



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

JOSÉ PATRÍCIO SANTANA DE ALMEIDA

COMPÓSITO DE MATERIAL RESIDUAL ENCOLADO COM LIGNOSULFONATO

Prof. Dr.^a GILMARA PIRES DE MOURA PALERMO
Orientadora

SEROPÉDICA, RJ
JUNHO – 2025



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

JOSÉ PATRÍCIO SANTANA DE ALMEIDA

COMPÓSITO DE MATERIAL RESIDUAL ENCOLADO COM LIGNOSULFONATO

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Florestal, como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Florestal, Instituto de Florestas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

Prof. Dr.^a GILMARA PIRES DE MOURA PALERMO
Orientadora

SEROPÉDICA, RJ
JUNHO



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
DEPARTAMENTO DE PRODUTOS FLORESTAIS



HOMOLOGAÇÃO N° 9 / 2025 - DeptPF (12.28.01.00.00.00.30)

Nº do Protocolo: 23083.033779/2025-39

Seropédica-RJ, 30 de junho de 2025.

COMPÓSITO DE MATERIAL RESIDUAL ENCOLADO COM LIGNOSULFONATO

JOSÉ PATRÍCIO SANTANA DE ALMEIDA

APROVADA EM: 30/06/2025.

BANCA EXAMINADORA:

**Prof. Dr^a. GILMARA PIRES DE MOURA PALERMO – UFRRJ
ORIENTADOR**

**Prof. Dr. FABRICIO GOMES GONÇALVES – UFES
MEMBRO**

**Prof. Dr. ALEXANDRE MONTEIRO DE CARVALHO – UFRRJ
MEMBRO**

(Assinado digitalmente em 30/06/2025 16:25)
ALEXANDRE MONTEIRO DE CARVALHO
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DeptPF (12.28.01.00.00.00.30)
Matrícula: 1486653

(Assinado digitalmente em 30/06/2025 16:17)
GILMARA PIRES DE MOURA PALERMO
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DeptPF (12.28.01.00.00.00.30)
Matrícula: 2433466

(Assinado digitalmente em 30/06/2025 18:06)
FABRICIO GOMES GONÇALVES
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 031.022.477-25

Visualize o documento original em <https://sipac.ufrrj.br/public/documentos/index.jsp>
informando seu número: **9**, ano: **2025**, tipo: **HOMOLOGAÇÃO**, data de emissão: **30/06/2025** e
o código de verificação: **b9ed9b0e7a**

Dedico este trabalho a todos aqueles que, de alguma forma, fizeram parte desta caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, e principalmente aos meus pais: Joana e Sandro, pelo amor incondicional, cujo todo empenho e esforço me fizeram chegar aonde estou hoje. Obrigado pela compreensão nos momentos difíceis e pelo suporte constante. Sem vocês, este sonho não teria se tornado realidade.

À minha orientadora, Profª. Gilmara P. M. Palermo, pela paciência, sabedoria e dedicação, guiando-me com firmeza e carinho ao longo deste processo. Sua orientação foi essencial para que eu pudesse crescer ao longo de todos esses anos e concluir este trabalho com confiança e me tornar um futuro profissional íntegro. Obrigado por todos os conselhos e conversas que tivemos ao longo destes anos.

Ao auxílio e a enorme dedicação dos integrantes do Laboratório Multusuário de Painéis - UFES, em especial à Emilly e ao Coordenador Prof. Fabricio Gomes Gonçalves, por terem me recebido de braços abertos e com disposição a me ajudar de todas as formas possíveis.

Aos meus amigos ao longo desta caminhada: Monique, Alfredo, Ana Cristina, Gabriela, Boletta, Mahyne, Drieli, Íris, Caroline, Juliana, Carlos e tantos outros, por cada palavra de incentivo, pelas conversas que aliviaram os momentos de tensão e pelo apoio incondicional. Vocês tornaram essa jornada muito mais leve e significativa.

As minhas amigas e irmãs de outra mãe: Ana Carolina Lindolfo de Oliveira e Ana Beatriz Lindolfo de Oliveira por sempre estarem comigo nos piores e, principalmente, nos melhores momentos. Espero que saibam que vocês se tornaram um marco em minha vida e que amo muito vocês.

Ao Laboratório de Química e Bioquímica da Madeira - UFRRJ, a Coordenadora Profª. Natália Dias e ao Técnico José Carlos, por terem sido meus amigos ao longo desses anos e por sempre estarem a disposição para uma conversa séria ou uma conversa descontraída, acompanhada de um café.

A todo o corpo docente do curso de Engenharia Florestal, pelos anos de ensino e todo o aprendizado.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, por ter me proporcionado tantos momentos inesquecíveis, com pessoas que me marcaram pela infinidade e por ter me possibilitado a conclusão deste trabalho e da minha graduação.

A todos, minha eterna gratidão.

RESUMO

O objetivo deste estudo foi desenvolver e caracterizar um compósito desenvolvido a partir de madeira de eucalipto e resíduos de endocarpo de macadâmia, fragmentos de borracha e lignosulfonato. Para isso, foram determinadas as densidades nominais e proporções de partículas, identificados como tratamentos, 1 e 2. Para o tratamento 1 foi aplicada a proporção de 65% de partículas de endocarpo de macadâmia, 20% de partículas de madeira de *Eucalyptus* sp., 10% de partículas de solado de sandália do tipo flip-flop, 5% de lignosulfonato. Para o tratamento 2 foi aplicada a proporção de 20% de partículas de endocarpo de macadâmia, 65% de partículas de madeira de *Eucalyptus* sp., 10% de partículas de solado de sandália do tipo flip-flop, 5% de lignosulfonato. As partículas do endocarpo, madeira e de solado de borracha foram classificadas com base em sua granulometria, densidade aparente e teor de umidade, para aplicação no compósito. Em cada painel, o material foi pesado e posteriormente, misturado com o adesivo de poliuretano à base de óleo de mamona, AGT-1315. As misturas homogeneizadas manualmente foram colocadas em moldes (43 cm × 43 cm) e prensadas a quente em prensa hidráulica a 120 °C e 45 kgf/cm² por aproximadamente 8 minutos. A espessura dos compósitos formados foi de 1,28cm. Foram avaliados quanto às propriedades físicas (densidade aparente, teor de umidade, absorção de água e inchamento em espessura após 2 e 24 horas) e mecânicas (flexão estática, tração perpendicular, arrancamento de parafuso e dureza Janka). Os resultados mostram que T1 apresentou melhor desempenho nos testes físicos, com menor absorção de água (17,78%/24h), menor inchamento em espessura (9,60%/24h) com e densidade nominal de 0,820 g/cm³. O T2 destacou-se nos resultados mecânicos, com maior resistência à flexão (MOR = 11,46 MPa), módulo de elasticidade (MOE = 2102,64 MPa), dureza Janka (46,14 MPa) e com densidade nominal de 0,790 g/cm³. Os resultados indicam a viabilidade técnica do reaproveitamento de resíduos agroindustriais e urbanos na formulação de compósitos sustentáveis para aplicações não estruturais.

Palavras-chave: resíduos lignocelulósicos; reaproveitamento; adesivo vegetal; compósito madeira-borracha, Flip-flop.

ABSTRACT

The objective of this study was to develop and characterize a composite made from eucalyptus wood and residues of macadamia nutshell, rubber fragments, and lignosulfonate. For this purpose, two nominal densities and particle proportions were defined, identified as Treatments 1 and 2. In Treatment 1, the formulation included 65% macadamia nutshell particles, 20% *Eucalyptus sp.* wood particles, 10% flip-flop sandal sole particles, and 5% lignosulfonate. In Treatment 2, the formulation consisted of 20% macadamia nutshell particles, 65% *Eucalyptus sp.* wood particles, 10% flip-flop sandal sole particles, and 5% lignosulfonate. The nutshell, rubber, and wood particles were classified based on their granulometry, bulk density, and moisture content for use in the composite. In each panel, the materials were weighed and manually mixed with castor oil-based polyurethane adhesive (AGT-1315). The homogenized mixtures were molded into forms (43 cm × 43 cm) and hot-pressed in a hydraulic press at 120 °C and 45 kgf/cm² for approximately 8 minutes. The resulting composites had a thickness of 1.28 cm. They were evaluated for physical properties (apparent density, moisture content, water absorption, and thickness swelling after 2 and 24 hours) and mechanical properties (static bending, perpendicular tensile strength, screw withdrawal resistance, and Janka hardness). Treatment 1 showed better performance in physical tests, with lower water absorption (17.78%/24h) and lower thickness swelling (9.60%/24h), with a nominal density of 0.820 g/cm³. Treatment 2 stood out in mechanical performance, with higher flexural strength (MOR = 11.46 MPa), modulus of elasticity (MOE = 2102.64 MPa), and Janka hardness (46.14 MPa), with a nominal density of 0.790 g/cm³. The results indicate the technical feasibility of reusing agro-industrial and urban residues in the formulation of sustainable composites for non-structural applications.

Keywords: lignocellulosic residues; reuse; bio-based adhesive; wood-rubber composite, flip-flop

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1 <i>Macadamia integrifolia</i> e Algumas de suas Utilizações	3
2.2 Sandália tipo flip-flop.....	5
2.4 Lignosulfanato	6
2.5 Compósitos	7
2.5.1 Granulometria das partículas do compósito	8
2.5.2 Compósito madeira-borracha (CMB).....	9
2.6 Poliuretano Vegetal Derivado de Óleo de Mamona.....	10
2.7 Propriedades dos Painéis	10
2.7.1 Propriedades físicas	10
2.7.1.1 Densidade	10
2.7.1.2 Teor de umidade	11
2.7.2 Propriedades mecânicas.....	11
2.7.2.1 Flexão estática	11
2.7.2.2 Tração perpendicular	12
2.7.2.3 Arrancamento de parafuso.....	12
2.7.2.4 Dureza Janka.....	12
3 MATERIAL E MÉTODOS	14
3.1 Material Utilizado e sua Procedência	14
3.2 Preparação do Material Utilizado na Confecção do Painel	14
3.2.1 Partículas de macadâmia	14
3.2.1.1 Determinação da densidade aparente do endocarpo da macadâmia	15
3.2.1.2 Determinação do teor de umidade do endocarpo da macadâmia	15
3.2.2 Partículas de solado de sandália do tipo flip-flop.....	16
3.2.2.1 Determinação da densidade da borracha do solado de sandália do tipo flip-flop	17
3.2.2.2 Determinação do teor de umidade do solado de sandália do tipo flip-flop.....	17
3.2.3 Partículas de <i>Eucalyptus</i> sp.	17
3.2.3.1 Determinação da densidade básica das partículas de eucalipto	17
3.2.3.2 Determinação do teor de umidade das partículas de eucalipto.....	18
3.2.4 Caracterização do Adesivo Poliuretano Misturado com lignosulfanato	18
3.2.5 Formação do Compósito.....	19
3.2.6 Amostragem para Determinação das Propriedades físicas e mecânicas do compósito...	21
3.2.7 Propriedades do Compósito.....	21
3.2.7.1 Propriedades mecânicas.....	21
3.2.7.2 Propriedades físicas	22
3.2.8 Análise Estatística	22
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
4.1 Densidade e Teor de Umidade do Endocarpo da Macadâmia, <i>Eucalyptus</i> sp. e solado de sandália do tipo flip-flop	23
4.2 Propriedades do Adesivo	23
4.3 Propriedades Mecânicas do Compósito.....	24
4.4 Propriedades Físicas do Compósito.....	24
4.4.1 Inchamento em Espessura e Absorção de Umidade	24
4.4.2 Densidade Aparente média do Compósito por Densitometria de Raio-X.....	25
5 CONCLUSÕES.....	27
6 RECOMENDAÇÕES.....	28
REPEFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	29

1 INTRODUÇÃO

Compósito é todo o material multifásico que exiba uma proporção significativa das propriedades de ambos os materiais que o constituem (Callister *et al.*, 2016). Ele é formado pela combinação de dois ou mais materiais, resultando em um novo material, com propriedades que são intermediárias ou superiores às dos materiais originais (Drekener; Simêncio, 2019). Portanto, combinar materiais heterogêneos que apresentem diferentes propriedades, desde que seja feito com metodologia e técnicas adequadas, podem apresentar características superiores a materiais homogêneos.

Segundo o boletim interno da Associação Latino-Americana de Materiais Compósitos - ALMACO (2022), o consumo de compósitos no Brasil, em 2021, aumentou 17,8%, o que representa um valor de R\$ 3,960 bilhões. Porém, este valor expressivo está atrelado à escassez e ao aumento dos valores as matérias-primas convencionais (fibra de vidro e resinas) usadas para confecção de determinados tipos de compósitos.

Em 2021, a construção civil respondeu por 36,6% do consumo brasileiro de compósitos de poliéster. Este valor foi superior ao consumido pelo setor de transportes (19,5%), corrosão/saneamento (16,6%), lazer/piscinas (11,7%), energia eólica (5,9%), energia elétrica (3,9%), náutico (2%) e vestuário (1%). Quando analisado apenas o consumo de compósitos à base de resina epóxi, o setor de energia eólica liderou com uma demanda de 92,6%, à frente de óleo e gás (3,3%) e eletroeletrônicos (2,4%) (ALMACO, 2022).

Com o aumento da demanda por compósitos, pesquisas por novas matérias-primas para serem usadas em sua fabricação tem se intensificado, impulsionando a inovação e a busca por soluções mais sustentáveis e eficientes. Entre as fibras naturais empregadas na confecção de compósitos destacam-se as fibras de coco, sisal, juta, bambu, madeira, caroço de açaí, pecíolo da folha do dendê, entre outras (Wearn; Montagna; Passador, 2020; Guo; Tataranni; Sangiorgi, 2023; Farzana *et al.*, 2022; Hasan *et al.*, 2023; Yuan, Fu; Liu, 2025; Barbosa *et al.*, 2019; Pimentel *et al.*, 2023).

Além de matéria-prima virgem, resíduos de processos produtivos também tem sido empregados na confecção de compósitos. A incorporação de materiais como plásticos pós-consumo e resíduos industriais, em compósitos tem como objetivo reduzir o impacto ambiental e agregar valor a esses materiais.

Neste contexto, em busca por alternativas sustentáveis, o aproveitamento de resíduos pode ser uma das soluções encontradas para minimizar esse impacto e gerar renda. Três exemplos claros de atividades com alta produção de resíduos e que podem ser usados na produção de compósitos destacam-se os resíduos gerados no beneficiamento do fruto da noz macadâmia, na fabricação e pós-uso de calçados do tipo solado de sandália do tipo flip-flop e na fabricação de celulose/papel. Esses resíduos podem ser reaproveitados para atender à demanda por compósitos mais ecológicos e inovadores.

No caso da noz macadâmia, o fruto é composto pelo carpelo, casca e amêndoas, que durante o seu beneficiamento, 25% são aproveitados como produto alimentício (25g de amêndoas) e 75% se tornam resíduo (75g de casca e carpelo) (Pimentel *et al.*, 2007; Piza *et al.*, 2017).

Com o aumento do consumo da noz macadâmia no mercado interno do Brasil, Camargo (2024) após entrevistar a Associação Brasileira de Macadâmia- ABM para o jornal “O Globo”, afirmou que o Brasil produziu em 2024 2,2% da produção mundial (300 mil toneladas), ou seja, 6,5 mil toneladas de macadâmia colhidas e beneficiadas em solo brasileiro. Nesse processo, aproximadamente 4,8 mil toneladas de resíduos são geradas.

Na fabricação de calçados de borracha, segundo a Associação Brasileira da Indústria de calçados - ABICALÇADOS (2023), em 2022, 48,3% da produção de calçados nacional foi desse

tipo de calçado, com um total de, aproximadamente, 410 milhões de pares. Essas sandálias de borracha microporosa são de difícil reciclagem e devido ao seu baixo valor agregado e alto custo do processo viram resíduos que vão para aterros sanitários ou são descartados incorretamente na natureza e acabam sendo encontrados próximos a rios e praias. De acordo com a BVRio (2022) somente um terço das 3,6 toneladas de chinelos coletados em rios próximos a Ilha do Governador, foram reciclados com êxito.

O lignosulfonato que é um subproduto da produção da celulose/papel também pode ser utilizado na formulação de compósitos (Gualberto; Motta; Pasquinib, 2021, Araujo *et al.*, 2025 e representa uma alternativa ambientalmente sustentável e economicamente viável. Por exemplo, o mercado global de lignosulfonato foi avaliado em US\$ 2,21 bilhões em 2024, com previsão de crescimento para US\$ 2,87 bilhões até 2031, a uma taxa composta de crescimento anual (CAGR) de 3,8 % (Precision Business Insights, 2023). Esse produto apresenta propriedades químicas favoráveis ao uso como aditivos, aglutinantes ou cargas funcionais em matrizes poliméricas, contribuindo para a redução de custos, valorização de resíduos industriais e alinhamento com os princípios da bioeconomia e da economia circular (Xiaodan *et al.*, 2019).

Desse modo, visando o reaproveitamento de resíduos, este trabalho objetivou reutilizar materiais residuais proveniente do fruto da macadâmia, solado de borracha de sandálias do tipo flip-flop e lignosulfonato para a produção de um compósito com matriz de *Eucalyptus sp.* e avaliar a densidade, teor de umidade, absorção e inchamento, em 2 e 24 horas, flexão estática, tração perpendicular (LI), arrancamento de parafuso e Dureza de Janka.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 *Macadamia integrifolia* e algumas de suas utilizações

A *Macadamia integrifolia* é uma árvore da família Proteaceae, nativa das regiões subtropicais de Nova Gales do Sul e Queensland, na Austrália. Essa espécie é amplamente reconhecida pela produção de nozes de alta qualidade, utilizadas tanto na alimentação quanto na indústria cosmética devido ao seu óleo de excelente qualidade (Pimentel *et al.*, 2007). O óleo extraído das nozes possui propriedades antioxidantes e é rico em ácidos graxos monoinsaturados, o que o torna um ingrediente valioso para a saúde e a beleza. (Ribeiro *et al.*, 2020).

No Brasil, a macadâmia foi introduzida em 1931, com os primeiros estudos realizados pelo Instituto Agronômico de Campinas na década de 1950. Atualmente, o país possui cerca de 6.500 hectares plantados, com produção anual de aproximadamente 3.200 toneladas de nozes em casca. Os principais estados produtores incluem São Paulo, Espírito Santo e Bahia (Rodrigues, 2016). A Figura 1 mostra um exemplar de macadâmia.

Figura 1. Exemplar de *Macadamia integrifolia*.



Fonte: Tir (2019).

Atualmente existem cerca de 10 espécies descritas do gênero, mas somente as espécies *Macadamia integrifolia* e *Macadamia tetraphylla* são exploradas economicamente (São José, 1991). A espécie *M. integrifolia* é responsável por cerca de 90% da produção mundial (Pimentel *et al.*, 2017). Seu fruto é um folículo, composto por três partes principais: carpelo (exocarpo e mesocarpo), casca (endocarpo) e amêndoas (embrião) (Figura 2). Seu beneficiamento pode contar com etapas de seleção, secagem, separação noz-casca, extração do óleo e descarte do carpelo e da casca. A amêndoas inteira é o principal produto comercial, a qual apresenta sabor refinado e bastante apreciado no mercado internacional (Rodrigues *et al.*, 2016).

Figura 2. A) Características do fruto e da noz macadâmia. Da esquerda para direita: Carpelo verde, carpelo fendido, endocarpo, carpelo, semente com endocarpo, semente com endocarpo fendido com noz, endocarpo vazio.



Fonte: Pizza e Morya (2014).

O endocarpo da *Macadamia integrifolia*, popularmente conhecido como casca interna ou carapaça da noz, é um resíduo lignocelulósico de alta rigidez e resistência, que tem despertado interesse crescente para aplicações industriais, especialmente na produção de compósitos, painéis de partículas e carvão ativado (Cortat *et al.*, 2021; Tam *et al.*, 2000; Dai & Antal, 1999).

No caso da sua utilização para produção de carvão, Strezov *et al.* (2007) observaram que durante a carbonização formou-se de 0,4% de cinzas, 79,7% de materiais voláteis e 19,9% de carbono fixo. Além disso, a análise elementar deste resíduo revelou a presença de 53,0% de carbono (C), 6,0% de hidrogênio (H), 0,3% de nitrogênio (N) e 40,5% de oxigênio (O), sendo este último estimado por diferença.

O potencial desse resíduo se dá pelo fato da densidade do endocarpo da macadâmia ser aproximadamente $0,680 \text{ g cm}^{-3}$, sendo seus principais constituintes a lignina (47,6%), a celulose (25,8%), as hemiceluloses (11,7%), as cinzas (0–2%) e cerca de 10% de umidade (Toles *et al.*, 1998). A baixa higroscopidade natural do endocarpo também o torna vantajoso para aplicações em produtos onde a estabilidade dimensional é desejável, como em painéis ou compósitos expostos à umidade.

Do ponto de vista mecânico, o endocarpo apresenta valores notáveis. Estudos apontam módulo de elasticidade (MOE) superior a 9 GPa e resistência à compressão acima de 80 MPa, valores comparáveis a algumas madeiras duras tropicais e a outros frutos de carapaça rígida, como coco e noz (Mirindi *et al.*, 2021; Wechsler *et al.*, 2013). Sua elevada dureza também favorece o uso como carga reforçante em matrizes poliméricas.

Portanto, o endocarpo da macadâmia configura-se como uma matéria-prima de elevado potencial tecnológico, sendo uma alternativa sustentável ao uso de madeiras e cargas minerais em produtos industriais.

O aproveitamento de resíduos do endocarpo da *Macadamia integrifolia* na produção de materiais e compósitos tem sido cada vez mais explorado na literatura científica devido ao seu alto teor de lignina e resistência mecânica. Segundo Khan *et al.* (2023), o endocarpo dessa noz apresenta propriedades que favorecem sua aplicação em compósitos com diferentes tipos de polímeros. Quando incorporado ao poliácido lático (PLA) ou ao polietileno de alta densidade (HDPE), o endocarpo contribui para o aumento da resistência à água e da cristalinidade do material. Além disso, quando adicionado ao polietileno de baixa densidade (LDPE) em até 20% em peso, ele melhora significativamente o módulo de elasticidade, embora possa reduzir a tenacidade do compósito (Khan *et al.*, 2023).

Em painéis de partículas o endocarpo da macadâmia tem se mostrado promissor. Wechsler *et al.* (2013) ao avaliarem painéis produzidos com partículas de endocarpo e resina de óleo de mamona (castor oil), comparando-os a painéis convencionais de fibra de madeira com uréia-formaldeído, verificaram que os painéis à base de macadâmia apresentaram densidade 43 % maior, absorção de água e inchamento equivalentes a apenas 25 % dos valores dos painéis de madeira e, manteve resistência interna semelhante.

No entanto, os módulos de ruptura e elasticidade foram cerca de 50 % inferiores, devido ao menor teor de celulose do endocarpo. Um destaque importante foi a emissão de formaldeído, inferior a 5 % dos níveis típicos dos painéis convencionais (Wechesler *et al.*, 2013). Já Mirindi *et al.* (2021) testaram misturas com 50 % de endocarpo e 50 % de goma-arábica, resultando em painéis com densidade de $1.219 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, módulo de ruptura de 12,21 MPa, módulo de elasticidade de 1,81 GPa, resistência interna de 1,25 MPa e resistência à compressão de 22,54 MPa, embora a absorção de água (9,42 %) e o inchamento (6,22 %) estivessem acima dos limites da norma ANSI/A208.1-1999 (Mirindi *et al.*, 2021).

2.2 Sandália tipo flip-flop

As sandálias do tipo flip-flop são amplamente utilizados no Brasil e no mundo, sendo confeccionados, em sua maioria, com EVA (etileno-acetato de vinila), borracha natural (*Hevea brasiliensis*) e borracha sintética, especialmente SBR (Estireno-Butadieno). Esses materiais conferem ao produto leveza, flexibilidade, resistência ao desgaste e boa durabilidade (Paiva Junior *et al.*, 2023;).

Entre as borrachas sintéticas para produção desolado de sandália do tipo flip-flop se destacam o EVA e a SBR. O EVA é um copolímero formado pelo encadeamento de sequências aleatórias de unidades repetitivas da polimerização do eteno e acetato de vinila termoplástico cuja composição pode variar entre 10% e 40% de acetato de vinila, encontradas no mercado com densidades variando de 90 a 350 kg m^{-3} o que influencia diretamente na sua flexibilidade e desempenho mecânico (Paiva Junior *et al.*, 2023; Azevedo *et al.*, 2009).

Já a borracha de butadieno-estireno (SBR) está não é cristalizável e apresenta propriedades bem mais modestas, sendo a de mais baixo custo e, portanto, a mais utilizada para aplicações gerais em que não se necessita de desempenho específico (Viscote *et al.*, 2001).

Além das borrachas sintéticas, a borracha natural (NR) é também muito empregada na fabricação de sandálias, em pequenas proporções no produto, pois ela frequentemente é combinada com outras borrachas ou polímeros para otimizar propriedades como conforto e durabilidade. A borracha natural (NR) tem excelente resistência à tração, mesmo na ausência de cargas reforçadoras como o negro de fumo, por causa de sua característica de ser cristalizável sob tração (Viscote *et al.*, 2001).

A crescente geração de resíduos provenientes de sandálias do tipo flip-flop, compostos majoritariamente por polímeros como o copolímero de etileno-acetato de vinila (EVA) e a borracha estireno-butadieno (SBR), tem impulsionado estudos voltados à sua reutilização em materiais compósitos. Uma aplicação promissora é sua incorporação em compósito madeira plástico, também conhecidos como Wood Plastic Composite, que combinam fibras vegetais com matrizes poliméricas (Santos *et al.*, 2025; Tian *et al.*, 2020).

Pesquisas indicam que a adição de EVA moído em compósitos à base de madeira pode melhorar propriedades físicas e mecânicas. Li *et al.* (2012) investigaram compósitos formados por farinha de madeira de choupo, polietileno diferentes proporções de EVA, e observaram que a adição de 15% do polímero aumentou a resistência à flexão em 17,5% e à tração em 10%, além de reduzir a absorção de água e o inchamento, conferindo maior estabilidade dimensional aos painéis.

Da mesma forma, Stael *et al.* (2001) analisaram a incorporação de resíduos de EVA com fibras lignocelulósicas provenientes do bagaço de cana-de-açúcar. O estudo mostrou que a

interface entre os materiais era coesa e sem descontinuidades, resultando em compósitos com bom comportamento ao impacto e potencial para substituir materiais tradicionais em aplicações não estruturais.

Dessa forma, a reutilização de resíduos de calcados na fabricação de painéis lignocelulósicos apresenta-se como uma alternativa viável do ponto de vista técnico e ambiental, uma vez que esse resíduo é um desafio para a logística reversa. Segundo Succar (2022), especialista em economia da BVRio, em seis meses, 3,6 toneladas de chinelos, sandálias de dedo e sandálias de plástico e borracha foram encontradas no mar e nos manguezais, o que equivale a cerca de 25.000 calçados. Como esse tipo de resíduo possui pouco valor na cadeia de reciclagem, apenas um terço foram encaminhados para reciclagem. Sendo assim, seu reaproveitamento pode contribuir para a redução do volume de resíduos sólidos urbanos, diminuir a poluição ambiental e promover o desenvolvimento de materiais sustentáveis e inovadores.

2.3 Madeira de *Eucalyptus* sp.

A madeira de *Eucalyptus* sp., amplamente cultivada no Brasil e em outros países tropicais e subtropicais, destaca-se por seu rápido crescimento, boa densidade e elevado teor de lignina. Essas propriedades a tornam uma excelente matriz lignocelulósica para a produção de compósitos madeira-borracha, sobretudo como farinha ou fibras de madeira, utilizadas em substituição parcial ou total a cargas minerais em polímeros termoplásticos (Aguilar-Bolados *et al.*, 2024; Mohammad *et al.*, 2019).

Ela é amplamente reconhecida por suas características físicas, químicas e anatômicas, que a tornam uma matéria-prima valiosa para diversas aplicações industriais, especialmente na produção de compósitos madeira-plástico (WPC). A densidade básica dessa madeira varia entre 0,45 e 0,60 g/cm³, dependendo da espécie, da idade e das condições ambientais em que a árvore foi cultivada (Gomide *et al.*, 2005), o que pode influenciar diretamente a resistência mecânica e a estabilidade dimensional dos compósitos produzidos.

Do ponto de vista químico, a madeira de eucalipto é composta principalmente por celulose, hemicelulose, holocelulose (celulose + hemicelulose) e lignina, correspondendo respectivamente, a 40 a 45%, 20 a 25%, 65 a 70% e 20 a 25% do seu conteúdo e desempenham um papel estrutural dentro do material. No caso da celulose, ela é responsável por conferir resistência à tração, enquanto a lignina age como uma matriz que proporciona rigidez e resistência à compressão, garantindo assim um equilíbrio estrutural na madeira. Os extrativos e as cinzas estão presentes em quantidades inferiores a 5%, mas também influenciam propriedades como a durabilidade e a resistência biológica da madeira (Gomide *et al.*, 2005; Pereira *et al.*, 2000).

Outro ponto relevante é a disponibilidade do material: O Brasil é líder mundial na produção de *Eucalyptus* sp., com mais de 7,6 milhões de hectares plantados (IBÁ, 2023), o que garante fornecimento contínuo de matéria-prima para aplicações industriais, inclusive na produção de compósito madeira-plástico voltados à construção civil, mobiliário e revestimentos.

A madeira de *Eucalyptus* sp. apresenta propriedades técnicas e disponibilidade que a qualificam como um excelente material lignocelulósico para o desenvolvimento de compósitos madeira-plástico sustentáveis e de alto desempenho.

2.4 Lignosulfanato

O lignosulfonato é um subproduto solúvel da indústria de papel e celulose obtido pelo processo sulfito, caracterizado por sua estrutura polifenólica e funcionalidade química que o torna um excelente agente para modificação de superfícies fibrosas e compatibilização em compósitos lignocelulósicos (Oliveira *et al.*, 2010).

Sua utilização tem se mostrado eficiente para melhorar a interface entre fibras naturais e matrizes poliméricas termofixas, como a resina fenólica e a ureia-formol, devido à sua capacidade de interagir quimicamente tanto com a fase lignocelulósica quanto com a matriz, promovendo melhor adesão e, consequentemente, aumentando as propriedades mecânicas dos compósitos (Silva *et al.*, 2019; Oliveira *et al.*, 2010).

Estudos demonstram que o tratamento de fibras naturais com lignosulfonato pode aumentar a estabilidade dos compósitos e aumentar a resistência a impacto, principalmente quando combinado com processos complementares, como a irradiação por ultrassom e aquecimento (Oliveira, 2010). Além disso, o lignosulfonato pode ser utilizado como substituto parcial do fenol na formulação de resinas fenólicas, contribuindo para o desenvolvimento de materiais mais sustentáveis e mais baratos (Silva *et al.*, 2016).

Na área de compósitos de fibrocimento, o lignosulfonato também atua no aprimoramento da interface entre as fibras naturais e a matriz mineral, o que evidencia sua versatilidade como agente de compatibilização em diferentes tipos de materiais compósitos (Gualberto, 2020). Essa propriedade é particularmente importante para a fabricação de compósitos madeira-plástico-borracha, onde a aderência entre a fase lignocelulósica e a matriz polimérica é determinante para o desempenho final do produto.

A incorporação de lignosulfonatos na produção de painéis de partículas representa uma alternativa sustentável e funcional ao uso exclusivo de adesivos sintéticos. Segundo Bekhta *et al.* (2021), lignosulfonatos de sódio (NaLS) e de magnésio (MgLS) foram utilizados como substituintes parciais da resina ureia-formaldeído (UF) na formulação de painéis, com adição complementar de polietileno de média densidade (pMD) como agente de entrecruzamento. Os resultados mostraram que até 30% de substituição da UF por lignosulfonato resultou em propriedades físicas e mecânicas satisfatórias, próximas àquelas dos painéis tradicionais à base de 100% UF.

Além disso, observou-se uma redução significativa na emissão de formaldeído. Os painéis formulados com lignosulfonato de sódio apresentaram os menores teores de liberação, atingindo níveis classificados como "super E0", com emissão inferior a 1,5 mg/100 g, conforme os métodos padronizados de análise (Bekhta *et al.*, 2021). Essa classificação evidencia o potencial desses painéis para aplicações em ambientes internos, com menor impacto à saúde humana e ao meio ambiente.

2.5 Compósitos

Os materiais compósitos são sistemas formados pela combinação de dois ou mais constituintes distintos, geralmente uma matriz (contínua) e um reforço (dispersa), que se mantêm separados a nível macroscópico, mas atuam de forma sinérgica para oferecer propriedades superiores às dos materiais convencionais. Segundo Harris (1999), a principal vantagem desses materiais é permitir ao projetista combinar as qualidades de diferentes materiais e minimizar suas deficiências, obtendo estruturas mais leves, resistentes e adequadas a requisitos específicos de projeto.

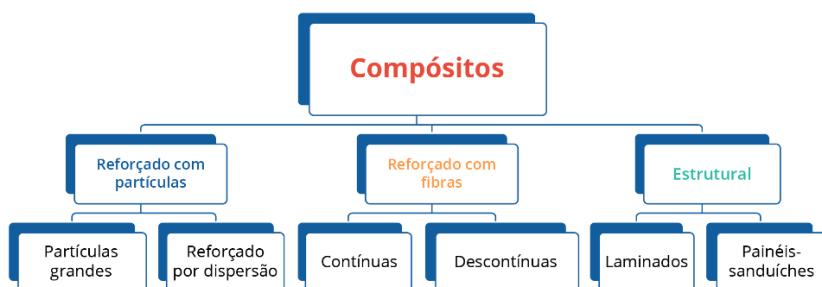
Diferentemente dos materiais homogêneos, como metais puros ou polímeros não reforçados, os compósitos possibilitam a otimização personalizada das propriedades mecânicas, térmicas e químicas. Essa capacidade de "engenheirar" os materiais confere maior liberdade de design e, frequentemente, soluções mais econômicas e eficazes (Harris, 1999). Um exemplo disso está no uso de materiais compósitos na indústria aeronáutica e automobilística, onde a alta relação resistência/peso é fundamental para o desempenho e a economia de combustível (Kieling *et al.*, 2019).

Segundo Merlini (2021) e Marinucci (2019) citado por Balieiro (2023) cargas particuladas estão em crescente uso devido à facilidade no processamento, disponibilidade e possibilidade de diversas combinações carga/matriz, pois, aplicando-se um carregamento mecânico ao compósito,

a tensão é transferida da matriz (parte mais fraca) para a carga que possui maior rigidez e deve suportar a maior parte do carregamento aplicado.

Os materiais compósitos estão classificados em três grupos principais: compósitos reforçados com partículas, compósitos reforçados com fibras e compósitos estruturais (Callister *et al.*, 2016) (FIGURA. 3).

Figura 3. Diagrama de classificação dos compósitos.



Fonte: Adaptado de Callister *et al.* (2016).

No caso dos compósitos poliméricos, que são os mais comuns, a matriz é geralmente um polímero termoplástico ou termofixo, enquanto os reforços podem ser fibras de vidro, carbono, aramida ou partículas naturais. O uso de partículas naturais, como as lignocelulósicas evidenciam o seu potencial em substituição a materiais sintéticos. A madeira, por exemplo, é um compósito natural constituído por fibras de celulose em uma matriz de lignina, o que serve como inspiração para o desenvolvimento de compósitos lignocelulósicos industriais. A combinação de fibras naturais com matrizes poliméricas (como epóxi ou poliéster) é promissora, principalmente devido ao baixo custo, menor densidade e maior sustentabilidade ambiental das fibras vegetais em comparação com as sintéticas (Harris, 1999).

2.5.1 Granulometria das partículas do compósito

Compósitos poliméricos reforçados com partículas ou fibras curtas está diretamente relacionada à granulometria dos elementos de reforço utilizados. Aspectos como o diâmetro, comprimento e distribuição das fibras ou partículas são determinantes para a eficiência da transferência de carga entre matriz e reforço, afetando assim propriedades como resistência à tração, rigidez e tenacidade (Zhandarov *et al.*, 2000).

Nos compósitos particulados as partículas dispersas em todas as direções do material são quase sempre equiaxiais e podem apresentar na matriz polimérica, cerâmica ou metálica qualquer forma irregular ou regular, cúbicas, esféricas e tetragonais. Essas partículas são materiais sólidos, não solúveis na matriz e são utilizadas para conceder uma nova funcionalidade ao material tornando-o mais resistente. As partículas de reforços são geralmente mais resistentes do que a própria matriz, aderem-se fortemente a ela e melhoram a propriedade mecânica do material compósito. Quanto menor o tamanho das partículas do reforço, maior a eficiência para a formação dos compósitos (Wijesinghe *et al.*, 2020).

Em compósitos com fibras curtas, como os reforçados com vidro ou carbono, a granulometria, particularmente o comprimento das fibras após o processamento, possui papel essencial. Durante o processo de moldagem por injeção, é comum a ocorrência de cisalhamento intenso que resulta na quebra das fibras. Como demonstrado por Bowyer e Bader (1972), em amostras de Nylon 66 reforçado com 15% em volume de fibra de vidro, cerca de 80% das fibras apresentavam comprimento inferior ao comprimento crítico necessário para a transmissão eficiente de tensões, reduzindo drasticamente a efetividade do reforço.

Este fenômeno ressalta a importância do controle do processo e da distribuição granulométrica. Parratt e Potter (1980) relataram que, por meio de processos controlados de orientação e distribuição das fibras curtas, foi possível alcançar até 95% da rigidez dos compósitos com reforço contínuo.

Além disso, a orientação das fibras curtas também está intimamente ligada ao seu comprimento: fibras mais curtas tendem a se orientar mais facilmente ao longo do fluxo do polímero durante a moldagem, o que pode ser vantajoso em certos casos, mas indesejável em outros, dependendo da direção solicitada no projeto mecânico do componente (Harris, 1999).

Com relação à micropartículas, como cargas minerais, a distribuição granulométrica também afeta diretamente a viscosidade da mistura e a dispersão no polímero. Distribuições amplas podem levar à sedimentação ou aglomeração durante a moldagem, prejudicando a uniformidade das propriedades mecânicas e viscoelásticas do compósito. Por isso, o uso de partículas com distribuições granulométricas controladas e homogêneas é recomendado para melhorar a integridade estrutural e o desempenho térmico do material (Harris, 1999).

A granulometria também impacta a molhabilidade e adesão interfacial entre a matriz polimérica e o reforço. Partículas com superfícies mais finas e rugosas, por exemplo, favorecem maior área de contato e melhor ancoragem da matriz, melhorando a transferência de carga e a resistência à delaminação (Yuan *et al.*, 2018; Chen *et al* 2006).

Diversos estudos têm investigado os efeitos do tamanho das partículas lignocelulósicas sobre o desempenho de compósitos madeira-plástico (WPC), sobretudo quanto às propriedades mecânicas. Gozdecki *et al.* (2012) analisaram compósitos de polipropileno reforçados com partículas de madeira industrial, tradicionalmente utilizadas na fabricação de painéis aglomerados, com quatro faixas de tamanho: muito pequenas (0,25–0,5 mm), pequenas (0,5–1 mm), grandes (1–2 mm) e muito grandes (2–4 mm). Os corpos de prova foram obtidos por moldagem por injeção e submetidos a ensaios de tração, flexão e impacto.

De modo geral, verificou-se que o aumento do tamanho das partículas até 2 mm promoveu melhora significativa nas propriedades mecânicas. Gozdecki *et al.* (2012) atribuíram esses resultados à maior razão entre comprimento e espessura das partículas maiores, que favorece a ancoragem mecânica e a transferência de carga entre a matriz e o reforço lignocelulósico.

2.5.2 Compósito madeira-borracha (CMB)

Os compósitos à base de borracha e materiais lignocelulósicos têm sido objeto de crescente interesse na área de engenharia de materiais, especialmente por promoverem soluções sustentáveis para o reaproveitamento de resíduos industriais e a redução de impactos ambientais. A borracha, tanto natural quanto sintética, é amplamente utilizada em diversos setores industriais, sendo responsável por uma significativa geração de resíduos ao final de seu ciclo de vida (Pennacchio, 2019). Ao mesmo tempo, o setor madeireiro também é responsável por elevada geração de resíduos, com perdas variando entre 20% a 40% do volume das toras processadas (Finotti *et al.*, 2006).

A incorporação de fibras lignocelulósicas em matrizes de borracha, especialmente de origem reciclada, tem se mostrado uma alternativa viável técnica e economicamente. De acordo com Jerônimo (2023), essa combinação resulta em compósitos com propriedades mecânicas adequadas, incluindo boa estabilidade dimensional, baixa absorção de água, leveza e resistência mecânica, mesmo que com leve redução na resistência à tração e à resiliência ao impacto.

Os principais desafios na formulação desses compósitos envolvem a compatibilização entre a matriz hidrofóbica da borracha e a fase lignocelulósica, que é hidrofílica. Tratamentos superficiais das fibras, como a alcalinização ou o uso de compatibilizantes, são frequentemente empregados para melhorar a adesão entre as fases (Hodzic; Shanks, 2014; Thakur *et al.*, 2010). A moagem da borracha, etapa crucial para sua incorporação aos compósitos, pode ser realizada por métodos mecânicos ou criogênicos, resultando em diferentes granulometrias e características

superficiais que afetam diretamente a interface com os reforços lignocelulósicos (Asaro *et al.*, 2018).

Em relação à aplicação prática, os compósitos madeira-borracha apresentam potencial para uso em pisos, mobiliário urbano, placas acústicas, entre outros produtos, com vantagem adicional de baixo custo de produção e reaproveitamento de resíduos (Jerônimo, 2023). A utilização desses materiais atende ainda aos princípios da economia circular, ao permitir o reuso de insumos industriais com valor agregado.

2.6 Poliuretano vegetal derivado de óleo de mamona

A resina de mamona é um material polimérico de origem natural, obtido a partir do óleo de mamona, que por sua vez é extraído das sementes da planta *Ricinus communis*. De acordo com Cardoso *et al.* (2013), o óleo de mamona já apresenta grupos hidroxila em sua molécula, o que o torna um poliol trifuncional ideal para reações de poliadição e para a síntese de poliuretanas. Essa propriedade intrínseca permite a formação de redes tridimensionais fortemente reticuladas quando o óleo é reagido com diisocianatos, como o isocianato de isoforona (IPDI).

O aumento do número de grupos reativos promove interações intermoleculares intensificadas, o que se reflete em propriedades como maior tenacidade, módulo de elasticidade e dureza, além de uma constante dielétrica adequada para isolação (Cardoso *et al.*, 2013).

Imperveg (2025) salienta que as propriedades isolantes dos poliuretanos à base de mamona tornam esses materiais adequados para impermeabilizante para aplicação em concreto, madeira e aço carbono nos segmentos de saneamento básico, industrial e residencial, na fabricação de espumas, revestimentos, adesivos, elastômeros, matriz aglomerante para compósitos e que apresenta valores competitivos de mercado em relação as demais resinas.

Essa afirmação pode ser reforçada avaliando os resultado obtidos por Barbalho *et al.* (2018) que encontrou valores de absorção de água 5 vezes menores em amostras de ripas de bambu com impermeabilização com o poliuretano vegetal à base do óleo da mamona. Associado a isso, a proliferação de fungos nas superfícies nas amostras sem a impermeabilização foi evidente dentro de 96 horas de ensaios de encharcamento.

A utilização de poliuretano derivado de óleo de mamona em compósitos reforçados com partículas de bambu tem se mostrado uma alternativa sustentável e eficiente para a manufatura de materiais ecológicos. Estudos indicam que a adição progressiva de poliuretano melhora propriedades como dureza Shore D, resistência térmica e impermeabilidade, reduzindo significativamente a absorção de água e o inchamento do material (Marinho *et al.*, 2013).

Além disso, a análise termogravimétrica revelou que o poliuretano vegetal apresenta estabilidade térmica até 250°C, tornando-se uma opção viável para aplicações industriais que exigem resistência mecânica e durabilidade (Marinho *et al.*, 2013).

Santos *et al.* (2018) também concluiu que a aplicação de biocompósitos de bambu e poliuretano derivado de óleo de mamona se mostra uma alternativa sustentável e acessível para diversas aplicações industriais, apresentando baixo custo e boa compatibilidade estrutural com produtos como próteses e até mesmo óculos.

2.7 Propriedades dos Painéis

2.7.1 Propriedades físicas

2.7.1.1 Densidade

A densidade é a relação entre a massa de um material e o volume que ele ocupa. Em termos simples, a densidade indica o grau de compactação de um corpo em um determinado

espaço. Ela é específica para cada material e muitas vezes é afetada por mudanças externas, como de temperatura, pressão e a composição do material.

Como compósitos são fabricados usando diferentes materiais, a densidade final irá depender da densidade dos materiais usados e, também, do método empregado para a sua produção.

De acordo com Iwakiri (2005) citado por Araujo (2019) a densidade tem uma influência significativa sobre as propriedades dos painéis e, também, no processo de produção. Os painéis de partículas feitas com material lignocelulósico de espécies de baixa densidade têm maior resistência à flexão, módulo de elasticidade, adesão interna e resistência à tração, já que apresentam maior qualidade de colagem. Para que as chapas produzidas com madeira de alta densidade possuam a mesma resistência que uma produzida com madeira de menor densidade deve-se aumentar obrigatoriamente a densidade da chapa, e isto implica em chapas com maior peso para o mesmo nível de resistência. Segundo Barrichelo *et al.* (1977) a composição química, como o teor de lignina dos materiais lignocelulósico, também afeta este parâmetro.

Sobral Filho (1981) concluiu que a adição de partículas de menores dimensões causou um pequeno aumento na densidade do painel, porém, diminuindo MOR e MOE.

2.7.1.2 Teor de umidade

A umidade é um fator que afeta não apenas o peso e a resistência mecânica, mas também a durabilidade e a estabilidade dimensional do material. A madeira é um material higroscópico, absorve e libera água em resposta à umidade relativa do ambiente. O conteúdo da umidade em equilíbrio varia conforme o teor de lignina e a densidade do material. Ou seja, compósitos serão afetados de diferentes formas em razão da proporção dos materiais lignocelulósicos presentes em sua composição (Hung *et al.*, 2017).

Está absorção de água se relaciona com outra propriedade, o inchamento em espessura do compósito. Quanto maior o teor de umidade absorvida pelo compósito maior será a variação dimensional causada pela umidade. Segundo Razera (2006), altos teores de umidade da madeira irão exercer influência negativa em sua colagem, interferindo na taxa de absorção, velocidade de cura e solidificação do adesivo.

Os efeitos ambientais causados pela umidade relativa do ar podem ser reversíveis quando o período de exposição é de curta duração. Porém, quando a exposição ocorre em ciclos prolongados, onde a combinação da umidade com mudança de temperatura está presente, os efeitos produzidos podem ser irreversíveis devido à afinidade da água por grupos funcionais específicos de matrizes poliméricas de natureza polar. Nesse caso, geralmente ocorrem alterações destrutivas na interface reforço/matriz polimérica, devido à degradação das prováveis interações físico-químicas existentes entre a resina e a fibra. Em consequência, ocorre o descolamento da fibra, provocando a delaminação do compósito com a consequente redução das propriedades mecânicas e termofísicas do material compósito (Demonte, 1987; Candido, 2001).

Compósitos madeira-borracha geralmente apresentam menor absorção de água em comparação com os compósitos tradicionais à base de madeira, aumentando sua durabilidade em ambientes úmidos (Xu *et al.*, 2017).

A estabilidade higroscópica do CMB é melhorada com a incorporação de borracha, o que ajuda a mitigar o inchaço e as mudanças dimensionais (Xu *et al.*, 2020).

2.7.2 Propriedades Mecânicas

2.7.2.1 Flexão estática

A resistência à flexão estática é uma das principais propriedades mecânicas avaliadas em compósitos madeira-borracha, pois simula a ação de cargas aplicadas de maneira contínua sobre o material. Ela é medida por meio do módulo de ruptura (MOR) e do módulo de elasticidade

(MOE). Segundo Hilling *et al.* (2008), os valores de MOR para compósitos com 60% de partículas de madeira e 40% de polietileno de alta densidade (PEAD) podem atingir entre 14 e 25 MPa, enquanto o MOE pode variar entre 1.500 e 3.000 MPa, dependendo do tipo de polímero, teor de madeira e aditivos.

O aumento do teor de madeira geralmente eleva o módulo de elasticidade, conferindo maior rigidez ao compósito. No entanto, teores excessivos podem prejudicar a homogeneidade da matriz e reduzir a tenacidade do material (Faruk *et al.*, 2012).

Segundo Tian *et al.* (2021) e Xu *et al.* (2017) compósitos madeira-borracha apresentam maior elasticidade, com componentes de borracha contribuindo para uma melhor absorção de energia sob cargas repetitivas, além de aumentar a flexibilidade do compósito, tornando-o mais adequado para aplicações que exigem desempenho dinâmico.

2.7.2.2 Tração perpendicular

A resistência à tração perpendicular (ou resistência interna) avalia a coesão entre as partículas lignocelulósicas e a matriz polimérica, sendo essencial para prever falhas de delaminação ou ruptura interna. Estudos indicam que a adição de agentes de acoplamento, como o anidrido maleico (MAPP), melhora significativamente essa propriedade ao aumentar a compatibilidade entre as fases orgânica e inorgânica do compósito (Morrell *et al.*, 2006).

A proporção entre fibra de madeira e borracha afeta significativamente as propriedades mecânicas. O maior teor de fibra de madeira geralmente aumenta a resistência à flexão, o módulo de elasticidade e a resistência à tração (Song *et al.*, 2000).

Song *et al.* (2000) discorrem que na proporção de 75:25 de madeira e borracha, apresentaram melhor resistência ao impacto e resistência de união interna em comparação com aqueles com maior teor de borracha.

2.7.2.3 Arrancamento de parafuso

A resistência ao arrancamento de parafusos é um parâmetro importante para aplicações que exigem conexões mecânicas, como montagem de móveis e estruturas modulares. Essa propriedade depende da densidade do compósito, da orientação das partículas, do tipo de polímero e do pré-tratamento da madeira (Xu *et al.*, 2017).

Trianosk *et al.* (2013) demonstram que compósitos com 50–70% de madeira apresentou resistência ao arrancamento superior a 800 N, especialmente quando o polímero utilizado possuía boa fluidez e a madeira apresentava baixa umidade. O uso de reforços adicionais, como fibras de vidro, também pode melhorar significativamente esta propriedade.

Segundo Raia *et al.* (2022) as propriedades mecânicas que influenciam a remoção de parafusos em compósitos de madeira e borracha incluem dureza, módulo de Young e resistência à tração. O aumento da dureza e o módulo de Young podem aumentar a retenção do parafuso, enquanto a menor resistência à tração pode afetar a capacidade do material de suportar as forças de retirada do parafuso.

2.7.2.4 Dureza Janka

A dureza Janka é amplamente utilizada para avaliar a resistência à penetração em superfícies de compósitos, sendo especialmente relevante em aplicações como pisos e painéis. Este ensaio mede a força necessária para cravar uma esfera de aço de 11,28 mm até a metade de seu diâmetro na superfície do material.

Os valores de dureza Janka para CMB variam significativamente, mas tendem a ser superiores aos da madeira sólida natural de baixa densidade. Segundo Clemons (2002), os compósitos com maiores teores de madeira e polietileno de alta densidade podem apresentar

dureza entre 4.000 e 6.500 N, comparáveis a madeiras duras como o carvalho branco (*Quercus alba*).

Esse comportamento é influenciado pela matriz polimérica, pela compactação durante o processamento e pela uniformidade da dispersão da carga lignocelulósica no compósito.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Material utilizado e sua procedência

Os materiais utilizados no estudo foram:

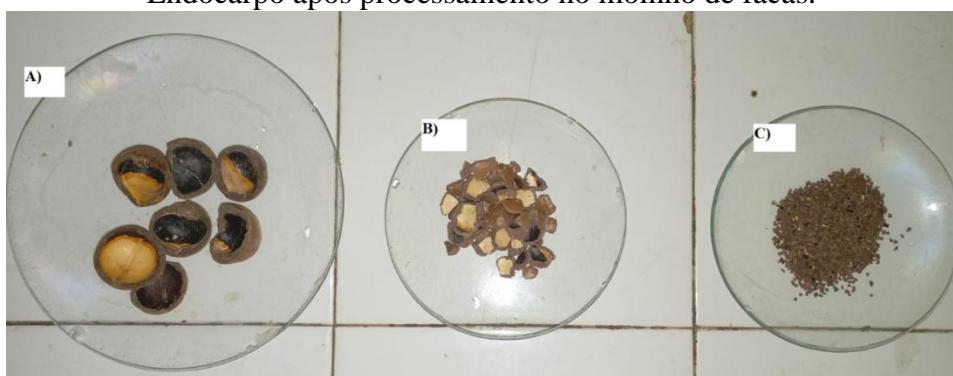
- i) Resíduo do endocarpo da macadâmia - proveniente da unidade industrial de beneficiamento TRIBECA, localizada na Fazenda Santa Marta, Município de Piraí/RJ ();
- ii) Solado de sandália do tipo Flip-flop – proveniente de coleta individual feita por catadores autônomos e recolhidas no Centro de reciclagem Cidade do Aço, na cidade de Volta Redonda/RJ;
- iii) Lignosulfonato – proveniente da empresa Borregarard;
- iv) Madeira de *Eucalyptus* sp. – cedidas pela Duratex, empresa produtora de painéis de Mdp, na cidade de Botucatu/SP;
- v) adesivo bicomponente à base de poliuretano vegetal, derivada do óleo de mamona, denominado de IMPERVEG AGT 1315 – Proveniente de comércio varejista.

3.2 Preparação do material utilizado na confecção do painel

3.2.1 Partículas de macadâmia

As partículas foram obtidas a partir da passagem dos resíduos do endocarpo em um moinho de martelo, visando a possibilidade de seu processamento posterior no moinho de facas (Figura 4), visto que o material apresentava uma certa dureza para ser diminuído em partículas menores.

Figura 4. A) Endocarpo bruto; B) Endocarpo após processamento no moinho de martelo e C) Endocarpo após processamento no moinho de facas.



Fonte: O autor.

Após concluir o processamento, o material foi classificado, em função da granulometria, com o auxílio de um conjunto de peneiras ASTM 20, de malha respectiva: 1,70 mm, 0,85 mm e finos. As partículas utilizadas no compósito foram aquelas retidas na peneira de malha 0,85 mm (Figura 5).

Figura 5. Conjunto de Peneiras ASTM 20 para classificação granulométrica das partículas. De cima para baixo: malha de 1,70mm; malha de 0,85mm e finos (fundo).



Fonte: O autor.

3.2.1.1 Determinação da densidade aparente do endocarpo da macadâmia

Para determinação da densidade aparente foi realizada adaptação da norma NBR 11941 (ABNT, 2003), onde 40 amostras do endocarpo bruto da macadâmia seca ao ar livre foram pesadas em balança de precisão para obtenção do seu peso, a 12% de umidade. Para obtenção do volume, as amostras foram fixadas em um suporte, contendo em sua ponta um objeto pontiagudo, que permitiu que elas pudessem ser submersas na água. A água foi colocada em uma vidraria graduada, para que quando as amostras fossem submersas, o volume de água deslocado correspondesse ao volume da amostra. Com os valores de peso e volume da amostra a 12% de umidade foi possível determinar a densidade aparente do endocarpo através da equação 1.

$$Dap. = \frac{Mi}{Vi} \quad (\text{Equação 1})$$

Em que: Dap.: Densidade aparente (g/cm^3); Mi: massa da amostra (g) e Vi: Volume deslocado (cm^3).

3.2.1.2 Determinação do teor de umidade do endocarpo da macadâmia

Para determinação da umidade, uma amostra de aproximadamente 10g do endocarpo passada no moinho de facas foi inicialmente pesada com o auxílio de uma balança de precisão de 0.0001g, para obtenção do peso inicial (úmido). Em seguida, para obtenção do peso final (seco) foi colocada na estufa, a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ por 48 horas e pesada até que a diferença entre duas últimas pesagens consecutivas fosse menor que 5%. Com base na equação 2 foi determinado o teor de umidade do endocarpo.

$$Ubs(\%) = \frac{Pu - Ps}{Ps} \times 100 \quad (\text{Equação 2})$$

Em que: Ubs (%): Umidade em base seca (%); Pu: Peso úmido da amostra (g); Ps: Peso seco da amostra (g).

3.2.2 Partículas de solado de borracha do tipo flip-flop

Os solados de borracha das sandálias do tipo flip-flop proveniente de coleta individual feita por catadores autônomos e recolhidas no Centro de reciclagem Cidade do Aço, na cidade de Volta Redonda/RJ foram selecionados por marca e parte da sandália. Neste estudo foram selecionados apenas os solados das sandálias do tipo fli-flop da marca Havaianas. As tiras não foram usadas.

A fim de retirar resíduos orgânicos e minerais, os solados foram lavados e higienizados em uma solução de hipoclorito de sódio por aproximadamente trinta minutos (Figura 6).

Figura 6. A) sandálias do tipo flip-flop que foram recolhidas pelos coletores; B) Tiras separadas dos solados e C) Material selecionado e higienizado para uso na produção do compósito.

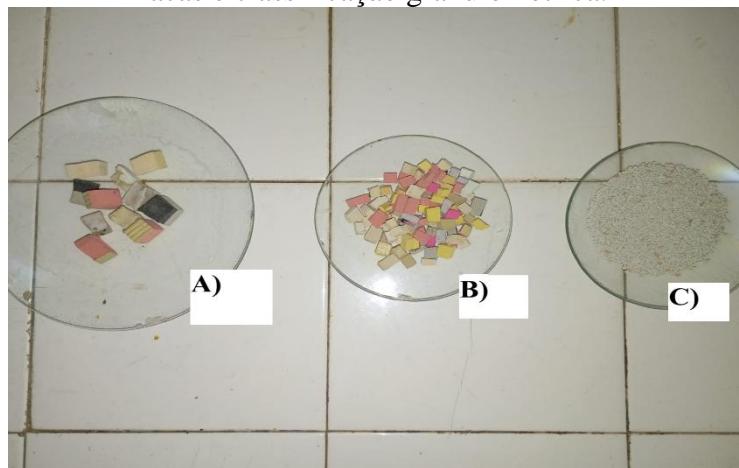


Fonte: O autor.

Para reduzir a dimensão dos solados de sandália do tipo flip-flop e possibilitar o seu processamento posterior no moinho de facas, estes primeiramente passaram em uma guilhotina de papel (Figura 7A) e posteriormente foram cortados de forma manual em dimensões aproximadas de 1 cm x 1 cm (Figura 7B).

Após o material foi classificado, em função da granulometria, com o auxílio de um conjunto de peneiras ASTM 20, de malha respectiva: 1,70 mm, 0,85 mm e finos, conforme a Figura 5. As partículas utilizadas no compósito foram aquelas retidas na peneira de malha 0,85 mm (Figura 7C).

Figura 7. **A)** Material pós guilhotina; **B)** Material pós corte manual e **C)** Material pós moinho de facas e classificação granulométrica.



Fonte: O autor.

3.2.2.1 Determinação da densidade da borracha do solado de sandália do tipo flip-flop

Para determinação da densidade aparente foi realizada adaptação da norma NBR 11941 pelo método de estereometria (ABNT, 2003). Foram utilizadas 40 amostras, ao ar livre, que foram pesadas em balança de precisão e em seguida, com o auxílio de um paquímetro digital, foram medidas as dimensões da partícula. A densidade Aparente foi obtida através da equação 3.

$$Dap. = \frac{Mi}{C \times L \times E} \quad (\text{Equação 2})$$

Em que: Dap.: Densidade aparente (g/cm^3); Mi: massa da amostra (g); C: Comprimento (cm); L: Largura (cm) e E: Espessura (cm).

3.2.2.2 Determinação do teor de umidade da borracha do solado de sandália do tipo flip-flop

Para determinação da umidade, uma amostra de aproximadamente 10g da borracha passada no moinho de facas foi inicialmente pesada com o auxílio de uma balança de precisão de 0.0001g, para obtenção do peso inicial (úmido). Em seguida, para obtenção do peso final (seco) foi colocada na estufa, a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ por 48 horas e pesada até que a diferença entre duas últimas pesagens consecutivas fosse menor que 5%. Com base na equação 2 foi determinado o teor de umidade do endocarpo.

3.2.3 Partículas de *Eucalyptus* sp.

O material foi classificado, em função da granulometria, com o auxílio de um conjunto de peneiras ASTM 20, de malha respectiva: 1,70 mm, 0,85 mm e finos. As partículas utilizadas no compósito foram àquelas retidas nas peneiras de malha 1,70mm e 0,85 mm.

3.2.3.1 Determinação da densidade básica das partículas de eucalipto

A densidade básica foi determinada com base em dados obtidos por meio de revisão de literatura de trabalhos anteriores desenvolvidos no Laboratório de Tecnologia da Madeira da UFRRJ, que utilizaram o mesmo material empregado no presente estudo.

3.2.3.2 Determinação do teor de umidade das partículas de eucalipto

Para determinação da umidade, uma amostra de aproximadamente 10g de madeira de eucalipto foi inicialmente pesada com o auxílio de uma balança de precisão de 0.0001g, para obtenção do peso inicial (úmido). Em seguida, para obtenção do peso final (seco) foi colocada na estufa, a $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$ por 48 horas e pesada até que a diferença entre duas últimas pesagens consecutivas fosse menor que 5%. Com base na equação 2 foi determinado o teor de umidade do *Eucliptus* sp.

3.2.4 Caracterização do adesivo poliuretano misturado com lignosulfanato

A caracterização do adesivo foi feito por meio da determinação do teor de sólidos, tempo de formação de gel e viscosidade.

O Teor de Sólidos (%) foi determinado a partir da mistura de 6 g de poliol (Componente B), 12 g de pré-polímero (Componente A), como indicado pelo fabricante, em uma proporção respectiva de 1:2. A esta mistura adicionou-se 9 g de lignosulfonato, o que corresponde à proporção de 5% utilizada no compósito, e ela foi agitada até sua total homogeneização.

Em um becker de peso conhecido, foi adicionado, aproximadamente, 3g da mistura e levada a estufa à $105 \pm 2^{\circ}\text{C}$ por 24 horas, em seis repetições. Com a amostra seca, foi realizada a correção do peso seco por meio da equação 4 e obtido o teor de sólidos (%) por meio da equação 5.

$$PSc = ps - pb \quad (\text{Equação 3})$$

Em que: PSc: Peso seco corrigido (g); ps: peso seco pós estufa (g) e pb: Peso do becker (g).

$$TS = \frac{PU - PSc}{PSc} \times 100 \quad (\text{Equação 4})$$

Em que: TS: Teor de Sólidos (%); PU: peso úmido (g) e PSc: Peso seco corrigido (g).

O tempo de formação de gel foi determinado por meio de uma mistura com 6 g de poliol (Componente B), 12 g de pré-polímero (Componente A), como indicado pelo fabricante, em uma proporção respectiva de 1:2. A esta mistura adicionou-se 9 g de lignosulfonato, o que corresponde a proporção de 5% utilizada no compósito e foi agitada até total homogeneização. Em um tubo de ensaio foi adicionado, aproximadamente, 4 g da mistura que posteriormente foi colocado em banho maria. O tempo, em segundos, foi cronometrado até a mistura mudar de textura líquida para gel. Foram realizados 4 repetições.

A Viscosidade foi obtida com o auxílio de um Viscosímetro Digital MVD-08, da marca 'MARTE'. A viscosidade foi obtida no parâmetro de 3 rotações por minuto (rpm) e com a Haste '1' do equipamento (Figura 8).

Figura 8. Caracterização da viscosidade com Viscosímetro Digital.



Fonte: O autor.

3.2.5 Formação do compósito

Para este estudo foram aplicados dois tratamentos denominados T1 e T2, onde:

- 1) T1 = 65% de partículas de endocarpo de macadâmia, 20% de partículas de madeira de *Eucalyptus* sp., 10% de partículas de solado de sandália do tipo flip-flop, 5% de lignosulfonato; e
- 2) T2 = 65% de partículas de madeira de *Eucalyptus* sp., 20% de partículas de endocarpo de macadâmia, 10% de partículas de solado de sandália do tipo flip-flop, 5% de lignosulfonato.

Ambos os tratamentos foram desenvolvidos em triplicatas e identificados como: T1.1, T1.2 e T1.3; T2.1, T2.2 e T2.3.

Para o tratamento 1 a densidade nominal (DP1) foi definida em 0,82 g/cm³ e para o tratamento 2 a densidade nominal (DP2) foi definida em 0,79 g/cm³.

Para evitar entupimento do aspersor da encoladeira, pois o adesivo AGT-1315 apresentava alta viscosidade e baixo tempo de formação de gel, a homogeneização das partículas (madeira, macadâmia, sandália do tipo flip-flop e lignosulfonato) com o adesivo foi feita de forma manual.

Após homogeneização, o material foi transferido para a caixa formadora do colchão, com dimensões de 43 cm de comprimento (c), 43 cm de largura (l) e 1,28 cm de espessura (e). Nesta etapa, o material foi uniformemente distribuído, para que não houvesse desnível na superfície do compósito e que toda a sua superfície entrasse em contato com a chapa da prensa de forma uniforme, garantindo assim, uma prensagem correta. Com o colchão formado, as duas faces do colchão foram cobertas com folhas de alumínio para evitar a adesão do material a chapa da prensa (Figura 9).

Figura 9. A) Caixa formadora forrada com folha de alumínio e B) Uniformização do material na caixa formadora.



Fonte: O autor.

Para a prensagem, foi feito o pré-aquecimento do equipamento por, pelo menos, 1 hora de antecedência. Com a prensa pré-aquecida, o colchão previamente preparado foi posicionado no interior da prensa de forma centralizada. Os parâmetros de prensagem adotados foram: temperatura de 120°C, pressão de 45 kgf/cm² por, aproximadamente, 8 minutos (Figura 10).

Figura 10. A) Prensa Hidráulica SL-12 e B) Parâmetros de prensagem.



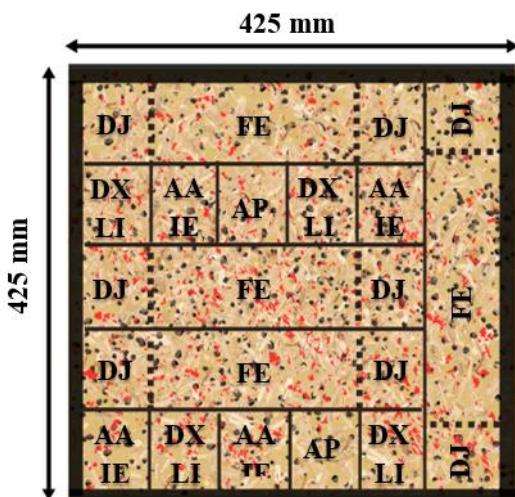
Fonte: O autor.

Os painéis prensados foram identificados e acondicionados em local arejado até o seu resfriamento e em seguida, levados para ser aclimatados em câmara climática ajustada em $65 \pm 5\%$ de umidade relativa e $20 \pm 3^\circ\text{C}$ de temperatura. A umidade de equilíbrio do compósito foi considerada quando o resultado de duas pesagens subsequentes do corpo-de-prova, em um intervalo de 24 h, não ultrapassasse mais que 0,1 % da massa do corpo de prova, segundo a norma NBR-14810.2 (ABNT, 2018).

3.2.6 Amostragem para determinação das propriedades físicas e mecânicas do compósito

A retirada das amostras ocorreu de acordo com adaptações feitas a NBR 14810-2(ABNT, 2018) e a ASTM D-142 (ASTM, 2014), conforme o esquema de retirada demonstrado na Figura 11.

Figura 11. Disposição da retirada dos corpos de prova. Onde: FE - Flexão Estática; AP - Arrancamento de Parafuso; DJ - Dureza Janka; DX - Densitômetria de raios X; LI - Ligação Interna (Tração Perpendicular); AA - Absorção de Água e IE - Inchamento em Espessura.



Fonte: O autor.

3.2.7 Propriedades do Compósito

3.2.7.1 Propriedades mécanicas

O ensaio de dureza Janka foi conduzido segundo adaptação da norma ASTM D-142 (ASTM, 2014). Foram utilizados dezoito corpos de prova com dimensões mínimas de 50 mm x 50 mm x 12,8 mm. O ensaio consistiu na aplicação de carga perpendicular à superfície do corpo de prova, utilizando uma esfera de aço com 11,28 mm de diâmetro, que foi pressionada até atingir metade do seu diâmetro embutido. A força necessária foi registrada por meio de uma máquina universal de ensaios com velocidade controlada.

Os parâmetros mecânicos (flexão estática, tração perpendicular ou ligação interna e arrancamento de parafuso) foram determinados de acordo com adaptações feitas à NBR 14810-2 (ABNT, 2018).

Para determinação da flexão estática foram utilizados dezoito corpos de prova de dimensões 310 mm x 50 mm x 12,8 mm. O corpo de prova foi apoiado em dois apoios equidistantes, com distância de 20 vezes a espessura do compósito. A carga foi aplicada de forma constante, no centro do corpo de prova até sua ruptura. Na máquina de ensaio universal, foi obtido os valores de carga quando no Limite de Proporcionalidade e no momento da Ruptura, e foram usados para determinação do MOR e MOE de acordo com as equações 6 e 7.

$$MOR = \frac{1,5*(P*D)}{B*(F)^2} \quad (\text{Equação 5})$$

$$MOE = \frac{P_1 * D^3}{d * 4 * P_1 * E^3} \quad (\text{Equação 6})$$

Em que:

MOE: Mód. De Elasticidade (N/mm²);

MOR: Mód. de Ruptura (N/mm²); P: carga na ruptura (N); P1: carga no limite proporcional (N); D: distância entre os apoios do aparelho (mm); d: deformação, referente a P1 (mm); B: largura do corpo-de-prova (mm); e E: espessura do corpo-de-prova (mm).

Para a Tração Perpendicular foram utilizados dez corpo-de-prova de dimensões 50 x 50 x 12,8 mm, e quando apresentavam superfície muito irregular, foram ligeiramente lixados para uma boa fixação dos blocos de tração. Para cada corpo-de-prova tiveram dois blocos de tração, em madeira, colados nas faces superior e inferior dos corpo-de-prova com adesivo termofusível (cola hot melt), ureia-formol, PVAc ou outro adesivo indicado para colagem dos blocos de tração aos corpo-de-prova. Na máquina de ensaios universal, foi anexado o novo corpo-de-prova (bloco de tração – corpo-de-prova – bloco de tração) nas garras para o ensaio, e o corpo foi ensaiado e a carga no momento da ruptura foi obtida, e a resistência à tração perpendicular foi obtida por meio da equação 8.

$$TP = \frac{P}{S} \quad (\text{Equação 7})$$

Em que: TP: Resistencia à Tração Perpendicular (N/mm²); P: carga na ruptura (N); S: área da superfície (mm²).

O ensaio de arrancamento de parafuso foi realizado com dez corpos de prova, medindo 50 mm x 50 mm x 12,8 mm, tanto na superfície quanto no topo do painel. Cada corpo foi perfurado com broca de 2,8 mm e recebeu um parafuso autoatarrazante nº 10. Em seguida, o corpo foi fixado em dispositivo acoplado à máquina universal de ensaio, que aplicou tração axial à taxa de 10 mm/min até a completa extração do parafuso. A força máxima registrada representou a resistência ao arrancamento.

3.2.7.2 Propriedades físicas

Os parâmetros físicos Inchamento em Espessura (%) e Absorção (%) foram determinados de acordo com a NBR 14810-2 (ABNT, 2018).

Os ensaios de inchamento e absorção de água foram realizados em dois intervalos de tempo: 2 horas e 24 horas. Para cada tempo, foram utilizados 10 corpos de prova de 50 mm x 50 mm x 12,8 mm. Inicialmente, foram medidas as espessuras e massas secas. As amostras foram totalmente submersas em água destilada a $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$. Após o tempo de imersão, as amostras foram retiradas, secas superficialmente com papel absorvente, e novamente medidas. O inchamento (%) foi calculado pela variação relativa da espessura, enquanto a absorção de água (%) foi determinada pela variação relativa de massa, ambas com precisão de 0,1%.

Para a determinação da densidade aparente do compósito foram utilizados doze corpos de prova de dimensões 50 mm x 50 mm x 12,8 mm. A densidade aparente foi obtida no equipamento de densitometria de Raio-X.

3.2.8 Análise Estatística

Os dados experimentais dos ensaios mecânicos foram avaliados por meio da Análise de Variância (ANOVA) para identificar diferenças significativas entre tratamentos ($p < 0.05$).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Densidade e teor de umidade das partículas

Os valores de umidade e densidade aparente das partículas estão expressos na Tabela 1.

Tabela 1. Valores médios de Umidade e Densidade Aparente das partículas no momento do uso.

Material	Teor de umidade (%)	Densidade Aparente (g/cm ³)
Macadâmia	8	0,85
<i>Eucalyptus</i> sp.	12	-
Solado (flip-flop)	2	0,53

Fonte: O autor.

*Densidade Básica

A densidade do material particulado de *Eucalyptus* sp. foi 0,46 g/cm³ que é igual a densidade básica descrita por Golçalves (2023).

Observa-se que ambos os tratamentos obtiveram um valor de absorção (%) em 24 horas, maior do que o máximo permitido por todos os painéis especificados na NBR 14810-2 (ABNT, 2018).

Iwakari (2005) destaca que a natureza da matéria-prima influencia diretamente nas propriedades dos painéis. O endocarpo de macadâmia, por ser denso e resistente, pode contribuir para o aumento da rigidez, porém, Ferreira (2023) observou que, em menores proporções, o uso da casca de macadâmia pode ser viável na fabricação de painéis, desde que os parâmetros de prensagem sejam otimizados.

Apesar de apresentarem densidades aparentes médias similares, segundo Tam (2000) macadâmia apresenta em seu endocarpo teor de lignina de 40,1%, o que impacta diretamente na absorção de água do Tratamento 1 e explica seu menor inchamento em espessura, em comparação com o Tratamento 2.

4.2 Propriedades do Adesivo

Os resultados referentes à Viscosidade, Teor de Sólidos e Tempo de Gel do adesivo podem ser observadas na Tabela 2.

Tabela 2. Valores médios de Viscosidade; Teor de Sólidos e Tempo de Gel para o adesivo formado pela mistura de poliuretano vegetal a base de resina de mamona e lignosulfonato.

Adesivo	Viscosidade (cP)	Teor de sólidos (%)	Tempo de gel (seg.)
	586,3*	4	202

* parâmetro: 3rpm e haste¹. **Fonte:** O autor.

De modo semelhante, Rosa *et al.* (2016) destacam que o uso do lignosulfonato como adesivo, especialmente em misturas com ureia-formaldeído, pode melhorar as propriedades mecânicas dos painéis, contribuindo para a ligação interna observada ser semelhante para ambos os tratamentos.

4.3 Propriedades Mecânicas do Compósito

Os valores médios de MOR e MOE na flexão estática, de ligação interna obtidas no ensaio de tração perpendicular (TP), os de arrancamento de parafuso (AP) e Dureza Janka podem ser visualizados na Tabela 3.

Tabela 3. Valores médios para os ensaios de Flexão Estática: MOR e MOE; Dureza Janka; Tração Perpendicular e Arrancamento de Parafusos para os Tratamento 1 e 2.

Tratamentos	Flexão Estática		Dureza Janka (MPa)	Tração perpendicular (Ligação interna) (MPa)	Arrancamento de parafuso (N)
	MOR (MPa)	MOE (MPa)			
1	4,29 (a)	796,62 (a)	21,94 (a)	0,74 (a)	626,45 (a)
2	11,46 (b)	2102,64 (b)	46,14 (b)	0,77 (a)	982,96 (b)

Médias seguidas de diferentes letras diferem a 0,05 de probabilidade. **Fonte:** O autor.

O valor de resistência ao arrancamento de parafuso (AP) também pode estar relacionado à presença de borracha, conforme apontado por Bertolini (2014), que identificou contribuições da borracha de pneu na melhora da resistência à tração em painéis compostos.

Os valores de MOR foram inferiores aos encontrados por Teixeira (2002) que variaram entre 9.47 MPa a 12.9 MPa, sendo a discrepante o Tratamento 1, que apresentou MOR de 4.29 MPa.

Segundo Correa (2003) a resistência à tração observada nas amostras compatibilizadas com algum material reforço indicam uma melhor transferência de tensão da matriz para o reforço celulósico na interface decorrente de uma provável ocorrência de ancoramento mecânico ou interações químicas entre os grupos anidrido e as hidroxilas da celulose na interface polímero-madeira.

O Tratamento 2 apresentou propriedades mecânicas superiores em quase todas as categorias de painéis descritos pela NBR 14810-2, com exceção de P6 e P7, por apresentar valores de MOR e MOE ligeiramente menores (ABNT, 2018).

O Tratamento 1 apresentou valores equivalentes à metade encontrado na literatura para Arranque de Parafusos e Dureza Janka. Teixeira (2002) encontrou valores de dureza que variaram entre 4410 à 4420 N e arranque de parafuso variando entre 1200 à 1300 N, mesmo assim ainda foram inferiores a literatura, que pode ser explicado pela falta de homogeneização das partículas de borracha e a menor massa específica aparente do compósito.

4.4 Propriedades Físicas do Compósito

4.4.1 Inchamento em Espessura e Absorção de Umidade

Os valores médios para Inchamento em Espessura (%) e Absorção (%) em 2 e 24 horas, podem ser observado na Tabela 4.

Tabela 4. Valores médios de Inchamento em espessura e absorção de umidade, em 2h e 24h para os Tratamento 1 e 2.

Tratamento	Inchamento (%)		Absorção (%)	
	Após 2h	Após 24h	Após 2h	Após 24h
1	2,37	9,60	5,47	17,78
2	6,64	17,91	8,35	26,86

Fonte: O autor.

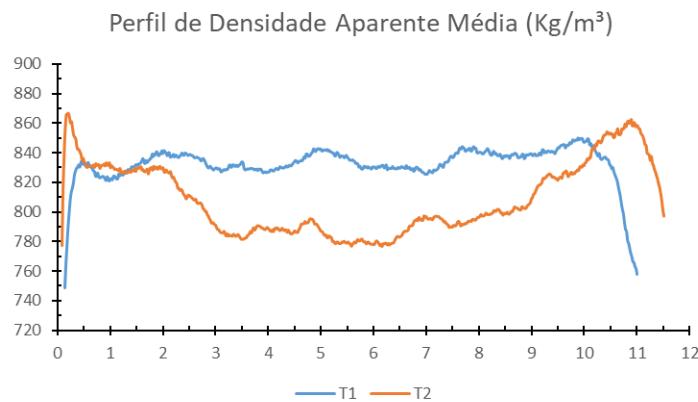
O Tratamento 2 apresentou valores de absorção e inchamento de aproximadamente o dobro dos valores apresentado pelo Tratamento 1. Segundo Mendes (2003) para exposição dos painéis em água acima de 24 horas, os painéis mais densos tendem a absorver mais água em função da maior quantidade de partículas, que resulta em uma área superficial maior, consequentemente aumentando o número de sítios higroscópicos, para retenção de água de adesão.

4.4.2 Densidade Aparente média do Compósito por Densitometria de Raio-X

A densidade aparente média para o tratamento 1 foi de aproximadamente 0,82 g/cm³ e para o tratamento 2 foi de aproximadamente 0,8 g/cm³.

O perfil de densidade aparente média para os tratamentos 1 e 2 são apresentados na Figura 12.

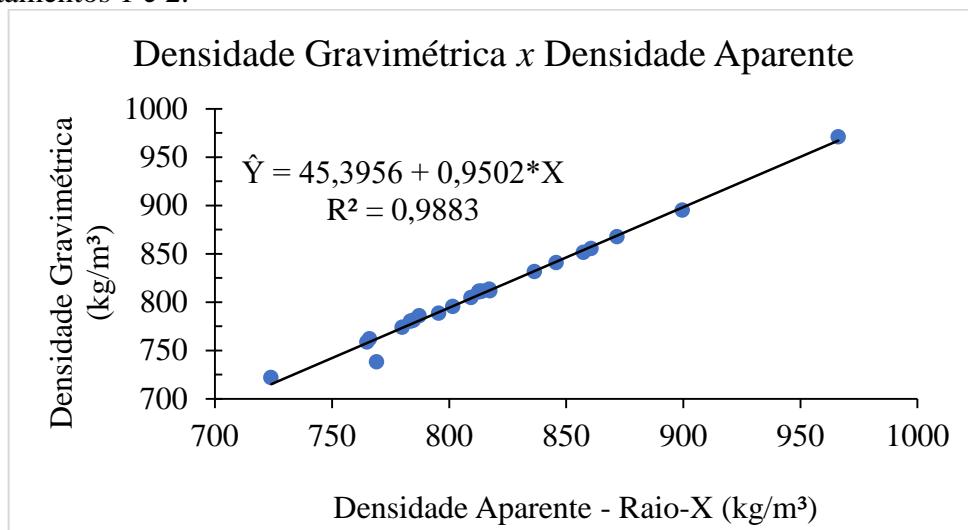
Figura 12. Perfil de Densidade Parente média para as amostras dos tratamentos 1 e 2.



Fonte: O autor.

A correlação entre a Densidade Aparente média obtida por densitometria de Raio-X e a Densidade Gravimétrica dos Tratamentos 1 e 2, pode ser visualizada na Figura 13.

Figura 13. Correlação entre Densidade Aparente média e Densidade Gravimétrica dos Tratamentos 1 e 2.



Fonte: O autor.

5 CONCLUSÕES

O estudo demonstra que é tecnicamente viável produzir compósitos lignocelulósicos sustentáveis a partir de resíduos de *Macadamia integrifolia*, borracha reciclada de calçados do tiposolado de sandália do tipo flip-flop e lignosulfonato, utilizando poliuretano vegetal como adesivo. Os materiais apresentaram desempenho físico e mecânico compatível com aplicações não estruturais, como mobiliário e revestimentos. A integração dos resíduos, aliada à estabilidade dimensional observada, reforça o potencial desses compósitos como alternativa ambientalmente adequada.

6 RECOMENDAÇÕES

O compósito produzido com o tratamento 1 apresentou pequena variação dimensional e absorção de água. Deve-se recalcular as proporções e investigar novos tratamentos e/ou materiais para serem utilizados juntamente ao endocarpo de macadâmia, buscando o incremento das propriedades mecânicas supracitadas.

O compósito produzido com o tratamento 2 apresentou desempenho mecânico superior aos limites exigidos pela norma para quase todos os painéis especificados, porém, como apresentou elevada absorção e variação dimensional, sugere-se o recalcular de novas proporções, a fim de aumentar a possibilidade de finalidades para o compósito e a aplicação de um revestimento impermeabilizante, como o próprio lignosulfonato, de modo que o compósito possa ser empregado em condições de umidade adversa.

Sugere-se que haja novas tentativas por meios de outros processos de confecção para este compósito.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALENCAR, L. N. **Compósito expandido de borracha natural com madeira: uma proposta de aplicação na construção civil com foco em isolamento termoacústico.** 2019. 67 f. Dissertação- Faculdade de Ciência e Tecnologia de Presidente Prudente, Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais. Presidente Prudente, SP, 2019.
- ALMACO - ASSOCIAÇÃO LATINO-AMERICANA DE MATERIAIS COMPÓSITOS. 2022. **Consumo de compósitos cresceu 17,8% em 2021.** 2022. Disponível em: <https://enqr.pw/o44Vu>. Acesso em: 14 de maio de 2024.
- ANTOV, P.; KRIŠT'ÁK, L.; RÉH, R.; SAVOV, V.; PAPADOPoulos, A. N. Eco-friendly fiberboard panels from recycled fibers bonded with calcium lignosulfonate. **Polymers**, v. 13, n. 4, art. 639, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13040639>.
- ARAÚJO, A. G.; MARTINELLI, A. E.; CABRAL, K. C.; SOUZA, W. R. M. Estudo da interação entre vermiculita expandida e lignosulfonato nas propriedades termomecânicas de argamassas de revestimento. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 25, e135642, 2025.
- ARAÚJO, C. K. C.; CAMPOS, C. I.; CAMARGO, S, K, C, A.; CAMARGO, B, S.; Caracterização mecânica de painéis particulados de média densidade produzidos a partir de resíduos de madeira. **Revista Gestão Industrial**, v. 15, n. 1, p. 197-211, 2019.
- ASARO, L. et al. Recycling of rubber waste: current strategies and new perspectives. **Waste Management**, v. 68, p. 14–20, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CALÇADOS - ABICALÇADOS, **Relatório Anual 2022.** 2023. Disponível: <https://assets.abicalcados.com.br/6684/Relato%CC%81rio-Anual-2022.pdf>. Acesso em: 15 de maio de 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR **14810-2:** Chapas de Madeira Aglomerada, 2018. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR **7190:** Projeto de Estruturas de Madeira. 2022. Rio de Janeiro.
- AZEVEDO, J. B.; CHAVÉZ, M. A.; JUNIOR, R. A. C.; OLIVEIRA, R. G. P.; RABELLO, M. S. Propriedades físicas e mecânicas de espumas de EVA/EPDM. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v.4.1, p.38-44, 2009.
- BALIEIRO, L. C. S. **Revalorização dos resíduos provenientes da casca de noz macadâmia como enchimento em compósito de poliuretano derivado do óleo de mamona.** 2023. 83 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.
- BARBALHO, G. H. N.; SILVA, J. Desempenho do poliuretano vegetal originado do óleo de mamona, para produção da resina vegetal aplicada na impermeabilização de madeiras. **Anais do Encontro Nacional de Pós-Graduação –VII ENPG.** ISSN: 2594-6153. v. 02, p.271, 2018.
- BARBOSA, A. M. et al. Caracterização de partículas de açaí visando seu potencial uso na construção civil. **Matéria**, v. 24, n. 3, 2019. BARRICHELO, L.E.G. Variação das características da madeira de *Eucalyptus grandis* e suas correlações com a produção de

celulose. **Congresso Anual da Abcp e I Congresso Brasileiro de Celulose e Papel**, v.10. p. 41-46, 1977.

BEKHTA, P.; NOSCHENKO, G.; RÉH, R.; KRISTÁK, L.; SEDLIAČIK, J.; ANTOV, P.; MIRSKI, R.; SAVOV, V. Properties of eco-friendly particleboards bonded with lignosulfonate-urea-formaldehyde adhesives and pMDI as a crosslinker. **Materials**, v. 14, n. 17, p. 4875, 2021. DOI: 10.3390/ma14174875.

BERTOLINI, M. S. **Avaliação de propriedades termoacústicas de painéis multicamadas com resíduos de madeira, borracha de pneus e poliuretana de mamona**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, SP, 2019.

BOWYER, W. H.; BADER, M. G. **Journal of Materials Science**, v. 7, p.1315-1321, 1972.

BRASIL. Setor de Promoção Comercial, Investimentos e Turismo (SECOM) do Consulado-Geral do Brasil em Sydney. **ESTUDO DE MERCADO O SETOR DE CALÇADOS NA AUSTRÁLIA**. Sydney, maio de 2023. Disponível em: <https://encurtador.com.br/QMYxs> Acesso em: 18 de jul. 2024.

BVRio. **Montanhas de chinelos: mar poluído é retrato dos desafios em logística reversa**. 2022. Disponível em: <https://shre.ink/ev01>. Acesso em: 14 de maio de 2024.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução** - 9^a Ed. LTC, 2016.

CAMARGO, I. **Macadâmia para todos: Como produtores brasileiros estão tentando desgoumertizar a iguaria**. 2024. Disponível em: <https://encurtador.com.br/U1Vv5>. Acesso em: 19 de maio de 2024.

CÂNDIDO, G. M. **Influência do condicionamento ambiental na resistência a delaminação de borda livre em compósitos** avançados. Tese (Doutorado em Ciência Tecnologia da Fabricação), Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2001.

CARDOSO, O. R.; BALABAN, R. C. Preparação de Resinas de Poliuretana à Base de Óleo de Mamona e Dietanolamina e sua Aplicação em Circuitos Eletroeletrônicos. **Polímeros**, 23(4), 552–558. DOI: <http://dx.doi.org/10.4322/polimeros.2013.003>, 2013.

CATTO, A. L., STEFANI, B. V., RIBEIRO, V. F.; SANTANA, R. M. C. Influence of coupling agent in compatibility of post-consumer HDPE in thermoplastic composites reinforced with *Eucalyptus* fiber. **Materials Research**. v.17, p.203–209, 2014. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392014005000036>

CHEN, P. et al. Influence of fiber wettability on the interfacial adhesion of continuous fiber-reinforced PPESK composite. **Journal of Applied Polymer Science**. v. 102, n. 3, p. 2544–2551, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1002/APP.24681>

CLEMONS, C. Wood–plastic composites in the United States: the interfacing of two industries. **Forest Products Journal**, Madison, v. 52, n. 6, p. 10–18, 2002.

CORREA, C. A.; FONSECA, C. N. P.; NEVES, S.; RAZZINO, C. A.; HAGE, E. Compósitos termoplásticos com madeira. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 13, n. 3, p. 154– 165, 2003. DOI:<https://doi.org/10.1590/S0104-14282003000300005>.

ORTAT, L. I. C. O. et al. A Sustainable Perspective for Macadamia Nutshell Residues Revalorization by Green Composites Development. **Journal of Polymers and The Environment**. v. 29, n. 10, p. 3210–3226, 2021. <https://doi.org/10.1007/S10924-021-02080-Y>.

DAI, X.; ANTAL, M. J. Synthesis of a high-yield activated carbon by air gasification of macadamia nut shell charcoal. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 38, n. 9, p. 3386–3395, 1999. <https://doi.org/10.1021/IE990063U>.

DEMONTE, J. D. **Technology of carbon and graphite fiber composites**. Robert E. Krieger, cap. 9, 1987.

FARUK, O.; BLEDZKI, A. K.; FINK, H.-P.; SAIN, M. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. **Progress in Polymer Science**, v. 37, n. 11, p. 1552–1596, 2012.

FERREIRA, B. S.; CAMPOS, C. I.; GONÇALVES, M. T. T. Use of macadamia nutshell in the production of *Eucalyptus* saligna particleboards. **Advanced Materials Research**. v.1025, p. 246-250, 2014.

FINOTTI, A. R. et al. Avaliação do reaproveitamento de resíduos de madeira. **Revista Árvore**, v. 30, n. 3, p. 377–385, 2006.

GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L; OLIVEIRA, R. C.; SILVA, C. M. Caracterização tecnológica, para produção de celulose, da nova geração de clones de *Eucalyptus* do Brasil, 2005. **Revista Árvore**, v. 29, n. 1, p. 129–137. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622005000100014>

GONÇALVES, C. H. R. **Qualidade de painéis de madeira-plástico fabricados com diferentes adesivos sob adição de lignosulfonato**. 2023. 110 f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais e Florestais), Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ. 2023.

GUALBERTO, S. L. **Tratamento de fibras de sisal com lignosulfonato para aprimoramento das propriedades dos compósitos de fibrocimento**. 2020. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG. 2020.

GUALBERTO, S. L.; MOTTA, L. A. C.; PASQUINI, D. Treatment of Sisal Fibers with Lignosulphonate to Improve the Properties of Fiber Cement Composites. **Revista Virtual de Química**, v. 13, n. 6, p. 1257–1267, 2021.

GUO, Y.; PIERGIORGIO, T.; SANGIORGI, C. The use of fibres in asphalt mixtures: A state of the art review, v. 390, p. 131754–131754, 2023.

HARRIS, B. **Engineering Composite Materials**. London: The Institute of Materials, 1999.

HILLIG, É.; IWAKIRI, S.; ANDRADE, M. Z.; ZATTERA, A. J. Caracterização de compósitos produzidos com polietileno de alta densidade (HDPE) e serragem da indústria moveleira. **Revista Árvore**, v. 32, n. 2, p. 299-310, 2008.

HODZIC, A.; SHANKS, R. A. **Natural Fibre Composites: Materials, Processes and Properties**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2014.

HUNG, K.-C. *et al.* Characterization of Wood-Plastic Composites Made with Different Lignocellulosic Materials that Vary in Their Morphology, Chemical Composition and Thermal Stability. **Polymers**, v. 9, n. 12, p. 726, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/POLYM9120726>

IBÁ – INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Estatísticas da produção florestal no Brasil, 2023**. São Paulo. Disponível em: <https://iba.org/data-estatisticas/>. Acesso em: 07 jun. 2025.

IWAKIRI, S. Painéis de madeira reconstituída. **FUPEF- FUNDAÇÃO DE PESQUISAS FLORESTAIS DO PARÁNA**, p. 247, 2005.

JERÔNIMO, J. P. da S. **Referencial teórico: compósito em material lignocelulósico-borracha**. 2023. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2023.

K.M. FARIDUL HASAN *et al.* Sustainable bamboo fiber reinforced polymeric composites for structural applications: A mini review of recent advances and future prospects. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, v. 8, p. 103–162, 2023.

KHAN, M.S.; ISLAM, M.M.; EPAARACHCHI, J.; SHIBATA, S. Exploring the Prospects of Macadamia Nutshells for Bio-Synthetic Polymer Composites: A Review. **Polymers**, v.15, p.07- 40, 2023.

KIELING, A. C.; SANTANA, G. P.; SANTOS, M. C. Compósitos de madeira plástica: Considerações gerais, 2019. **Scientia Amazonia**, v. 8, n.1, p. 1-14, 2019

LI, D.; LI, J.; HU, X.; LI, S. Effects of ethylene vinyl acetate content on physical and mechanical properties of wood–plastic composites. **BioResources**, v. 7, n. 3, p. 4063–4079, 2012. DOI: 10.15376/biores.7.3.4063. Disponível em: <https://encurtador.com.br/NOa44>. Acesso em: 8 jun. 2025.

MAHFUZA FARZANA *et al.* Properties and application of jute fiber reinforced polymer-based composites. **CERN European Organization for Nuclear Research**, v. 01, 2022.

MARINELLI, A.L.; MONTEIRO, M.R.; AMBRÓSIO, J.D.; BRANCIFORTI, M.C.; KOBAYASHI, M.; NOBRE, A.D. Desenvolvimento de Compósitos Poliméricos com Fibras Vegetais Naturais da Biodiversidade: Uma Contribuição para a Sustentabilidade Amazônica. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, vol. 18, nº 2, p. 92-99, 2008.

MARINUCCI, G. Materiais compósitos poliméricos. **Materiais compósitos**. São Paulo: Artliber Editora, p.333, 2019.

MENDES, L. M.; IWAKIRI, S.; MATOS, J. L. M. de; KEINERT JR, S.; SALDANHA, L. K. Efeitos da densidade, composição dos painéis e teor de resina nas propriedades de painéis OSB. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 10, n. 1, p. 1–17, 2003.

MERLINI, C. **Ciência e tecnologia de compósitos poliméricos**. São Paulo: Artliber Editora, p.327, 2021.

MIRINDI, D.; ONCHIRI, R. O.; THUO, J. Physico-Mechanical Properties of Particleboards Produced from Macadamia Nutshell and Gum Arabic. **Applied Sciences**, v. 11, n. 23, p. 11138, 2021. DOI <https://doi.org/10.3390/app112311138>.

MORRELL, J. J.; LOPEZ, A. N.; GARDNER, D. J. Wood-plastic composites: performance and environmental impacts. **Journal of Polymers and the Environment**, New York, v. 14, n. 4, p. 257–263, 2006.

OLIVEIRA, F.; FROLLINI, E. **Lignosulfonato de sódio como agente de modificação da superfície de fibras lignocelulósicas e da formulação de termorrígido fenólico**. 2010. 132 f. Dissertação (Mestrado em Físico-Química) – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2010. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001820330>. Acesso em: 7 jun. 2025.

PAIVA JUNIOR, C. Z.; PERUCHI, R. S.; FIM, F. C.; SOARES, W. O. S.; SILVA, L. B. Performance of ethylene vinyl acetate waste (EVA-w) when incorporated into expanded EVA foam for footwear. **Journal of Cleaner Production**, v. 317, 128352, 2021. ISSN 0959-6526. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128352>.

PARRATT, N.J.; POTTER, K.D. 1980. **Advances in Composite Materials**, v. 1, p. 313-326. Pergamon, Oxford.

PENNACCHIO, M. D. Panorama atual da borracha natural no mundo e no Brasil. **Revista da Borracha**, v. 23, p. 14–17, 2019.

PEREIRA, J.C.D.; STURION, J.A.; HIGA, A.R.; HIGA, R.C.V.; SHIMIZU, J.Y. Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil. Colombo: **Embrapa Florestas**, 2000. 113p, 2000.

PEREIRA, L. M.; ALMEIDA, F. R. 2021. Biodegradabilidade da borracha natural e seu impacto ambiental. **Revista Brasileira de Engenharia Ambiental**, v. 6, n. 2, p. 45-53.

PIMENTEL, L. M. R. *et al.* Compósito reforçado com fibra do pecíolo da palmeira de dendê: fabricação de material sustentável. **Brazilian Journal of Development**, v. 9, n. 2, p. 6310–6320, 2023.

PIMENTEL, L.; SANTOS, C. E.; JÚNIOR, A.; SILVA, V.; BRUCKNER, C.H. Estudo de viabilidade econômica na cultura da noz-macadâmia no Brasil. **Revista Brasileira De Fruticultura - Revista Brasileira De Fruticultura**, p. 29, v. 03, 2007. DOI: 29.10.1590/S0100-29452007000300018. Acesso em: 16 de junho de 2024.

PIZA, P. L. B. T.; MORIYA, L. M. 2014. Cultivo da macadâmia no Brasil. **Revista Brasileira De Fruticultura**, v. 36(1), p. 39–45. Disponível em: <https://encurtador.com.br/wvmOs>. Acesso em: 19 de maio de 2024.

PRECISION BUSINESS INSIGHTS. **Lignosulfonate Market Size & Forecast, 2024–2031. Global Outlook on Lignosulfonates**. 2024. Disponível em: <https://enqr.pw/GUWny>. Acesso em: 7 jun. 2025.

RAIA, R. Z. *et al.* Effects of replacing Carbon Black with Wood Fibers in wood-rubber composites. **Polímeros-ciencia e Tecnologia**, v. 33, n. 1, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0104-1428.20220051>

RAZERA, D. L. **Estudo sobre as interações entre as variáveis do processo de produção de painéis aglomerados e produtos moldados de madeira**. 2006. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2006.

RODRIGUES, D. A.; RANDOW, F. R.; SHIMOSAKAI, L. T.; PADOVANI, X. T. Utilização dos resíduos provenientes do beneficiamento da noz macadâmia: Uma revisão sistemática. **Brazilian Journal of Production Engineering**, São Mateus, Espírito Santo, Brazil, v. 2, n. 3, p. 1–13, 2016. Disponível em: <https://11nq.com/WMOFI> Acesso em: 20 abr. 2025.

ROSA, T. S.; HILLIG, E. Utilização de lignossulfonato de amônio como adesivo na fabricação de painéis aglomerados. **Ciência da Madeira**, v.7, n. 2, 2016.

SANTOS, A. R. dos; MOREIRA, L. M.; TEIXEIRA, T. O. B.; PATRÍCIO, P. S. de O. Madeira plástica utilizando polipropileno e resíduos de beneficiamento de madeira para construção de decks. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 25, e135583, 2025.

SANTOS, J. V. G.; GODINHO, G. M.; PEREIRA, M. A. R. Biocompósitos de Bambu e Resina de Mamona: Métodos e aplicações no Design de Produtos. **Blucher Proceedings**, v. 4, n. 3. DOI: 10.5151/cid2017-12, 2018.

SÃO JOSÉ, A. R. Macadâmia: Tecnologia de Produção e Comercialização. UESB-Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, 1991.

SILVA, G. C.; LELIS, R. C. C.; OLIVEIRA, G. de L.; SILVA, B. C.; LOSSANO, W. C. S.; ABREU, H. dos S. Propriedades de adesivo aplicado em painéis a partir da substituição por lignossulfonato do processo sulfito. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 1, p. 322–335, 2019. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/18414>. Acesso em: 7 jun. 2025.

SILVA, M. A. **Utilização de lignosulfonato de cálcio e magnésio em misturas com fenol-formaldeído na produção de painéis aglomerados**. 33 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2016. Disponível em: <https://tede.ufrj.br/jspui/handle/jspui/1136>. Acesso em: 7 jun. 2025.

SOBRAL FILHO, M. Influence of wood furnish type on properties of oriented strand panels. **Forest Products Journal**, Madison, v.31, n. 9, p. 43-52. 1981.

SONG, X. M.; HWANG, J.-Y. Mechanical properties of composites made with wood fiber and recycled tire rubber. **Forest Products Journal**, v. 51, n. 5, p. 45–51, 2001.

STAEL, G. C.; FECHINE, P. B. A.; ARAÚJO, E. M.; MELO, T. J. A. Impact behavior of sugarcane bagasse waste–EVA composites. **Polymer Testing**, v. 20, p. 869–872, 2001. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0142-9418\(01\)00014-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0142-9418(01)00014-9).

STARK, N.M.; BERGER, M.J. Effect of particle size on properties of wood-flour reinforced polypropylene composites. **Fourth International Conference of Wood Fiber–Plastic Composites**. p. 134-143. May 12-14, 1997.

STREZOV, V.; PATTERSON, M.; ZYMLA, V.; FISHER, K.; EVANS, T.; NELSON, P. Fundamental aspects of biomass carbonization. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Amsterdam, v. 79, p. 91–100, 2007.

SUCCAR, P. **Flip-flop mountains: the polluted ocean is a picture of reverse logistics challenges**. Disponível em: <https://encurtador.com.br/AgSTe>. Acesso em: 24 jun. 2025.

TAM, M. S. *et al.* Activated Carbon from Macadamia Nut Shell by Air Oxidation in Boiling Water. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 40, n. 2, p. 578–588, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/IE000461T>

TAM, M. S.; ANTAL JUNIOR, M. J. Preparation of activated carbons from macadamia nut shell and coconut shell by air activation. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v.38, p.4268-4276, 1999.

TEIXEIRA, D. E.; MOREIRA, J. M. M. Á. P.; COSTA, A. F. da. Confecção de composto de madeira-plástico utilizando resíduos de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden e polietileno de baixa densidade (PEBD). **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 9, n. 1, p. 72–80, 2002.

THAKUR, V. K. *et al.* Modification of lignocellulosic fibers using chemical methods for composite materials. **Carbohydrate Polymers**, v. 83, p. 1343–1351, 2010.

TIAN, F.; CHEN, L.; XU, X. Dynamical mechanical properties of wood-high density polyethylene composites filled with recycled rubber. **Journal of Bioresources and Bioproducts**, v. 6, n. 2, p. 152–159, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JOBAB.2021.02.007>.

TIR, J.; ROMAHN, V. Rainha das nozes - **Revista Natureza**. 2019. Disponível em: <https://encurtador.com.br/PiHcc>. Acesso em: 24 jun. 2025.

TOLES, C. A.; MARSHALL, W. E.; JOHNS, M. M. Phosphoric acid activation of nutshells for metals and organic remediation: process optimization. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, Oxford, v. 72, p. 255-263, 1998.

TRIANOSKI, R.; IWAKIRI, S.; MATOS, J. L. M.; PRATA, J. G. Propriedades físicas e mecânicas de painéis de madeira aglomerada de *acrocarpus fraxinifolius*, compostos com diferentes percentuais de casca. **Ciência Florestal, Santa Maria**, v. 23, n. 4, p. 761-769, 2013. DOI:doi.org/10.1590/S0100-67622008000200013.

VISCONTE, L. L. Y., MARTINS, A. F., NUNES, R. C. R.; SUAREZ, J. C. M. Misturas NR/SBR: modos de preparação e propriedades. **Polímeros**, v.11(2), p.76–81, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282001000200009>

WEARN, Y. N. *et al.* Coconut fiber/LDPE composites: effect of surface treatment of coconut fibers to produced green composites. **Revista Materia**, v. 25, n. 01, 2020. Disponível em: <https://encurtador.com.br/uEeKC>. Acesso em: 23 de junho de 2025.

WECHSLER, A.; ZAHARIA, M.; CROSKY, A.; JONES, H.; RAMÍREZ, M.; BALLERINI, A.; NUÑEZ, M.; SAHAJWALLA, V. Macadamia (*Macadamia integrifolia*) shell and castor (*Ricinus communis*) oil based sustainable particleboard: A comparison of its properties with conventional wood based particleboard. **Materials & Design**, v. 50, p. 117-123, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.03.008>.

XIAODAN, S.; ZHAO, J.; ZHENG, L. Lignosulfonate and preparation method thereof. 2019.

XU, M. *et al.* Wood-rubber composite fabricated from rubber mixing and vulcanization molding process. **Wood and Fiber Science**, v. 49, n. 4, p. 386–395, 2017. Disponível em: <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/2596>

XU, X.; TIAN, F.; LI, X. Regenerated Waste Tire Powders as Fillers for Wood Fiber Composites. **Bioresources**, v. 15, n. 2, p. 3029–3040, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.15376/BIORES.15.3029-3040>

YUAN, X. *et al.* Effects of particle size and distribution of the sizing agent on carbon fiber/epoxy composites interfacial adhesion. **Polymer Composites**, v. 39, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/PC.24439>

YUAN, X.; FU, S.; LIU, H. Preparation of Wood Fiber–Polyurethane Plastic Composite with Water Resistance and High Strength. **Materials**, v. 18, n. 6, p. 1314, 2025.

ZHANDAROV, S. *et al.* Investigation of load transfer between the fiber and the matrix in pull-out tests with fibers having different diameters. **Journal of Adhesion Science and Technology**, v. 15, n. 2, p. 205–222, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1163/156856101743418>

ZHOW, D. A estudy of oriented structural board made from hybrid poplar. Phisical and mechanical properties of OSB. **Holz Als Roh Und Werkstoff**, Berlin, v. 48, n. 7-8, p. 293-296, 1990.

ZOCH, V. P. **Produção e propriedades de compósitos madeira-plástico utilizando resíduos minimamente processados**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal) — Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Florestal, Brasília, 2013.