

RESSALVA

Atendendo a solicitação do autor, o texto completo desta tese será disponibilizado somente a partir de 04/03/2028.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

FELIPE REIS RODRIGUES

**COMPÓSITOS DE PARTÍCULAS DE MADEIRAS E BORRACHA NATURAL
VULCANIZADA VISANDO OBTENÇÃO DE PAINÉIS ESTRUTURADOS**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS

FELIPE REIS RODRIGUES

COMPÓSITOS DE PARTÍCULAS DE MADEIRAS E BORRACHA NATURAL VULCANIZADA VISANDO OBTENÇÃO DE PAINÉIS ESTRUTURADOS

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, para obtenção do título de Doutor.

Michael Jones da Silva
Orientador

Sérgio Augusto Mello da Silva
Coorientador

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvida pela Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

R696c Rodrigues, Felipe Reis.
 Compósitos de partículas de madeiras e borracha natural vulcanizada
 visando obtenção de painéis estruturados / Felipe Reis Rodrigues. – Ilha
 Solteira: [s.n.], 2026
 163 f. : il.

 Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia
 de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Ciência e Engenharia dos Materiais,
 2026

 Orientador: Michael Jones da Silva
 Coorientador: Sérgio Augusto Mello da Silva
 Inclui bibliografia

 1. Painéis compósitos. 2. Borracha natural vulcanizada. 3. Poliuretano de
 mamona. 4. Madeira de reflorestamento. 5. Caracterização de materiais.

Elaborada por Raiane da Silva Santos - CRB-8/9999

Impacto potencial desta pesquisa

A evolução da construção civil contemporânea é marcada pelo desenvolvimento de materiais de alto desempenho e soluções ecoeficientes, como a madeira laminada colada (MLC). Nesse cenário, a busca por materiais que conciliem integridade estrutural e sustentabilidade é imperativa. Embora o uso isolado de biopolímeros, como a borracha natural e o poliuretano derivado do óleo de mamona, seja objeto de estudos consolidados, a sinergia entre esses elementos em compósitos lignocelulósicos permanece inexplorada. A presente pesquisa propõe uma inovação tecnológica ao integrar madeiras de florestas plantadas (*Pinus* e *Eucalyptus*) com uma matriz híbrida de borracha natural e resina poliuretano vegetal, o interesse primordial é a substituição da resina ureia formaldeído pelas resinas mencionadas anteriormente (BN e PUR). O diferencial deste trabalho é a incorporação de partículas lignocelulósicas em matriz elastomérica vulcanizada pode gerar painéis com menor absorção de água e propriedades mecânicas competitivas em relação a painéis convencionais. O impacto esperado é a obtenção de um material de baixo impacto ambiental, que aproveita recursos renováveis e processos de extração não predatórios, contribuindo diretamente para a bioeconomia e para o avanço da engenharia de materiais sustentáveis.

Potential impact of this research

The evolution of contemporary civil engineering is characterized by the development of high-performance materials and eco-efficient solutions, such as Ultra-High-Performance Concrete (UHPC) and Glued Laminated Timber (Glulam). Within this context, the pursuit of materials that reconcile structural integrity with sustainability has become imperative. While the individual application of biopolymers—such as natural rubber and castor oil-based polyurethane—is well-documented in the literature, the synergy between these elements within lignocellulosic composites remains largely unexplored. This research proposes a technological innovation by integrating wood from commercial plantations (*Pinus* and *Eucalyptus*) into a hybrid matrix composed of natural rubber and bio-based polyurethane resin. The novelty lies in combining the bulk physical phase of the wood with these renewable elastomers and polymers, thereby addressing a gap in the global scientific literature. The anticipated impact is the development of a low-environmental-impact material that leverages renewable resources and sustainable extraction processes, contributing directly to the bioeconomy and the advancement of sustainable materials science.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: **Compósitos de partículas de madeiras e borracha natural vulcanizada visando obtenção de painéis estruturados**

AUTOR: FELIPE REIS RODRIGUES

ORIENTADOR: MICHAEL JONES DA SILVA

COORIENTADOR: COORIENTADOR: SERGIO AUGUSTO MELLO DA SILVA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em null, área: Ciência e Engenharia dos Materiais pela Comissão Examinadora:

 Documento assinado digitalmente
MICHAEL JONES DA SILVA
Data: 07/03/2026 09:59:08-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. MICHAEL JONES DA SILVA (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia / UNESP / Câmpus de Rosana - FEC

 Documento assinado digitalmente
JOSE ANTONIO MALMONGE
Data: 05/03/2026 20:20:29-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. JOSE ANTONIO MALMONGE (Participação Virtual)
Departamento de Física e Química / UNESP / Câmpus de Ilha Solteira - FEIS

 Documento assinado digitalmente
RENIVALDO JOSE DOS SANTOS
Data: 07/03/2026 08:36:31-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. RENIVALDO JOSÉ DOS SANTOS (Participação Virtual)
Diretoria / UNESP / Câmpus de Rosana - FEC

 Documento assinado digitalmente
ANDRÉ LUIS CHRISTOFORO
Data: 04/03/2026 16:02:40-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. ANDRÉ LUIS CHRISTOFORO (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Civil / Universidade Federal de São Carlos - UFSCar

 Documento assinado digitalmente
ALEXSANDRO DOS SANTOS FELIPE
Data: 04/03/2026 17:23:03-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. ALEXSANDRO DOS SANTOS FELIPE (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Civil / Instituto Federal Goiano

Ilha Solteira, 04 de março de 2026.

AGRADECIMENTOS

Por meio destas letras, por eu ter a certeza de que não preciso de ninguém para fazer, porém necessito de todos para realizar, as inúmeras estrelas que cintilam nos céus a todo instante são provas das inúmeras coisas que todos nós temos a realizar neste mundo, e por conta das inúmeras pessoas que povoam este planeta e porque estão neste lugar é que eu lhe agradeço por nos deixar viver este momento.

Agradeço ao Prof. Dr. Michael Jones da Silva pela paciência que teve comigo e com os resultados obtidos no decorrer do trabalho, pelo tempo cedido e todo o tempo em que estive de alguma forma me orientando, obrigado por tudo.

Obrigado ao Prof. Dr. Sergio Augusto Mello da Silva por me dar as orientações necessárias para entender os momentos mais difíceis, por ser essa pessoa simples em que podemos confiar.

E aos demais professores do Departamento de Física e Química da UNESP de Ilha Solteira – SP, e do Departamento de Engenharia Civil da Unesp de Ilha Solteira, que me ajudaram e estiveram há me apoiar.

Os professores da Unesp que me apoiaram, de Presidente Prudente – SP e de Rosana – SP, pois foram importantíssimos para que eu realizasse este trabalho. Como o Prof. Dr. Aldo Eloizo Job, Prof. Dr. José Francisco Resende da Silva, Prof. Dr. Renivaldo José dos Santos.

Ao técnico do laboratório do DFQ, Elton José de Souza, os técnicos do laboratório do DEC, Gilson Campos Correa, Flávio Rogério Porato e Ozias da Silva Porto, e os técnicos do laboratório da Unesp de Rosana o Dr. Carlos Toshiyuki Hiranobe, o pois sem eles eu não conseguiria.

Aos meus amigos que eu fiz durante o processo de pós-graduação, como o Rodrigo Andraus Bispo, Marcelo Bortoletto, Rodrigo Garozi da Silva, Gean Pereira da Silva Júnior, Lucas Dezen e muitos outros que estiveram comigo neste processo. E também aos meus amigos Luis Mateus Genova e Carlos Henrique Attilio Pedrosa, que estiveram sempre comigo em vários momentos da minha estadia em Ilha Solteira.

Aos meus familiares que me apoiaram em vários momentos desta etapa da minha vida, assim como meu pai Marco (falecido), minha mãe Eliane, meu irmão Guilherme, minha irmã Manuela, e meus avós Edith, Aparício, Laurentina e Darcy. Eles são muito especiais para a minha vida.

Aos meus amados tios Emilce e Mauro, Maria Heloise e Pedro Ângelo, Claudio Henrique e Marly, como também os seus respectivos filhos, pois todos fizeram parte de alguma forma.

Agradeço a empresa IMPERVEG® Polímeros Indústria e Comércio Ltda, pela doação da resina poliuretana bicomponente derivada do óleo de mamona, pois foi essencial para realização de parte dos estudos elaborados nesse projeto.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“Nascer, viver, morrer, renascer de novo e progredir continuamente, tal é a lei”.

Allan Kardec

RESUMO

O uso de madeiras provenientes de reflorestamento, como o eucalipto (*Eucalyptus* – EUC) e o pinus (*Pinus* – PIN), aliado à aplicação de biopolímeros, tem se destacado como uma alternativa promissora e sustentável para o setor da construção civil e industrial. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo desenvolver e caracterizar painéis compósitos obtidos a partir da combinação de partículas de madeira com borracha natural vulcanizada (BNV), empregada como matriz ligante, e resina poliuretano derivada do óleo de mamona (PUR), utilizada como aditivo estrutural na proporção fixa de 20 phr. O delineamento experimental envolveu diferentes proporções mássicas entre madeira e matriz polimérica (100/100, 200/100, 300/100 e 400/100), considerando as formulações EUC/BNV, EUC/BNV-PUR e EUC-PIN/BNV-PUR. Os compósitos foram processados por termocompressão a 150 °C, sob pressão de 3 MPa. A caracterização dos materiais incluiu ensaios reométricos, determinação da densidade de ligações cruzadas, análise termogravimétrica (TG/DTG) e microscopia eletrônica de varredura (MEV), além de ensaios físicos (densidade, teor de umidade, absorção de água e inchamento em espessura) e mecânicos (resistência à tração, dureza Shore A e abrasão). Os resultados físicos evidenciaram a eficiência da matriz elastomérica na redução da interação com a umidade, com valores de inchamento e absorção de água inferiores a 2,00% e 2,50%, respectivamente, após 24 horas. No âmbito mecânico, os compósitos apresentaram resistência à tração de até 15,01 MPa e dureza de 92 Shore A, indicando que o aumento da fração lignocelulósica contribui para o incremento da rigidez do material. De modo geral, as formulações contendo PUR, em especial EUC/BNV-PUR e EUC-PIN/BNV-PUR, apresentaram o melhor desempenho global, com resultados consistentes tanto nas propriedades físicas e mecânicas quanto nas análises térmicas e morfológicas. Esses resultados indicam que a incorporação do poliuretano favorece a interação interfacial entre a matriz e as partículas de madeira. Conclui-se que a utilização combinada de borracha natural, poliuretano de origem vegetal e resíduos lignocelulósicos de reflorestamento é tecnicamente viável, resultando em compósitos com potencial para aplicação em painéis aglomerados, com desempenho compatível às exigências de normas técnicas como ABNT e ASTM, além de contribuir para o desenvolvimento de materiais com menor impacto ambiental.

Palavras-chave: Painéis Compósitos, borracha natural vulcanizada, poliuretano de mamona, madeira de reflorestamento e caracterização de materiais.

ABSTRACT

The use of reforestation wood species such as eucalyptus (Eucalyptus – EUC) and pine (Pinus – PIN), combined with biopolymers, has emerged as a promising and sustainable alternative for civil and industrial applications. In this context, this study aimed to develop and characterize composite panels produced from wood particles and vulcanized natural rubber (BNV), used as a binder matrix, with castor oil-based polyurethane (PUR) as a structural additive at a fixed content of 20 phr. The experimental design considered different mass ratios between wood and polymer matrix (100/100, 200/100, 300/100, and 400/100), including EUC/BNV, EUC/BNV-PUR, and EUC-PIN/BNV-PUR formulations. The composites were processed by thermocompression at 150 °C under a pressure of 3 MPa. Material characterization included rheological analysis, crosslink density determination, thermogravimetric analysis (TG/DTG), and scanning electron microscopy (SEM), as well as physical tests (density, moisture content, water absorption, and thickness swelling) and mechanical tests (tensile strength, Shore A hardness, and abrasion resistance). The physical results demonstrated the effectiveness of the elastomeric matrix, with low thickness swelling and water absorption values (below 2.00% and 2.50%, respectively, after 24 h). Mechanically, the composites reached tensile strength values of up to 15.01 MPa and hardness of 92 Shore A, indicating that increasing the lignocellulosic fraction enhances material stiffness. Overall, PUR-containing formulations, particularly EUC/BNV-PUR and EUC-PIN/BNV-PUR, exhibited the best overall performance, with consistent results across physical, mechanical, thermal, and morphological analyses. These findings suggest that polyurethane improves interfacial adhesion between the rubber matrix and wood particles. It can be concluded that the combined use of natural rubber, bio-based polyurethane, and reforestation wood residues is technically feasible, resulting in composite materials with potential application in particleboard panels, meeting technical requirements such as ABNT and ASTM standards, while contributing to more sustainable material solutions.

Keywords: Composite panels, vulcanized natural rubber, castor oil-based polyurethane, reforestation wood residue.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - ETAPA DE CRIAÇÃO E ELABORAÇÃO DE DIVERSOS MATERIAIS DERIVADOS DE PAINÉIS DE MADEIRA, E SEU USO FINAL, COMO A APLICAÇÃO DE MÓVEIS E PAREDES.....	30
FIGURE 2 - AREA QUEIMADA ANUALMENTE NO BRASIL (A) ESQUEMA GRÁFICO DE 1985 ATÉ 2023 DE QUEIMADAS ANUAL, (B) GRÁFICO DESTA SITUAÇÃO.	32
FIGURE 3 - PRODUTOS FLORESTAIS EM PRODUÇÃO DESDE O ANO DE 2000.	34
FIGURA 4 – IMAGEM DE ARVORES DE EUCALIPTO SALIGNA.	35
FIGURA 5 - IMAGEM DE ARVOREE DE PINUS ELLIOTTII.	35
FIGURA 6 - ESTRUTURA QUÍMICA DA CELULOSE.	36
FIGURA 7 - ESTRUTURA QUÍMICA DA HEMICELULOSE.....	37
FIGURA 8 - ESTRUTURA QUÍMICA DA LIGNINA.	37
FIGURA 9 – PROCESSO PARA A PRODUÇÃO DE RESINA UREIA FORMALDEÍDO, COM O INTUITO DE PRODUIR AGLOMERADOS DE MADEIRA.	41
FIGURA 10 – PROCESSO DE PRODUÇÃO DA RESINA FENOL FORMALDEÍDO.	41
FIGURA 11 – APLICAÇÃO DA RESINA EPÓXI E APLICAÇÃO EM DIVERSAS ETAPAS, COMO NO CASO EM USO PARA MÓVEIS DE MADEIRA.	42
FIGURA 12 – REALIZAÇÃO DA RESINA POLIURETANO DERIVADO DO ÓLEO DE MAMONA.....	43
FIGURA 13 - ARVORE DE SERINGUEIRA (HEVEA BRASILIENSIS).	45
FIGURA 14 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO ISOPRENO E SUA ESTRUTURA CIS E TRANS COMO POLI-ISOPRENO.	48
FIGURA 15 - PROCESSO DE CRIAÇÃO DO MATERIAL ATRAVÉS DE UM MISTURADOR DE ROLOS PARALELOS DA MARCA MAKINTEC, COM O USO DE MADEIRA E BN.	58
FIGURA 16 – IMAGEM DAS MISTURAS REFERENTES A CADA COMPOSIÇÃO PARA PRODUÇÃO DOS PAINÉIS COMPÓSITOS EUC/BNV1 E EUC-PIN/BNV1 (100/100); EUC/BNV2 E EUC-PIN/BNV2 (200/100); EUC/BNV3 E EUC-PIN/BNV3 (300/100 E EUC/BNV4 E EUC-PIN/BNV4 (400/100).....	59
FIGURA 17 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL UTILIZADO PARA PRODUÇÃO DOS PAINÉIS COMPÓSITOS DE PARTÍCULAS DE MADEIRA E BNV COM E SEM PUR.	61
FIGURA 18 – DETALHE DA CURVA DE REOMETRIA.....	62
FIGURA 19 – PROCEDIMENTO PARA SE RETIRAR A DENSIDADE DOS CPS, A MASSA, ALTURA X LARGURA, ESPESSURA.....	64
FIGURA 20 - MATERIAL EM QUE ESTÁ SENDO AFERIDO A ESPESSURA ANTES, DURANTE E DEPOIS DE COLOCÁ-LO EM ÁGUA.	65

FIGURA 21 - OS MATERIAIS UTILIZADOS PARA O ENSAIO DE TEOR DE UMIDADE APÓS 24 HORAS. MATERIAIS ANTES DA ESTUFA E RETIRADO A MASSA ANTES E APÓS A ESTUFA.....	68
FIGURA 22 - REOMETRIA DOS MATERIAIS DE BNV E BNV-PUR.....	72
FIGURA 23 - ANÁLISE DE DENSIDADE DAS AMOSTRAS DE BNV E BNV-PUR..	76
FIGURA 24 - RESULTADOS DOS VALORES DE INCHAMENTO EM ESPESSURA APÓS 24 HORAS DOS PAINÉIS DE BNV E BNV-PUR.....	77
FIGURA 25 - RESULTADOS OBTIDOS DO ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA APÓS 24 HORAS, REFERENTE AOS PAINÉIS DE BNV E BNV-PUR.	78
FIGURA 26 - RESULTADOS OBTIDOS DO ENSAIO DE TEOR DE UMIDADE APÓS 24 HORAS, COM AS RESPECTIVAS AMOSTRAS DE BNV E BNV-PUR.	79
FIGURA 27 - RESULTADO DO ENSAIO DE TENSÃO/DEFORMAÇÃO DAS MISTURAS DE BNV E BNV-PUR.	80
FIGURA 28 - RESULTADO DO ENSAIO DE DUREZA DAS MISTURAS DE BNV E BNV-PUR.....	82
FIGURA 29 - RESULTADO DO ENSAIO DE ABRASÃO DAS MISTURAS DE BNV E BNV-PUR.....	84
FIGURA 30 – ANÁLISES DE (A) TG E (B) DTG DAS AMOSTRAS BNV E BNV-PUR.	85
FIGURA 31 – ANÁLISE DE MEV DA SUPERFÍCIE E DA SEÇÃO TRANSVERSAL CRIOFRATURADA DAS AMOSTRAS COM BNV (A E C) E BNV-PUR (B E D).	86
FIGURE 32 - ANÁLISE DE DENSIDADE DAS AMOSTRAS DE EUC/BNV.....	89
FIGURE 33 - RESULTADOS DOS VALORES DE INCHAMENTO EM ESPESSURA APÓS 24 HORAS DAS AMOSTRAS DE EUC/BNV.	91
FIGURE 34 - RESULTADOS OBTIDOS DO ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA APÓS 24 HORAS DAS AMOSTRAS DE EUC/BNV.	92
FIGURA 35 RESULTADOS OBTIDOS DO ENSAIO DE TEOR DE UMIDADE APÓS 24 HORAS DAS DETERMINADAS MISTURAS EUC/BNV.	93
FIGURA 36 - RESULTADO DO ENSAIO DE TENSÃO/DEFORMAÇÃO DAS MISTURAS DE EUC/BNV.	95
FIGURA 37 - RESULTADO DO ENSAIO DE DUREZA DA AMOSTRA DE EUC/BNV.	97
FIGURA 38 - RESULTADO DO ENSAIO DE ABRASÃO DAS MISTURAS DE EUC/BNV.....	98
FIGURA 39 - (A) TG DA MISTURA DE EUC/BNV; E (B) DTG DA MISTURA DE EUC/BNV.....	100
FIGURA 40 – ANÁLISE DE MEV DA (A) SUPERFÍCIE E (B) DA SEÇÃO TRANSVERSAL FRATURADA DA AMOSTRA EUC/BNV1 E, DA (C) SUPERFÍCIE E (D) DA SEÇÃO TRANSVERSAL FRATURADA DA AMOSTRA EUC/BNV4.....	102
FIGURA 41 – REOMETRIA DOS MATERIAIS EUC/BNV-PUR, SENDO: EUC/BNV-PUR1, EUC/BNV-PUR2, EUC/BNV-PUR3 E EUC/BNV-PUR4.	104

FIGURA 42 - ANÁLISE DA P_A E A VARIAÇÃO DA DENSIDADE (MVD) DAS AMOSTRAS DE EUC/BNV-PUR COM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES EM PHR DE EUC.....	109
FIGURA 43 - RESULTADOS DOS VALORES DE INCHAMENTO EM ESPESSURA APÓS 24 HORAS DAS AMOSTRAS DO PAINEL COMPÓSITO EUC/BNV-PUR COM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE EUC.	110
FIGURA 44 - RESULTADOS DO ENSAIO DE AA% APÓS 24 HORAS IMERSA EM MEIO AQUOSO DAS AMOSTRAS DO PAINEL COMPÓSITO EUC/BNV-PUR COM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE EUC.	112
FIGURA 45 - RESULTADOS DO ENSAIO DE TEOR DE UMIDADE APÓS 24 HORAS DAS AMOSTRAS DO PAINEL COMPÓSITO EUC/BNV-PUR COM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE EUC.....	113
FIGURA 46 - RESULTADO DO ENSAIO MECÂNICOS DE TENSÃO/DEFORMAÇÃO DAS AMOSTRAS DO PAINEL COMPÓSITO EUC/BNV-PUR COM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE EUC.....	114
FIGURA 47 - RESULTADO DO ENSAIO DE DUREZA DAS AMOSTRAS DO PAINEL COMPÓSITO EUC/BNV-PUR COM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE EUC.	116
FIGURA 48 - RESULTADO DO ENSAIO DE ABRASÃO DAS AMOSTRAS DO PAINEL COMPÓSITO EUC/BNV-PUR COM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE EUC.	118
FIGURA 49 – ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (A) TG E (B) DTG DAS AMOSTRAS DO PAINEL COMPÓSITO EUC/BNV-PUR COM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE EUC.	119
FIGURA 50 - PARTE SUPERIOR DAS AMOSTRAS DO PAINEL COMPÓSITO (A) EUC/BNV-PUR1 E (B) EUC/BNV-PUR4.	120
FIGURA 51 – ANÁLISE DE MEV DA SUPERFÍCIE CRIOFRATURADA DAS AMOSTRAS (A) EUC/BNV-PUR1 E (B) EUC/BNV-PUR4.....	121
FIGURA 52 - REOMETRIA DOS MATERIAIS EUC-PIN/BNV-PUR, SENDO: <i>EUC-PIN/BNV-PUR1</i> , <i>EUC-PIN/BNV-PUR2</i> , <i>EUC-PIN/BNV-PUR3</i> E <i>EUC-PIN/BNV-PUR4</i>	123
FIGURA 53 - ANÁLISE DA DENSIDADE APARENTE PARA AS AMOSTRAS EUC-PIN/BNV-PUR COM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE MISTURA EUC-PIN.....	128
FIGURA 54 - RESULTADOS DOS VALORES DE INCHAMENTO EM ESPESSURA APÓS 24 HORAS PARA AS AMOSTRAS EUC-PIN/BNV-PUR COM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE MISTURA EUC-PIN.....	130
FIGURA 55 - RESULTADOS OBTIDOS DO ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA APÓS 24 HORAS PARA AS AMOSTRAS EUC-PIN/BNV-PUR COM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE MISTURA EUC-PIN.....	131
FIGURA 56 - RESULTADOS OBTIDOS DO ENSAIO DE TEOR DE UMIDADE APÓS 24 HORAS PARA AS AMOSTRAS EUC-PIN/BNV-PUR COM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE MISTURA EUC-PIN.	132

FIGURA 57 – RESULTADOS DO ENSAIO MECÂNICO TENSÃO/DEFORMAÇÃO PARA AS AMOSTRAS EUC-PIN/BNV-PUR COM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE MISTURA EUC-PIN.	133
FIGURA 58 - RESULTADO DO ENSAIO DE DUREZA PARA AS AMOSTRAS EUC-PIN/BNV-PUR COM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE MISTURA EUC-PIN.....	135
FIGURA 59 – RESULTADO DO ENSAIO DE ABRASÃO PARA AS AMOSTRAS EUC-PIN/BNV-PUR COM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE MISTURA EUC-PIN.....	136
FIGURA 60 – ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (A) TG E (B) DTG PARA AS AMOSTRAS EUC-PIN/BNV-PUR COM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE MISTURA EUC-PIN.....	137
FIGURA 61 - PARTE SUPERIOR DAS AMOSTRAS, COM: (A) EUC-PIN/BNV-PUR1; (B) EUC-PIN/BNV-PUR4.....	138
FIGURA 62 - PARTE FRONTAL DAS AMOSTRAS, COM: (A) EUC-PIN/BNV-PUR1; (B) EUC-PIN/BNV-PUR4.	139

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – MATERIAIS UTILIZADOS PARA A PRODUÇÃO DE BNV PURA.	57
TABELA 2 - CONCENTRAÇÕES DOS MATERIAIS UTILIZADOS PARA PRODUÇÃO DOS PAINÉIS COMPÓSITOS, BEM COMO OS TEMPOS DE VULCANIZAÇÃO E SUAS NOMENCLATURAS.	59
TABELA 3 – OS RESULTADOS DOS PARÂMETROS REOMÉTRICOS DOS COMPÓSITOS DE BNV E BNV-PUR.....	73
TABELA 4 - ANÁLISE DOS RESULTADOS DA DENSIDADE DE LIGAÇÕES CRUZADAS ELABORADA PELO MÉTODO DE FLORY-REHNER, PARA AS AMOSTRAS DE BNV E BNV-PUR.....	75
TABELA 5 - VALORES DE TENSÃO, DEFORMAÇÃO E MÓDULO DE TENSÃO A 100%, 200%, 300% E 400% DE ELONGAÇÃO DOS PAINÉIS.	81
TABELA 6 - ANÁLISE DOS RESULTADOS DA DENSIDADE DE LIGAÇÕES CRUZADAS ELABORADA PELO MÉTODO DE FLORY-REHNER, PARA AS AMOSTRAS DE EUC-BNV.....	88
TABELA 7 - VALORES DE TENSÃO E DEFORMAÇÃO NA RUPTURA, BEM COMO OS VALORES DA TENSÃO EM DIFERENTES DEFORMAÇÕES (5% ($\sigma_{5\%}$), 15% ($\sigma_{15\%}$), 30% ($\sigma_{30\%}$) E 45% ($\sigma_{45\%}$)) DOS PAINÉIS COMPÓSITOS.....	96
TABELA 8 – OS RESULTADOS DOS DE PARÂMETROS REOMÉTRICOS DE EUC/BNV-PUR1, EUC/BNV-PUR2, EUC/BNV-PUR3 E EUC/BNV-PUR4 (BORRACHA NATURAL COM RESINA DE POLIURETANO À BASE DE ÓLEO DE MAMONA COM RASPAS DE MADEIRA DE EUCALIPTO).	105
TABELA 9 - ANÁLISE DOS RESULTADOS DA DENSIDADE DE LIGAÇÕES CRUZADAS ELABORADA PELO MÉTODO DE FLORY-REHNER, PARA AS AMOSTRAS DE EUC/BNV-PUR.	107
TABELA 10 - VALORES DE TENSÃO E DEFORMAÇÃO NA RUPTURA, BEM COMO OS VALORES DA TENSÃO EM DIFERENTES DEFORMAÇÕES (5% ($\sigma_{5\%}$), 15% ($\sigma_{15\%}$), 30% ($\sigma_{30\%}$) E 45% ($\sigma_{45\%}$)) DAS AMOSTRAS DO PAINEL COMPÓSITO EUC/BNV-PUR COM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE EUC.	115
TABELA 11 – OS RESULTADOS DOS PARÂMETROS REOMÉTRICOS DAS AMOSTRAS DO PAINEL COMPÓSITO DE EUC-PIN/BNV-PUR COM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE MISTURA EUC-PIN.....	124
TABELA 12 - ANÁLISE DOS RESULTADOS DA DENSIDADE DE LIGAÇÕES CRUZADAS DETERMINADA MÉTODO DE FLORY-REHNER, PARA AS AMOSTRAS EUC-PIN/BNV-PUR COM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE MISTURA EUC-PIN.....	126
TABELA 13 – VALORES DA Σ_R E E_R , BEM COMO OS VALORES DA TENSÃO EM DIFERENTES DEFORMAÇÕES 5% ($\sigma_{5\%}$) E 15% ($\sigma_{15\%}$) PARA AS AMOSTRAS EUC-PIN/BNV-PUR COM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE MISTURA EUC-PIN.....	134
TABELA 14 – CLASSIFICAÇÃO COM BASE NO DESEMPENHO FÍSICO (ABSORÇÃO DE ÁGUA E ESTABILIDADE DIMENSIONAL).	143

TABELA 15 – CLASSIFICAÇÃO QUALITATIVA DOS COMPÓSITOS.....	144
TABELA 16 – CLASSIFICAÇÃO COM BASE NO COMPORTAMENTO MECÂNICO E ESTRUTURAL (ASTM D1037).....	145

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

IBA	
WPC	Wood Plastic Composites
MDF	Medium Density Fiberboard
HDF	High Density Fiberboard
MDP	Medium Density Particleboard
OSB	Oriented Strand Board
PUR	Resina Poliuretana derivado do Óleo de mamona
BN	Borracha Natural
BNV	Borracha Natural Vulcanizada
phr	Per Hundred Rubber
N550	Negro de Fumo
TDAE	Treated Distillate Aromatic Extract Oil
SB	Shea butter
SDT	Shea butter Plasticizer
ZnO	Zinc Oxid
TMTD	Tetrametilenotetramina
CZ	2-Benzotiazole Sulfonamide
SA	Stearic Acid
DRY	Drying
RH100	Relative Humidity of 100%
WET	Water
TBBS	N-tert-butyl-2-benzothiazole sulfenamide
EPDM	Monômero de Etileno Propilenodieno
CCA	Carboxila Ácidos
CCP	Amino Alcalinos
CCS	Sulfônicos
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
FTIR	Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier
ASTM	American Society for Testing and Materials
ISO	International Organization for Standardization
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Normas Brasileiras Regulamentadoras

RSS	Ribbed Smoked Slides
ADS	Air-Dried Slides
SMR L	Standard Malaysian Rubber – very light in color
SMR CV	Standard Malaysian Rubber – Compensate Viscosity
SMR GP	Standard Malaysian Rubber – Gilsonite Powder
SMR 5	Standard Malaysian Rubber - Five
TSR 5	Technically Specified Rubbers – Five
TSR 10	Technically Specified Rubbers – Ten
TSR 20	Technically Specified Rubbers – Twenty
TSR 50	Technically Specified Rubbers – Fifty
TiO ₂	Óxido de Zinco
TMT	Tetrametiltiuram
FAO	Food and Agriculture Organization
IBA	Industria Brasileira de Árvores
DAP	Diâmetro à Altura do Peito
MDI	difenilmetano diisocianato
TDI	tolueno diisocianato
DLP	
Ltda-ME	Limitada - Microempresa
SP	São Paulo – Estado
MBTS	Dibenzotiazol Disulfeto
MX	Mistura 1 até Mistura 14
Euc	Eucalipto
Pin	Pinus
sPUR	Sem Poliuretano derivado do óleo de mamona
cPUR	Com Poliuretano derivado do óleo de mamona
cps	Corpos de Prova
D	Densidade
IE	Inchamento em Espessura após 24 horas
AA	Absorção de água após 24 horas
TU	Teor de Umidade após 24 horas
TG	Análise Termogravimétrica
DTG	Análise de Taxa de Variação de Massa
SDT	Simultaneous Thermogravimetric Analyzer

TA	Thermal Analysers
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
FTIR	Fourier-transform Infrared Spectroscopy
MVD	Módulo de Variação da Densidade
CV	Coeficiente de Variação
DP	Desvio Padrão
PE	Polystyrene
WPCs	Wood Particle Composites
M X%	Módulus 5%, 15%, 30% e 45%

LISTA DE SÍMBOLOS

%	porcentagem
μm	micrometro
$^{\circ}\text{C}$	grau celsius
t	tonelada
mm	milímetros
pH	potencial hidrogeniônico
m^3	metro cúbico
hec	hectares
km	quilometro
m	metro
cm	centimetro
g	gramas
min	minuto
g/cm^3	gramas por centímetro cúbico
D	densidade
ma	<i>massa</i>
v	volume
$D_{\%}$	variação da densidade
D_m	densidade média
ρ	densidade da amostra
ρ_L	densidade do etanol na temperatura de análise
m_A	massa da amostra sem fio no ar
m_B	massa da amostra sem fio no líquido
ν	densidade de ligações cruzadas
ρ_B	densidade da borracha
V_b	fração de volume de borracha na forma inchada
$\chi_{\text{Toluol,BN}}$	parâmetro de interação Flory-Huggins
V_0	volume molar do tolueno
l	inchamento em espessura
E_1	espessura do corpo de prova após o período de imersão
E_0	espessura do corpo de prova antes da imersão
AA	Absorção de água do corpo de prova

M_1	massa do corpo de prova após a imersão
M_0	massa do corpo de prova antes da imersão
U	teor de umidade
M_u	massa úmida dos corpos de prova
M_s	massa seca dos corpos de prova
PA	perda por abrasão
Δ_m	Perda de massa do compósito devido à abrasão
S_0	Índice de ataque teórico da lixa na borracha padrão
S	índice de ataque real da lixa na borracha
P	densidade do compósito
$^{\circ}\text{C}/\text{min}$	graus celsius por minuto
ml/min	mililitro por minuto
mg	miligrama
cm^{-1}	centímetro menos um
kg/m^3	quilos por metro cúbicos
mol/cm^3	mol por centímetro cúbico
MPa	Mega pascal
$\text{mm}^3/40\text{m}$	milímetros cúbicos por quarenta metros

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	24
1.1. ENUCIADO DO PROBLEMA	24
2. REVISÃO DE LITERATURA	30
2.1. MADEIRA	30
2.1.1. Madeira de reflorestamento	33
2.1.2. Composição química da madeira	36
2.1.3. Eucalipto	38
2.1.4. Pinus	39
2.1.5. Painéis compósitos	39
2.2. ADESIVOS	40
2.2.1. O poliuretano a base de óleo de mamona	43
2.3. BORRACHA NATURAL	45
2.3.1. Um breve Histórico da BN	46
2.3.2. Características da borracha natural	47
2.3.3. Produção e Característica do Crepe claro	48
2.4. MATERIAIS COM O USO DE BORRACHA NATURAL E MADEIRA E PUR	49
2.4.1. Borracha natural como adesivo em painéis de madeira	49
2.4.2. Painéis de madeira e outros polímeros	50
2.4.3. Principais lacunas da literatura	50
2.4.4. Onde está a novidade?	51
3. OBJETIVO	52
3.1. OBJETIVO GERAL	52
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	52
4. MATERIAIS E MÉTODOS	54
4.1. MATERIAIS	54
4.2. PROCESSO PARA OBTENÇÃO DOS COMPÓSITOS	55
4.2.1. Processamento das madeiras	55
4.2.2. Confeção dos painéis	56
4.3. REÔMETRIA	61
4.4. ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS	62
4.4.1. Determinação da Densidade de Ligações Cruzadas	62
4.4.2. Ensaio de Densidade (ρ_A)	63
4.4.3. Ensaio de Inchamento em espessura após 24 horas ($IE\%$)	64
4.4.4. Ensaio de Absorção de Água após 24 horas ($AA\%$)	66
4.4.5. Ensaio de Teor de umidade após 24 horas ($TU\%$)	67
4.4.6. Ensaio Mecânicos	68
4.4.6.1. Ensaio de Tração	69
4.4.6.2. Ensaio de Dureza (DU)	69
4.4.6.3. Ensaio de Abrasão (AB)	69
4.5. ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TG/DTG)	70
4.6. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	70

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	71
5.1 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DAS AMOSTRAS BNV E BNV-PUR	71
5.1.1. Análises Reométrica	71
5.1.2. Análise de ligação cruzada pelo método de Flory–Rehner	74
5.1.3. Análises das Propriedades Físicas	75
5.1.3.1. Análise da densidade aparente (ρ_a)	76
5.1.3.2. Inchamento em espessura (IE%)	77
5.1.3.2. Absorção de água (AA%)	78
5.1.3.3. Teor de umidade (TU%)	79
5.1.4. Propriedades mecânicas	80
5.1.4.1. Ensaio mecânicos em tração	80
5.1.4.2. Ensaio de dureza	81
5.1.4.3. Ensaio de abrasão	83
5.1.5. Análise termogravimétrica (TG/DTG)	84
5.1.6. Análise morfológicas (MEV)	85
5.2. AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DAS AMOSTRAS EUC/BNV	87
5.2.1. Análise de ligação cruzada pelo método de Flory–Rehner	87
5.2.2. Análises das Propriedades Físicas	89
5.2.2.1. Análise da densidade aparente (ρ_a)	89
5.2.2.2. Inchamento em espessura (IE%)	90
5.2.2.3. Absorção de água (AA%)	91
5.2.2.4. Teor de umidade (TU%)	93
5.2.3. Propriedades mecânicas	94
5.2.3.1. Ensaio de tensão/deformação	94
5.2.3.2. Ensaio de dureza	96
5.2.3.3. Ensaio de abrasão	98
5.2.4. Análise termogravimétrica (TG/DTG)	99
5.2.5. Análise morfológicas (MEV)	101
5.3. AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DAS AMOSTRAS EUC/BNV–PUR	103
5.3.1. Análise Reométrica	103
5.3.2. Análise de ligação cruzada pelo método de Flory–Rehner	106
5.3.3. Propriedades físicas	109
5.3.3.1. Análise da densidade aparente (ρ_a)	109
5.3.3.2. Inchamento em espessura (IE%)	110
5.3.3.3. Absorção de Água (AA%)	111
5.3.3.4. Teor de Umidade (TU%)	112
5.3.4. Propriedades mecânicas	114
5.3.4.1. Ensaio de tração/deformação	114
5.3.4.2. Ensaio de dureza	116
5.3.4.3. Ensaio de Abrasão	117
5.3.5. Análise termogravimétrica (TG/DTG)	118
5.3.6. Análise morfológicas (MEV)	119
5.4. AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DAS AMOSTRAS EUC-PIN/BNV-PUR	121
5.4.1. Análise Reométrico	122

5.4.2. Análise de ligação cruzada pelo método de Flory–Rehner	125
5.4.3. Propriedades físicas	128
5.4.3.1. Análise da densidade aparente (ρ_A).....	128
5.4.3.2. Inchamento em espessura (IE%).....	129
5.4.3.3. Absorção de Água (AA%)	130
5.4.3.4. Teor de Umidade (TU%).....	131
5.4.4. Ensaios mecânicos	133
5.4.4.1. Ensaio de tração/deformação	133
5.4.4.2. Ensaio de dureza	134
5.4.4.3. Ensaio de Abrasão.....	135
5.4.5. Análise termogravimétrica (TG/DTG)	136
5.4.6. Análise morfológica (MEV)	138
5.5. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS DIFERENTES COMPÓSITOS	140
5.6. POTENCIAL DE APLICAÇÃO E ENQUADRAMENTO NORMATIVO DOS COMPÓSITOS (ABNT NBR 14810–1 E ASTM D1037)	141
6. CONCLUSÃO	147
REFERÊNCIA	149

1. INTRODUÇÃO

1.1. ENUCIADO DO PROBLEMA

O cultivo de plantas, especialmente de espécies arbóreas destinadas à extração de madeira, constitui um dos setores industriais mais relevantes em nível mundial. Diversas espécies de árvores são cultivadas para atender a diferentes aplicações, como a produção de painéis aglomerados, mobiliário, construção civil e, a indústria de papel e celulose. Essa ampla gama de aplicações reflete a importância econômica e estratégica da atividade florestal para diferentes cadeias produtivas.

Entretanto, apesar de sua relevância, uma parcela significativa da madeira utilizada, em especial aquela proveniente de espécies nativas, ainda é obtida por meio de práticas ilegais. Esse cenário evidencia a necessidade de ações mais efetivas de controle e fiscalização florestal. Nesse contexto, a atuação de órgãos governamentais e de organizações não governamentais tem papel fundamental na garantia de que a exploração madeireira ocorra de forma legal e ambientalmente responsável. Tais iniciativas são essenciais para reduzir a degradação de florestas nativas e de ecossistemas naturais, contribuindo para a preservação da biodiversidade e para a mitigação dos riscos de extinção da fauna e da flora associadas a esses ambientes, que são, em muitos casos, ecologicamente sensíveis (1,2,3).

No Brasil, a gestão inadequada de florestas nativas compostas por espécies arbóreas singulares, como o pau-brasil, tem gerado debates e preocupações relacionadas à exploração de recursos florestais. Muitas dessas espécies apresentam elevado valor ecológico, histórico e cultural, além de demandarem longos períodos de crescimento, o que torna sua exploração especialmente sensível. Nesse sentido, a preservação dessas árvores nativas é fundamental para a manutenção da biodiversidade e do equilíbrio dos ecossistemas florestais (4,5,6).

Além das ações de controle e fiscalização promovidas por órgãos governamentais e não governamentais, uma estratégia amplamente adotada para reduzir o desmatamento e a degradação de ecossistemas naturais tem sido o incentivo ao plantio de florestas com espécies específicas. Nesse contexto, espécies não nativas, caracterizadas por alta capacidade de adaptação e rápido crescimento, têm sido amplamente utilizadas para suprir a demanda por recursos madeireiros,

contribuindo de forma indireta para a preservação das florestas nativas. Entre as espécies mais cultivadas no Brasil destacam-se o Pinus (PIN) e o Eucalipto (EUC), que atualmente dominam a produção florestal nacional. O eucalipto, em particular, apresenta produtividade superior quando comparado a outras espécies arbóreas, o que justifica sua ampla adoção em diferentes segmentos industriais (7,8).

De acordo com o Relatório Anual da Indústria Brasileira de Árvores (IBA, 2023), a área total de florestas plantadas no Brasil corresponde a aproximadamente 9,93 milhões de hectares, dos quais cerca de 7,53 milhões de hectares são ocupados por eucalipto e 1,93 milhões de hectares por pinus. Esses números evidenciam a relevância dessas espécies para o setor florestal e para a economia nacional (9).

As madeiras de pinus e eucalipto apresentam ampla versatilidade de uso devido às suas propriedades técnicas, como boa resistência mecânica, facilidade de processamento e rápido crescimento quando cultivadas em florestas plantadas (10,11). A madeira de pinus é amplamente empregada na fabricação de móveis, especialmente aqueles de menor custo ou com estética rústica, em função de sua leveza, coloração clara e facilidade de acabamento (12).

O eucalipto, por sua vez, é frequentemente utilizado em móveis que demandam maior durabilidade e resistência, sendo valorizado também por seus padrões de veios e aspecto visual mais sofisticado (13). Na construção civil, ambas as espécies são empregadas na produção de vigas, tábuas e caibros destinados a estruturas temporárias, como formas para concreto e andaimes (14,15).

Adicionalmente, o eucalipto é amplamente utilizado como mourões e postes em cercas e estruturas rurais, devido à sua durabilidade natural, especialmente quando submetido a tratamentos preservativos (16,17). Essas madeiras também são matérias-primas fundamentais para a fabricação de painéis aglomerados, MDF (Medium Density Fiberboard) e compensados, amplamente utilizados na indústria moveleira e na construção civil, em razão de sua estabilidade dimensional, uniformidade e possibilidade de revestimento decorativo(18).

Nos últimos anos, a produção de painéis derivados de madeira tem incorporado abordagens voltadas à sustentabilidade, como a reutilização de resíduos agroindustriais e a substituição de resinas convencionais por alternativas menos agressivas à saúde humana (19,20). Painéis produzidos a partir de resíduos lignocelulósicos ou com a adição de polímeros têm como objetivo reduzir o peso do material, melhorar propriedades mecânicas e aumentar sua vida útil (19,20,21,22,23).

Em particular, o reaproveitamento de resíduos de madeira de Pinus e Eucalipto na produção de painéis compósitos contribui para a redução dos custos de matéria-prima e promove práticas alinhadas aos princípios da economia circular, minimizando a geração de resíduos sólidos e o impacto ambiental da indústria madeireira (24).

A importância da madeira e de seus derivados para o desenvolvimento humano é amplamente reconhecida na literatura. Ramesh et al., (2022), por exemplo, realizaram uma revisão crítica sobre compósitos poliméricos à base de madeira, abrangendo materiais como Wood-Plastic Composites (WPCs), MDF, HDF, MDP, OSB, entre outros. Esses estudos evidenciam o papel estratégico dos compósitos de madeira-polímero no desenvolvimento de materiais multifuncionais com aplicações estruturais e não estruturais.

No estudo realizado de Yano et al., (2020), foram produzidos painéis compósitos utilizando seis misturas diferentes de serragem e bagaço de cana-de-açúcar, no qual as proporções mássicas foram variadas em 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40, 50/50, e adicionando concentração fixa de 10% de resina poliuretana de óleo de mamona (PUR). Os autores realizaram análises das propriedades físicas, tais como a absorção de água após 2 horas e 24 horas, com valores dos resultados de (23,12 a 27,51%) e (22,85 a 26,92%), respectivamente, inchamento em espessura após 2 horas e 24 horas, sendo que os valores dos resultados ficaram entre 20,15 a 28,83% e 15,10 a 24,27%, respectivamente, e densidade, com os valores dos resultados estando entre 0,71 até 0,82 g/cm³, bem como testes mecânicos visando avaliar o módulo de elasticidade, com valores dos resultados estando entre 1.108 até 2.034 MPa, módulo de ruptura, com valor de resultado entre 7,40 até 11,40 MPa, e tração perpendicular, com os valores de resultados estando entre 1,11 até 1,25 MPa.

Outros estudos demonstram que características como o tamanho das partículas de madeira influenciam significativamente o desempenho dos painéis, variando de acordo com a disponibilidade regional de matéria-prima e com as especificações técnicas desejadas (27,28,29).

Um aspecto central na fabricação de painéis aglomerados está relacionado ao tipo de resina ou aglutinante utilizado, uma vez que esse componente é responsável por unir as partículas de madeira e conferir ao material final propriedades mecânicas, físicas e químicas adequadas. Atualmente, as resinas à base de formaldeído, especialmente a ureia-formaldeído, ainda predominam na indústria, representando cerca de 95% do total utilizado (30,31,32,33). Apesar de seu baixo

custo e boas propriedades adesivas, essas resinas apresentam limitações importantes, como a liberação de compostos orgânicos voláteis, incluindo o formaldeído, classificado como carcinogênico pela Organização Mundial da Saúde. (34,35). Essa liberação contínua pode causar efeitos adversos à saúde humana, além de comprometer a sustentabilidade ambiental dos painéis (36,37,38). Adicionalmente, a resina ureia-formaldeído apresenta baixa resistência à umidade, enquanto resinas fenólicas, embora mais duráveis, resultam em painéis com coloração escura, limitando seu uso em aplicações que exigem acabamento estético (39,40). Por fim, as resinas à base de formaldeído são derivadas de fontes petroquímicas, o que contribui para a dependência de recursos não renováveis e o aumento da pegada de carbono no processo produtivo (41,42,43,44,45).

Diante dessas limitações, alternativas sustentáveis têm sido propostas, com destaque para o uso de polímeros naturais ou bio-baseados, como os poliuretanos derivados de óleo vegetal, que apresentam menor toxicidade e menor impacto ambiental (46,47,48).

No estudo de Silva Cazella et al., (2024), foi investigado painéis aglomerados de madeira pinus misturada com plástico PET e aglutinados com resina PUR, em diferentes proporções mássicas pinus/PET/PUR (100/0/10; 70/30/10; 50/50/10; 70/30/5; 50/50/5). Os valores obtidos referente ao ensaio físico foram: de densidade 770 a 1060 kg/m³, teor de umidade no valor de 3 a 6%, absorção de água de 10 a 78%, e inchamento após 24 horas no valor de 3 a 30%. Já para os ensaios mecânico foram: para o Modulo de Ruptura (*MOR*) o valor de 13 a 28 MPa, já para o Módulo de Elasticidade (*MOE*) os valores foram de 1.800 a 3.200 MPa, e para o ensaio de tração perpendicular foram no valor de 0,60 a 2,50 MPa. Os resultados obtidos demonstram que PET tem potencialidade como aglutinante na produção de painéis compósitos.

Já o estudo realizado por Duran et al., (2025) foram obtidos painéis aglomerados por meio da mistura de bagaço de cana-de-açúcar, resíduos de plástico e resina PUR, 15% nas proporções mássicas 100/0/100; 50/50/100; 50/50/150; 50/50/175; 50/50/200. As melhores amostra apresentaram valores de inchamento após 24 horas entre 13,14 e 19,02%, módulo de ruptura de 14,15 a 25,04 Mpa e, módulo de elasticidade de 1608 a 2674 MPa, demonstrando que o uso de resíduo de plástico contribui nas propriedades finais dos compósitos.

Rodrigues et al., (2023) realizou a mistura de partículas de madeiras (pinus e eucalipto) visando a substituição parcial de PUR por poliestireno (PS), objetivando

avaliar o impacto do uso do resíduo de plástico nas propriedades físicas e mecânicas do compósito. Os autores registraram densidade entre 0,756 e 0,821 g/cm³, umidade de 7,52 a 8,08%, inchamento após 24h de 27,95 a 53,36%, *MOE* de 1.613 a 1.856 MPa e *MOR* de 9,01 a 12,96 MPa.

Outro polímero natural pouco explorado e com potencial para ser empregado como aglutinante na produção de painéis compósitos é a borracha natural (BN), extraída da seringueira (*Hevea brasiliensis*) (40). Quando submetida ao processo de vulcanização, a borracha natural forma uma rede tridimensional de ligações cruzadas, conferindo ao material propriedades mecânicas superiores, como elevada elasticidade, resistência térmica e durabilidade (52,53).

No processo de vulcanização da borracha natural (BNV), utiliza-se como reticulante o enxofre que resulta na formação de uma rede tridimensional de ligações cruzadas (54). Nesse processo, (55,56,57,58,59), os átomos de enxofre quebram as ligações duplas do poli-isopreno, formando ligações cruzadas que aumentam a resistência e a elasticidade do material (60,61). Essa nova estrutura tridimensional confere à BNV características superiores, como resistência a temperaturas elevadas e a degradação por produtos químicos agressivos, bem como excelentes propriedades mecânicas (62,63). Além disso, a vulcanização reduz a pegajosidade da borracha, facilitando seu manuseio e aplicação em diversas indústrias.

As propriedades melhoradas tornam a BNV ideal para aplicações que exigem durabilidade e resistência, como pneus automotivos, peças de vedação e calçados (64,65,66). Essa inovação na utilização da BN pode abrir novas possibilidades para a fabricação de painéis, proporcionando uma alternativa mais saudável e sustentável em relação às resinas tradicionais, bem como a utilização de uma matéria prima extraída de fontes renováveis.

Nesse sentido, o presente trabalho propõe o uso da BN, em seu estado vulcanizado, como aglutinante na produção de painéis compósitos a partir de resíduos de partículas de madeira de Pinus e Eucalipto. A proposta tem como principal objetivo avaliar a viabilidade técnica da BN, isoladamente ou em combinação com a resina poliuretana à base de óleo vegetal (PUR), como alternativa às resinas sintéticas convencionais, especialmente aquelas à base de formaldeído.

A utilização da BN, um polímero de origem renovável, busca reduzir a dependência de insumos petroquímicos e a emissão de compostos orgânicos voláteis, além de promover o reaproveitamento de resíduos provenientes de serrarias e

indústrias moveleiras. Espera-se que a BN contribua para a adequada adesão entre as partículas de madeira e para a melhoria de propriedades mecânicas relevantes, como resistência à flexão e ao impacto, em função de sua elevada elasticidade.

Os painéis compósitos desenvolvidos neste estudo destinam-se principalmente a aplicações não estruturais, incluindo revestimentos internos, mobiliário, painéis decorativos e componentes para a construção civil leve, nos quais a combinação entre desempenho mecânico, segurança à saúde e sustentabilidade ambiental é um requisito fundamental. Dessa forma, este trabalho busca contribuir para o desenvolvimento de materiais compósitos mais sustentáveis e para o avanço de alternativas tecnológicas alinhadas aos princípios da economia circular na indústria de painéis de madeira.

6. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos ao longo deste trabalho permitem compreender, de forma consistente, o comportamento de compósitos híbridos desenvolvidos a partir da combinação de partículas de resíduo de madeira (eucaliptos e pinus), borracha natural vulcanizada (BNV) e poliuretano (PUR). A proposta de integrar materiais de naturezas distintas mostrou-se adequada, tanto do ponto de vista científico quanto tecnológico, especialmente por explorar a interação entre fases rígidas e elastoméricas em um mesmo sistema.

A escolha das madeiras utilizadas, amplamente empregadas na construção civil, contribuiu para o desenvolvimento de compósitos com potencial de aplicação prática. Além disso, o uso de matéria-prima proveniente de florestas plantadas reforça o caráter sustentável do estudo, o que é cada vez mais relevante no desenvolvimento de novos materiais.

De maneira geral, os resultados indicam que a incorporação da BNV promove alterações importantes no comportamento dos compósitos, principalmente no que se refere à capacidade de deformação. No entanto, foi a adição de PUR que se mostrou determinante para a melhoria global das propriedades dos materiais. Os compósitos contendo PUR apresentaram melhor desempenho mecânico, maior rigidez estrutural e maior eficiência na interação entre matriz e reforço.

Os resultados reológicos confirmam esse comportamento, uma vez que as formulações com PUR apresentaram maiores valores de torque máximo e diferença de torque, indicando maior densidade de ligações cruzadas e uma estrutura mais coesa. Esse efeito se refletiu diretamente nos ensaios mecânicos, nos quais os compósitos com PUR, especialmente as formulações intermediárias, apresentaram melhor equilíbrio entre resistência e integridade estrutural.

No que se refere às propriedades físicas, todos os compósitos apresentaram baixa absorção de água, com valores inferiores a 7,5%, o que representa um resultado bastante relevante quando comparado a materiais lignocelulósicos convencionais. Ainda assim, os sistemas contendo PUR apresentaram melhor estabilidade dimensional, sugerindo a formação de uma estrutura mais compacta e menos suscetível à penetração de umidade.

As análises térmicas e morfológicas complementam essa interpretação. Os ensaios de TG/DTG indicaram diferenças na estabilidade térmica entre as

formulações, associadas à composição e à proporção entre os componentes. Já as análises por MEV evidenciaram que os compósitos contendo PUR apresentam melhor recobrimento das partículas e menor presença de vazios, indicando maior compatibilidade entre as fases. Em contrapartida, os sistemas com maior teor de madeira e sem modificação apresentaram maior heterogeneidade estrutural.

De forma geral, os resultados mostram que o desempenho dos compósitos está diretamente relacionado ao equilíbrio entre os constituintes e à eficiência da interface matriz–reforço. A simples adição de partículas de resíduo de madeira não é suficiente para garantir um bom desempenho estrutural, sendo necessária a presença de um agente que promova a compatibilização entre as fases.

Nesse contexto, as formulações contendo PUR, com destaque para EUC/BNV-PUR2 e EUC-PIN/BNV-PUR2, apresentaram o melhor desempenho global, reunindo propriedades físicas e mecânicas mais adequadas para aplicações em painéis estruturais leves e componentes de uso interno.

Por fim, pode-se concluir que a utilização conjunta de BNV, partículas de madeira e PUR representa uma estratégia promissora para o desenvolvimento de compósitos com propriedades ajustáveis e potencial de aplicação tecnológica. O trabalho contribui ao demonstrar que a modificação interfacial por meio do PUR é um fator determinante para a melhoria do desempenho desses materiais, ampliando as possibilidades de uso de compósitos sustentáveis na área de engenharia de materiais.

REFERÊNCIA

- [1] SZICHTA, P. et al. Environmental potentials from wood cascading: A future-oriented consequential yet dynamic approach considering market and time-dependent biogenic carbon effects for selected scenarios under German conditions. **Cleaner and Circular Bioeconomy**, v. 9, 1 dez. 2024.
- [2] JOSHI, G.; CHAUHAN, S. S. Cellulose nanofibers-based UV resistant and hydrophobic wood coatings. **Surfaces and Interfaces**, p. 105259, out. 2024.
- [3] FU, Z. et al. **Wood elasticity and compressible wood-based materials: Functional design and applications. Progress in Materials Science**Elsevier Ltd, , 1 jan. 2025.
- [4] YIN, F. et al. Moisture sorption and its induced deformation of juvenile wood at different radial positions in poplar wood at the tissue scale. **Industrial Crops and Products**, v. 220, 15 nov. 2024.
- [5] HE, L. et al. Architecting layered double hydroxides: Exploring their structural mastery and transformative influence on wood staining. **Industrial Crops and Products**, v. 221, 1 dez. 2024.
- [6] SHARMA, R.; KUMAR, R. Distinguishing between *Tectona grandis* and *acacia auriculiformis* woods. **Microchemical Journal**, v. 202, 1 jul. 2024.
- [7] DAI, J. et al. Tile roof inspired structure optimization on radial wood to fabricate oil-water separation function. **Industrial Crops and Products**, v. 221, 1 dez. 2024.
- [8] ZHOU, Y. et al. Multifunctional wood-bamboo hybrid materials for effective electromagnetic interference shielding. **Construction and Building Materials**, v. 440, 23 ago. 2024.
- [9] IBÁ. IBÁ - Relatório anual. 2023.
- [10] BIANCHE, J. J. et al. Improving the understanding of wood bonding: Behavior of different adhesives on the surface of eucalyptus and pine wood. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 112, p. 102987, jan. 2022.
- [11] ACOSTA, A. P. et al. Improvement in mechanical, physical and biological properties of eucalyptus and pine woods by raw pine resin in situ polymerization. **Industrial Crops and Products**, v. 166, p. 113495, ago. 2021.
- [12] ZHANG, F. et al. Investigation of surface damage mechanisms in milling heat-treated pine wood. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 56, p. 47–60, fev. 2025.
- [13] SUGAHARA, E. S. et al. Termite Resistance of Heat-Treated Eucalyptus OSB Bonded with Eco-Friendly Castor Oil Adhesive. **Journal of Renewable Materials**, v. 12, n. 11, p. 1911–1925, 2024.
- [14] STØRDAL, S. et al. Drivers of housing developers' perception on future construction reuse material premium for wood. **Journal of Cleaner Production**, v. 476, p. 143642, out. 2024.

- [15] KHATRI, S.; SJØLIE, H. K.; NYRUD, A. Q. Consumer drivers for intended adoption of recycled wood as construction material. **Cleaner and Circular Bioeconomy**, v. 10, p. 100129, mar. 2025.
- [16] DA PAZ GOMES BRANDÃO FERRAZ, D.; VICENS, R. S. Comparison between machine learning classification and trajectory-based change detection for identifying eucalyptus areas in Landsat time series. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, p. 101444, dez. 2024.
- [17] YIP, S. C. et al. Chemical composition and bioactivities of Eucalyptus essential oils from selected pure and hybrid species: A review. **Industrial Crops and Products**, v. 222, p. 120118, dez. 2024.
- [18] WANG, Q. et al. Mechanical properties and probabilistic models of wood and engineered wood products: A review of green construction materials. **Case Studies in Construction Materials**, v. 21, p. e03796, dez. 2024.
- [19] AFSHAR, S. V. et al. **Degradation of biodegradable plastics in waste management systems and the open environment: A critical review.** *Journal of Cleaner Production* Elsevier Ltd, , 1 jan. 2024.
- [20] KAINING, V. et al. **Photodegradation of biodegradable plastics in aquatic environments: Current understanding and challenges.** *Science of the Total Environment* Elsevier B.V., , 10 fev. 2024.
- [21] ZHANG, Z.; ZOU, S.; LI, P. **Aging of plastics in aquatic environments: Pathways, environmental behavior, ecological impacts, analyses and quantifications.** *Environmental Pollution* Elsevier Ltd, , 15 jan. 2024.
- [22] BRIASSOULIS, D. et al. Biodegradation of plastics in the pelagic environment of the coastal zone – Proposed test method under controlled laboratory conditions. **Science of the Total Environment**, v. 912, 20 fev. 2024.
- [23] MA, Y. B. et al. Recent advances in micro (nano) plastics in the environment: Distribution, health risks, challenges and future prospects. **Aquatic Toxicology**, v. 261, 1 ago. 2023.
- [24] GAUDELAS, A. et al. Design of a structural insulating panel based on wood-based corrugated panels as an alternative to light-frame construction. **Construction and Building Materials**, v. 457, p. 139346, dez. 2024.
- [25] RAMESH, M. et al. **A Critical Review on Wood-Based Polymer Composites: Processing, Properties, and Prospects.** *Polymers* MDPI, , 1 fev. 2022.
- [26] YANO, B. B. R. et al. Use of sugarcane bagasse and industrial timber residue in particleboard production. **BioResources**, v. 15, n. 3, 2020.
- [27] HE, Z. et al. Lateral behavior of wood frame shear wall using PVC wood-plastic composite (WPC) veneer panels. **Journal of Building Engineering**, v. 89, p. 109367, jul. 2024.
- [28] SUNITHA, V. L. et al. Wood plastic composites (WPC) waste based triboelectric nanogenerator for mechanical energy harvesting and self-powered applications. **Materials Letters**, v. 351, p. 134995, nov. 2023.

- [29] CHAUDEMANCHE, S. et al. Properties of an industrial extruded HDPE-WPC: The effect of the size distribution of wood flour particles. **Construction and Building Materials**, v. 162, p. 543–552, fev. 2018.
- [30] OLAWALE, O. et al. Optimization of mixing ratio for the production of particle board from bamboo leaves, saw dust and urea formaldehyde. **Advances in Bamboo Science**, v. 9, 1 nov. 2024.
- [31] XU, Y. et al. A formaldehyde-free amino resin alternative to urea-formaldehyde adhesives: A bio-based oxidized glucose – urea resin. **Industrial Crops and Products**, v. 218, 15 out. 2024.
- [32] KAWALERCZYK, J. et al. The effect of urea-formaldehyde adhesive modification with diisocyanate-functionalized nanocellulose on the properties of particleboard. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 135, p. 103850, dez. 2024.
- [33] GARCÍA GAVÍN, J.; FERNÁNDEZ-REDONDO, V. Dermatitis de contacto en la industria de la madera. **Piel**, v. 23, n. 7, p. 349–355, ago. 2008.
- [34] LOTFY, V. F.; BASTA, A. H. A sustainable black liquor-based carbon scavenger to promote urea formaldehyde as green wood adhesive with low formaldehyde emission. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 282, p. 137126, dez. 2024.
- [35] CHEN, Y. et al. Demethylation of lignin with mild conditions and preparation of green adhesives to reduce formaldehyde emissions and health risks. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 242, p. 124462, jul. 2023.
- [36] RAMDUGWAR, V.; FERNANDES, H.; GADEKAR, P. Study of scavengers for free formaldehyde reduction in phenolic resins used in polychloroprene based contact adhesives. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 115, 1 jun. 2022.
- [37] WANG, S. et al. Formaldehyde causes an increase in blood pressure by activating ACE/AT1R axis. **Toxicology**, v. 486, 1 mar. 2023.
- [38] CHEN, Y. et al. Demethylation of lignin with mild conditions and preparation of green adhesives to reduce formaldehyde emissions and health risks. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 242, 1 jul. 2023.
- [39] ZHANG, Z. F. et al. Indoor occurrence and health risk of formaldehyde, toluene, xylene and total volatile organic compounds derived from an extensive monitoring campaign in Harbin, a megacity of China. **Chemosphere**, v. 250, 1 jul. 2020.
- [40] JAZAYERI, R.; NAJAFI, S. K.; YOUNESI, H. Modified graphene as potential additive for urea formaldehyde (UF) resin in medium density fiberboard (MDF) manufacturing. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 126, 1 ago. 2023.
- [41] ASADI KHORRAMABADI, L.; BEHROOZ, R.; KAZEMI NAJAFI, S. Reduction of formaldehyde emission from medium density fiberboard using nanoclay modified with 3-aminopropyltriethoxysilane and L-Lysine as additives to urea-formaldehyde adhesive. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 125, 1 jul. 2023.

- [42] CHEN, Q. et al. Variation behavior of organic compounds in melamine-urea-formaldehyde impregnated bond paper in different pyrolysis stages. **Journal of Hazardous Materials**, v. 436, 15 ago. 2022.
- [43] KELLECI, O. et al. Eco-friendly particleboards with low formaldehyde emission and enhanced mechanical properties produced with foamed urea-formaldehyde resins. **Journal of Cleaner Production**, v. 379, 15 dez. 2022.
- [44] LI, Z. et al. Urea-formaldehyde resin covered etched basalt as durable composite coating with antibacterial activity and corrosion resistance. **Corrosion Science**, v. 209, 1 dez. 2022.
- [45] WU, Y. et al. Preparation and characterization of hybrid resin from used urea-formaldehyde and isocyanate resin. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 124, 1 maio 2023.
- [46] CAVALLO, D. et al. New formaldehyde-free adhesives for wood manufacturing: In vitro evaluation of potential toxicity of fine dust collected during wood sawing using a new experimental model to simulate occupational inhalation exposure. **Toxicology**, v. 466, 30 jan. 2022.
- [47] GONÇALVES, F. G. et al. Resistance of particleboards produced with lignocellulosic agro-industrial wastes to fungi and termites. **International Biodeterioration and Biodegradation**, v. 157, 1 fev. 2021.
- [48] LA TORRE, G. et al. **Relationship between formaldehyde exposure, respiratory irritant effects and cancers: a review of reviews**. **Public Health** Elsevier B.V., , 1 maio 2023.
- [49] SILVA CAZELLA, P. H. DA et al. Polyethylene terephthalate (PET) as a recycled raw material for particleboards produced from pinus wood and biopolymer resin. **Journal of Cleaner Production**, v. 447, 1 abr. 2024.
- [50] DURAN, A. J. F. P. et al. Evaluation of physical and mechanical properties in medium density particleboards made from sugarcane bagasse and plastic waste (HDPE) at different pressing temperatures. **Industrial Crops and Products**, v. 223, p. 120190, jan. 2025.
- [51] RODRIGUES, F. R. et al. Particleboard Composite Made from Pinus and Eucalyptus Residues and Polystyrene Waste Partially Replacing the Castor Oil-Based Polyurethane as Binder. **Materials Research**, v. 26, n. suppl 1, 2023.
- [52] DODDAMANI, S. et al. Development of rubber-sand composite for enhanced impact resistance: Implications of vulcanization. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, v. 51, p. 101631, mar. 2024.
- [53] ANAND, A. et al. Unveiling the synergistic effect of zinc oxide and carbon black nanoparticles on the dielectric properties of vulcanized natural rubber. **Next Nanotechnology**, v. 6, p. 100092, 2024.
- [54] KUMAR, A. et al. Advances in recycling of waste vulcanized rubber products via different sustainable approaches. **Materials Advances**, v. 5, n. 19, p. 7584–7600, 2024.

- [55] KONG, P. et al. Chemical structure of rubber powder on the compatibility of rubber powder asphalt. **Construction and Building Materials**, v. 392, p. 131769, ago. 2023.
- [56] KUMAR, A. et al. Advances in recycling of waste vulcanized rubber products via different sustainable approaches. **Materials Advances**, v. 5, n. 19, p. 7584–7600, 2024.
- [57] PAMANULUK, K. et al. Effect of proteins as constituents of island-nanomatrix structure on vulcanization of natural rubber. **Polymer**, v. 307, p. 127272, jul. 2024.
- [58] KOHJIYA, S.; IKEDA, Y. A short history of natural rubber research. Em: **Chemistry, Manufacture, and Applications of Natural Rubber**. [s.l.] Elsevier, 2021. p. 407–427.
- [59] WHBA, R. et al. Intrinsic challenges and strategic approaches for enhancing the potential of natural rubber and its derivatives: A review. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 276, p. 133796, set. 2024.
- [60] WEI, X. et al. A ReaxFF molecular dynamic study on pyrolysis behavior and sulfur transfer during pyrolysis of vulcanized natural rubber. **Waste Management**, v. 139, p. 39–49, fev. 2022.
- [61] SILVA et al. Nano cellulose-crystals: Isolation and their promising application as reinforcement in vulcanized natural rubber compounds. **Industrial Crops and Products**, v. 222, p. 120023, dez. 2024.
- [62] YANG, L. et al. Effect of deep eutectic solvents on vulcanization kinetics and strain-softening behavior of natural rubber/styrene-butadiene rubber. **Polymer**, v. 316, p. 127871, jan. 2025.
- [63] REN, T. et al. Thermo-oxidative degradation behavior of natural rubber vulcanized by different curing systems. **Chemical Engineering Science**, v. 295, p. 120147, ago. 2024.
- [64] WANG, Y. et al. Research of strain induced crystallization and tensile properties of vulcanized natural rubber based on crosslink densities. **Industrial Crops and Products**, v. 202, 15 out. 2023.
- [65] SONG, Y. et al. Vulcanization kinetics of natural rubber and strain softening behaviors of gum vulcanizates tailored by deep eutectic solvents. **Polymer**, v. 263, 16 dez. 2022.
- [66] YAMANO, M. et al. Preparation and characterization of vulcanized natural rubber with high stereoregularity. **Polymer**, v. 235, 19 nov. 2021.
- [67] LI, M. Y. et al. Structural characterization of steam-heat treated *Tectona grandis* wood analyzed by FT-IR and 2D-IR correlation spectroscopy. **Chinese Chemical Letters**, v. 26, n. 2, p. 221–225, 2015.
- [68] POPESCU, M. C. et al. Structural modifications of *Tilia cordata* wood during heat treatment investigated by FT-IR and 2D IR correlation spectroscopy. **Journal of Molecular Structure**, v. 1033, p. 176–186, 6 fev. 2013.
- [69] RODRIGUES, F. R. **ESTUDO DA VIABILIDADE DO USO DE RESÍDUO DE POLIESTIRENO E POLIURETANO DE ÓLEO DE MAMONA NA PRODUÇÃO DE PAINÉIS AGLOMERADOS HOMOGÊNEOS DE PINUS E EUCALIPITO**. Dissertação (Mestrado)—Ilha Solteira: UNESP, fev. 2022.

- [70] FERRO, F. S. et al. Environmental aspects of oriented strand boards production. A Brazilian case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 183, p. 710–719, maio 2018.
- [71] PIEKARSKI, C. M. et al. Life cycle assessment of medium-density fiberboard (MDF) manufacturing process in Brazil. **Science of The Total Environment**, v. 575, p. 103–111, jan. 2017.
- [72] ZOU, W. et al. A delignified longitudinal-cutting poplar veneer-based epoxy resin composite with excellent transmittance, haze, flexibility and wood fiber art texture. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 698, p. 134565, out. 2024.
- [73] GHOSH, T. et al. Poly (itaconic acid) functionalized lignin/polyvinyl acetate composite resin with improved sustainability and wood adhesion strength. **Industrial Crops and Products**, v. 187, p. 115299, nov. 2022.
- [74] PINHEIRO, L. Z. et al. *In vitro* micropropagation and tiliroside production in *Paratecoma peroba* (Record) Kuhl, an endemic and endangered Brazilian tree. **Natural Product Research**, v. 38, n. 20, p. 3588–3596, 17 out. 2024.
- [75] GIANCOLA, D. T. et al. Degradation exposure scenario in the Brazilian Amazon: Edge effect on hyperdominant C-cycle tree species. **Forest Ecology and Management**, v. 562, p. 121926, jun. 2024.
- [76] SILVA, T. F. M. R. The effect of fire-induced forest-degradation on rainfall: A causal inference analysis of the case of the Brazilian Amazon. **World Development Sustainability**, v. 5, p. 100162, dez. 2024.
- [77] WANG, G. et al. Fighting against forest fire: A lightweight real-time detection approach for forest fire based on synthetic images. **Expert Systems with Applications**, p. 125620, nov. 2024.
- [78] SOUZA, C. M. et al. Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. **Remote Sensing**, v. 12, n. 17, p. 2735, 25 ago. 2020.
- [79] GASPERINI, T.; YEŞİL, V.; TOSCANO, G. Machine learning and woody biomasses: Assessing wood chip quality for sustainable energy production. **Biomass and Bioenergy**, v. 193, p. 107527, fev. 2025.
- [80] GHOLAMI, K. et al. Developing thermal insulation concrete with enhanced mechanical strength using belitic calcium sulfoaluminate cement and wood chips. **Construction and Building Materials**, v. 447, p. 138146, out. 2024.
- [81] MARTINS, R. S. F. et al. Investigation of agro-industrial lignocellulosic wastes in fabrication of particleboard for construction use. **Journal of Building Engineering**, v. 43, p. 102903, nov. 2021.
- [82] KRISTINA PETROVIĆ, E.; THOMAS, C. A. Sustainability and toxicity of formaldehyde-based resins for composite wood products like plywood, particleboard and medium density fibreboard. Em: **Sustainability and Toxicity of Building Materials**. [s.l.] Elsevier, 2024. p. 389–415.
- [83] FAO. **World Food and Agriculture – Statistical Yearbook 2023**. Rome, Italy: FAO, 2023.

- [84] PALUDZYSZYN FILHO, E.; DOS SANTOS, P. E. T.; FERREIRA, C. A. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Embrapa Florestas Ministério da Agricultura e do Abastecimento Eucaliptos Indicados para Plantio no Estado do Paraná. **Embrapa Florestas**, 2006.
- [85] SHIMIZU, J. Y. **Pínus na silvicultura brasileira**. Colombo: Embrapa Florestas, 2008.
- [86] CHEN, W. H. et al. Two-step thermodegradation kinetics of cellulose, hemicelluloses, and lignin under isothermal torrefaction analyzed by particle swarm optimization. **Energy Conversion and Management**, v. 238, 15 jun. 2021.
- [87] SHEN, W. et al. Variation pattern in the macromolecular (cellulose, hemicelluloses, lignin) composition of cell walls in *Pinus tabulaeformis* tree trunks at different ages as revealed using multiple techniques. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 268, 1 maio 2024.
- [88] ZHANG, S.; MEI, Y.; LIN, G. Pyrolysis interaction of cellulose, hemicellulose and lignin studied by TG-DSC-MS. **Journal of the Energy Institute**, v. 112, 1 fev. 2024.
- [89] DE ARAUJO, H. J. B. **CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL MADEIRA**. 1. ed. Ituiutaba, MG: Barlavento: Embrapa, 2020.
- [90] CHEN, W. H. et al. Two-step thermodegradation kinetics of cellulose, hemicelluloses, and lignin under isothermal torrefaction analyzed by particle swarm optimization. **Energy Conversion and Management**, v. 238, 15 jun. 2021.
- [91] GUO, F. et al. Role of microfibril angle in molecular deformation of cellulose fibrils in *Pinus massoniana* compression wood and opposite wood studied by in-situ WAXS. **Carbohydrate Polymers**, v. 334, 15 jun. 2024.
- [92] BARBIERI, H. C. R.; SCOPEL, E.; REZENDE, C. A. **Investigação da influência de lignina e de hemicelulose nas propriedades de filmes de acetato de celulose**. Campinas: [s.n.].
- [93] MIYABAYASHI, M. et al. Fungal invasion of cellulosic skeletal substrates with a hierarchical structure of wood. **International Biodeterioration and Biodegradation**, v. 192, 1 jul. 2024.
- [94] GRAÇA, M. C. E.; SHIMIZU, J. Y.; TAVARES, F. R. CAPACIDADE DE REBROTA E DE ENRAIZAMENTO DE *Eucalyptus benthamii*. **Boletim de Pesquisa Florestal**, v. 39, n. Madeira, p. 135–138, jul. 1999.
- [95] DE AGUIAR, A. V. **Cultivo de Pínus**. 2. ed. Curitiba, Paraná: Embrapa, 2014. v. 1
- [96] MUNHOZ, J. S. B. Juliana_Soares_Biruel_Munhoz. 2011.
- [97] MEN, J. et al. Synthesis of near net-shape carbon aerogel composites for high-temperature thermal insulators with complex structures. **Ceramics International**, dez. 2024.
- [98] PERERA, Y. S. et al. Investigation of the effect of extrusion process parameters and filler loading on the performance of LDPE composites reinforced with eggshell powder. **Composites Part C: Open Access**, v. 16, p. 100561, mar. 2025.

- [99] CHAI, X. et al. Mechanical property prediction and configuration effect exploration of particulate reinforced metal matrix composites via an interpretable deep learning approach. **Materials Science and Engineering: A**, p. 147880, jan. 2025.
- [100] ZHOU, M. et al. Integration of MXene and polymer: Unlocking the full potential of multifunctional composites for electromagnetic interference shielding. **Journal of Materials Science & Technology**, v. 226, p. 12–35, ago. 2025.
- [101] AYYAMPILLI, S. P.; SURESH, R. Study on mechanical and flammability properties of natural fibre polymer composites. **Green Materials**, p. 1–11, 20 jan. 2025.
- [102] EYYUBOVA, E. et al. Synthesis, X-ray analysis, specific electric conductivity study and antioxidant activity of novel compound based on 3-(1-phenyl-2,3-dimethylpyrazolone-5)azopentadione-2,4. **Journal of the Indian Chemical Society**, v. 101, n. 12, p. 101473, dez. 2024.
- [103] NOËL, A. et al. Identification of five volatile organic compounds that trigger hygienic and recapping behaviours in the honey bee (*Apis mellifera*). **International Journal for Parasitology**, fev. 2025.
- [104] NASROLLAHZADEH, M. et al. Polymer supported copper complexes/nanoparticles for treatment of environmental contaminants. **Journal of Molecular Liquids**, v. 330, p. 115668, maio 2021.
- [105] DE SOUZA, L. D. S. et al. **ADESIVOS UREIA-FORMALDEÍDO E SUA APLICAÇÃO NA PRODUÇÃO DE PAINÉIS DE MADEIRA**. (Embrapa, Ed.)FLORIANÓPOLIS, Santa Catarina: Embrapa: Embrapa, jul. 2017. Disponível em: <<https://proceedings.science/cbctem/trabalhos/adesivos-ureia-formaldeido-e-sua-aplicacao-na-producao-de-paineis-de-madeira?lang=pt-br>>. Acesso em: 20 out. 2024
- [106] CELESTINO SILVA, F. J. **Projecto de Desenvolvimento em Ambiente Empresarial**. Lisboa: [s.n.]. Disponível em: <<https://hdl.handle.net/10216/58391>>. Acesso em: 20 out. 2024.
- [107] SILVA, D. A. L. et al. Influence of fabrication parameters on the physical and mechanical properties of medium density particleboards. **Revista Materia**, v. 25, n. 1, 2020.
- [108] ALEMDAR, A.; SAIN, M. Biocomposites from wheat straw nanofibers: Morphology, thermal and mechanical properties. **Composites Science and Technology**, v. 68, n. 2, p. 557–565, fev. 2008.
- [109] CARVALHO SANTOS, L. **SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE ADESIVOS LIGNINA-FENOL-FORMALDEÍDO PARA MADEIRA E DERIVADOS**. Dissertação (mestrado)—Viçosa, Minas Gerais: Universidade Federal de Viçosa, 24 fev. 2016.
- [110] DA SILVA, M. A. et al. Utilização de lignosulfonato e adesivo Fenol-Formaldeído na produção de painéis aglomerados. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 45, n. 115, 1 set. 2017.
- [111] ESSID, S. et al. Comparison of the properties of flax shives based particleboards prepared using binders of bio-based lignin and partially bio-based

epoxy resin. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 109, 1 set. 2021.

[112] HERRADON, M. P. et al. Produção e avaliação de painéis de partículas com resíduo de *Pinus oocarpa* aglutinadas com dois tipos de resinas. **Caderno Pedagógico**, v. 20, n. 4, p. 889–902, 17 nov. 2023.

[113] SOUZA, A. M. et al. Wood-based composite made of wood waste and epoxy based ink-waste as adhesive: A cleaner production alternative. **Journal of Cleaner Production**, v. 193, p. 549–562, 20 ago. 2018.

[114] MAY, C. **Epoxy Resins**. 2. ed. New York: Routledge, 2018.

[115] CARDOSO, O. R.; DE CARVALHO BALABAN, R. Preparação de Resinas de Poliuretana à Base de Óleo de Mamona e Dietanolamina e sua Aplicação em Circuitos Eletroeletrônicos. **Polimeros**, v. 23, n. 4, p. 552–558, 2013.

[116] COUTO, J. P. M. et al. Paineis MDP com resina poliuretana à base de óleo de mamona com adição de cimento. **Ambiente Construído**, v. 20, n. 3, p. 661–669, jul. 2020.

[117] VILAR, W. **Química e tecnologia dos poliuretanos**. 3.ed. ed. Rio de Janeiro: Vilar Consultoria, 2004.

[118] LIMBERGER, H. J. et al. POLIURETANOS BASEADOS EM ÓLEO DE MAMONA. **Revista Jovens Pesquisadores**, v. 3, p. 6–16, 2013.

[119] SHIELDS, J. **Adhesives Handbook**. 3. ed. Chatham: Elsevier, 1984.

[120] DA SILVA, M. J. **Preparação e Caracterização Elétrica do Compósito de Poliuretano/Negro de Fumo**. Ilha Solteira, São Paulo: Universidade Estadual Paulista., 21 ago. 2009.

[121] XIE, H.-Q.; GUO, J.-S. **Room temperature synthesis and mechanical properties of two kinds of elastomeric interpenetrating polymer networks based on castor oil**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/europolj>.

[122] JEEVANANDA, T.; SIDDARAMAIAH. Synthesis and characterization of polyaniline filled PU/PMMA interpenetrating polymer networks. **European Polymer Journal**, v. 39, n. 3, p. 569–578, mar. 2003.

[123] HIRANOBE, C. T. **Reciclagem de resíduo de poliuretano proveniente da indústria de refrigeradores como carga em compósitos de borrachas SBR/BN para aplicação industrial**. Rosana - São Paulo: [s.n.]. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/250755>>. Acesso em: 20 out. 2024.

[124] SONNENSCHNEIN, M. F. **Polyurethanes: Science, Technology, Markets, and Trends**. 1. ed. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2014.

[125] IONESCU, M. **Chemistry and Technology of Polyols for polyurethanes**. 2. ed. Shawbury, Shrewsbury, Shropshire, United Kingdom: Smithers Rapra Technology Ltd, 2016. v. 1

[126] OGUNNIYI, D. S. **Castor oil: A vital industrial raw material**. **Bioresource Technology**, jun. 2006.

[127] SAMBUGARO, R. **UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO” FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS CAMPUS DE BOTUCATU ESTÁGIOS FOLIARES, FENOLOGIA DA SERINGUEIRA (Hevea**

- spp.) **E INTERAÇÃO COM *Microcycilus ulei* (MAL DAS FOLHAS)**. Tese (Doutorado)—Botucatu: Universidade Estadual Paulista, fev. 2007.
- [128] ALVES, M. R. DA C. **Estudo da borracha natural para utilização em períodos de entre-safra num mesmo composto**. Campinas, SP: Universidade Estadual de Campinas, 29 nov. 2004.
- [129] DA CUNHA, A. G.; DA SILVA, J. C.; FERREIRA, C. H. C. **Seringueira PB 324**. Goianésia-GO, Planaltina-DF e Pontes e Lacerda-MT, 2021. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/en/busca-de-solucoes-tecnologicas/-/produto-servico/6755/seringueira-pb-324>>. Acesso em: 10 jul. 2024
- [130] JOSÉ, J. I. G.; ALBUQUERQUE, M. **Características Botânicas do gênero Hevea**. 2. ed. Belém, PA: Embrapa, 2000.
- [131] BATISTA MARTIN, N.; TOLEDO ARRUDA, S. Informações Econômicas. **Informações Econômicas**, v. 23, n. 9, p. 47f, set. 1993.
- [132] MORTON, M. **Rubber Technology**. 3. ed. Akron, Ohio: Springer Netherlands, 2012.
- [133] JOSEPH, S.; JACOB, M.; THOMAS, S. **Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites**. 1. ed. [s.l.] CRC Press, 2005.
- [134] DA SILVA, M. J. **Obtenção e caracterização de nanocompósitos de borracha natural reforçada com nanofibras de celulose recobertas com polianilina**. Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista - UNESP, 2013.
- [135] KINGKOHYAO, N. et al. Synergistic effect of zinc ions from tire waste and modified zinc oxide on mechanical, thermo-mechanical and antibacterial properties in epoxidized natural rubber composites. **Industrial Crops and Products**, v. 225, p. 120577, mar. 2025.
- [136] RODAK, A. et al. Waste tire rubber with low and high devulcanization level prepared in the planetary extruder. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 43, p. e01193, abr. 2025.
- [137] NANTHANASIT, P. et al. Effective natural rubber vulcanization using electron beam irradiation and DFT driven cross-linking agents. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 228, p. 112390, mar. 2025.
- [138] INNES, J. R. et al. Effect of solid-state shear milled natural rubber particle size on the processing and dynamic vulcanization of recycled waste into thermoplastic vulcanizates. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 32, p. e00424, jul. 2022.
- [139] SUN, C. et al. The use of crude carbon dots as green, low-cost and multifunctional additives to improve the curing, mechanical, antioxidative and fluorescence properties of epoxy natural rubber/silica composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 182, p. 108177, jul. 2024.
- [140] NAKASON, C. et al. Sustainable multi-functional additives: Zinc soaps from vegetable oil and fatty acids in natural rubber compounds. **Industrial Crops and Products**, v. 217, p. 118827, out. 2024.
- [141] CHANDRASEKARAN, V. C. Note on Coloring of Rubbers. Em: WILLIAM ANDREW PUB. (Ed.). **Essential Rubber Formulary**. 1. ed. Norwich, NY: Elsevier, 2007. p. 14–15.

- [142] DE OLIVEIRA, R. C. et al. Influence of leather fiber on modulus of elasticity in bending test and of bend strength of particleboards. **Materials Research**, v. 25, 2021.
- [143] GILIO, C. G. et al. Produção de painéis aglomerados empregando seringueira, teca e poliuretano derivado de óleo de mamona. **Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, n. 57, p. 86, 19 dez. 2021.
- [144] ASTM D2084-11. Standard Test Method for Rubber Property-Vulcanization Using Oscillating Disk Cure Meter 1. 2017.
- [145] ABNT NBR 14810-2. **Painéis de partículas de média densidade Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio**. (ABNT, Ed.) **Associação Brasileira de Normas Técnicas** Rio de Janeiro, RJ, 27 set. 2024. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/pnm.aspx?Q=N3h3MjRVVGp4MjUydHp6emV1a2JVdHFMZVZYeUlnWjNtNE5jSUQ5cXp0RT0=>>>. Acesso em: 23 out. 2024
- [146] ASTM D412-16. Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers – Tension. 2021.
- [147] ASTM D5963-04. **Test Method for Rubber Property Abrasion Resistance (Rotary Drum Abrader)**. West Conshohocken, PA ASTM International, , 1 nov. 2019.
- [148] ASTM D2240-15. Standard Test Method for Rubber Property-Durometer Hardness 1. 2021.
- [149] FLORY, P. J.; REHNER, J. Statistical Mechanics of Cross-Linked Polymer Networks I. Rubberlike Elasticity. **The Journal of Chemical Physics**, v. 11, n. 11, p. 512–520, 1 nov. 1943.
- [150] ASTM D297. **Test Methods for Rubber Products Chemical Analysis**. West Conshohocken, PA ASTM International, , 1 nov. 2021.
- [151] ASTM D882-18. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics 1. 2018.
- [152] JAMES E. MARK; BURAK ERMAN; C. MICHAEL ROLAND. **The Science and Technology of Rubber**. [s.l.] Elsevier, 2013.
- [153] AKIBA, M. Vulcanization and crosslinking in elastomers. **Progress in Polymer Science**, v. 22, n. 3, p. 475–521, 1997.
- [154] CORAN, A. Y. Chemistry of the vulcanization and protection of elastomers: A review of the achievements. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 87, n. 1, p. 24–30, 3 jan. 2003.
- [155] PETERSEN, S. Polyurethanes, Chemistry and Technology, Teil I: Chemistry, von *J. H. Saunders* und *K. C. Frisch* . Band XVI der Reihe: High Polymers, a Series of Monographs on the Chemistry, Physics, and Technology of High Polymer Substances, herausgeg. von *H. Mark, P. J. Flory, C. S. Marvel, H. W. Melville* . Interscience Publishers, a Division of J. Wiley & Sons, New York-London 1962. 1. Aufl., XV, 384 S., zahlr. Tab., geb. £ 5.5.0. **Angewandte Chemie**, v. 75, n. 21, p. 1039–1039, 7 nov. 1963.
- [156] PETROVIĆ, Z. S. Polyurethanes from Vegetable Oils. **Polymer Reviews**, v. 48, n. 1, p. 109–155, 15 fev. 2008.

- [157] LEVCHIK, S. V; WEIL, E. D. Thermal decomposition, combustion and fire-retardancy of polyurethanes—a review of the recent literature. **Polymer International**, v. 53, n. 11, p. 1585–1610, 30 nov. 2004.
- [158] ZHU, S. et al. Fluorinated natural rubber with enhanced strength and excellent resistance to ozone, organic solvent, and acid and alkali via in situ reactive melt extrusion. **Polymer Degradation and Stability**, v. 228, 1 out. 2024.
- [159] SAKULKHAEMARUETHAI, C.; JAKARBUTR, W.; CHAILAD, W. Accelerated vulcanisation of natural rubber latex sheets using microwave energy: Mechanical and thermal performance improvements. **Results in Engineering**, v. 26, p. 105197, jun. 2025.
- [160] TIAN, L.; QIU, L.; LIU, Y. Fabrication of integrally hydrophobic self-compacting rubberized mortar with excellent waterproof ability, corrosion resistance and stable mechanical properties. **Construction and Building Materials**, v. 304, p. 124684, out. 2021.
- [161] LIMA, L. R. M. et al. Sustainable Fibrous Biocomposites for Tissue Engineering From Renewable Polymers via Solution Blow Spinning. **Polymer Engineering & Science**, v. 66, n. 1, p. 497–512, 7 jan. 2026.
- [162] YANG, C. et al. Mechanism of chitosan-cerium complex in enhancing the mechanical properties of natural rubber: Insights into vulcanization kinetics and strain-induced crystallization. **Polymer**, v. 337, p. 129020, out. 2025.
- [163] **Polymer Blends**. [s.l.] Elsevier, 1978.
- [164] LESZEK A. UTRACKI; CHARLES A. WILKIE. **Polymer Blends Handbook**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2014.
- [165] PORTER, M. Rubber technology handbook werner hofmann, carl hanser verlag, munich, 1989. pp. xv + 611, price dm 86.00. isbn 3–446–14895–7. **British Polymer Journal**, v. 23, n. 4, p. 359–359, 11 jan. 1990.
- [166] SANTOS, R. J. DOS et al. Sugarcane bagasse ash: new filler to natural rubber composite. **Polímeros**, v. 24, n. 6, p. 646–653, dez. 2014.
- [167] MELO, D. S. et al. Analyzing the Reinforcement of Multiwalled Carbon Nanotubes in Vulcanized Natural Rubber Nanocomposites Using the Lorenz–Park Method. **Applied Sciences**, v. 14, n. 19, p. 8973, 5 out. 2024.
- [168] LAZIM, N. H.; SHAMSUDIN, S. A.; MOHD HIDZIR, N. Mechanical and thermal studies on modified 50/50 natural rubber latex/poly(styrene-block-isoprene-block-styrene) blend by gamma irradiation and comparison with sulphur and peroxide vulcanization methods. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 207, 1 jun. 2023.
- [169] CUI, S. et al. Preparation and microstructural and thermal properties of a vulcanized Eucommia ulmoides gum modified asphalt. **Construction and Building Materials**, v. 408, 8 dez. 2023.
- [170] YUE, C. et al. Controlled pre-vulcanization of natural rubber latex for high-performance tire puncture sealants. **Polymer**, v. 343, p. 129443, jan. 2026.
- [171] SANTOS, R. J. et al. Recycling leather waste: Preparing and studying on the microstructure, mechanical, and rheological properties of leather waste/rubber composite. **Polymer Composites**, v. 36, n. 12, p. 2275–2281, 29 dez. 2015.

- [172] SANTOS, R. L. B. DOS et al. Morphological, Electrical, and Mechanical Characterization of a Sustainable Three-Phase Composite Based on Natural Rubber, Leather Residue, and PZT Particles. **Research, Society and Development**, v. 14, n. 10, p. e164141049793, 28 out. 2025.
- [173] LIMA, L. R. M. et al. Fibrous-biocomposites scaffold of natural rubber with bioactive glass–ceramic particles obtained by solution blowing spinning. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 142, n. 10, 10 mar. 2025.
- [174] ZHU, G.; DUFRESNE, A. Synergistic reinforcing and cross-linking effect of thiol-ene-modified cellulose nanofibrils on natural rubber. **Carbohydrate Polymers**, v. 278, p. 118954, fev. 2022.
- [175] PIMENTA, E. M. et al. Planting spacing and genotype affected the tree growth and variation of wood density and lignin content along Eucalyptus trunks. **Industrial Crops and Products**, v. 222, p. 119595, dez. 2024.
- [176] DURAN, A. J. F. P. et al. Evaluation of physical and mechanical properties in medium density particleboards made from sugarcane bagasse and plastic waste (HDPE) at different pressing temperatures. **Industrial Crops and Products**, v. 223, p. 120190, jan. 2025.
- [177] SANTOS JUNIOR, A. J. et al. Epoxy as an Alternative Resin in Particleboard Production with Pine Wood Residues: Physical, Mechanical, and Microscopical Analyses of Panels at Three Resin Proportions. **Forests**, v. 16, n. 2, p. 196, 22 jan. 2025.
- [178] DE CARVALHO, F. A. et al. Eco-friendly particleboard production: Integrating recycled PET and bio-based pine resin adhesives. **BioResources**, v. 20, n. 2, p. 3443–3452, 18 mar. 2025.
- [179] VIRÁG, L. et al. Determination of the most significant rubber components influencing the hardness of natural rubber (NR) using various statistical methods. **Heliyon**, v. 10, n. 3, p. e25170, fev. 2024.
- [180] SILVA, M. J. et al. Three-phase bio-nanocomposite natural-rubber-based microfibers reinforced with cellulose nanowhiskers and 45S5 bioglass obtained by solution blow spinning. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 140, n. 45, 5 dez. 2023.
- [181] RODRIGUES, F. R. et al. Particleboard Composite Made from Pinus and Eucalyptus Residues and Polystyrene Waste Partially Replacing the Castor Oil-Based Polyurethane as Binder. **Materials Research**, v. 26, n. suppl 1, 2023.
- [182] WANG, X. et al. Enhancing water resistance and flame retardancy of wood through phytic acid catalyzed in-situ polyesterification. **Industrial Crops and Products**, v. 215, 1 set. 2024.
- [183] CHE, W. et al. Fire-retardant anti-microbial robust wood nanocomposite capable of fire-warning by graded-penetration impregnation. **Composites Part B: Engineering**, v. 280, 1 jul. 2024.
- [184] PASSAUER, L. A case study on the thermal degradation of an acrylate-type polyurethane wood coating using thermogravimetry coupled with evolved gas analysis. **Progress in Organic Coatings**, v. 157, 1 ago. 2021.

- [185] RANTUCH, P. et al. Is biochar a suitable fire retardant for furfurylated wood? **Composites Part C: Open Access**, v. 14, 1 jul. 2024.
- [186] LOPES, F. C. R.; TANNOUS, K. Coconut fiber pyrolysis: specific heat capacity and enthalpy of reaction through thermogravimetry and differential scanning calorimetry: 504527. **Thermochimica Acta**, v. 707, 1 jan. 2022.
- [187] LEE, H. et al. A novel approach utilising phosphorylated casein for fire-retardant and formaldehyde-free medium density wood fibreboards. **Industrial Crops and Products**, v. 215, p. 118608, set. 2024.
- [188] MENSAH, B. et al. Vulcanization kinetics and reinforcement behaviour of natural rubber-carbon black composites: Addition of Shea-butter versus aromatic oil as plasticizers. **Heliyon**, v. 10, n. 4, 29 fev. 2024.
- [189] MIEDZIANOWSKA-MASŁOWSKA, J. et al. Waste management of straw to manufacture biochar: An alternative reinforcing filler for natural rubber biocomposites. **Industrial Crops and Products**, v. 222, p. 119629, dez. 2024.
- [190] DE CARVALHO, F. A. et al. Eco-friendly particleboard production: Integrating recycled PET and bio-based pine resin adhesives. **BioResources**, v. 20, n. 2, p. 3443–3452, 18 mar. 2025.
- [191] LAHTELA, V.; KÄRKI, T. A Study on the Effect of Construction and Demolition Waste (CDW) Plastic Fractions on the Moisture and Resistance to Indentation of Wood-Polymer Composites (WPC). **Journal of Composites Science**, v. 5, n. 8, p. 205, 3 ago. 2021.
- [192] TIAN, L.; QIU, L.; LIU, Y. Fabrication of integrally hydrophobic self-compacting rubberized mortar with excellent waterproof ability, corrosion resistance and stable mechanical properties. **Construction and Building Materials**, v. 304, p. 124684, out. 2021.
- [193] HU, J. et al. Effects of the surface chemical groups of cellulose nanocrystals on the vulcanization and mechanical properties of natural rubber/cellulose nanocrystals nanocomposites. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 230, p. 123168, mar. 2023.
- [194] KIM, J. K.; PAL, K. **Recent Advances in the Processing of Wood-Plastic Composites**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. v. 32
- [195] PIZZI, A. (ED.). **Wood Adhesives**. [s.l.] CRC Press, 2018.
- [196] FENGEL, D. ; W. G. **Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions**. [s.l.: s.n.].
- [197] OWELL, R. M. **Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites**. [s.l.: s.n.]. v. 2
- [198] FERRY, J. D. **Viscoelastic Properties of Polymers**. 3. ed. ed. New York: [s.n.].
- [199] ROWELL, R. M. **Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites**. 2. ed. ed. Boca Raton: [s.n.].
- [200] VÉLEZ, J. S.; VELÁSQUEZ, S.; GIRALDO, D. Mechanical and rheometric properties of gilsonite/carbon black/natural rubber compounds cured using conventional and efficient vulcanization systems. **Polymer Testing**, v. 56, p. 1–9, dez. 2016.

- [201] ZHANG, N. et al. A biomimetic mineralized wood-based composite material with water-mediated reversible switching between dryness–rigidity and wetness–flexibility. **Industrial Crops and Products**, v. 222, p. 119839, dez. 2024.
- [202] PIMENTA, E. M. et al. Planting spacing and genotype affected the tree growth and variation of wood density and lignin content along Eucalyptus trunks. **Industrial Crops and Products**, v. 222, p. 119595, dez. 2024.
- [203] ASTM D5963-04. Standard Test Method for Rubber Property – Abrasion Resistance (Rotary Drum Abrader). 2019.
- [204] AL-MAQDASI, Z. et al. Characterization of wood and Graphene Nanoplatelets (GNPs) reinforced polymer composites. **Materials**, v. 13, n. 9, 1 maio 2020.
- [205] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D882-18: Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting, ASTM International. **Www.Astm.Org**, n. August, 2018.
- [206] ABNT NBR 14810-1. **Painéis de partículas de média densidade. Parte 1: Terminologia.** (ABNT, Ed.) **Associação Brasileira de Normas Técnicas** Rio de Janeiro, RJ, 11 jan. 2014. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/pnm.aspx?Q=YUorUE1oVII4MnhnZ1V6enZPaDkr cytTOUVHZDd2aE13NDdRbGFJWFV1OD0=>>>. Acesso em: 23 out. 2024
- [207] ISO - 37:2024. **Rubber, vulcanized or thermoplastic — Determination of tensile stress-strain properties.** , jul. 2024. Disponível em: www.iso.org
- [208] ASTM D638-22. Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting 1. 2022.
- [209] ASTM D695-15. Designation: D695 – 15 Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics 1. 2019.