, cada uma das etapas será aprofundada individualmente.

Figura 8 - Fluxo de operações para a obtenção de materiais e obtenção.



4.3.1. Preparação, pesagem e mistura

Em posse das formulações, os materiais foram pesados. As fibras utilizadas em cada material foram submetidas a um processo de secagem por pelo menos 24 horas a 60 °C em uma estufa. A mistura de cada formulação foi feita por cinco minutos, com auxílio de um misturador basculante com capacidade de 10L da MH Equipamentos, indicado na Figura 9.

Figura 9 - Misturador da marca MH Equipamentos, modelo MH-4, utilizado para a mistura mecânica dos componentes da formulação.



4.3.2. Homogeneização

A homogeneização do material foi conduzida de duas maneiras diferentes. A primeira forma consistiu na utilização de uma extrusora, que resultou em um material homogeneizado na forma de filamentos com diâmetro de 6 mm, ou na utilização de um equipamento Draiz, equipamento responsável pela homogeneização termocinética do material em batelada. Na primeira, o processo foi conduzido a 45 RPM, com o aquecimento iniciando-se a 160 °C na primeira zona e finalizando com 185 °C sexta zona de aquecimento, com incrementos iguais de 5 °C em cada zona de aquecimento subsequente. Já no segundo, o material pesado foi colocado em dosagem máxima de 130g por batelada no equipamento, e o processo de homogeneização foi executado até que ocorresse a fusão dos componentes plásticos, na faixa de 185 °C. A Figura 10 apresenta a extrusora utilizada, enquanto a Figura 11 traz a representação do homogeneizador Draiz.

Figura 10 - Extrusora monorosca da marca LGMT, modelo LGEX - SIV 0V 060/36D, utilizada para a fabricação dos compósitos em regime contínuo.



Figura 11 - Homogeneizador Draiz da MH Equipamentos, modelo MH-100, utilizado para a fabricação dos compósitos em batelada.



4.3.3. Granulação/Moagem

Uma vez homogeneizado, o material foi preparado para a etapa posterior de injeção. Este preparo consistiu na cominuição do compósito resultante, de forma a se obter um particulado injetável. Um moinho de facas foi utilizado para a cominuição das composições. A Figura 12 indica o moinho de facas disponível no laboratório.

Figura 12 - Moinho de facas Seibt MGH 6/230, utilizado para a cominuição dos compósitos fabricados.



4.3.4. Injeção

Uma vez que o particulado foi obtido, o processo prosseguiu com a injeção dos corpos de prova para os ensaios mecânicos de tração, flexão, impacto e dureza. Antes do processo de injeção, cada material foi submetido a um processo de secagem por pelo menos 24 horas a 60 °C em uma estufa. A injetora foi configurada de forma que a sua primeira zona de aquecimento estivesse em 160 °C, com incrementos iguais nas zonas de aquecimento subsequentes, com a sexta e última zona em 185 °C. A pressão utilizada no processo foi de 5 atm. A injeção de cada corpo de prova foi feita em moldes com as dimensões especificadas nas respectivas normas ASTM, a saber: para o ensaio de tração, a norma ASTM D638-22A; para o ensaio de flexão a norma ASTM D790-17 e para o ensaio de resistência ao impacto a norma ASTM D256-10(18). Para a injeção dos corpos de prova do ensaio de dureza, regidos pela norma ASTM D2240-15(21), foi utilizado o mesmo molde do ensaio de flexão, uma vez que os corpos a serem obtidos atendem à norma. A Figura 13 indica o equipamento utilizado para a injeção, enquanto a Figura 14 apresenta um dos moldes utilizados na injeção, o de corpos de prova para o ensaio de flexão e dureza.

Figura 13 - Injetora de plásticos da marca Semeraro, modelo 650/247, utilizada para a injeção dos corpos de prova conforme as normas ASTM.



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.



4.4. Ensaaios mecânicos

Os ensaios mecânicos consistem nos testes realizados com os corpos de prova injetados para cada material. O objetivo destes ensaios é avaliar as características de cada material formulado, de forma a se verificar aquele com as melhores propriedades para a aplicação pretendida. Para tal, foram realizadas 10 repetições para cada formulação em cada teste, de forma a se obter resultados fidedignos e representativos para cada amostra. Os ensaios desenvolvidos foram os ensaios de tração, de flexão de três pontos, de impacto Izod e de dureza *Shore D*.

4.4.1. Ensaio de tração

O ensaio de tração consiste em verificar o comportamento do material frente a um esforço de tração. Trata-se de um ensaio destrutivo, em que uma força uniaxial é aplicada sobre o corpo de prova até que sua fratura ocorra. O resultado deste ensaio é um gráfico tensão-deformação do material analisado, que indica também o seu módulo de elasticidade. O teste foi executado conforme a norma ASTM D638-22. A Figura 15 apresenta o equipamento utilizado para a realização deste ensaio.

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.



4.4.2. Ensaio de flexão de três pontos

O ensaio de flexão tem por objetivo estudar o comportamento do material frente a um esforço de flexão. Neste teste, o corpo de prova é apoiado sobre dois anteparos separados a uma distância fixa e pré-definida, enquanto um terceiro suporte realiza um esforço vertical e uniaxial no material. O resultado deste ensaio é uma curva tensão-deformação, que não só indica a tensão máxima que o material suporta, mas também o seu módulo de elasticidade. Os ensaios de flexão foram realizados conforme a norma ASTM D790-17.

4.4.3. Ensaio de impacto Izod

O ensaio de impacto Izod tem por objetivo verificar a resistência ao impacto do material. O seu funcionamento consiste na afixação de um corpo de prova com um entalhe na base do equipamento. O corpo de prova é então atingido por um pêndulo de massa definida e calibrado previamente. A partir do impacto, é possível determinar quanta energia foi transferida do pêndulo para o corpo de prova, e consequentemente a sua resistência ao impacto. Quanto maior for o valor de energia transferida, maior a resistência do material ao impacto. O resultado deste teste é um valor unitário, expresso em termos de energia por área. A norma utilizada para a execução deste ensaio é a ASTM D256-10(18). A Figura 16 apresenta o equipamento utilizado.

Figura 16 - Equipamento da Tinius Olsen, modelo 892, utilizado para a realização dos ensaios de impacto com pêndulo.



4.4.4. Ensaio de dureza Shore D

O ensaio de dureza Shore D tem por objetivo determinar a dureza do material avaliado. O teste consiste na utilização de um durômetro pressionado contra o corpo de prova, verticalmente e com força uniaxial. A resposta do equipamento - analógica - é dada em termos de unidades de dureza Shore D. A norma que rege este ensaio é a Shore D: ASTM D2240-15(21). A Figura 17 traz o durômetro utilizado para a realização dos testes.

Figura 17 - Durômetro da Zwick, utilizado para a realização dos ensaios de dureza Shore D.



5. Resultados e discussão

Durante o processo de fabricação dos materiais, verificou-se que os diferentes aspectos das fibras a serem utilizadas poderiam impactar o processamento dos compósitos. A Figura 18 trazem registros das fibras de bambu, eucalipto e sisal utilizadas.

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.



Os diferentes aspectos observados nas fibras de sisal constituíram uma preocupação desde o momento inicial de fabricação dos materiais. Contudo, como as fibras já haviam sido submetidas a um processo industrial de micronização e o resultado obtido ainda diferiu em muito das outras fibras, optou-se por prosseguir com os processos com as fibras no estado original. As dificuldades encontradas foram comunicadas à montadora, e todas as decisões tomadas foram de comum acordo. Mais detalhes sobre as dificuldades encontradas são compartilhados a seguir.

5.1. Primeira Etapa

As composições base foram obtidas através das formulações base descritas na Tabela 4. Contudo, algumas dificuldades foram observadas durante o processo, fazendo com que fosse necessário alterar o planejamento inicial de fabricação. Os desafios enfrentados, bem como os ajustes necessários nas composições serão discutidos nas seções a seguir.

Já em relação ao material de referência, obtido junto a uma montadora, não houve qualquer tipo de complicação durante o processo de injeção, como esperado. O material foi utilizado para a injeção dos corpos de prova sem a necessidade de adaptações ou alteração dos componentes da fórmula.

5.1.1. Bambu

Para a preparação das composições base de bambu, verificou-se que seria necessário realizar uma etapa preliminar de peneiramento das fibras, de forma a se garantir o diâmetro de partícula médio proposto inicialmente. Dessa forma, foi utilizado um sistema de peneiras que permitisse a separação do material a ser utilizado, obtendo-se assim o particulado passante pela peneira de *mesh* #42, como planejado inicialmente. A partir deste trabalho, foi possível obter as composições da Primeira Etapa sem maiores dificuldades.

Contudo, diferentemente do eucalipto, em que as fibras são provenientes da madeira do vegetal, a matéria-prima obtida a partir do bambu apresenta aspecto mais heterogêneo, contendo porções de diferentes partes da planta, como caule e folhagens. Assim, embora o trabalho de peneiramento tenha sido feito na fibra

utilizada na Primeira Etapa, constatou-se que adicionar esta operação unitária em um processo industrial seria inviável. Isso se deve ao fato do baixo rendimento pós-peneiramento, dado o alto volume necessário do insumo para a obtenção do particulado adequado e pela necessidade de adição da nova operação no processo. Como o objetivo deste trabalho é não só obter formulações que apresentem propriedades mecânicas razoáveis, mas também que sejam escalonáveis e praticáveis em escala industrial, optou-se pela utilização das fibras de bambu integralmente nas etapas subsequentes, da forma em que elas foram obtidas junto ao fornecedor.

Após todo o processamento, que ocorreu sem maiores dificuldades, obteve-se as composições base, utilizadas para a injeção dos corpos de prova para cada ensaio mecânico. Em seguida, procedeu-se com a execução dos ensaios mecânicos de acordo com as respectivas normas ASTM. Os resultados obtidos serão apresentados na seção 6.1.4. Ensaio mecânicos.

5.1.2. Eucalipto

O processamento das composições base de eucalipto se mostrou de fácil execução, sem dificuldades específicas. Foi possível seguir todo o planejamento, e utilizar as fibras micronizadas da forma que foram obtidas do fornecedor. As composições base foram utilizadas para a injeção dos corpos de prova para cada ensaio mecânico, que foram executados de acordo com as respectivas normas ASTM. Os resultados serão apresentados na seção 6.1.4. Ensaio mecânicos.

5.1.3. Sisal

Desde o começo, verificou-se que as fibras de sisal apresentavam aspecto diferente das demais. Embora tenha sido possível obter um particulado mais fino a partir das fibras de bambu, e que sequer tenha sido necessário realizar um processo de peneiramento das fibras de eucalipto, as fibras de sisal se apresentaram como um desafio desde o processo de preparação para a fabricação dos materiais.

Apesar de apresentarem textura homogênea e serem obtidas de uma única porção da planta, a folhagem, as fibras de sisal possuíam uma relação de aspecto

(largura *versus* espessura) muito maior do que as outras fibras. Enquanto as fibras de eucalipto, também homogêneas, se comportavam como um particulado de alta esfericidade quando micronizadas, o mesmo comportamento não foi verificado com as fibras de sisal, que se assemelham a microagulhas.

Para garantir a granulometria desejada, as fibras de sisal foram submetidas ao processo de peneiramento. Entretanto, após diversas tentativas, verificou-se a impossibilidade de peneirá-las. As fibras de sisal apresentam um comportamento peculiar de formação de grumos, em um emaranhado de difícil separação. Processos vibratórios, como aqueles utilizados em sistemas de peneiras, só fazem compactar o material, tornando-o ainda mais difícil de ser separado. Dessa forma, optou-se por utilizar a fibra integralmente.

O comportamento das fibras de sisal, contudo, revelou o material como de difícil processamento. Desde o processo de mistura mecânica, até os momentos de alimentação nos equipamentos como a extrusora e a injetora, as fibras tendem a entupir as entradas dos equipamentos, em grumos que tornam os processos de homogeneização extremamente difíceis. Verificou-se, portanto, que desenvolver processos industriais capazes de incorporar as fibras de sisal seria extremamente desafiador, e cogitou-se descartá-las do escopo deste projeto logo de início.

Contudo, para fins de observação e comparação, decidiu-se que seria interessante minimizar a utilização de tais fibras, mas não descartá-la completamente. Dessa forma, excluiu-se a utilização das fibras de sisal da Primeira Etapa, a etapa preliminar, incorporando-as nas composições subsequentes, nas quais a formulação já estaria definida e seria possível verificar os atributos destes materiais. A utilização das fibras de sisal ficaram, portanto, restritas à Terceira Etapa deste projeto.

Após todas as modificações realizadas no planejamento, as Etapas do projeto foram definidas como apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Resumo atualizado dos compósitos a serem desenvolvidos.

	Rótulo	Fibra	Granulometria (mesh)	Teor de fibras	Teor de MAPP	Teor de antichamas	Teor de pigmento	Teor de elastômero
1ª Etapa	R0	-	-	-	2,00%	1,50%	1,00%	0%
	B1	Bambu	<42	20%	2,00%	1,50%	1,00%	0%
	B2	Bambu	<42	40%	2,00%	1,50%	1,00%	0%
	E1	Eucalipto	<42	20%	2,00%	1,50%	1,00%	0%
	E2	Eucalipto	<42	40%	2,00%	1,50%	1,00%	0%
2ª Etapa	B3	Bambu	Toda a faixa	20%	2,00%	1,50%	1,00%	1%
	B4	Bambu	Toda a faixa	20%	2,00%	1,50%	1,00%	2%
	B5	Bambu	Toda a faixa	20%	2,00%	1,50%	1,00%	4%
	B6	Bambu	Toda a faixa	40%	2,00%	1,50%	1,00%	6%
3ª Etapa	B7	Bambu	Toda a faixa	20%	2,00%	1,50%	1,00%	X
	B8	Bambu	Toda a faixa	40%	2,00%	1,50%	1,00%	X
	E3	Eucalipto	<42	20%	2,00%	1,50%	1,00%	X
	E4	Eucalipto	<42	40%	2,00%	1,50%	1,00%	X
	S3	Sisal	Toda a faixa	20%	2,00%	1,50%	1,00%	X
	S4	Sisal	Toda a faixa	40%	2,00%	1,50%	1,00%	X

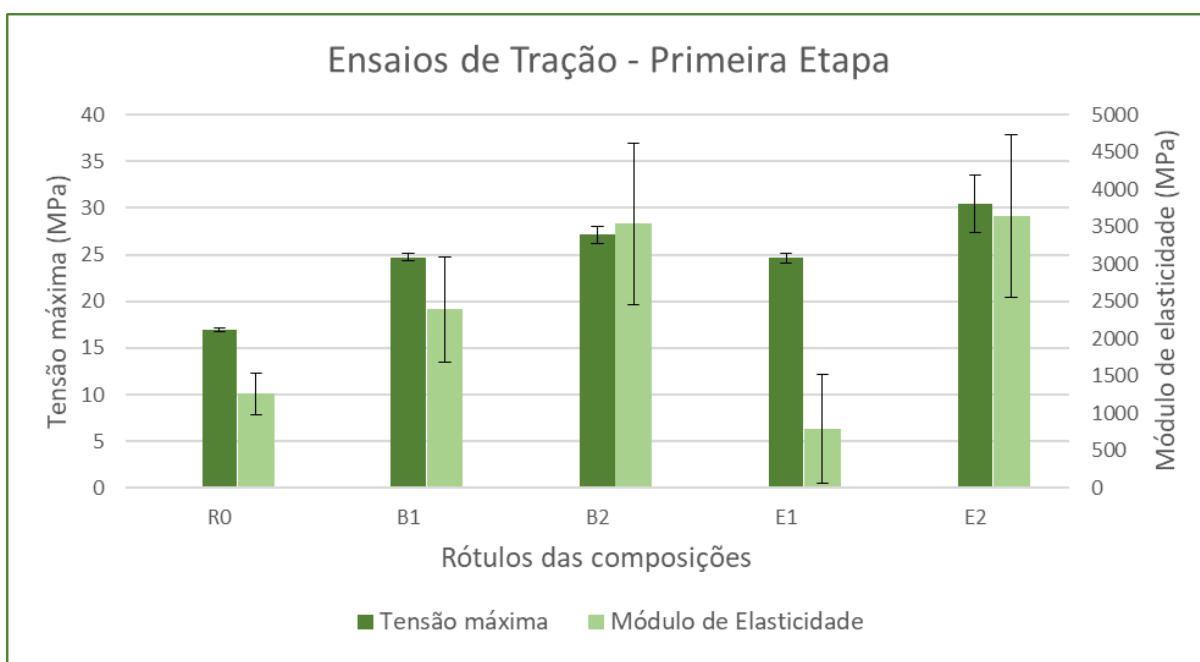
Dessa forma, a Primeira Etapa contou com cinco composições, incluindo a de referência (R0). A Segunda Etapa contou com quatro formulações, e a Terceira Etapa apresentou seis formulações, com todas as fibras com a formulação final.

5.1.4. Ensaios mecânicos

5.1.4.1. Ensaios de tração

Os ensaios de tração foram realizados nas cinco composições base, em conformidade com as condições previstas na norma ASTM D638-22. Os corpos de prova injetados nas dimensões especificadas na mesma norma foram testados, sendo realizados 10 ensaios para cada material. O objetivo de se realizar repetições acima do número mínimo indicado pela norma - no caso, cinco repetições - foi justamente garantir que os resultados obtidos seriam representativos do material como um todo. Contudo, verificou-se que, mesmo para os ensaios conduzidos com o material de referência, os valores de desvio padrão encontrados foram consideravelmente altos para os módulos de elasticidade, quando comparados com os valores dos módulos de tensão e com os outros ensaios realizados. Tal fenômeno pode estar relacionado com a utilização do módulo extensômetro da máquina de ensaios universal. Embora o seu uso seja recomendado para garantir valores mais precisos de deslocamento durante a submissão de estresse ao material, a sua sensibilidade gerou pequenas oscilações nas curvas. Essas variações, desprezíveis a olho nu, dificultaram o cálculo dos módulos de elasticidade das composições. Um outro fato que corrobora a suspeita sobre o uso do extensômetro é a acurácia em que foi possível se obter os módulos de flexão para as composições, apresentadas na seção 6.1.4.2. Ensaios de flexão, nos quais o extensômetro não foi utilizado. Os resultados dos ensaios de tração estão explicitados na Figura 19.

Figura 19 - Resultados dos ensaios de tração da Primeira Etapa.



Há diversas análises estatísticas que podem ser feitas para se obter conclusões sólidas sobre os resultados obtidos. Para avaliar os dados acima, optou-se por iniciar as análises pelo Teste F para análise de variâncias, com o objetivo de verificar a equivalência entre variâncias. A análise consistiu em realizar o Teste F para análise das variâncias entre o material de referência e cada um dos materiais desenvolvidos. Em seguida, foi realizado o Teste T de Student adequado para cada caso, ou seja, considerando-se se as variâncias eram equivalentes ou não. A Figura 20 traz um exemplo de como os testes estatísticos foram conduzidos, utilizando-se o *software* Excel. O intervalo de confiança utilizado foi de 5% ($\alpha = 0,05$). Todos os resultados estão expressos na Tabela 6.

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.

Resultados dos módulos de tensão da Primeira Etapa (MPa)					
R0	B1	B2	E1	E2	
16,80	24,57	28,08	24,40	23,82	
16,95	24,31	27,49	25,47	32,77	
16,85	24,40	27,43	24,59	29,49	
17,02	25,50	25,41	25,42	28,86	
17,33	24,82	28,10	24,16	28,41	
16,95	24,54	27,09	23,90	29,51	
16,76	24,30	27,43	24,85	32,00	
16,97	25,21	27,58	24,87	34,00	
17,00	24,61	26,90	24,70	31,87	
16,81	24,85	25,70	24,02	33,88	

B1-R0		
Teste-F: duas amostras para variâncias		
	B1	R0
Média	24,71052	16,94247
Variância	0,153954	0,026258
Observações	10	10
gl	9	9
F	5,863035	
P(F<=f) uni-caudal	0,007327	
F crítico uni-caudal	3,178893	
Teste-t: duas amostras presumindo variâncias diferentes		
	B1	R0
Média	24,71052	16,94247
Variância	0,153954	0,026258
Observações	10	10
Hipótese da diferença de média	0	
gl	12	
Stat t	57,86549	
P(T<=t) uni-caudal	2,34E-16	
t crítico uni-caudal	1,782288	
P(T<=t) bi-caudal	4,68E-16	
t crítico bi-caudal	2,178813	

Como $F > F_{crit}$, rejeita-se a hipótese de variâncias iguais.
Como $p < \alpha$ ($\alpha = 0,05$), rejeita-se a hipótese nula.

Como $T > T_{crit}$, rejeita-se a hipótese de médias iguais.
Como $p < \alpha$ ($\alpha = 0,05$), rejeita-se a hipótese nula.

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% ($\alpha = 0,05$).

Análise efetuada	Fibra utilizada	Teor de fibra (%)	Valor p Teste F	Resultado Teste F	Valor p Teste T	Resultado Teste T
B1 - R0	Bambu	20	0,007	Variâncias diferentes	< 0,001	Diferença significativa
B2 - R0	Bambu	40	< 0,001	Variâncias diferentes	< 0,001	Diferença significativa
E1 - R0	Eucalipto	20	0,001	Variâncias diferentes	< 0,001	Diferença significativa
E2 - R0	Eucalipto	40	< 0,001	Variâncias diferentes	< 0,001	Diferença significativa

A partir dos resultados dos testes estatísticos, verifica-se que há, de fato, diferenças significativas entre os materiais desenvolvidos e aquele utilizado na indústria. Há efeitos relacionados à adição das fibras à base polimérica, juntamente com os aditivos definidos para as composições base. Uma vez que todos os testes F indicaram variâncias diferentes, o Teste T realizado em cada caso foi aquele que não presumia variância equivalente. Nos casos analisados, é possível constatar que todas as composições apresentaram diferenças significativas em relação ao material de referência. Pode-se concluir, portanto, que a adição de fibras naturais, independentemente da concentração ou variedade, resultou em ganhos expressivos no que diz respeito ao módulo de tensão dos materiais. Este resultado está de acordo com a literatura, uma vez que o reforço de materiais poliméricos é frequentemente associado com um aumento nas propriedades de resistência à tração.

Uma vez que houve comprovação da diferença entre as composições base e a referência, a análise foi conduzida de forma a verificar se há de fato diferenças estatísticas significativas entre o uso das fibras de bambu e de eucalipto e suas diferentes concentrações. Para isso, foram conduzidas análises de variância de fator duplo com repetição, tanto para os resultados de módulo de tensão como para os de módulo de elasticidade. Estes testes também foram realizados com o auxílio do Excel.

Inicialmente, os resultados para a análise dos módulos de tensão estão indicados na Figura 21.

Figura 21 - Resultados da ANOVA para os dados de módulo de tração das composições da Primeira Etapa, com significância de 95%.

Concentrações			
Repetição	Fibra	20%	40%
1	Bambu	24,57	28,08
2	Bambu	24,31	27,49
3	Bambu	24,40	27,43
4	Bambu	25,50	25,41
5	Bambu	24,82	28,10
6	Bambu	24,54	27,09
7	Bambu	24,30	27,43
8	Bambu	25,21	27,58
9	Bambu	24,61	26,90
10	Bambu	24,85	25,70
1	Eucalipto	24,40	23,82
2	Eucalipto	25,47	32,77
3	Eucalipto	24,59	29,49
4	Eucalipto	25,42	28,86
5	Eucalipto	24,16	28,41
6	Eucalipto	23,90	29,51
7	Eucalipto	24,85	32,00
8	Eucalipto	24,87	34,00
9	Eucalipto	24,70	31,87
10	Eucalipto	24,02	33,88

RESUMO			
	20%	40%	Total
<i>Bambu</i>			
Contagem	10	10	20
Soma	247,1052	271,2304	518,3356
Média	24,71052	27,12304	25,91678
Variância	0,153954	0,823238	1,994533
<i>Eucalipto</i>			
Contagem	10	10	20
Soma	246,368	304,6098	550,9778
Média	24,6368	30,46098	27,54889
Variância	0,290502	9,61343	13,61794
<i>Total</i>			
Contagem	20	20	
Soma	493,4732	575,8402	
Média	24,67366	28,79201	
Variância	0,211962	7,875753	

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Amostra	26,63796	1	26,63796	9,79235607	0,003466	4,113165
Colunas	169,6084	1	169,6084	62,3495994	2,27E-09	4,113165
Interações	29,0985	1	29,0985	10,6968747	0,002369	4,113165
Dentro	97,93011	36	2,720281			
Total	323,275	39				

Verifica-se através da ANOVA, portanto, que pelo menos uma das composições analisadas possui uma diferença significativa em relação às outras, uma vez que $F > F_{crit}$, e $p < 0,05$. Contudo, através desta análise, não é possível dizer especificamente qual. Para isso, é necessário realizar outras análises estatísticas. Optou-se por realizar o Teste de Tukey para verificar qual(is) composição(ões) se destacam. A Figura 22 e a Tabela 7 apresentam o resultado deste teste.

Figura 22 - Resultados do Teste de Tukey para os dados de módulo de tração das composições da Primeira Etapa, com significância de 95%.

$$dms = q \cdot \sqrt{\frac{QMR}{n^{\circ} \text{ repetições}}}$$

QMR	2,720280963
nº de tratamentos	2
Graus de liberdade	36
nº de repetições	10
q	2,872
dms	1,498

Concentração	20%	Média 1	Média 2	Mód. da diferença
Bambu - Eucalipto		24,71051525	24,63680083	0,073714423

Concentração	40%	Média 1	Média 2	Mód. da diferença
Bambu - Eucalipto		27,12304125	30,4609836	3,337942344

Tabela 7 - Compilação dos resultados do Teste de Tukey para os módulos de tração da Primeira Etapa. b>a.

Teor de fibras de 20%	Teor de fibras de 40%
B1 ^a	B2 ^a
E1 ^a	E2 ^b

A partir do Teste de Tukey, é possível verificar que, no que se refere às composições base com 20% de teor de fibras, não houve diferenças significativas nos valores de módulo de tensão. O mesmo, contudo, não é observado nas composições com teor de 40% de fibras. O teste revela que neste caso há uma diferença significativa entre a composição base B2 e a E2. Este comportamento pode estar relacionado com o maior teor de fibras dessas composições. Ao se trabalhar com maiores concentrações, o comportamento dos materiais tornou-se mais distinto. Nesse caso, a composição de eucalipto se saiu melhor.

Além da avaliação dos módulos de tensão, foram realizados também testes estatísticos F e T de Student nos módulos de elasticidade das composições base um a um com os dados do material de referência. Assim como nos testes executados anteriormente, verificou-se que a variância do módulo de elasticidade de todas as composições base em relação à referência são significativamente diferentes. A Figura 23 apresenta um exemplo ilustrativo de como os testes foram executados neste caso. Na Tabela 8 estão os resultados encontrados para os módulos de elasticidade das composições base.

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.

Módulos de elasticidade para as composições da Primeira Etapa (MPa)					
R0	B1	B2	E1	E2	
1216,38	2398,98	4021,48	423,16	3219,78	
1400,48	2130,46	3701,85	1553,05	3571,84	
1404,95	3216,39	2905,40	662,82	2864,11	
1125,65	2155,27	2960,19	2584,52	4252,17	
1143,65	3885,14	4916,70	565,08	4563,13	
1039,28	2412,02	4283,21	529,34	2813,44	
944,17	1502,91	1076,68	456,68	2713,52	
1903,03	2495,47	3331,02	314,85	5671,80	
1367,00	2002,03	3671,21	289,87	2209,56	
1084,50	1724,03	4521,28	543,93	4595,94	

B1-R0		
Teste-F: duas amostras para variâncias		
	B1	R0
Média	2392,27	1262,91
Variância	492605	75371,6
Observações	10	10
gl	9	9
F	6,53568	
P(F<=f) uni-caudal	0,00501	
F crítico uni-caudal	3,17889	
Teste-t: duas amostras presumindo variâncias diferentes		
	B1	R0
Média	2392,27	1262,91
Variância	492605	75371,6
Observações	10	10
Hipótese da diferença de média	0	
gl	12	
Stat t	4,73879	
P(T<=t) uni-caudal	0,00024	
t crítico uni-caudal	1,78229	
P(T<=t) bi-caudal	0,00048	
t crítico bi-caudal	2,17881	

Como $F > F_{crit}$, rejeita-se a hipótese de variâncias iguais.

Como $p < \alpha$ ($\alpha = 0,05$), rejeita-se a hipótese nula.

Como $T > T_{crit}$, rejeita-se a hipótese de variâncias iguais.

Como $p < \alpha$ ($\alpha = 0,05$), rejeita-se a hipótese nula.

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% ($\alpha = 0,05$).

Análise efetuada	Fibra utilizada	Teor de fibra (%)	Valor p Teste F	Resultado Teste F	Valor p Teste T	Resultado Teste T
B1 - R0	Bambu	20	0,001	Variâncias equivalentes	< 0,001	Diferença significativa
B2 - R0	Bambu	40	< 0,001	Variâncias equivalentes	< 0,001	Diferença significativa
E1 - R0	Eucalipto	20	0,004	Variâncias diferentes	0,079	Não há diferença significativa
E2 - R0	Eucalipto	40	< 0,001	Variâncias diferentes	< 0,001	Diferença significativa

No caso dos módulos de elasticidade, verificou-se que, embora o comportamento de divergência das variâncias tenha sido mantido, levando a se realizar o Teste T de Student para variâncias diferentes em todos os casos, a composição E1 apresentou média equivalente ao material de referência. Isso indica que, diferentemente das outras composições, o material E1 não apresentou diferença

significativa quando comparado a R0, com intervalo de confiança de 95% ($0,079 > \alpha$). Contudo, neste caso específico, o valor encontrado para t foi negativo ($t = -1,922$), indicando que a composição E1 apresenta em média valores do módulo de elasticidade inferiores a R0. Este fato pode estar relacionado aos altos valores de desvio padrão encontrado para esta composição em especial, como é possível verificar na Figura 19, mas a princípio indica que, embora não seja de forma significativa, E1 é inferior a R0 no que se refere ao módulo de elasticidade.

De forma análoga, a Análise de Variância foi realizada a partir dos dados de módulo de elasticidade obtidos com as composições base. Os resultados podem ser verificados na Figura 24.

Figura 24 - ANOVA dos valores de módulo de elasticidade das composições da Primeira Etapa, com nível de significância de 95%.

		Concentrações	
Repetição	Fibra	20%	40%
1	Bambu	2398,98	4021,48
2	Bambu	2130,46	3701,85
3	Bambu	3216,39	2905,40
4	Bambu	2155,27	2960,19
5	Bambu	3885,14	4916,70
6	Bambu	2412,02	4283,21
7	Bambu	1502,91	1076,68
8	Bambu	2495,47	3331,02
9	Bambu	2002,03	3671,21
10	Bambu	1724,03	4521,28
1	Eucalipto	423,16	3219,78
2	Eucalipto	1553,05	3571,84
3	Eucalipto	662,82	2864,11
4	Eucalipto	2584,52	4252,17
5	Eucalipto	565,08	4563,13
6	Eucalipto	529,34	2813,44
7	Eucalipto	456,68	2713,52
8	Eucalipto	314,85	5671,80
9	Eucalipto	289,87	2209,56
10	Eucalipto	543,93	4595,94

Anova: fator duplo com repetição

RESUMO

20%

40%

Total

Bambu

Contagem

101020

Soma

23922,735389,0259311,72

Média

2392,273538,9022965,586

Variância

492605,111706981133871

Eucalipto

Contagem

101020

Soma

7923,29736475,2844398,58

Média

792,32973647,5282219,929

Variância

524368,211821472953654

Total

Contagem

2020

Soma

3184671864,3

Média

1592,33593,215

Variância

11553591117611

ANOVA

Fonte da variação

SQ

gl

MQ

F

valor-P

F crítico

Amostra

5560045

1

5560045

6,59981603

0,014489

4,113165

Colunas

40036606

1

40036606

47,5237569

4,53E-08

4,113165

Interações

7298007

1

7298007

8,66278957

0,005654

4,113165

Dentro

30328365

36

842454,6

Total

83223023

39

Mais uma vez, foi verificada a presença de diferenças significativas entre as formulações. Para verificar quais são destoantes, foi necessário realizar um novo Teste de Tukey. A Figura 25 e a Tabela 9 trazem os resultados do Teste de Tukey para os módulos de elasticidade da Primeira Etapa.

Figura 25 - Resultados do Teste de Tukey para os dados de módulo de elasticidade das composições da Primeira Etapa, com significância de 95%.

$dms = q \cdot \sqrt{\frac{QMR}{n^{\circ} \text{ repetições}}}$				
QMR	842454,5729			
nº de tratamentos	2			
Graus de liberdade	36			
nº de repetições	10			
q	2,872			
dms	833,600			

Concentração	20%	Média 1	Média 2	Mód. da diferença
Bambu - Eucalipto		2392,270495	3538,901727	1146,631232

Concentração	40%	Média 1	Média 2	Mód. da diferença
Bambu - Eucalipto		792,3296724	3647,528338	2855,198665

Tabela 9 - Compilação dos resultados do Teste de Tukey para os módulos de elasticidade da Primeira Etapa. b>a.

Teor de fibras de 20%	Teor de fibras de 40%
B1 ^b	B2 ^a
E1 ^a	E2 ^b

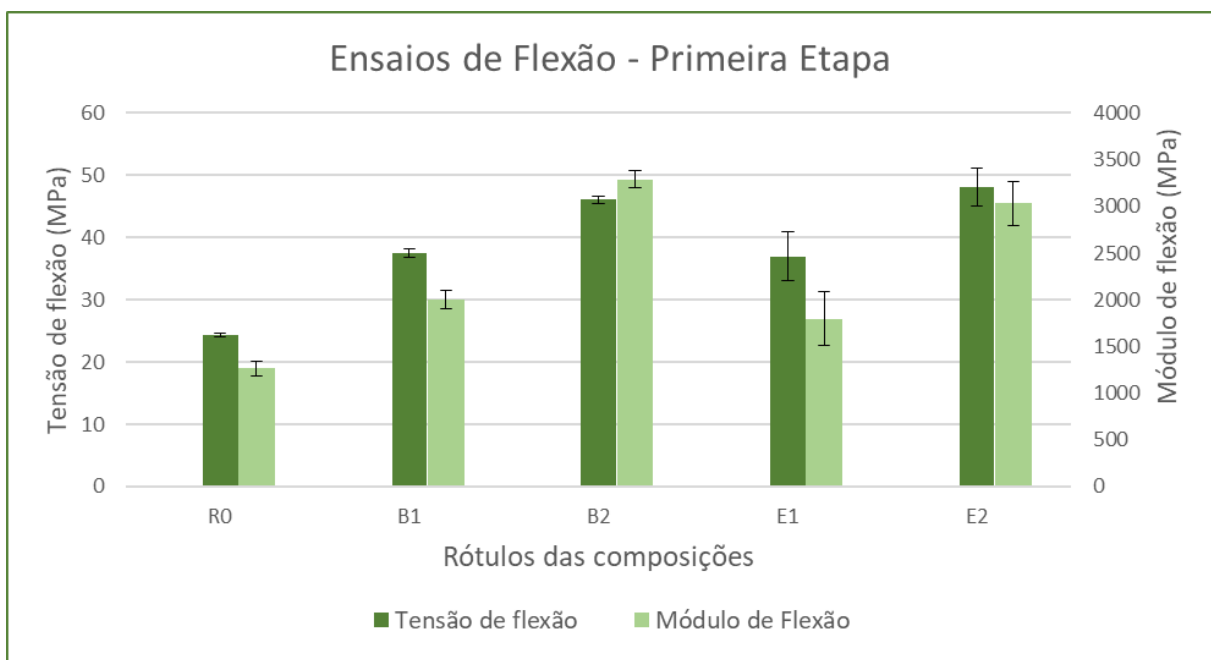
Analisando-se os resultados do Teste Tukey para os módulos de elasticidade, é possível verificar que houve diferença significativa tanto para as composições com teor de 20% como para as de 40% de teor de fibras. Logo, é possível dizer que as composições B1 e E1; e B2 e E2 apresentam diferenças significativas entre si no que se refere ao módulo de elasticidade. Contudo, verifica-se que o comportamento não é coerente, uma vez que ora a composição de bambu se apresentou como melhor, ora a de eucalipto. Essa inconsistência pode mais uma vez estar relacionada com os altos valores de desvio padrão encontrados.

5.1.4.2. Ensaios de flexão

Os ensaios de flexão foram realizados utilizando-se as cinco composições base, em acórdância com as condições previstas na norma ASTM D790-17. Da mesma forma que para os ensaios de flexão, os corpos de prova injetados nas

dimensões especificadas na mesma norma foram testados, sendo realizados 10 ensaios para cada material. O objetivo da utilização de um elevado número de ensaios, mais uma vez, foi garantir que os resultados seriam fidedignos e representativos. Diferentemente do que foi observado nas curvas de tração, as curvas de flexão apresentaram aspecto suave, facilitando o processo de cálculo do módulo de flexão. Este fato se reflete nos baixos valores de desvio padrão encontrados, quando comparados com aqueles observados no teste anterior. Os resultados dos ensaios de flexão estão explicitados na Figura 26.

Figura 26 - Resultados dos ensaios de flexão para as composições da Primeira Etapa.



A abordagem estatística para a análise destes resultados foi semelhante àquela adotada na seção anterior. Inicialmente, foram realizados testes F e testes T de Student entre as composições base e o material de referência, com o intuito de verificar se haveria diferenças significativas entre os dados. A Tabela 10 sintetiza os resultados encontrados.

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% ($\alpha = 0,05$).

Análise efetuada	Fibra utilizada	Teor de fibra (%)	Valor p Teste F	Resultado Teste F	Valor p Teste T	Resultado Teste T
B1 - R0	Bambu	20	0,007	Variâncias diferentes	< 0,001	Diferença significativa
B2 - R0	Bambu	40	0,045	Variâncias diferentes	< 0,001	Diferença significativa
E1 - R0	Eucalipto	20	< 0,001	Variâncias diferentes	< 0,001	Diferença significativa
E2 - R0	Eucalipto	40	< 0,001	Variâncias diferentes	< 0,001	Diferença significativa

Mais uma vez, foi realizado o Teste T de Student para variâncias diferentes em todos os casos. Verifica-se que todos os materiais reforçados apresentaram variâncias e médias com diferenças significativas em relação ao material de referência, como esperado. Este comportamento traduz-se nas composições apresentando propriedades diferentes daquelas observadas em R0.

A próxima etapa da análise consiste na aplicação da ANOVA nos dados obtidos. A Figura 27 apresenta os resultados da análise.

Figura 27 - ANOVA dos valores de tensão de flexão das composições da Primeira Etapa, com nível de significância de 95%.

Repetição	Fibra	Concentrações	
		20%	40%
1	Bambu	38,07	46,19
2	Bambu	38,29	46,10
3	Bambu	37,33	45,98
4	Bambu	37,61	46,89
5	Bambu	37,93	46,48
6	Bambu	36,96	45,85
7	Bambu	36,70	45,82
8	Bambu	38,40	46,30
9	Bambu	37,87	45,99
10	Bambu	36,27	44,85
1	Eucalipto	39,14	44,84
2	Eucalipto	29,77	45,32
3	Eucalipto	38,97	48,32
4	Eucalipto	37,77	49,35
5	Eucalipto	29,97	47,93
6	Eucalipto	38,72	46,98
7	Eucalipto	37,76	45,29
8	Eucalipto	41,51	52,94
9	Eucalipto	37,33	46,22
10	Eucalipto	38,60	53,31

Anova: fator duplo com repetição

RESUMO	20%	40%	Total
<i>Bambu</i>			
Contagem	10	10	20
Soma	375,425	460,44	835,865
Média	37,5425	46,044	41,7933
Variância	0,50634	0,28076	19,3926
<i>Eucalipto</i>			
Contagem	10	10	20
Soma	369,53	480,503	850,033
Média	36,953	48,0503	42,5017
Variância	15,2567	9,24546	44,0145
<i>Total</i>			
Contagem	20	20	
Soma	744,955	940,943	
Média	37,2478	47,0472	
Variância	7,55818	5,57175	

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítica
Amostra	5,01855	1	5,01855	0,79378181	0,37888	4,11317
Colunas	960,286	1	960,286	151,88807	1,8E-14	4,11317
Interações	16,8463	1	16,8463	2,66457941	0,11132	4,11317
Dentro	227,604	36	6,32233			
Total	1209,75	39				

De posse dos resultados da ANOVA de dois fatores com repetição, verifica-se desta vez que não há evidências o suficiente para rejeitar a hipótese de que as variâncias entre as composições são equivalentes. De toda forma, o Teste de Tukey foi executado, para efeitos de confirmação. A Figura 28 e a Tabela 11 trazem estes resultados.

Figura 28 - Resultados do Teste de Tukey para os dados de tensão de flexão das composições da Primeira Etapa, com significância de 95%.

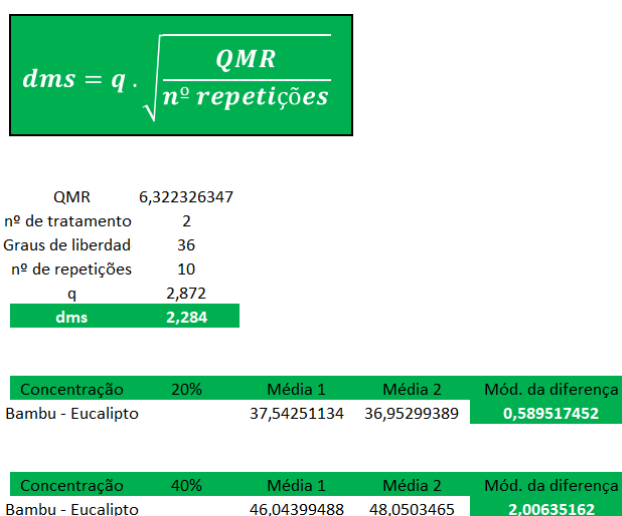


Tabela 11 - Compilação dos resultados do Teste de Tukey para a tensão de flexão da Primeira Etapa. b>a.

Teor de fibras de 20%	Teor de fibras de 40%
B1 ^a	B2 ^a
E1 ^a	E2 ^a

Assim como verificado na Análise de Variância, o Teste de Tukey indicou que não há diferenças significativas entre as composições no que se refere aos valores de tensão de flexão. Observa-se nesse caso a coerência dos resultados: tanto para valores de concentração de 20 como para 40%, os resultados indicaram que o comportamento do reforço, seja com fibras de bambu ou de eucalipto, foi semelhante. É o equivalente a dizer que, para esta propriedade específica, o uso de qualquer uma das fibras resulta em ganhos semelhantes.

Realizando-se o mesmo procedimento para avaliação dos dados dos módulos de flexão, obteve-se a Tabela 12.

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% ($\alpha = 0,05$).

Análise efetuada	Fibra utilizada	Teor de fibra (%)	Valor p Teste F	Resultado Teste F	Valor p Teste T	Resultado Teste T
B1 - R0	Bambu	20	0,268	Variâncias equivalentes	< 0,001	Diferença significativa
B2 - R0	Bambu	40	0,321	Variâncias equivalentes	< 0,001	Diferença significativa
E1 - R0	Eucalipto	20	< 0,001	Variâncias diferentes	< 0,001	Diferença significativa
E2 - R0	Eucalipto	40	0,001	Variâncias diferentes	< 0,001	Diferença significativa

Para os módulos de flexão, o teste F indicou que as variâncias para as composições de bambu são equivalentes às do material de referência, portanto, nesses casos, foi realizado o teste T de Student para variâncias equivalentes. Os resultados dos testes F e T de Student indicam que, embora as composições à base de bambu tenham apresentado variâncias equivalentes à R0, todos os materiais apresentaram diferenças significativas em relação a referência quando comparados os módulos de flexão, indicando que a hipótese nula de que os materiais seriam equivalentes deve ser descartada. Tais dados confirmam que as composições são superiores à referência para essa propriedade em específico.

O teste de ANOVA realizado nas composições para os materiais está registrado na Figura 29.

Figura 29 - Resultado do teste ANOVA para os módulos de flexão das composições da Primeira Etapa.

Repetição	Fibra	Concentrações	
		20%	40%
1	Bambu	2128,17	3349,42
2	Bambu	2091,64	3309,51
3	Bambu	1917,98	3369,92
4	Bambu	2067,92	3383,61
5	Bambu	2069,47	3354,39
6	Bambu	1906,76	3367,75
7	Bambu	1860,66	3233,60
8	Bambu	1971,93	3177,17
9	Bambu	2071,63	3196,95
10	Bambu	1910,25	3145,82
1	Eucalipto	2085,52	2778,03
2	Eucalipto	1304,36	2795,19
3	Eucalipto	1786,69	2981,85
4	Eucalipto	1974,91	3140,56
5	Eucalipto	1257,24	3183,91
6	Eucalipto	1946,52	2995,72
7	Eucalipto	1891,77	2796,80
8	Eucalipto	1837,30	3350,85
9	Eucalipto	1898,88	2832,99
10	Eucalipto	1989,83	3445,61

Anova: fator duplo com repetição

RESUMO	20%	40%	Total
<i>Bambu</i>			
Contagem	10	10	20
Soma	19996,41	32888,12	52884,53
Média	1999,641	3288,812	2644,227
Variância	9230,706	8288,501	445657,2

<i>Eucalipto</i>			
Contagem	10	10	20
Soma	17973,02	30301,51	48274,54
Média	1797,302	3030,151	2413,727
Variância	81061,34	58544,9	466107,4

<i>Total</i>			
Contagem	20	20	
Soma	37969,43	63189,64	
Média	1898,472	3159,482	
Variância	53543,84	49264,64	

ANOVA						
	Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P
Amostra		531301,7	1	531301,7	13,52554079	0,000763
Colunas		15901468	1	15901468	404,8094936	3,59E-21
Interações		7930,517	1	7930,517	0,201890078	0,655893
Dentro		1414129	36	39281,36		
Total		17854830	39			

A ANOVA para os valores de módulo de flexão revela que há evidências para se rejeitar a hipótese nula de que as composições base apresentam módulos de flexão equivalentes entre si. Portanto, neste caso, verifica-se que há, de fato, diferenças significativas entre os materiais. O Teste de Tukey é responsável por fornecer mais informações quanto às propriedades das composições, como mostrado na Figura 30 e na Tabela 13.

Figura 30 - Resultados do Teste de Tukey para os dados de módulo de flexão das composições da Primeira Etapa, com significância de 95%.

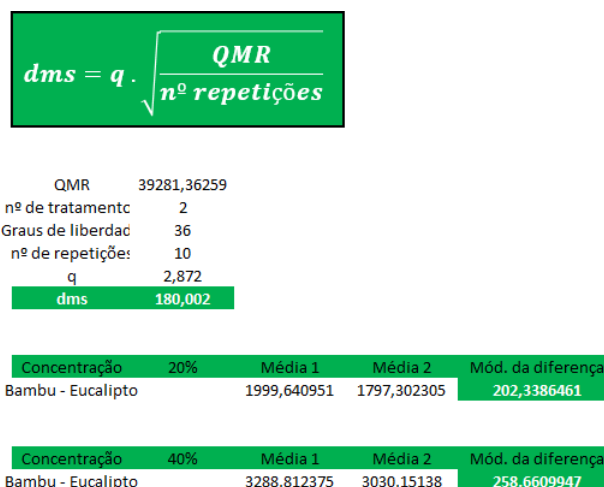


Tabela 13 - Compilação dos resultados do Teste de Tukey para o módulo de flexão da Primeira Etapa. b>a

Teor de fibras de 20%	Teor de fibras de 40%
B1 ^b	B2 ^b
E1 ^a	E2 ^a

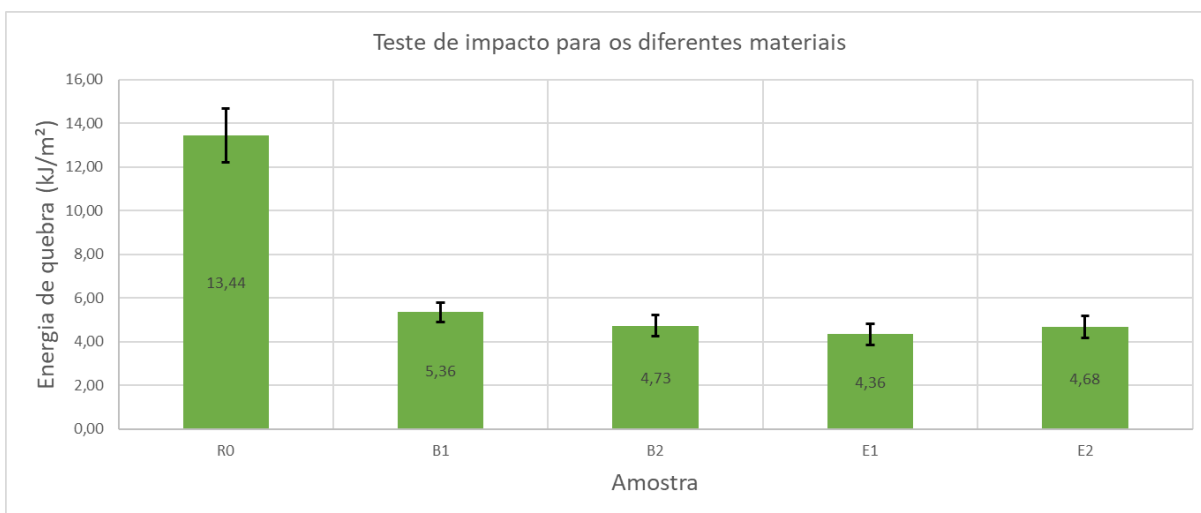
Como os módulos das diferenças das médias foram, em ambos os casos, maiores do que dms, comprova-se o que já havia sido constatado a partir da ANOVA. Há uma significativa diferença entre as composições à base de bambu e de eucalipto, em ambas as concentrações. Neste caso, percebe-se que as composições à base de bambu apresentaram resultados ligeiramente melhores. Mais uma vez, é possível constatar a coerência dos resultados, uma vez que, para ambos os casos, as fibras de bambu apresentaram maior desempenho do que as de eucalipto, mostrando-se mais rígidas.

5.1.4.3. Ensaios de resistência ao impacto Izod

Os ensaios de resistência ao impacto foram realizados para as cinco composições base. Não houve qualquer dificuldade específica para a realização dos ensaios, que foram executados em conformidade com as condições previstas na norma ASTM D256-10(18). Os corpos de prova foram obtidos por injeção, utilizando-se as

composições desenvolvidas e o material de referência. Foram realizados 10 ensaios para cada material, acima do valor mínimo de cinco recomendado pela norma, com o intuito de se obter resultados fidedignos e representativos. Os resultados dos ensaios de flexão estão explicitados na Figura 31.

Figura 31 - Resultados dos ensaios de impacto das composições da Primeira Etapa.



A partir dos resultados, já é possível verificar que os valores obtidos para as composições foram muito inferiores àquele de R0, mesmo que mais análises estatísticas sejam necessárias para se confirmar as especulações. De toda forma, este comportamento já é esperado, uma vez que materiais reforçados com fibras tendem a apresentar menor resistência ao impacto do que aqueles de composição exclusivamente polimérica. Este comportamento está intimamente relacionado com a rigidez do material. Incorporar um reforço em um polímero geralmente torna-o mais rígido, levando a ganhos na resistência à tração e à flexão, como foi observado nos resultados anteriores. Contudo, este ganho de rigidez vem a custo da capacidade de absorção e dispersão de energia do material, o que se traduz em uma menor resistência a impacto. Os testes F e T de Student foram realizados para comparação das composições com a referência. Os resultados estão registrados na Tabela 14.

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% ($\alpha = 0,05$).

Análise efetuada	Fibra utilizada	Teor de fibra (%)	Valor p Teste F	Resultado Teste F	Valor p Teste T	Resultado Teste T
B1 - R0	Bambu	20	0,003	Variâncias diferentes	< 0,001	Diferença significativa
B2 - R0	Bambu	40	0,005	Variâncias diferentes	< 0,001	Diferença significativa
E1 - R0	Eucalipto	20	0,006	Variâncias diferentes	< 0,001	Diferença significativa
E2 - R0	Eucalipto	40	0,008	Variâncias diferentes	< 0,001	Diferença significativa

Por meio dos testes F, verificou-se que as variâncias de todos os materiais em relação à referência se mostraram diferentes, e, portanto, foi realizado o teste T de Student para variâncias diferentes em todos os casos. Como visto no gráfico, os testes estatísticos preliminares indicam que, para a propriedade de resistência ao impacto, há diferenças significativas entre o material de referência e as composições. Tais resultados se relacionam com os baixos valores médios encontrados para os compósitos quando comparados com R0. Diferentemente das análises anteriores, contudo, esses dados evidenciam a inferioridade das composições em relação à referência. Estes resultados comprovam também a necessidade da utilização do modificador de impacto, aditivo responsável por conferir melhores propriedades mecânicas de resistência ao impacto para as formulações.

Os testes ANOVA foram realizados entre as composições base, com o intuito de avaliar a existência de diferenças significativas entre si. O resultado encontra-se na Figura 32.

Figura 32 - Resultado do teste ANOVA para os ensaios de impacto das composições da Primeira Etapa.

Repetição	Fibra	Concentrações	
		20%	40%
1	Bambu	5,74	4,45
2	Bambu	4,50	4,35
3	Bambu	4,93	4,22
4	Bambu	5,78	4,66
5	Bambu	5,22	4,93
6	Bambu	5,17	4,98
7	Bambu	5,34	4,29
8	Bambu	5,60	4,75
9	Bambu	5,98	5,87
10	Bambu	5,37	4,79
1	Eucalipto	4,75	4,88
2	Eucalipto	5,04	4,90
3	Eucalipto	3,98	5,08
4	Eucalipto	3,95	4,53
5	Eucalipto	5,05	4,79
6	Eucalipto	3,84	4,02
7	Eucalipto	3,76	4,03
8	Eucalipto	4,57	4,00
9	Eucalipto	4,16	5,39
10	Eucalipto	4,47	5,21

RESUMO	20%	40%	Total
<i>Bambu</i>			
Contagem	10	10	20
Soma	53,6332	47,298	100,931
Média	5,36332	4,7298	5,04656
Variância	0,1939	0,23284	0,30776
<i>Eucalipto</i>			
Contagem	10	10	20
Soma	43,5711	46,8279	90,399
Média	4,35711	4,68279	4,51995
Variância	0,23508	0,26493	0,26476
<i>Total</i>			
Contagem	20	20	
Soma	97,2043	94,1259	
Média	4,86022	4,70629	
Variância	0,46964	0,23637	

ANOVA	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Fonte da variação						
Amostra	2,77317	1	2,77317	11,969393	0,00141	4,11317
Colunas	0,23693	1	0,23693	1,0226052	0,31865	4,11317
Interações	2,30021	1	2,30021	9,9280437	0,00327	4,11317
Dentro	8,34077	36	0,23169			
Total	13,6511	39				

Mesmo todos os materiais não tendo apresentado resultados satisfatórios em relação a R0, verifica-se que ainda há diferenças significativas entre as propriedades de cada composição. A Análise de Variância indica que o teor de fibras dos materiais não revela evidências o suficiente para descarte de que são equivalentes entre si. Contudo, ao se avaliar a diferença entre composições de diferentes fibras, as diferenças tornam-se significativas para pelo menos parte do conjunto. O Teste de Tukey é capaz de dizer qual(is) composição(ões) apresentam diferenças significativas, como mostrado na Figura 33 e na Tabela 15.

Figura 33 - Resultados do Teste de Tukey para os dados de resistência ao impacto das composições da Primeira Etapa, com significância de 95%.

$dms = q \cdot \sqrt{\frac{QMR}{n^{\circ} \text{ repetições}}}$			
QMR	0,23168813		
nº de tratamento	2		
Graus de liberdade	36		
nº de repetições	10		
q	2,872		
dms	0,437		

Concentração	20%	Média 1	Média 2	Mód. da diferença
Bambu - Eucalipto		5,36332414	4,35711049	1,006213651

Concentração	40%	Média 1	Média 2	Mód. da diferença
Bambu - Eucalipto		4,72979526	4,68279168	0,04700358

Tabela 15 - Compilação dos resultados do Teste de Tukey para a resistência ao impacto da Primeira Etapa. b>a.

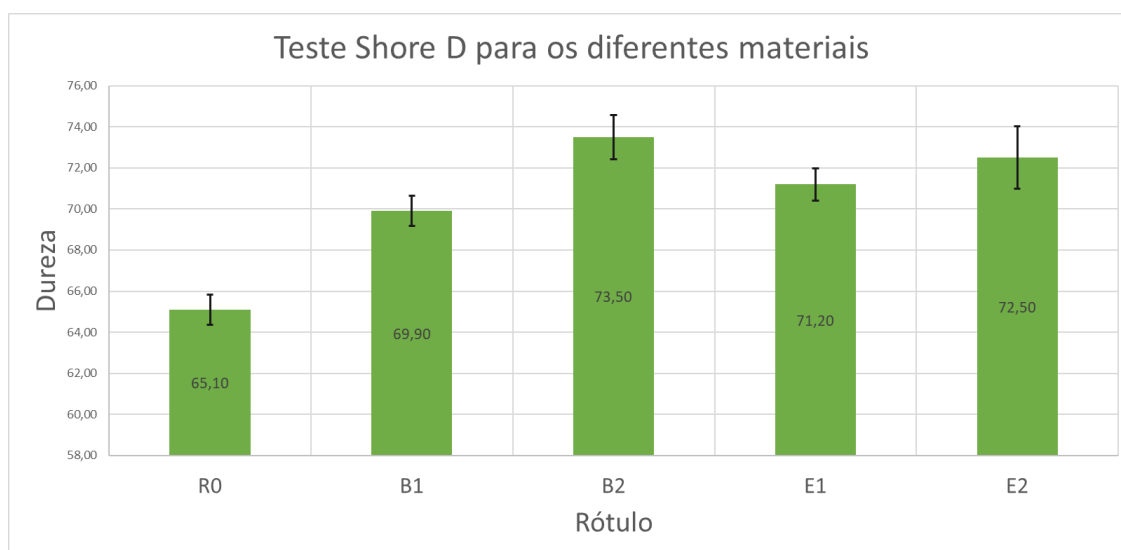
Teor de fibras de 20%	Teor de fibras de 40%
B1 ^b	B2 ^a
E1 ^a	E2 ^a

Há, portanto, diferenças significativas entre as composições B1 e E1, nas quais há uma concentração menor de fibras naturais. Este fenômeno pode ser relacionado com o fato de que, quanto maior o teor de reforço no material, característica já conhecida por reduzir a resistência ao impacto de compósitos, menor a influência do tipo específico de fibra no produto. Nota-se que, em menores quantidades, as fibras diferenciam-se mais em seus comportamentos nas composições, o que pode ser devido ao fato de que um ponto de distinção não está tão próximo ou ter sido atingido.

5.1.4.4. Ensaios de dureza *Shore D*

Os ensaios de dureza *Shore D* foram realizados em todas as composições base. Não houve qualquer dificuldade específica para a realização dos ensaios, que foram executados em conformidade com as condições previstas na norma ASTM D2240-15(21). Garantiu-se que os corpos de prova possuíam a espessura mínima recomendada na norma para a realização dos ensaios. Os corpos de prova foram obtidos por injeção, utilizando-se as composições desenvolvidas e o material de referência. Foram realizados 10 ensaios para cada material, acima do valor mínimo de cinco recomendado pela norma, com o intuito de se obter resultados fidedignos e representativos. Os resultados dos ensaios de flexão estão explicitados na Figura 34.

Figura 34 - Resultados dos ensaios de dureza Shore D das composições da Primeira Etapa.



De modo análogo aos resultados obtidos nos ensaios de resistência ao impacto, já é possível perceber através da avaliação do gráfico que as composições apresentam comportamentos muito diferentes do material de referência no que se refere à dureza. Deve-se também ressaltar que este comportamento é esperado, uma vez que as mesmas propriedades que fazem as composições são aquelas que tornam o material mais duro. Contudo, os testes estatísticos ainda são necessários para avaliações mais embasadas. A Tabela 16 traz as avaliações das composições em relação a R0 para os testes de dureza.

Tabela 16 - Resultados dos Testes T e F a dureza Shore D entre as composições base e a referência, com intervalo de confiança de 95% ($\alpha = 0,05$).

Análise efetuada	Fibra utilizada	Teor de fibra (%)	Valor p Teste F	Resultado Teste F	Valor p Teste T	Resultado Teste T
B1 - R0	Bambu	20	0,423	Variâncias equivalentes	< 0,001	Diferença significativa
B2 - R0	Bambu	40	0,022	Variâncias diferentes	< 0,001	Diferença significativa
E1 - R0	Eucalipto	20	0,500	Variâncias equivalentes	< 0,001	Diferença significativa
E2 - R0	Eucalipto	40	0,136	Variâncias equivalentes	< 0,001	Diferença significativa

O teste F para cada caso mostrou que as variâncias eram equivalentes, exceto para a análise B2 - R0. Por conta disso, foi realizado o teste T de Student para variâncias equivalentes, exceto para essa composição. Os baixíssimos valores de p encontrados no Teste T de Student confirmam o que já havia sido verificado, há uma diferença significativa e nítida entre os resultados das composições base e os da referência. Este resultado já era esperado, por conta do caráter rígido de materiais reforçados em relação a polímeros. A constatação é de que todas as composições são superiores à R0 no que se refere à dureza.

O teste ANOVA foi executado para verificar a equivalência ou não entre as composições base. A Figura 35 apresenta os resultados encontrados.

Figura 35 - Resultado do teste ANOVA para os resultados dos ensaios de dureza Shore D das composições da Primeira Etapa.

		Concentrações	
Repetição	Fibra	20%	40%
1	Bambu	71,00	71,00
2	Bambu	72,00	73,00
3	Bambu	72,00	70,00
4	Bambu	71,00	72,00
5	Bambu	72,00	72,00
6	Bambu	70,00	74,00
7	Bambu	70,00	71,00
8	Bambu	71,00	74,00
9	Bambu	71,00	74,00
10	Bambu	72,00	74,00
1	Eucalipto	70,00	72,00
2	Eucalipto	70,00	74,00
3	Eucalipto	71,00	75,00
4	Eucalipto	69,00	74,00
5	Eucalipto	70,00	72,00
6	Eucalipto	70,00	74,00
7	Eucalipto	70,00	72,00
8	Eucalipto	69,00	74,00
9	Eucalipto	69,00	74,00
10	Eucalipto	71,00	74,00

Anova: fator duplo com repetição

RESUMO	20%	40%	Total
Bambu			
Contagem	10	10	20
Soma	712	725	1437
Média	71,2	72,5	71,85
Variância	0,62222	2,27778	1,81842
Eucalipto			
Contagem	10	10	20
Soma	699	735	1434
Média	69,9	73,5	71,7
Variância	0,54444	1,16667	4,22105
Total			
Contagem	20	20	
Soma	1411	1460	
Média	70,55	73	
Variância	0,99737	1,89474	

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Amostra	0,225	1	0,225	0,19518072	0,66128	4,11317
Colunas	60,025	1	60,025	52,0698795	1,7E-08	4,11317
Interações	13,225	1	13,225	11,4722892	0,00172	4,11317
Dentro	41,5	36	1,15278			
Total	114,975	39				

O resultado do teste ANOVA indica que não há diferença significativa entre as variedades de fibras naturais utilizadas na performance da dureza. Contudo, há também a revelação de que os diferentes valores de teor de fibra são responsáveis por gerar diferenças significativas entre os materiais, e que os fatores de interação são relevantes. O Teste de Tukey se faz necessário para identificar os materiais destoantes dos restantes. A Figura 36 e a Tabela 17 traz o resultado do Teste de Tukey.

Figura 36 - Resultados do Teste de Tukey para os dados de dureza Shore D das composições da Primeira Etapa, com significância de 95%.

$dms = q \cdot \sqrt{\frac{QMR}{n^{\circ} \text{ repetições}}}$				
QMR	1,15277778			
n° de tratamento	2			
Graus de liberdade	36			
n° de repetições	10			
q	2,872			
dms	0,975			
Concentração	20%	Média 1	Média 2	Mód. da diferença
Bambu - Eucalipto		69,9	71,2	1,3
Concentração	40%	Média 1	Média 2	Mód. da diferença
Bambu - Eucalipto		73,5	72,5	1

Tabela 17 - Compilação dos resultados do Teste de Tukey para os ensaios de dureza Shore D da Primeira Etapa. b>a.

Teor de fibras de 20%	Teor de fibras de 40%
B1 ^a	B2 ^b
E1 ^b	E2 ^a

Por algum motivo, os resultados do Teste de Tukey foram incoerentes com aqueles visualizados na ANOVA. Contudo, após meticulosa revisão das etapas dos testes estatísticos, não foram encontrados erros no desenvolvimento. Dessa forma, as inconsistências podem estar relacionadas a problemas na coleta de dados durante os ensaios, ou às interações que se provaram significativas no teste ANOVA. Dessa forma, conclui-se que, para essa análise, pode ter havido interações significativas entre o teor e o tipo de fibra, levando a resultados corretos, mas aparentemente incoerentes.

5.2. Segunda Etapa

A Segunda Etapa deste estudo constitui a definição das concentrações de um novo aditivo, o modificador de impacto, também chamado de elastômero. Desde a

concepção inicial do projeto, a necessidade de utilização deste aditivo já era esperada, uma vez que o uso de fibras naturais como reforço acabam por resultar em materiais rígidos, com menor capacidade de absorção de energia em situações de impacto. Garantir boas propriedades mecânicas neste aspecto, portanto, se faz imperativo, especialmente quando consideradas as condições de aplicação pretendida dos materiais.

Para a execução dos testes, foi utilizado o modificador de impacto comercial Daplen™ EG251AIB, da Borealis. As composições escolhidas para a realização dos testes foram feitas a partir das fibras de bambu, utilizando-se toda a faixa granulométrica.

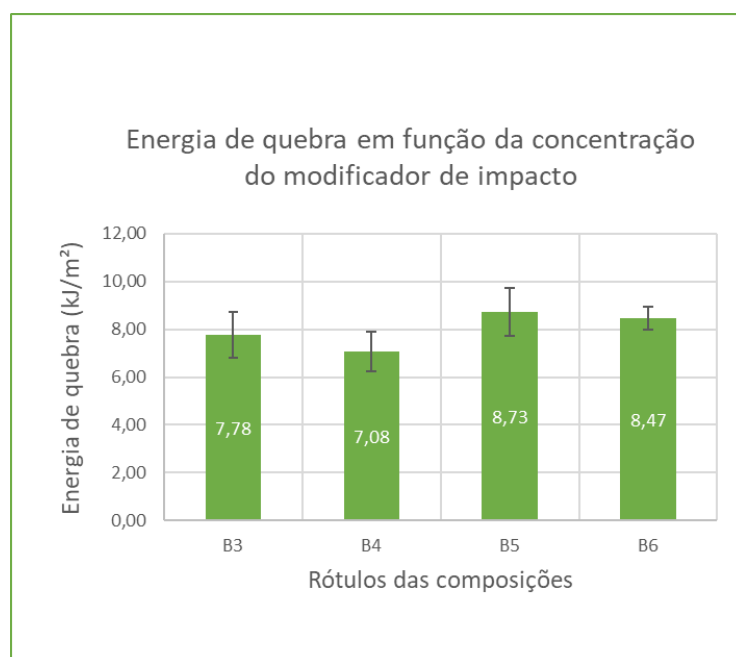
Esta Etapa apresenta, portanto, um escopo mais enxuto que as demais. Aqui, deseja-se verificar apenas a ação do modificador de impacto nas composições. Para isso, quatro concentrações diferentes do material foram testadas. As composições utilizadas estão expostas na Tabela 18.

Tabela 18 - Planejamento do experimento da segunda Etapa.

	Rótulo	Fibra	Granulometria (mesh)	Teor de fibras (%)	Teor de MAPP (%)	Teor de antichamas (%)	Teor de pigmento (%)
2ª Etapa	B3	Bambu	Toda a faixa	20%	2,00%	1,50%	1,00%
	B4	Bambu	Toda a faixa	20%	2,00%	1,50%	1,00%
	B5	Bambu	Toda a faixa	20%	2,00%	1,50%	1,00%
	B6	Bambu	Toda a faixa	40%	2,00%	1,50%	1,00%

A fabricação das composições seguiu o fluxograma explicitado na Figura 4, sem maiores dificuldades. Entretanto, diferentemente da Primeira Etapa, na fabricação das composições B3, B4, B5 e B6 já foram utilizadas as fibras de bambu integralmente. A Figura 37 apresenta os resultados encontrados.

Figura 37 - Resultados dos ensaios de resistência de impacto das composições da Segunda Etapa.



Verifica-se que há certa semelhança entre os resultados obtidos, sendo necessárias análises estatísticas para verificar a diferença ou não entre os resultados obtidos. Para isso, realizou-se uma ANOVA entre valores encontrados. A Figura 38 traz a execução da análise, bem como os resultados encontrados.

Figura 38 - Realização da Análise de Variância nas composições da Segunda Etapa.

Energia de quebra para cada composição (Kj/m²)			
B3	B4	B5	B6
7,52	8,51	7,83	9,09
7,47	7,18	8,06	7,72
8,10	5,97	10,47	7,87
8,54	7,13	9,71	8,83
8,78	6,25	9,03	8,26
6,81	8,06	7,35	8,89
8,95	6,28	8,40	8,04
6,73	6,50	9,16	8,78
8,62	7,59	7,79	8,51
6,27	7,32	9,50	8,74

Anova: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
B3	10	77,7722	7,77722	0,914131304
B4	10	70,79893	7,079893	0,692075205
B5	10	87,2948	8,72948	0,999028896
B6	10	84,73164	8,473164	0,221986653

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	16,51361	3	5,504535	7,787906137	0,000392	2,866266
Dentro dos grupos	25,445	36	0,706806			
Total	41,9586	39				

A partir dos resultados, verifica-se que há, de fato, evidências para se rejeitar a hipótese de que as composições apresentam performances equivalentes. Para verificar quais são os materiais destoantes, utilizou-se o Teste de Tukey. A Figura 39 e Tabela 19 trazem os resultados do teste.

Figura 39 - Resultados do Teste de Tukey para a comparação das composições da Segunda Etapa.

$dms = q \cdot \sqrt{\frac{QMR}{n^{\circ} \text{ repetições}}}$			
QMR	0,706805515		
nº de tratamento:	4		
Graus de liberdade	36		
nº de repetições	10		
q	3,814		
dms	1,014		

Comparação	Média 1	Média 2	Mód. da diferença
B3 - B4	7,777219507	7,079892877	0,69732663
B3 - B5	7,777219507	8,729480025	0,952260518
B3 - B6	7,777219507	8,473163633	0,695944127
B4 - B5	7,079892877	8,729480025	1,649587148
B4 - B6	7,079892877	8,473163633	1,393270757
B5 - B6	8,729480025	8,473163633	0,256316391

Tabela 19 - Compilação dos resultados do Teste de Tukey para os ensaios de impacto Izod da Segunda Etapa. b>a.

Material
B3 ^a
B4 ^a
B5 ^b
B6 ^b

O Teste de Tukey indica que, na maioria dos casos, não há diferenças significativas entre as composições, especialmente quando os materiais B3, B5 e B6 foram comparados entre si. Contudo, verifica-se que há diferenças significativas entre as composições B4 - B5 e B4 - B6, mas não entre B3 - B4. Dessa forma, considerando-se as médias dos materiais e o fato de que também não há diferenças significativas entre B5 - B6, optou-se por prosseguir com a concentração de B5, ou seja, um teor de modificador de impacto de 4%, respeitando a preferência industrial de se utilizar a menor quantidade possível de aditivos e consequentemente diminuir o preço final do produto.

5.3. Terceira Etapa

De posse das informações da Segunda Etapa, foi possível definir as composições a serem testadas na Terceira Etapa. Dessa forma, as composições da Terceira Etapa puderam ser definidas, como indicado na Tabela 20.

Tabela 20 - Formulações definidas das composições da Terceira Etapa.

	Rótulo	Fibra	Granulometria (mesh)	Teor de fibras	Teor de MAPP	Teor de antichamas	Teor de pigmento	Teor de elastômero
3ª Etapa	B7*	Bambu	Toda a faixa	20%	2,00%	1,50%	1,00%	4%
	B8	Bambu	Toda a faixa	40%	2,00%	1,50%	1,00%	4%
	E3	Eucalipto	<42	20%	2,00%	1,50%	1,00%	4%
	E4	Eucalipto	<42	40%	2,00%	1,50%	1,00%	4%
	S3	Sisal	Toda a faixa	20%	2,00%	1,50%	1,00%	4%
	S4	Sisal	Toda a faixa	40%	2,00%	1,50%	1,00%	4%

*Verifica-se que B7 apresenta a mesma composição de B5. O material recebeu novo rótulo para fins de clareza e facilidade de classificação.

5.3.1. Bambu

Como explicado na seção 6.1.1, na Terceira Etapa foram utilizadas as fibras de bambu integralmente, como foram obtidas junto ao fornecedor. Este fato se deve à opção por um eventual processo industrial mais enxuto, sem a necessidade da inclusão da operação unitária de peneiramento/separação granulométrica. Além disso, há também preocupações em relação ao baixo rendimento do processo de peneiramento em comparação ao volume total de fibras que seria necessário para se obter quantidades apreciáveis do particulado desejado.

Utilizando-se essas fibras, o processo de fabricação das composições não foi afetado. Observou-se níveis de dificuldade semelhantes àqueles enfrentados com as composições da Primeira Etapa, indicando que este processo seria passível de escalonamento industrial.

5.3.2. Eucalipto

O processo de fabricação a partir das fibras de eucalipto, assim como aquele a partir do bambu, apresentou níveis esperados de dificuldade. Durante a preparação das composições, não foram encontrados empecilhos que inviabilizariam o processo industrial. As fibras foram utilizadas na granulometria indicada na Tabela 4 sem maiores dificuldades.

5.3.3. Sisal

Diferentemente das formulações anteriores, muitas dificuldades foram enfrentadas com a fabricação de materiais a base de sisal, mesmo em concentrações menores. Isso se deve ao fato de que, desde o processo de peneiramento até a injeção, por diversas vezes foi necessário parar o processo ou forçar a alimentação das fibras nos equipamentos. Isso ocorreu pois, mesmo após pouco tempo parado, o material forma emaranhados que não são desfeitos naturalmente nas etapas de alimentação dos equipamentos, sendo necessárias atenção e assistência constante nestes momentos. Além disso, foi comum a ocorrência de entupimentos, seja dentro dos equipamentos ou mesmo nas etapas de alimentação, sendo necessário parar o procedimento, remover as obstruções e então seguir com a fabricação. As fibras de sisal também apresentam grande volume, com um aspecto semelhante a uma esponja. Este fato por si só dificulta o seu armazenamento e também constitui desafios de alimentação dos equipamentos mesmo em produções de pequenas quantidades.

Frente aos relatos apresentados, verifica-se, portanto, que as produções a partir de sisal podem não ser viáveis em grande escala. As composições a partir da fibra foram mantidas neste estudo, entretanto, para fins de comparação e ciência.

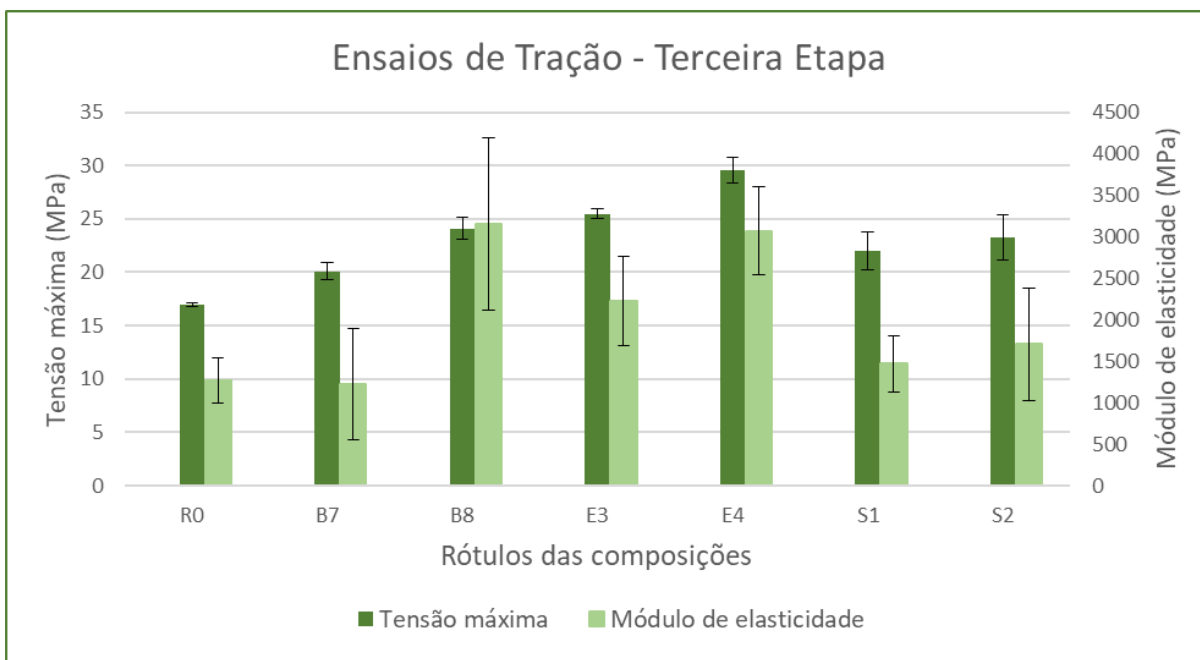
5.3.4. Ensaios mecânicos

5.3.4.1. Ensaios de tração

De forma semelhante ao que foi apresentado na Primeira Etapa, os ensaios de tração foram conduzidos para as seis composições desenvolvidas nesta Etapa, conforme as determinações da norma ASTM D638-22, com 10 corpos de prova. Além

disso, os dados de R0 foram resgatados, para fins de comparação. A Figura 40 apresenta os resultados encontrados.

Figura 40 - Resultados dos ensaios de tração para as composições da Terceira Etapa.



Mais uma vez, é possível verificar altos desvios no que diz respeito aos valores de módulo de elasticidade. Assim como nos ensaios de tração realizados na Primeira Etapa, utilizou-se o extensômetro para a obtenção das medidas de deslocamento. Embora a acurácia da medida de deslocamento seja maior, o ruído presente nas curvas dificulta a obtenção dos dados do módulo de elasticidade, que dependem da regressão linear da região da curva. Em comparação, os desvios obtidos para tensão máxima se apresentam de forma razoável ao longo das análises.

Para verificar as propriedades de tensão máxima das composições em relação a R0, foram realizados Testes F, para verificar a equivalência ou não entre as variâncias, e em seguida os testes T de Student adequados para cada caso. Os resultados destes testes estão descritos na Tabela 21.

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%.

Análise efetuada	Fibra utilizada	Teor de fibra (%)	Valor p Teste F	Resultado Teste F	Valor p Teste T	Resultado Teste T
B7 - R0	Bambu	20	< 0,001	Variâncias diferentes	< 0,001	Diferença significativa
B8 - R0	Bambu	40	< 0,001	Variâncias diferentes	< 0,001	Diferença significativa
E3 - R0	Eucalipto	20	0,002	Variâncias diferentes	< 0,001	Diferença significativa
E4 - R0	Eucalipto	40	< 0,001	Variâncias diferentes	< 0,001	Diferença significativa
S1 - R0	Sisal	20	< 0,001	Variâncias diferentes	< 0,001	Diferença significativa
S2 - R0	Sisal	40	< 0,001	Variâncias diferentes	< 0,001	Diferença significativa

Verifica-se que o teste F indicou variâncias diferentes para todos os casos, portanto, o teste T de Student para variâncias diferentes foi utilizado. Os resultados dos testes F e T de Student revelam que todas as composições apresentaram diferenças significativas em relação a R0, indicando que há, de fato, diferenças entre os comportamentos dos compósitos em relação ao material de referência, o que pode ser observado na Figura 36. Este comportamento já era esperado pois, se mesmo com baixo teor de fibras o aumento da resistência das composições já havia sido nítido, trabalhando com um teor maior o resultado não seria diferente.

Em seguida, as composições foram comparadas entre si, de forma a se verificar se há evidências de que os comportamentos apresentados pelos diversos materiais variam conforme o teor e o tipo de fibras utilizados. Para esta comparação, foi utilizada a Análise de Variâncias, conforme mostrado na Figura 41.

Figura 41 - Resultados da ANOVA para as tensões máximas dos ensaios de tração dos materiais da Terceira Etapa, com significância de 95%.

Anova: fator duplo com repetição

		Concentrações	
Repetição	Fibra	20%	40%
1	Bambu	19,99	24,90
2	Bambu	20,34	24,09
3	Bambu	20,26	22,81
4	Bambu	20,98	24,14
5	Bambu	20,29	24,30
6	Bambu	19,76	24,37
7	Bambu	20,11	25,15
8	Bambu	20,00	24,67
9	Bambu	21,07	24,66
10	Bambu	18,29	21,76
1	Eucalipto	25,15	31,31
2	Eucalipto	25,09	30,83
3	Eucalipto	25,07	29,89
4	Eucalipto	25,64	29,86
5	Eucalipto	24,80	29,94
6	Eucalipto	25,39	27,08
7	Eucalipto	25,92	30,02
8	Eucalipto	25,31	29,88
9	Eucalipto	26,19	28,25
10	Eucalipto	26,00	28,81
1	Sisal	21,61	22,60
2	Sisal	21,95	22,66
3	Sisal	22,62	19,34
4	Sisal	23,66	25,86
5	Sisal	23,99	22,96
6	Sisal	22,35	21,70
7	Sisal	22,39	22,21
8	Sisal	18,59	23,26
9	Sisal	19,20	26,61
10	Sisal	23,27	25,36

RESUMO	20%	40%	Total
Bambu			
Contagem	10	10	20
Soma	201,1038243	240,852	441,9558561
Média	20,11038243	24,0852	22,09779281
Variância	0,584253929	1,06984	4,941201526
Eucalipto			
Contagem	10	10	20
Soma	254,5637332	295,873	550,4371018
Média	25,45637332	29,5873	27,52185509
Variância	0,214113496	1,53065	5,317221167
Sisal			
Contagem	10	10	20
Soma	219,6346751	232,555	452,1897465
Média	21,96346751	23,2555	22,60948733
Variância	3,179535226	4,6887	4,166364011
Total			
Contagem	30	30	
Soma	675,3022326	769,28	
Média	22,51007442	25,6427	
Variância	6,316582867	10,4293	

ANOVA	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítica
Fonte da variação						
Amostra	358,7575996	2	179,3787998	95,5236	1,8E-18	3,16825
Colunas	147,1984907	1	147,1984907	78,3868	4,2E-12	4,01954
Interações	25,46864012	2	12,73432006	6,78134	0,00236	3,16825
Dentro	101,4038166	54	1,877848455			
Total	632,828547	59				

A interpretação dos resultados da ANOVA indica que há de fato evidências para se admitir diferenças significativas tanto em relação às variedades de fibras como em relação às concentrações utilizadas e às interações entre os fatores. Para verificar quais são os materiais destoantes no grupo, o Teste de Tukey foi utilizado, como exibido na Figura 42 e na Tabela 22.

Figura 42 - Teste de Tukey para análise das tensões máximas dos materiais da Terceira Etapa.

$$dms = q \cdot \sqrt{\frac{QMR}{n^{\circ} \text{ repetições}}}$$

QMR	1,87784845
nº de tratamentos	3
Graus de liberdade	54
nº de repetições	10
q	3,412
dms	1,479

Concentração	20%	Média 1	Média 2	Mód. da diferença
Bambu - Eucalipto		20,1103824	25,4563733	5,345990883
Bambu - Sisal		20,1103824	21,9634675	1,853085078
Eucalipto - Sisal		25,4563733	21,9634675	3,492905805

Concentração	40%	Média 1	Média 2	Mód. da diferença
Bambu - Eucalipto		24,0852032	29,5873369	5,502133681
Bambu - Sisal		24,0852032	23,2555071	0,829696038
Eucalipto - Sisal		29,5873369	23,2555071	6,331829718

Tabela 22 - Compilação dos resultados do Teste de Tukey para as tensões máximas da Terceira Etapa. $c > b > a$.

Teor de fibras de 20%	Teor de fibras de 40%
B7 ^a	B8 ^a
E3 ^c	E4 ^b
S1 ^b	S2 ^a

Por meio do Teste de Tukey, é possível constatar que praticamente todas as composições apresentaram diferenças significativas entre si. O único caso em que os resultados podem ser admitidos como equivalentes é para as composições B8 e S2, nas quais o valor do módulo da diferença das médias não superou o dms. Conclui-se, portanto, que para a propriedade analisada, tanto o teor de fibras como a variedade é importante na maioria dos casos. Este comportamento aparentemente inconsistente pode estar relacionado nos diferentes níveis de interação entre os fatores analisados, a saber, o teor de fibras e o tipo utilizado em cada compósito. O fenômeno, contudo, não indica necessariamente que há inconsistências nos dados.

Para os dados de módulo de elasticidade, a mesma abordagem acima foi adotada. Inicialmente, os valores das composições foram comparados com R0, por meio da análise de variância do teste F. Em seguida, o Teste T de Student adequado para cada caso foi aplicado, também comparando cada formulação com o material de referência. Os resultados dos dois testes para cada análise estão expressos na Tabela 23.

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%.

Análise efetuada	Fibra utilizada	Teor de fibra (%)	Valor p Teste F	Resultado Teste F	Valor p Teste T	Resultado Teste T
B7 - R0	Bambu	20	0,007	Variâncias diferentes	0,866	Não há diferença significativa
B8 - R0	Bambu	40	< 0,001	Variâncias diferentes	< 0,001	Diferença significativa
E3 - R0	Eucalipto	20	0,030	Variâncias diferentes	< 0,001	Diferença significativa
E4 - R0	Eucalipto	40	0,031	Variâncias diferentes	< 0,001	Diferença significativa
S1 - R0	Sisal	20	0,272	Variâncias equivalentes	0,154	Não há diferença significativa
S2 - R0	Sisal	40	0,007	Variâncias diferentes	0,079	Não há diferença significativa

O teste F indicou variâncias diferentes para todos os casos, exceto para S1 - R0. Dessa forma, o teste T de Student para variâncias diferentes foi realizado, exceto para esse caso. Interpretando-se os resultados encontrados, é possível dizer que, para os módulos de elasticidade, o comportamento dos materiais em relação a R0 foi bem variado. B7, S1 e S2 não apresentaram diferenças significativas em relação à referência, mas B8, E3 e E4, sim. Estes dados podem indicar que as composições à base de eucalipto tendem a destoar mais da referência do que as outras. Em compensação, aquelas à base de sisal apresentam indícios de resposta semelhante ao composto industrial, enquanto para as composições de bambu variaram em termos de diferenciação significativa com R0. Contudo, estes dados devem ser interpretados com cautela, tendo em vista os altos valores de desvio padrão para os módulos de elasticidade.

Para a comparação entre as composições, utilizou-se o método ANOVA, conforme registrado na Figura 43. Dessa forma, será possível dizer se algum dos materiais é destoante dos demais.

Figura 43 - Resultados do método ANOVA para os módulos de elasticidade das composições da Terceira Etapa, com significância de 95%.

Concentrações			
Repetição	Fibra	20%	40%
1	Bambu	419,87	3694,70
2	Bambu	1193,47	2424,37
3	Bambu	916,22	3272,11
4	Bambu	788,13	576,95
5	Bambu	859,13	3336,81
6	Bambu	1972,58	2892,85
7	Bambu	2728,33	3624,09
8	Bambu	1116,10	3774,78
9	Bambu	968,75	3727,72
10	Bambu	1273,97	4256,50
1	Eucalipto	1592,30	3226,33
2	Eucalipto	2518,58	3882,75
3	Eucalipto	1994,66	2865,16
4	Eucalipto	3223,70	2842,21
5	Eucalipto	2829,87	2635,10
6	Eucalipto	2395,41	1930,41
7	Eucalipto	2158,40	3431,72
8	Eucalipto	1886,66	3265,24
9	Eucalipto	2093,58	3280,09
10	Eucalipto	1508,63	3334,02
1	Sisal	1298,18	1132,13
2	Sisal	1473,19	1606,27
3	Sisal	1944,20	1500,86
4	Sisal	1248,47	943,04
5	Sisal	2152,72	1980,70
6	Sisal	1155,37	1086,78
7	Sisal	1565,13	1977,70
8	Sisal	1131,82	1646,21
9	Sisal	1279,11	3311,06
10	Sisal	1431,04	1872,23

Anova: fator duplo com repetição				
RESUMO	20%	40%	Total	
Bambu				
Contagem	10	10	20	
Soma	12236,54916	31580,9	43817,42141	
Média	1223,654916	3158,09	2190,87107	
Variância	440897,9499	1081367	1705817,125	
Eucalipto				
Contagem	10	10	20	
Soma	22201,79815	30693	52894,81761	
Média	2220,179815	3069,3	2644,740881	
Variância	286776,6375	283272	459762,1383	
Sisal				
Contagem	10	10	20	
Soma	14679,23081	17057	31736,2116	
Média	1467,923081	1705,7	1586,81058	
Variância	114433,9056	455956	285062,696	
Total				
Contagem	30	30		
Soma	49117,57811	79330,9		
Média	1637,252604	2644,36		
Variância	447392,1764	1022108		

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítica
Amostra	11267356,01	2	5633678,007	12,6946	3E-05	3,16825
Colunas	15214052,63	1	15214052,63	34,2826	2,9E-07	4,01954
Interações	7383815,881	2	3691907,94	8,31916	0,00071	3,16825
Dentro	23964328,73	54	443783,8653			
Total	57829553,25	59				

Por meio da Análise de Variância, observa-se que há evidências para descartar a hipótese nula de que os materiais são equivalentes no que se refere ao módulo de elasticidade. É ainda possível dizer que tanto o teor de fibras, como a variedade utilizada e as interações entre os fatores apresentam diferenças significativas entre si. Para entender melhor o fenômeno, o Teste de Tukey foi executado, como ilustrado na Figura 44 e na Tabela 24.

Figura 44 - Teste de Tukey para análise dos módulos de elasticidade dos materiais da Terceira Etapa.

$$dms = q \cdot \sqrt{\frac{QMR}{n^{\circ} \text{ repetições}}}$$

QMR	443783,865
nº de tratamentos	3
Graus de liberdade	54
nº de repetições	10
q	3,412
dms	718,778

Concentração	20%	Média 1	Média 2	Mód. da diferença
Bambu - Eucalipto		1223,65492	2220,17981	996,5248986
Bambu - Sisal		1223,65492	1467,92308	244,268165
Eucalipto - Sisal		2220,17981	1467,92308	752,2567337

Concentração	40%	Média 1	Média 2	Mód. da diferença
Bambu - Eucalipto		3158,08722	3069,30195	88,78527801
Bambu - Sisal		3158,08722	1705,69808	1452,389146
Eucalipto - Sisal		3069,30195	1705,69808	1363,603868

Tabela 24 - Compilação dos resultados do Teste de Tukey para os módulos de elasticidade da Terceira Etapa. b>a.

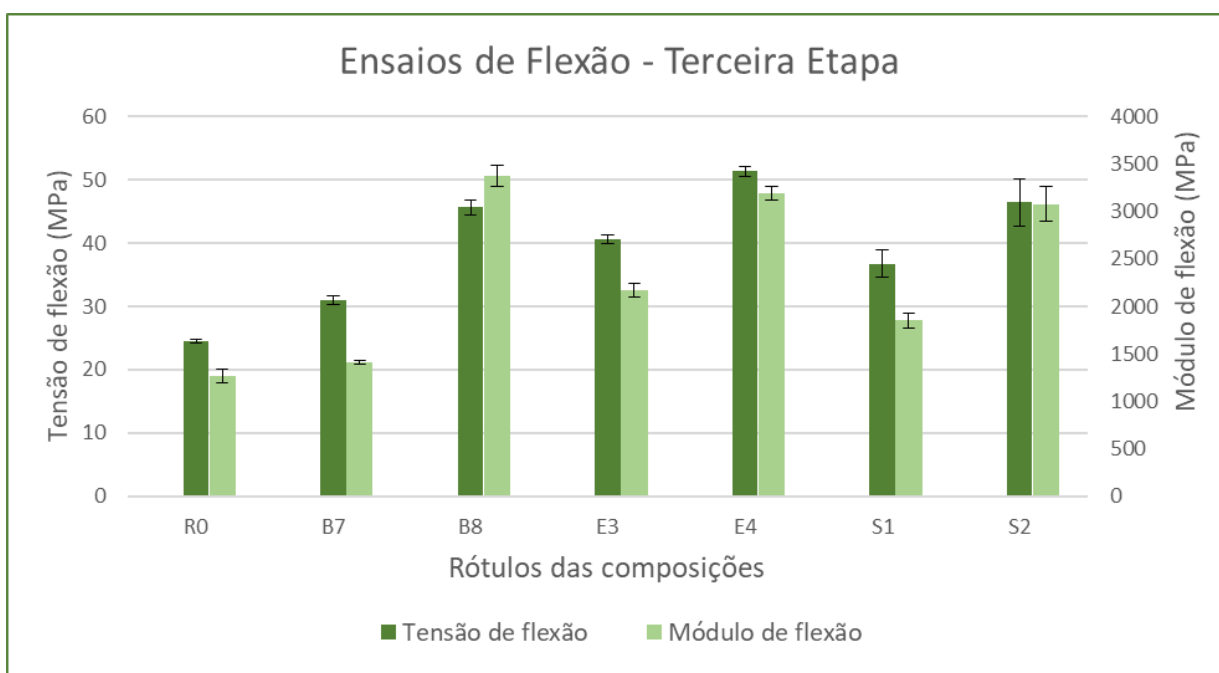
Teor de fibras de 20%	Teor de fibras de 40%
B7 ^a	B8 ^b
E3 ^b	E4 ^b
S1 ^a	S2 ^a

O teste de Tukey revela as diferenças apontadas pelo método ANOVA. Verifica-se, portanto, que o comportamento é bastante heterogêneo: não é possível apontar interações entre fibras específicas como fator decisivo para as diferenças significativas. Os resultados obtidos indicam que as composições de sisal são aquelas mais destoantes do grupo, com resultados inferiores. Isso pode estar relacionado com a natureza da fibra, ou mesmo com a sua granulometria. O fato de apresentar maior granulometria pode fazer com que a sua incorporação leve a um menor ganho de rigidez quando comparado com o eucalipto, que possui diâmetro menor que 1 mm, por exemplo. No caso do bambu, em que B7 apresentou resposta semelhante a S1 e também se utilizou toda a faixa granulométrica, esta teoria é corroborada. Já B8, entretanto, por conta da natureza da fibra e teor mais alto, foi capaz de apresentar melhores resultados.

5.3.4.2. Ensaios de flexão

De forma análoga ao que foi conduzido na seção 6.3.3.2, os ensaios de flexão foram realizados para as seis composições desenvolvidas nesta Etapa. As recomendações da norma ASTM D790-17 foram respeitadas, e 10 repetições foram feitas para cada material. Os resultados dos testes são apresentados na Figura 45.

Figura 45 - Resultados dos ensaios de flexão para as composições da Terceira Etapa.



Assim como os resultados da seção 5.3.3.2, verifica-se que os desvios para os módulos de flexão são baixos em relação à média, mais uma vez confirmando a influência do uso do extensômetro nos cálculos dos módulos de elasticidade dos ensaios de tração, já que para os ensaios de flexão este equipamento não é utilizado.

De forma análoga ao que foi conduzido em discussões prévias, o resultado de cada composição foi comparado aos valores obtidos para R0. Para isso, foram utilizados o Teste F e o Teste T de Student, para analisar a equivalência das variâncias e das médias, respectivamente. Os resultados destes testes estão descritos na Tabela 25.

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%.

Análise efetuada	Fibra utilizada	Teor de fibra (%)	Valor p Teste F	Resultado Teste F	Valor p Teste T	Resultado Teste T
B7 - R0	Bambu	20	0,009	Variâncias diferentes	< 0,001	Diferença significativa
B8 - R0	Bambu	40	< 0,001	Variâncias diferentes	< 0,001	Diferença significativa
E3 - R0	Eucalipto	20	0,019	Variâncias diferentes	< 0,001	Diferença significativa
E4 - R0	Eucalipto	40	0,006	Variâncias diferentes	< 0,001	Diferença significativa
S1 - R0	Sisal	20	< 0,001	Variâncias diferentes	< 0,001	Diferença significativa
S2 - R0	Sisal	40	< 0,001	Variâncias diferentes	< 0,001	Diferença significativa

A partir do teste F, verificou-se variâncias diferentes entre todos os materiais e R0, levando ao uso do teste T de Student para variâncias diferentes. Os resultados revelam que, para todos os materiais, há diferenças significativas quando comparados com o valor de referência. Este comportamento indica que, independentemente da variedade ou teor de fibras, a presença delas como reforço confere comportamento diferenciado ao material quando comparado com R0. Este resultado pode ser bem observado na Figura 45.

As composições foram então comparadas entre si utilizando-se o método ANOVA, com o intuito de verificar se há variedades ou concentrações de fibras que resultam em materiais com propriedades de tensão de flexão distintas dos demais. A Figura 46 apresenta o resultado da Análise de Variância.

Figura 46 - Resultados do método ANOVA para os valores de tensão de flexão das composições da Terceira Etapa, com significância de 95%.

Repetição	Fibra	Concentrações	
		20%	40%
1	Bambu	31,80	47,68
2	Bambu	32,03	45,85
3	Bambu	31,04	46,01
4	Bambu	30,57	44,87
5	Bambu	31,35	45,68
6	Bambu	31,60	45,69
7	Bambu	30,79	45,31
8	Bambu	30,81	46,53
9	Bambu	29,79	45,80
10	Bambu	30,40	43,01
1	Eucalipto	41,54	51,23
2	Eucalipto	40,79	50,47
3	Eucalipto	40,22	52,75
4	Eucalipto	41,50	51,19
5	Eucalipto	40,99	50,61
6	Eucalipto	40,63	51,42
7	Eucalipto	40,35	50,81
8	Eucalipto	40,00	52,08
9	Eucalipto	40,07	50,78
10	Eucalipto	39,79	51,86
1	Sisal	37,28	49,88
2	Sisal	36,49	49,49
3	Sisal	34,72	47,92
4	Sisal	36,87	37,42
5	Sisal	39,89	48,54
6	Sisal	32,12	46,77
7	Sisal	36,85	43,28
8	Sisal	36,52	46,72
9	Sisal	39,14	45,16
10	Sisal	37,41	49,08

Anova: fator duplo com repetição

RESUMO	20%	40%	Total
<i>Bambu</i>			
Contagem	10	10	20
Soma	310,17468	456,433	766,608
Média	31,017468	45,6433	38,3304
Variância	0,4727409	1,42228	57,1911

<i>Eucalipto</i>			
Contagem	10	10	20
Soma	405,87209	513,189	919,062
Média	40,587209	51,3189	45,9531
Variância	0,3755032	0,52871	30,7362

<i>Sisal</i>			
Contagem	10	10	20
Soma	367,2988	464,255	831,553
Média	36,72988	46,4255	41,5777
Variância	4,6644637	14,1972	33,6724

<i>Total</i>			
Contagem	30	30	
Soma	1083,3456	1433,88	
Média	36,111519	47,7959	
Variância	17,698262	11,5369	

ANOVA						
Fonte da variap.	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F critico
Amostra	585,29612	2	292,648	81,0627	5,4649E-17	3,16825
Colunas	2047,8715	1	2047,87	567,254	2,5651E-30	4,01954
Interações	67,575277	2	33,7876	9,35908	0,0003238	3,16825
Dentro	194,94789	54	3,61015			
Total	2895,6908	59				

O teste revela que há, de fato, que há evidências de materiais distintos dentre aqueles analisados. Além disso, é possível assumir que tanto a variedade, como o teor de fibras e a interação entre estes dois fatores são relevantes no que diz respeito à tensão de flexão. Para verificar quais são as composições com propriedades significativamente diferentes, procedeu-se com o Teste de Tukey, como mostrado na Figura 47 e na Tabela 26.

Figura 47 - Teste de Tukey para análise dos valores de tensão de flexão dos materiais da Terceira Etapa.

$$dms = q \cdot \sqrt{\frac{QMR}{n^{\circ} \text{ repetições}}}$$

QMR	3,610146159
nº de tratamento	3
Graus de liberdac	54
nº de repetições	10
q	3,412
dms	2,050

Concentração	20%	Média 1	Média 2	Mód. da diferença
Bambu - Eucalipto		31,0174682	40,58720891	9,569740704
Bambu - Sisal		31,0174682	36,72988016	5,712411957
Eucalipto - Sisal		40,58720891	36,72988016	3,857328747

Concentração	40%	Média 1	Média 2	Mód. da diferença
Bambu - Eucalipto		45,6433052	51,31894251	5,675637316
Bambu - Sisal		45,6433052	46,42545375	0,782148558
Eucalipto - Sisal		51,31894251	46,42545375	4,893488757

Tabela 26 - Compilação dos resultados do Teste de Tukey para as tensões de flexão da Terceira Etapa. $c > b > a$.

Teor de fibras de 20%	Teor de fibras de 40%
B7 ^a	B8 ^a
E3 ^c	E4 ^b
S1 ^b	S2 ^a

Os resultados do Teste de Tukey revelam que há diferenças consideráveis entre praticamente todos os materiais, exceto pela comparação Bambu - Sisal a 40%. Tais dados confirmam o que foi apresentado na Análise de Variância, comprovando que todos os fatores e a interação entre eles são relevantes para as propriedades de tensão de flexão das composições. Nesse caso, portanto, não foi somente o teor de fibras ou o tipo utilizado que se mostrou superior, mas também a interação entre esses fatores.

Para finalizar as análises relacionadas aos ensaios de flexão, é importante realizar também as observações pertinentes sobre os módulos de flexão. Foram realizadas comparações entre os módulos de elasticidade das composições e o material de referência. Para isso, utilizou-se os testes F e T de Student, para análise de equivalência das variâncias e das médias, respectivamente. Os resultados estão expressos na Tabela 27.

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%.

Análise efetuada	Fibra utilizada	Teor de fibra (%)	Valor p Teste F	Resultado Teste F	Valor p Teste T	Resultado Teste T
B7 - R0	Bambu	20	< 0,001	Variâncias diferentes	< 0,001	Diferença significativa
B8 - R0	Bambu	40	0,142	Variâncias equivalentes	< 0,001	Diferença significativa
E3 - R0	Eucalipto	20	0,420	Variâncias equivalentes	< 0,001	Diferença significativa
E4 - R0	Eucalipto	40	0,359	Variâncias equivalentes	< 0,001	Diferença significativa
S1 - R0	Sisal	20	0,455	Variâncias equivalentes	< 0,001	Diferença significativa
S2 - R0	Sisal	40	0,009	Variâncias diferentes	< 0,001	Diferença significativa

De acordo com o teste F, neste caso, o comportamento das variâncias em relação a referência diferiu bastante entre as composições. Dessa forma, o teste T de Student para variâncias equivalentes ou diferentes foi utilizado adequadamente para cada caso. Os testes acima indicam que todos os materiais apresentaram diferenças significativas quando comparados com a referência, no que se refere ao módulo de flexão. Mais uma vez, este comportamento era esperado por conta da presença dos reforços, além dos valores muito distintos apresentados na Figura 41. Os dados indicam que as composições apresentam com alta evidência valores distintos de módulo de flexão em relação a R0.

Para a comparação entre as composições foi performada uma Análise de Variâncias entre os valores encontrados, de forma a se investigar se dentre os materiais do conjunto haveria algum com propriedades distintas dos demais. O resultado pode ser conferido na Figura 48.

Figura 48 - Resultados do método ANOVA para os valores dos módulos de flexão das composições da Terceira Etapa, com significância de 95%.

Concentrações			
Repetição	Fibra	20%	40%
1	Bambu	1431,25	3445,13
2	Bambu	1402,40782	3379,80
3	Bambu	1429,20	3442,21
4	Bambu	1393,61	3383,58
5	Bambu	1433,46	3305,17
6	Bambu	1385,43	3247,01
7	Bambu	1421,53	3369,10
8	Bambu	1382,25	3522,03
9	Bambu	1413,76	3464,84
10	Bambu	1421,05	3142,91
1	Eucalipto	2206,86	3133,88
2	Eucalipto	2144,45	3169,47
3	Eucalipto	2155,37	3335,33
4	Eucalipto	2262,90	3217,94
5	Eucalipto	2198,52	3144,65
6	Eucalipto	2225,70	3275,87
7	Eucalipto	2252,05	3143,45
8	Eucalipto	2010,41	3217,77
9	Eucalipto	2151,06	3139,67
10	Eucalipto	2153,84	3144,66
1	Sisal	1823,33	3252,35
2	Sisal	1828,15	3290,43
3	Sisal	1776,14	3222,87
4	Sisal	1854,50	2727,96
5	Sisal	1847,98	3104,40
6	Sisal	1787,76	3188,98
7	Sisal	1905,94	3064,94
8	Sisal	1855,47	3112,27
9	Sisal	2034,77	2893,56
10	Sisal	1800,61	2910,38

RESUMO			
	20%	40%	Total
Bambu			
Contagem	10	10	20
Soma	14113,94	33701,8	47815,7
Média	1411,394	3370,18	2390,79
Variância	368,92273	12683,3	1015875
Eucalipto			
Contagem	10	10	20
Soma	21761,175	31922,7	53683,9
Média	2176,1175	3192,27	2684,19
Variância	5246,7295	4708,85	276444
Sisal			
Contagem	10	10	20
Soma	18514,66	30768,1	49282,8
Média	1851,466	3076,81	2464,14
Variância	5584,2439	32833,5	413323
Total			
Contagem	30	30	
Soma	54389,775	96392,6	
Média	1812,9925	3213,09	
Variância	105069,37	30649,8	

ANOVA						
Fonte da variac.	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Amostra	932623,52	2	466312	45,5489	2,5691E-12	3,16825
Colunas	29403960	1	2,9E+07	2872,15	1,6682E-48	4,01954
Interações	2450401,3	2	1225201	119,677	1,4292E-20	3,16825
Dentro	552830,27	54	10237,6			
Total	33339815	59				

Verifica-se através da Análise de Variâncias que há fortes evidências de que as composições apresentam diferenças significativas entre si, tanto no que se refere a variedade como no teor de fibras, assim como na interação entre os dois valores. Para compreensão mais aprofundada destes resultados, foi necessário realizar o Teste de Tukey, apresentado na Figura 49 e na Tabela 28.

Figura 49 - Teste de Tukey para análise dos valores dos módulos de flexão dos materiais da Terceira Etapa.

$dms = q \cdot \sqrt{\frac{QMR}{n^{\circ} \text{ repetições}}}$				
QMR	10237,59751			
nº de tratamento	3			
Graus de liberdade	54			
nº de repetições	10			
q	3,412			
dms	109,171			

Concentração	20%	Média 1	Média 2	Mód. da diferença
Bambu - Eucalipto		1411,394044	2176,117456	764,7234112
Bambu - Sisal		1411,394044	1851,46601	440,0719653
Eucalipto - Sisal		2176,117456	1851,46601	324,6514459

Concentração	40%	Média 1	Média 2	Mód. da diferença
Bambu - Eucalipto		3370,176861	3192,270766	177,9060944
Bambu - Sisal		3370,176861	3076,812725	293,3641355
Eucalipto - Sisal		3192,270766	3076,812725	115,4580412

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

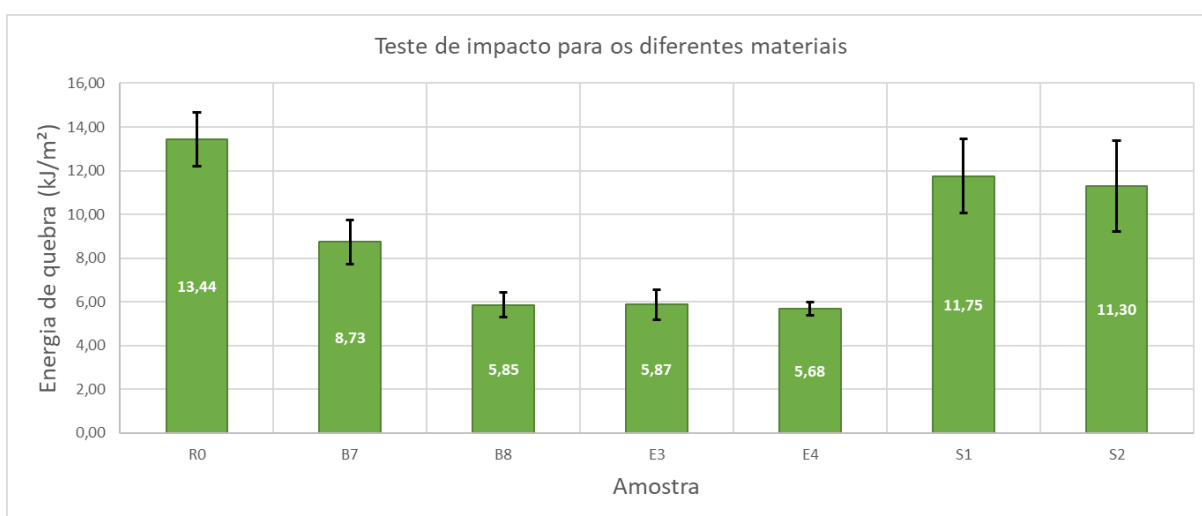
Teor de fibras de 20%	Teor de fibras de 40%
B7 ^a	B8 ^c
E3 ^c	E4 ^b
S1 ^b	S2 ^a

Os resultados do Teste de Tukey apontam que todas as composições apresentam propriedades distintas entre si, com diferenças significativas. Esta constatação se traduz como a relevância de ambos os fatores e as suas interações para os resultados encontrados. Dessa forma, pode-se dizer que, para os módulos de flexão, a variedade e o teor de fibras, bem como a combinação desses fatores é relevante para a propriedade final da composição, não sendo possível acusar uma fibra específica como superior.

5.3.4.3. Ensaios de resistência a impacto Izod

Os ensaios de resistência a impacto foram conduzidos de forma análoga ao que foi praticado na Primeira Etapa deste trabalho. Os ensaios foram executados em conformância com a norma ASTM D256-10(18). Foram realizadas dez repetições para cada composição. Os resultados estão expostos na Figura 50.

Figura 50 - Resultados dos ensaios de impacto das composições da Terceira Etapa.



Através dos resultados expostos acima, é possível verificar que, mesmo com o modificador de impacto nas composições, os resultados ainda ficaram muito aquém da referência, exceto para as composições à base de sisal. Para análises mais embasadas para fins de comparação entre as composições e R0, os testes F e T de Student foram realizados. Os resultados podem ser conferidos na Tabela 29.

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%.

Análise efetuada	Fibra utilizada	Teor de fibra (%)	Valor p Teste F	Resultado Teste F	Valor p Teste T	Resultado Teste T
B7 - R0	Bambu	20	0,277	Variâncias equivalentes	< 0,001	Diferença significativa
B8 - R0	Bambu	40	0,014	Variâncias diferentes	< 0,001	Diferença significativa
E3 - R0	Eucalipto	20	0,053	Variâncias equivalentes	< 0,001	Diferença significativa
E4 - R0	Eucalipto	40	< 0,001	Variâncias diferentes	< 0,001	Diferença significativa
S1 - R0	Sisal	20	0,170	Variâncias equivalentes	0,021	Diferença significativa
S2 - R0	Sisal	40	0,067	Variâncias equivalentes	0,012	Diferença significativa

Mais uma vez, o teste F revelou um comportamento bastante heterogêneo quanto a equivalência das variâncias das composições em relação à R0. Por conta disso, o teste T de Student para variâncias equivalentes ou diferentes foi aplicado conforme a necessidade. Os resultados dos testes estatísticos indicam o que já havia sido verificado no resultado gráfico. As composições apresentam diferenças significativas em relação à referência. Contudo, verifica-se nesse caso que as composições performaram de forma inferior à referência nos ensaios de resistência ao impacto, seja com teor de 20 ou 40% de fibras. Pode-se constatar que a utilização do modificador de impacto não foi o suficiente para alcançar propriedades de resistência ao impacto comparáveis ou superiores às daquelas do material de referência.

Para verificar as propriedades das composições entre si, foi realizada a Análise

de Variância das amostras. A Figura 51 apresenta os resultados encontrados.

Figura 51 - Resultados do método ANOVA para os valores dos ensaios de resistência ao impacto das composições da Terceira Etapa, com significância de 95%.

Concentrações			
Repetição	Fibra	20%	40%
1	Bambu	7,83	5,90
2	Bambu	8,06	5,87
3	Bambu	10,47	6,09
4	Bambu	9,71	5,10
5	Bambu	9,03	6,98
6	Bambu	7,35	5,53
7	Bambu	8,40	6,26
8	Bambu	9,16	5,80
9	Bambu	7,79	5,91
10	Bambu	9,50	5,05
1	Eucalipto	4,98	5,79
2	Eucalipto	5,73	5,80
3	Eucalipto	5,55	6,08
4	Eucalipto	6,19	5,39
5	Eucalipto	6,91	5,32
6	Eucalipto	7,04	5,74
7	Eucalipto	5,35	5,43
8	Eucalipto	6,14	5,94
9	Eucalipto	5,59	5,28
10	Eucalipto	5,19	6,03
1	Sisal	11,96	13,86
2	Sisal	10,04	10,51
3	Sisal	14,48	11,03
4	Sisal	12,21	11,22
5	Sisal	10,47	8,46
6	Sisal	10,27	9,99
7	Sisal	14,54	10,84
8	Sisal	12,56	10,67
9	Sisal	10,79	10,57
10	Sisal	10,22	15,82

RESUMO			
	20%	40%	Total
<i>Bambu</i>			
Contagem	10	10	20
Soma	87,2948002	58,5053	145,8001293
Média	8,72948002	5,85053	7,290006466
Variância	0,9990289	0,31341	2,802824115
<i>Eucalipto</i>			
Contagem	10	10	20
Soma	58,6660996	56,8004	115,4665443
Média	5,86660996	5,68004	5,773327217
Variância	0,48344984	0,0906	0,281077519
<i>Sisal</i>			
Contagem	10	10	20
Soma	117,536578	112,981	230,5172644
Média	11,7536578	11,2981	11,52586322
Variância	2,90106182	4,28749	3,459724434
<i>Total</i>			
Contagem	30	30	
Soma	263,497478	228,286	
Média	8,78324925	7,60955	
Variância	7,33730661	8,49816	

ANOVA						
Fonte da variaçã	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítica
Amostra	355,563125	2	177,7815627	117,541	2,1236E-20	3,16825
Colunas	20,6635954	1	20,66359541	13,6618	0,00051269	4,01954
Interações	21,9899277	2	10,99496385	7,26936	0,00160088	3,16825
Dentro	81,6753722	54	1,512506892			
Total	479,892021	59				

Constata-se por meio do método ANOVA que há diferenças significativas entre as composições. Através da análise, é possível dizer que há diferenças entre as variedades e as concentrações de fibra, além das eventuais interações entre os dois fatores. Para verificar quais são os materiais distintos, o Teste de Tukey foi realizado, como mostrado na Figura 52 e na Tabela 30.

Figura 52 - Teste de Tukey para análise dos valores dos valores de resistência ao impacto dos materiais da Terceira Etapa.

$$dms = q \cdot \sqrt{\frac{QMR}{n^{\circ} \text{ repetições}}}$$

QMR	1,51250689
nº de tratamento	3
Graus de liberdade	54
nº de repetições	10
q	3,412
dms	1,327

Concentração	20%	Média 1	Média 2	Mód. da diferença
Bambu - Eucalipto		8,72948002	5,86660996	2,862870066
Bambu - Sisal		8,72948002	11,7536578	3,024177748
Eucalipto - Sisal		5,86660996	11,7536578	5,887047814

Concentração	40%	Média 1	Média 2	Mód. da diferença
Bambu - Eucalipto		5,85053291	5,68004447	0,170488432
Bambu - Sisal		5,85053291	11,2980687	5,447535758
Eucalipto - Sisal		5,68004447	11,2980687	5,61802419

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

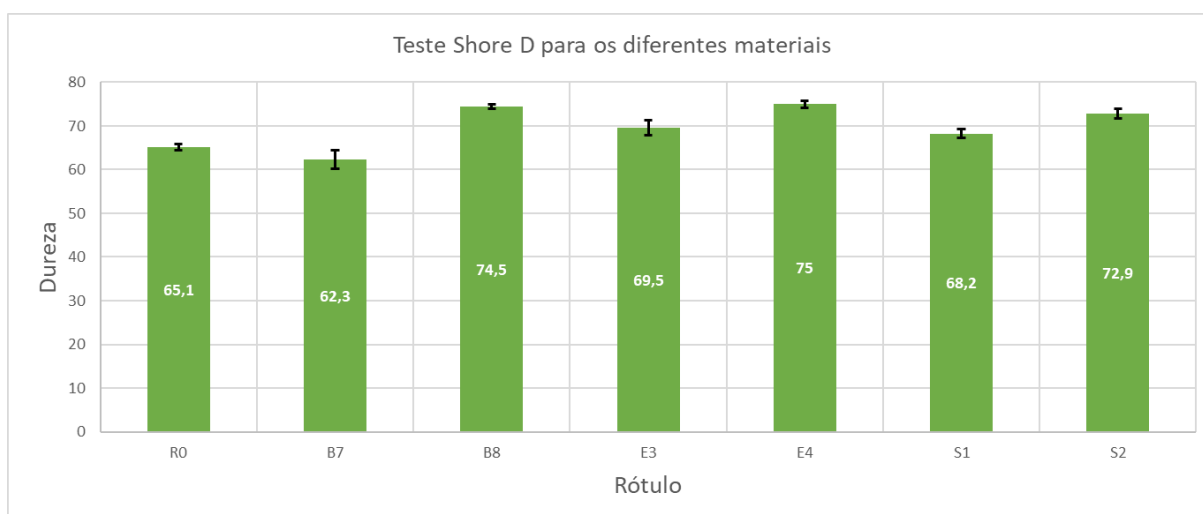
Teor de fibras de 20%	Teor de fibras de 40%
B7 ^b	B8 ^a
E3 ^a	E4 ^a
S1 ^c	S2 ^b

O Teste de Tukey aponta que há diferenças significativas entre os materiais, especialmente entre as composições de sisal e as das outras fibras. Este resultado comprova a análise gráfica, em que os materiais S1 e S2 apresentaram resultados nitidamente superiores às demais composições. Isso pode indicar que a incorporação das fibras de sisal não tornou o material tão rígido quanto a incorporação das outras fibras. Verificou-se que entre as composições B8 e E4 não há diferença significativa, sendo as únicas formulações que apresentaram equivalência entre si, indicando que, neste caso, o uso de fibras de eucalipto ou de bambu resulta em respostas semelhantes.

5.3.4.4. Ensaios de Dureza Shore D

Por fim, os ensaios de dureza foram realizados de forma análoga àquela conduzida na seção 6.3.3.4. Os ensaios de dureza foram performados em todos os materiais da Terceira Etapa, em acordância com as determinações da norma ASTM D2240-15(21). Foram realizadas dez repetições para cada uma das composições. Os resultados estão expostos na Figura 53.

Figura 53 - Resultados dos ensaios de dureza Shore D das composições da Terceira Etapa.



Verifica-se no gráfico apresentado que todas as composições apresentaram resultados razoáveis para os ensaios de dureza. Contudo, análises estatísticas mais profundas para se tomar conclusões embasadas. Os testes F e T de Student foram realizados para verificar como as composições se saem em comparação com o material de referência. Os resultados das análises podem ser verificados na Tabela 31.

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%.

Análise efetuada	Fibra utilizada	Teor de fibra (%)	Valor p Teste F	Resultado Teste F	Valor p Teste T	Resultado Teste T
B7 - R0	Bambu	20	0,002	Variâncias diferentes	0,002	Diferença significativa
B8 - R0	Bambu	40	0,165	Variâncias equivalentes	< 0,001	Diferença significativa
E3 - R0	Eucalipto	20	0,010	Variâncias diferentes	< 0,001	Diferença significativa
E4 - R0	Eucalipto	40	0,384	Variâncias equivalentes	< 0,001	Diferença significativa
S1 - R0	Sisal	20	0,165	Variâncias equivalentes	< 0,001	Diferença significativa
S2 - R0	Sisal	40	0,125	Variâncias equivalentes	< 0,001	Diferença significativa

Exceto para B7 e E3, o teste F indicou variâncias equivalentes entre as composições e R0. Dessa forma, o teste T de Student para variâncias equivalentes foi utilizado, exceto para esses casos. Analisando-se os dados obtidos nos testes F e T de Student, verifica-se que todas as composições apresentam diferenças significativas em relação ao material de referência. Estas informações corroboram a análise gráfica, em que os resultados foram, no geral, superiores a R0, exceto por B7. Além disso, os resultados corroboram com a literatura e com o fato de que o reforço da matriz polimérica torna o material mais duro.

Para verificar se há diferenças significativas entre as composições, foi utilizado o método ANOVA. Através deste teste, será possível dizer se pelo menos uma das composições destoa das demais. A Figura 54 apresenta os resultados encontrados na Análise de Variâncias.

Figura 54 - Resultados do método ANOVA para os valores dos de dureza das composições da Terceira Etapa, com significância de 95%.

		Concentrações	
Repetição	Fibra	20%	40%
1	Bambu	59	74
2	Bambu	59	74
3	Bambu	61	74
4	Bambu	62	75
5	Bambu	64	75
6	Bambu	64	75
7	Bambu	62	74
8	Bambu	64	75
9	Bambu	63	75
10	Bambu	65	74
1	Eucalipto	68	75
2	Eucalipto	68	74
3	Eucalipto	67	76
4	Eucalipto	68	76
5	Eucalipto	71	75
6	Eucalipto	70	75
7	Eucalipto	69	74
8	Eucalipto	71	76
9	Eucalipto	72	74
10	Eucalipto	71	75
1	Sisal	70	74
2	Sisal	68	71
3	Sisal	69	72
4	Sisal	68	74
5	Sisal	67	74
6	Sisal	69	74
7	Sisal	67	73
8	Sisal	67	72
9	Sisal	68	73
10	Sisal	69	72

Anova: fator duplo com repetição			
RESUMO	20%	40%	Total
Bambu			
Contagem	10	10	20
Soma	623	745	1368
Média	62,3	74,5	68,4
Variância	4,45555556	0,27778	41,41052632
Eucalipto			
Contagem	10	10	20
Soma	695	750	1445
Média	69,5	75	72,25
Variância	2,94444444	0,66667	9,671052632
Sisal			
Contagem	10	10	20
Soma	682	729	1411
Média	68,2	72,9	70,55
Variância	1,06666667	1,21111	6,892105263
Total			
Contagem	30	30	
Soma	2000	2224	
Média	66,6666667	74,1333	
Variância	12,7816092	1,49885	

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Amostra	148,9	2	74,45	42,0533	9,7462E-12	3,16825
Colunas	836,266667	1	836,266667	472,368	2,2707E-28	4,01954
Interações	169,633333	2	84,8166667	47,909	1,0824E-12	3,16825
Dentro	95,6	54	1,77037037			
Total	1250,4	59				

A ANOVA permite concluir que há, de fato, diferenças significativas entre as composições. De acordo com a análise, pode-se dizer que há diferenças significativas entre composições de diferentes variedades e concentrações de fibras, além das interações entre esses dois fatores. Contudo, para dizer com mais precisão em quais composições se encontram as diferenças, é necessário realizar o Teste de Tukey. A Figura 55 e a Tabela 32 apresentam os resultados encontrados para este teste.

Figura 55 - Teste de Tukey para análise dos valores dos valores de dureza Shore D dos materiais da Terceira Etapa.

$dms = q \cdot \sqrt{\frac{QMR}{n^{\circ} \text{ repetições}}}$			
QMR	1,77037037		
nº de tratamento	3		
Graus de liberdade	54		
nº de repetições	10		
q	3,412		
dms	1,436		

Concentração	20%	Média 1	Média 2	Mód. da diferença
Bambu - Eucalipto		62,3	69,5	7,2
Bambu - Sisal		62,3	68,2	5,9
Eucalipto - Sisal		69,5	68,2	1,3

Concentração	40%	Média 1	Média 2	Mód. da diferença
Bambu - Eucalipto		74,5	75	0,5
Bambu - Sisal		74,5	72,9	1,6
Eucalipto - Sisal		75	72,9	2,1

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

Teor de fibras de 20%	Teor de fibras de 40%
B7 ^a	B8 ^b
E3 ^b	E4 ^b
S1 ^b	S2 ^a

É possível constatar por meio do Teste de Tukey que há, de fato, diferenças significativas entre algumas das composições. Quando comparadas duas a duas, as composições Eucalipto - Sisal a 20% (E3 - S1) e Bambu - Eucalipto a 40% (B8 - E4) apresentaram resultados ditos equivalentes. As outras comparações, por sua vez, indicaram diferenças significativas entre os materiais analisados. Dessa forma, verifica-se que as composições a base de eucalipto se mostraram aquelas com melhores resultados, para ambas as concentrações. As composições de bambu e sisal, entretanto, apresentaram comportamentos diferentes para as diferentes concentrações, indicando que outros fatores, como a interação entre o tipo de fibra e a concentração, possam ter um maior impacto nesses casos.

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.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)