



ANA CAROLINA CORRÊA FURTINI

**ADESIVO NATURAL À BASE DE CARDANOL MODIFICADO
COM NANOPARTÍCULAS DE SÍLICAS PARA PRODUÇÃO
DE PAINÉIS MDP (*Medium Density Particleboard*)**

**LAVRAS – MG
2024**

ANA CAROLINA CORRÊA FURTINI

**ADESIVO NATURAL À BASE DE CARDANOL MODIFICADO COM
NANOPARTÍCULAS DE SÍLICAS PARA PRODUÇÃO DE PAINÉIS MDP**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Biomateriais, área de concentração em Compósitos e Nanocompósitos Lignocelulósicos, para a obtenção do título de Doutor.

Dr. José Benedito Guimarães Júnior
(Orientador, DEG/ESCOLAENG/UFLA)

Dr. Fábio Akira Mori
(Coorientador, DCF/ESAL/UFLA)

Dr.^a Flávia Maria Silva Brito
(Coorientadora, ESALQ/USP)

Dr.^a Josy Anteveli Osajima Furtini
(Coorientadora, DQUI/CCN/UFPI)

**LAVRAS – MG
2024**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Furtini, Ana Carolina Corrêa.

Adesivo natural à base de cardanol modificado com nanopartículas de sílica para produção de painéis MDP. / Ana Carolina Corrêa Furtini. - 2024.

88 p. : il.

Orientador(a): José Benedito Guimarães Júnior.

Coorientador(a): Fábio Akira Mori, Flávia Maria Silva Brito,
Josy Anteveli Osajima Furtini.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2024.

Bibliografia.

1. Adesivo nanomodificado. 2. Casca do caju. 3. Fonte renovável. I. Guimarães Júnior, José Benedito. II. Akira Mori, Fábio. III. Silva Brito, Flávia Maria. IV. Osajima Furtini, Josy Anteveli. V. Título.

ANA CAROLINA CORRÊA FURTINI

**ADESIVO NATURAL À BASE DE CARDANOL MODIFICADO COM
NANOPARTÍCULAS DE SÍLICAS PARA PRODUÇÃO DE PAINÉIS MDP**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Biomateriais, área de concentração em Compósitos e Nanocompósitos Lignocelulósicos, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 29 de novembro de 2024.

Dr. José Benedito Guimarães Júnior – UFLA.
Dr.^a Bárbara Maria Ribeiro Guimarães de Oliveira – UFC.
Dr. Lorrان de Sousa Arantes – UFLA
Dr. Rosalvo Maciel Guimarães Neto - UFPI
Dr.^a Thaís Brito Sousa - UEMG

Dr. José Benedito Guimarães Júnior
(Orientador, DEG/ESCOLAENG/UFLA)

Dr. Fábio Akira Mori
(Coorientador, DCF/ESAL/UFLA)
Dr.^a Flávia Maria Silva Brito
(Coorientadora, ESALQ/USP)
Dr.^a Josy Antevéli Osajima Furtini
(Coorientadora, DQUI/CCN/UFPI)

**LAVRAS – MG
2024**

AGRADECIMENTOS

A conclusão desta tese marca não só o término de uma importante fase acadêmica, mas a realização de um sonho que sempre esteve presente em minha vida. Um sonho que, agora, se torna realidade graças ao apoio e dedicação de tantas pessoas que estiveram ao meu lado nessa jornada.

Agradeço primeiramente a Deus, que iluminou meu caminho e me deu forças para seguir em frente, mesmo diante dos desafios. Sem Sua presença em minha vida, este sonho não teria se concretizado.

Aos meus pais, Marco Antonio e Roselene que sempre acreditaram em mim e nunca mediram esforços para me apoiar. Vocês foram e sempre serão a base sobre a qual construo meus sonhos. Cada conquista minha é também de vocês!

À toda minha família e amigos, por estarem sempre ao meu lado, oferecendo apoio, motivação e carinho ao longo de toda essa jornada.

Aos meus colegas e amigos de laboratório, que estiveram ao meu lado nesta caminhada. A troca de ideias, a convivência e o apoio mútuo foram essenciais para a conclusão desta etapa.

À Universidade Federal de Lavras e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais, pela oportunidade de realizar o doutorado.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pela concessão da bolsa de estudos (código de financiamento 001).

À Empresa Resibras Cashol, pela doação do cardanol.

Ao meu orientador Prof. Dr. José Benedito, que me guiou com sabedoria, paciência e incentivo. Sua orientação foi fundamental para que eu pudesse transformar este sonho em realidade e alcançar a realização deste trabalho.

Aos meus coorientadores, Prof. Dr. Fábio Akira, Prof. Dr.^a Flávia Maria e Prof. Dr.^a Josy Antevelli, por toda ajuda e parceria ao longo desta jornada.

A toda equipe e amigos da UEPAM/NEPAM, pelo companheirismo, amizade e apoio na realização deste trabalho.

Por fim, deixo meu sincero agradecimento a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste projeto. Muito obrigada!

RESUMO

Os painéis de partículas de média densidade (MDP), são amplamente utilizados em todo o mundo para confecções de móveis e pisos. A ureia formaldeído (UF) é o adesivo sintético, comumente utilizado para a confecção destes painéis, devido seu baixo custo, incolor e tempo de cura rápido. Apesar destas propriedades favoráveis, uma das principais desvantagens do adesivo UF é a emissão de formaldeído livre nos painéis de madeira, que causam riscos à saúde, como, sintomas respiratórios alérgicos, não alérgicos e de mucosas, bem como o câncer. Para a redução de emissão de formaldeído, estudos indicam que a inserção de nanopartículas de sílica em adesivos à base de formaldeído tem demonstrado resultados significantes para a sua redução. Além disso, levando em consideração as questões ambientais e a sustentabilidade da matéria-prima, à busca por substituição do adesivo UF, de origem petrolífera, impulsiona o desenvolvimento de adesivos que tenham base em recursos renováveis ou biológicos, e que apresentem menores taxas de emissão de formaldeído. Sendo assim, o cardanol obtido a partir do líquido da casca de castanha de caju, proveniente do cajueiro, é considerada uma fonte renovável aromática promissora dos fenóis derivados do petróleo, devido sua alta reatividade com formaldeído tanto pela via resol quanto novalac. Neste contexto, o objetivo deste estudo é avaliar o potencial de utilização do adesivo cardanol-formaldeído, modificado com diferentes porcentagens de nanopartículas de sílica e teores de adesivo, para a produção de painéis MDP. Para a produção dos painéis foi utilizado a madeira de *Pinus oocarpa*, com dimensões de 30 x 30 x 1,5 cm (comprimento x largura x espessura), densidade nominal de 0,70 g/cm³ e os parâmetros do ciclo de prensagem foram de 15 minutos, pressão de 4 MPa e temperatura de 160°C. A síntese do adesivo cardanol-formaldeído ocorreu via resol. Ao final, foram adicionados nanopartículas de sílica nas seguintes proporções em massa, com base no teor de sólidos do adesivo: 0, 1 e 2%. Os painéis foram produzidos com teores de adesivos em proporções de 8, 10, 12 e 14% em relação a massa seca das partículas. Foram avaliadas as propriedades físicas, químicas e térmicas dos adesivos, e as propriedades físicas, mecânicas, interface madeira-adesivo, emissão de formaldeído, isolamento térmico e a combustibilidade dos painéis. A análise das propriedades dos painéis mostrou que a adição de 2% de SiO₂NPs ao adesivo com 8% de teor influenciou a absorção de água após 2 horas (AA2h), inchamento em espessura (IE) e taxa de não retorno de espessura (TNRE). Nas propriedades mecânicas, a adição de nanopartículas impactou negativamente, exceto na Dureza Janka. Todos os painéis atenderam à classe E1 de baixa emissão de formaldeído. A partir das análises conjuntas dos resultados, conclui-se que a adição das SiO₂NPs não foi favorável ao adesivo cardanol-formaldeído diante as propriedades mecânicas, e o teor de adesivo a partir de 11% atingem as normas estabelecidas para a comercialização das placas.

Palavras-chave: adesivo nanomodificado; casca do caju; fonte renovável; emissão de formaldeído.

ABSTRACT

Medium Density Particle Boards (MDP) are widely used around the world for furniture and flooring. Urea formaldehyde (UF) is the synthetic adhesive commonly used for making these panels, due to its low cost, colorlessness and fast curing time. Despite these favorable properties, one of the main disadvantages of UF adhesive is the emission of free formaldehyde in wood panels, which causes health risks such as allergic, non-allergic and mucosal respiratory symptoms, as well as cancer. For the reduction of formaldehyde emissions, studies indicate that the insertion of silica nanoparticles in formaldehyde-based adhesives has shown significant results for its reduction. However, taking into account environmental issues and the sustainability of the raw material, the search for replacing the UF adhesive, which is of petroleum origin, drives the development of adhesives that are based on renewable or biological resources, and that present lower emission rates of formaldehyde. Therefore, the cardanol obtained from the cashew nut shell liquid, from the cashew tree, is considered a promising aromatic renewable source of petroleum-derived phenols, due to its high reactivity with formaldehyde both via resol and novalac. In this context, the objective of this study is to evaluate the potential use of cardanol-formaldehyde adhesive, modified with different percentages of silica nanoparticles and adhesive contents, for the production of MDP panels. For the production of the panels, *Pinus oocarpa* wood was used, with dimensions of 30 x 30 x 1.5 cm (length x width x thickness), nominal density of 0.70 g/cm³ and the parameters of the pressing cycle were 15 minutes, pressure of 4 MPa and temperature of 160°C. The synthesis of the cardanol-formaldehyde adhesive occurred via resol. At the end, silica nanoparticles were added in the following mass proportions, based on the solids content of the adhesive: 0, 1 and 2%. The panels were produced with adhesive contents in proportions of 8, 10, 12 and 14% in relation to the dry mass of the particles. The physical, chemical and thermal properties of the adhesives, and the physical, mechanical properties, wood-adhesive interface, formaldehyde emission, thermal insulation and combustibility of the panels were evaluated. The analysis of the panel properties showed that the addition of 2% SiO₂NPs to the adhesive with 8% content influenced the water absorption after 2 hours (WA2h), thickness swelling (TS) and thickness non-return rate (NTS). In the mechanical properties, the addition of nanoparticles had a negative impact, except for Janka hardness. All panels met the E1 class of low formaldehyde emission. From the joint analysis of the results, it is concluded that the addition of SiO₂NPs was not favorable to the cardanol-formaldehyde adhesive in terms of mechanical properties, and the adhesive content from 11% reaches the standards established for the commercialization of the panels.

Keywords: nanomodified adhesive; cashew shell; renewable source; formaldehyde emission.

INDICADORES DE IMPACTO

O estudo avaliou o potencial de utilização do adesivo cardanol-formaldeído, modificado com diferentes porcentagens de nanopartículas de sílica (SiO_2NPs) e teores de adesivo, para a produção de painéis MDP, resultando em contribuições relevantes nos âmbitos social, tecnológico e ambiental. Os painéis produzidos apresentaram propriedades físicas e mecânicas que atenderam aos requisitos normativos, enquanto o adesivo destacou-se por sua baixa emissão de formaldeído, sendo classificado como classe E1, um avanço significativo em termos de segurança e saúde ocupacional, dado que reduz o risco de exposição a substâncias cancerígenas. A utilização do cardanol, recurso renovável derivado de resíduos da casca da castanha de caju, fortalece a sustentabilidade do processo produtivo, promovendo o reaproveitamento de resíduos agrícolas e agregando valor a comunidades envolvidas no cultivo e processamento desse recurso. Por outro lado, a inclusão de nanopartículas de sílica, embora tenha impactado negativamente a viscosidade e a adesão do adesivo, evidenciou a necessidade de ajustes na formulação para otimizar sua aplicação industrial. Os resultados indicaram que a proporção ideal do adesivo cardanol-formaldeído, sem nanopartículas, é de 11%, atendendo às demandas técnicas e comerciais do setor de painéis de madeira. Essa abordagem potencializa a substituição de adesivos sintéticos convencionais, contribuindo para a redução do impacto ambiental associado à produção de compósitos lignocelulósicos e alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, em especial os objetivos 12 (Consumo e Produção Responsáveis), 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima) e 15 (Vida Terrestre). Além disso, o trabalho apresenta uma abordagem que atua positivamente nos territórios e comunidades produtoras de castanha de caju, promovendo a inclusão socioeconômica e o desenvolvimento local sustentável. Dessa forma, este estudo não apenas gera inovações tecnológicas no setor de painéis de madeira, mas também promove impacto social concreto ao valorizar cadeias produtivas regionais e minimizar a pegada ambiental do setor industrial.

IMPACT INDICATORS

The study evaluated the potential use of cardanol-formaldehyde adhesive, modified with different percentages of silica nanoparticles (SiO_2NPs) and adhesive contents, for the production of MDP panels, resulting in relevant contributions in the social, technological and environmental spheres. The panels produced presented physical and mechanical properties that met the regulatory requirements, while the adhesive stood out for its low formaldehyde emission, being classified as class E1, a significant advance in terms of occupational health and safety, given that it reduces the risk of exposure to carcinogenic substances. The use of cardanol, a renewable resource derived from cashew nut shell residues, strengthens the sustainability of the production process, promoting the reuse of agricultural waste and adding value to communities involved in the cultivation and processing of this resource. On the other hand, the inclusion of silica nanoparticles, although it negatively impacted the viscosity and adhesion of the adhesive, highlighted the need for adjustments in the formulation to optimize its industrial application. The results indicated that the ideal proportion of cardanol-formaldehyde adhesive, without nanoparticles, is 11%, meeting the technical and commercial demands of the wood panel sector. This approach enhances the replacement of conventional synthetic adhesives, contributing to the reduction of the environmental impact associated with the production of lignocellulosic composites and aligning with the UN Sustainable Development Goals (SDGs), especially goals 12 (Responsible Consumption and Production), 13 (Climate Action) and 15 (Life on Land). In addition, the work presents an approach that acts positively in cashew nut producing territories and communities, promoting socioeconomic inclusion and sustainable local development. Thus, this study not only generates technological innovations in the wood panel sector, but also promotes concrete social impact by valuing regional production chains and minimizing the environmental footprint of the industrial sector.

LISTA DE FIGURAS

PRIMEIRA PARTE

Figura 1 – Pannel MDP com sua estrutura em três camadas distintas.	16
Figura 2 – Classificação dos adesivos para madeira.	17
Figura 3 – Comparação do tamanho das estruturas em diferentes escalas.....	21
Figura 4 – Representação da unidade estrutural da sílica com dois tetraedros ligados	22
Figura 5 – Seção transversal da castanha de caju.....	25
Figura 6 – Estrutura química do cardanol e suas características	27

SEGUNDA PARTE: ARTIGO

Figura 1 – Produção dos painéis MDP a) caju b) castanha de caju c) cardanol; d) síntese do adesivo e) SiO ₂ NPs f) amostras de painéis MDP	47
Figura 2 – Diagrama para obtenção da condutividade térmica dos painéis MDP.....	49
Figura 3 – Aparato utilizado para o teste de combustibilidade.	50
Figura 4 – Curvas TGA e DTG a) Em função do adesivo cardanol-formaldeído b) Em função do adesivo com 1% SiO ₂ NPs c) Em função do adesivo com 2% SiO ₂ NPs.	56
Figura 5 – Teor de umidade dos painéis: a) Em função do teor de adesivo	59
b) Em função das SiO ₂ NPs.....	59
Figura 6 – Absorção de água após 2 e 24 horas de imersão a) AA2h em função do teor de adesivo b) AA24h em função do teor de adesivo c) AA24h em função das SiO ₂ NPs.....	60
Figura 7 – Inchamento em espessura após 2 e 24 horas de imersão dos painéis a) Em função do teor de adesivo b) Em função das SiO ₂ NPs.....	62
Figura 8 – Taxa de não retorno de espessura dos painéis a) Em função do teor de adesivo b) Em função das SiO ₂ NPs.....	63
Figura 9 – Flexão estática a) MOE em função do teor de adesivo b) MOR em função do teor de adesivo c) MOE em função das SiO ₂ NPs d) MOR em função das SiO ₂ NPs.....	65
Figura 10 – Ligação interna dos painéis a) Em função do teor de adesivo b) Em função das SiO ₂ NPs.....	66
Figura 11 – Dureza Janka a) Em função do teor de adesivo b) Em função das SiO ₂ NPs... ..	68
Figura 12 – Compressão em função do teor de adesivo	69
Figura 13 – Imagens da estrutura interna dos painéis MDP obtidas por microscópio óptico de luz em função do teor de adesivo e adição de SiO ₂ NPs	70
Figura 14 – Emissão de formaldeído dos painéis	71
Figura 15 – Relação entre massa e tempo de combustão de painéis MDP produzidos com diferentes teor adesivo cardanol-formaldeído e adição de SiO ₂ NPs.	75
Figura 16 – Variação de temperatura durante o teste de inflamabilidade	75

LISTA DE TABELAS

PRIMEIRA PARTE

Tabela 1 – Características dos adesivos livres de formaldeído. 24

SEGUNDA PARTE: ARTIGO

Tabela 1 – Plano experimental. 46

Tabela 2 – Caracterização química da madeira *P. oocarpa* 51

Tabela 3 – Caracterização do adesivo cardanol-formaldeído em função da concentração de nanopartículas de sílica (SiO₂NPs)..... 53

Tabela 4 – Densidade aparente e razão de compactação em função do teor de adesivo para produção de painéis MDP 57

Tabela 5 – Densidade aparente e razão de compactação em função da concentração de nanopartículas de sílicas (SiO₂NPs) nos adesivos para produção dos painéis MDP 58

Tabela 6 – Valores de Condutividade Térmica (λ), Resistência Térmica (RT) em função do teor de adesivo para produção de painéis MDP..... 73

Tabela 7 – Valores de Condutividade Térmica (λ), Resistência Térmica (RT) em função da concentração de nanopartículas de sílicas (SiO₂NPs) nos adesivos para produção dos painéis MDP 73

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE	12
1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Objetivo geral	14
1.2 Objetivos específicos	14
2 REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1 Painéis aglomerados (MDP - <i>Medium Density Particleboard</i>)	14
2.2 Adesivos para madeira.....	16
2.2.1 Ureia-formaldeído	18
2.2.2 Emissões de Formaldeído	18
2.3 Nanopartículas de sílica	20
2.3.1 Adição de nanopartículas de sílica em adesivos para painéis de madeira	22
2.4 Cardanol.....	24
3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	29
REFERÊNCIAS	30
SEGUNDA PARTE: ARTIGO	40
RESUMO	40
ABSTRACT	41
1 INTRODUÇÃO	42
2 MATERIAL E MÉTODOS	44
2.1 Obtenção e preparo do material lignocelulósico.....	44
2.2 Caracterização do material lignocelulósico.....	45
2.3 Síntese e caracterização dos adesivos	45
2.4 Produção dos painéis MDP	46
2.5 Caracterizações dos painéis	47
2.5.1 Avaliação das propriedades físicas e mecânicas dos MDP	47
2.5.2 Avaliação microestrutural da interface madeira-adesivo.....	48
2.5.3 Avaliação da emissão de formaldeído	48
2.5.4 Propriedades de isolamento térmico.....	48
2.5.5 Teste de combustibilidade.....	49
2.6 Análise estatística dos dados experimentais	50
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
3.1 Caracterização física e química do material lignocelulósico.....	50
3.2 Caracterização dos adesivos	52
3.3 Caracterização dos painéis	57
3.3.1 Propriedades físicas	57
3.3.2 Propriedades mecânicas	64
3.3.3 Avaliação microestrutural da interface madeira-adesivo	69
3.3.4 Avaliação da emissão de formaldeído	71
3.3.5 Teste de isolamento térmico	72
3.3.6 Teste de combustibilidade.....	74
4 CONCLUSÃO	76
5 AGRADECIMENTOS	76
6 REFERÊNCIAS	77

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

Anualmente no mundo, são produzidos cerca de 402 milhões de m³ de painéis à base de madeira (Food and Agriculture Organization of the United Nations FAO 2023). Dentre estes painéis, os painéis de partículas de média densidade (MDP) são amplamente utilizados. Para atender o consumo destes painéis, são fabricados em torno de 100 milhões de m³ de painéis aglomerados e MDP (Boussetta *et al.*, 2022; Hidayat *et al.*, 2022; Pędzik, *et al.*, 2021). Estes painéis são utilizados para confecções de móveis, pisos, confecções de divisórias, portas e placas de teto (J Ktay *et al.*, 2021, Imenez JR *et al.*, 2022; Ahmad *et al.*, 2022). Em 2023, o Brasil produziu 8,1 milhões de m³ de painéis MDP, consolidando-se como um dos principais produtores no mercado global, ocupando a 9ª posição no ranking mundial (Instituto Brasileiro de Árvores IBÁ, 2024).

O adesivo sintético comumente utilizado para a confecção dos painéis MDP é o adesivo ureia-formaldeído (UF) (Owodunni *et al.*, 2020). Isso ocorre, devido às suas vantagens, como, baixo custo, incolor, tempo de cura rápido (Liu *et al.*, 2018; Dazmiri *et al.*, 2019) resistência a microrganismos e abrasão, fácil adaptabilidade e excelente adesão à madeira (Khanjanzadeh *et al.*, 2019). Apesar de todas as suas propriedades favoráveis, as principais desvantagens do adesivo UF é a emissão de formaldeído nos painéis de partículas, especialmente em temperaturas mais altas, e a baixa durabilidade ou resistência dos painéis sob a influência da umidade ou da água (Dorieh *et al.*, 2022).

Um dos desafios deste adesivo é sua emissão de formaldeído, que podem causar graves problemas ambientais diante sua alta toxicidade e riscos à saúde, como sintomas respiratórios alérgicos, não alérgicos e de mucosas, bem como o câncer, resultando em um acúmulo global crescente de riscos a saúde humana (Barbu *et al.*, 2017). Neste contexto, a inclusão de nanoestruturas em adesivos para painéis de madeira vem proporcionando melhorias ao produto final, como à redução da emissão de formaldeído e bom desempenho físico-mecânico (Jasmani *et al.*, 2020). Ranjbaran *et al.* (2020) atribuíram que o acréscimo de nanopartículas de sílica no adesivo UF aumentou a estabilidade térmica do adesivo, devido às interações químicas-físicas criadas entre as macromoléculas da UF e as partículas de sílica. O outro efeito benéfico foi a redução da porcentagem de formaldeído livre no adesivo.

Além disso, a adição de nanopartículas de sílica em adesivos tem mostrado significativos benefícios em termos de propriedades mecânicas e de durabilidade dos painéis.

Os efeitos da nanopartículas de sílica sobre a estrutura e as propriedades de adesivos indicam que estas são promissoras em adesivos de madeira, pois tem capacidade de produzir materiais com alto desempenho (Lin *et al.*, 2005; Wang *et al.*, 2011). Estas nanopartículas agem como reforço, proporcionando uma matriz adesiva mais coesa e resistente, ou seja, fatores essenciais para a aplicação em ambientes que exigem alta durabilidade.

No entanto, levando em consideração as questões ambientais e a sustentabilidade da matéria-prima, à busca por substituição do adesivo UF, de origem petrolífera, impulsiona o desenvolvimento de adesivos que tenham base em recursos renováveis ou biológicos e que apresentem menores taxas de emissão de formaldeído livre (Din *et al.*, 2020; Hemmila *et al.*, 2017; Norström *et al.*, 2018). Porém é possível perceber, a dificuldade em substituir totalmente os adesivos sintéticos por alternativas de base renováveis, como por exemplo, a lignina, amido, proteína e tanino, pois muitas vezes, apresentam baixo desempenho de ligação em relação à resistência à água, e/ou não apresentam custos competitivos (Todorovic *et al.*, 2021). O cardanol é considerado uma fonte renovável aromática promissora aos fenóis derivados do petróleo (Caillol, 2018) devido sua alta reatividade com formaldeído, além de ser um subproduto agrícola barato, extraído do líquido da casca da castanha de caju, não tóxico, facilmente disponível e ecologicamente correto (Guo *et al.*, 2021).

Isso ocorre, devido às suas características estruturais únicas, tais como o anel benzênico rígido, bem como a longa e flexível cadeia alquil hidrofóbica com múltiplas ligações insaturadas. O cardanol também apresenta uma baixa volatilidade e viscosidade, tornando-se uma escolha adequada para preparar adesivos (Wang *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2019). Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2024) a estimativa para a produção de castanha de caju em casca (*in natura*) no Brasil em 2024, com base nas informações disponíveis até setembro, publicada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2024), é de 152,5 mil toneladas, um aumento previsto de 30,6% em comparação com o ano anterior,

É importante ressaltar que o cardanol é uma matéria-prima não alimentar, não requer água em grande quantidade, nutrientes de solo ou agrotóxicos. Como consequência, é altamente sustentável e tem benefícios sociais, econômicos e ambientais (Scaldeferri; Pasa, 2019). Contudo, alguns estudos já indicam o cardanol como substituto de adesivos petrolíferos. Furtini *et al.* (2022) por exemplo, em busca da substituição da UF nos painéis aglomerados, observaram que é possível substituição máxima de UF por cardanol em 5%, pois, nesta situação, os painéis atingem as normas estabelecidas para a comercialização. Outros estudos conduzidos por Khan *et al.* (2018), Zhang *et al.* (2020), Stalin e Shobhanadevi (2021); Faria *et al.* (2023) relataram o potencial da síntese de adesivos à base de cardanol-formaldeído.

Como complemento destas inovações, é fundamental avaliar a melhor proporção do teor de adesivo cardanol-formaldeído (8%, 10%, 12% e 14%) em relação à massa seca das partículas, modificado com nanopartículas de sílica, para a produção dos painéis MDP. Essa avaliação é crucial para otimizar as propriedades físico-mecânicas e a durabilidade dos painéis. Neste contexto, o objetivo deste estudo é avaliar o potencial de utilização do adesivo cardanol-formaldeído, modificado com diferentes porcentagens de nanopartículas de sílica e teores de adesivo, para a produção de painéis MDP.

1.1 Objetivo geral

Avaliar o potencial de utilização do adesivo cardanol-formaldeído, modificado com diferentes porcentagens de nanopartículas de sílica e teores de adesivo, para a produção de painéis MDP.

1.2 Objetivos específicos

- a) Avaliar a melhor proporção do teor de adesivo (8, 10, 12 e 14%) em relação à massa seca das partículas para a produção dos painéis;
- b) Avaliar o efeito das concentrações de nanopartículas de sílica (0, 1 e 2%) em relação à massa seca de adesivo para a produção dos painéis.
- c) Verificar o comportamento da ligação adesiva dos painéis a partir das propriedades físico-mecânica.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Painéis aglomerados (MDP - *Medium Density Particleboard*)

O surgimento dos painéis aglomerados se deu no início da década de 40 na Alemanha durante a Segunda Guerra Mundial, devido aos problemas de indisponibilidade de madeira de boa qualidade para a produção de painéis compensados. Por esse motivo, os resíduos de madeira passaram a ser utilizados na produção de painéis, como alternativa para suprir a demanda dos painéis compensados (Iwakiri; Trianoski, 2020). Os painéis aglomerados são denominados como compósitos naturais, devido à aglutinação de partículas lignocelulósicas ao adesivo

sintético, sendo normalmente usada o adesivo ureia-formaldeído (UF) e prensado sob calor e pressão (Oktay *et al.*, 2021).

A primeira indústria de painéis aglomerados no Brasil, entrou em operação durante a década de 60, denominada Placas do Paraná S.A, localizada na cidade de Curitiba-PR. A instalação da indústria marcou o início do desenvolvimento de painéis particulados como um dos principais fornecedores de matéria-prima, para indústria moveleira no Brasil (Iwakiri, 2013). Estes painéis ganharam popularidade no ramo da construção civil e na indústria moveleira, diante seu baixo custo comparado à madeira maciça, devido à utilização de resíduos lignocelulósicos, serragem ou aparas de madeira (Owodunni *et al.*, 2020). Porém no Brasil, estes painéis passaram por períodos de questionamentos, devido às suas limitações técnicas, como alta absorção de água, problemas quanto à fixação de parafusos, inchamento em espessura e usinagem das bordas (Melo, 2009)

Nos anos de 2005 e 2006, as empresas brasileiras começaram a substituí-lo, gradativamente, por um produto que recebeu o nome de MDP (*Medium Density Particleboard*), ou painel de partículas de média densidade (Mendoza, 2010). O MDP é considerado uma evolução dos aglomerados, sendo definido como um painel formado por três camadas (Figura 1), de modo que as duas camadas externas são compostas por partículas do tipo “*sliver*” menores, enquanto a camada central é composta por partículas “*sliver*” maiores. Estas camadas diferentes possuem extrema importância para garantir propriedades de resistência satisfatórias. Além disso, partículas menores nas faces garantem um aspecto visual atraente (Veloso *et al.*, 2020).

A demanda por painéis MDP vem aumentando em todo o mundo. De acordo com a *Food and Agricultural Organization* (FAO), a produção de painéis de partículas em 2020 foi de aproximadamente 131 milhões de m³ em todo o mundo (FAO STATISTICAL, 2021). Segundo o Instituto Brasileiro de Árvores -IBÁ (2022) o Brasil é destaque mundial na fabricação de painéis de madeira reconstituída, conforme as estatísticas, os volumes totais de painéis de madeira aumentaram 13% em 2021 (comparado ao ano de 2020) alcançando 9,3 milhões de m³. As estatísticas também mostraram um crescimento de 14% nas vendas anuais de painéis MDP de 3,2 milhões de m³ (WBPI, 2022).

Figura 1 – Painel MDP com sua estrutura em três camadas distintas.



Fonte: Viva Decora (2024).

Sendo assim, a indústria de painéis MDP é considerada uma das maiores indústrias de compósitos à base de madeira do mundo (Sulaiman *et al.*, 2018). Isso acontece, pois os painéis são amplamente utilizados na fabricação de móveis para casa e escritório, podem ser utilizados para as confecções de divisórias, portas, prateleiras, armários, placas de teto, etc. São usados também com laminados decorativos que imitam a grã da madeira ou a pedra natural, como pisos ou paredes em residenciais na construção civil (Jimenez Jr *et al.*, 2022; Ahmad *et al.*, 2022).

2.2 Adesivos para madeira

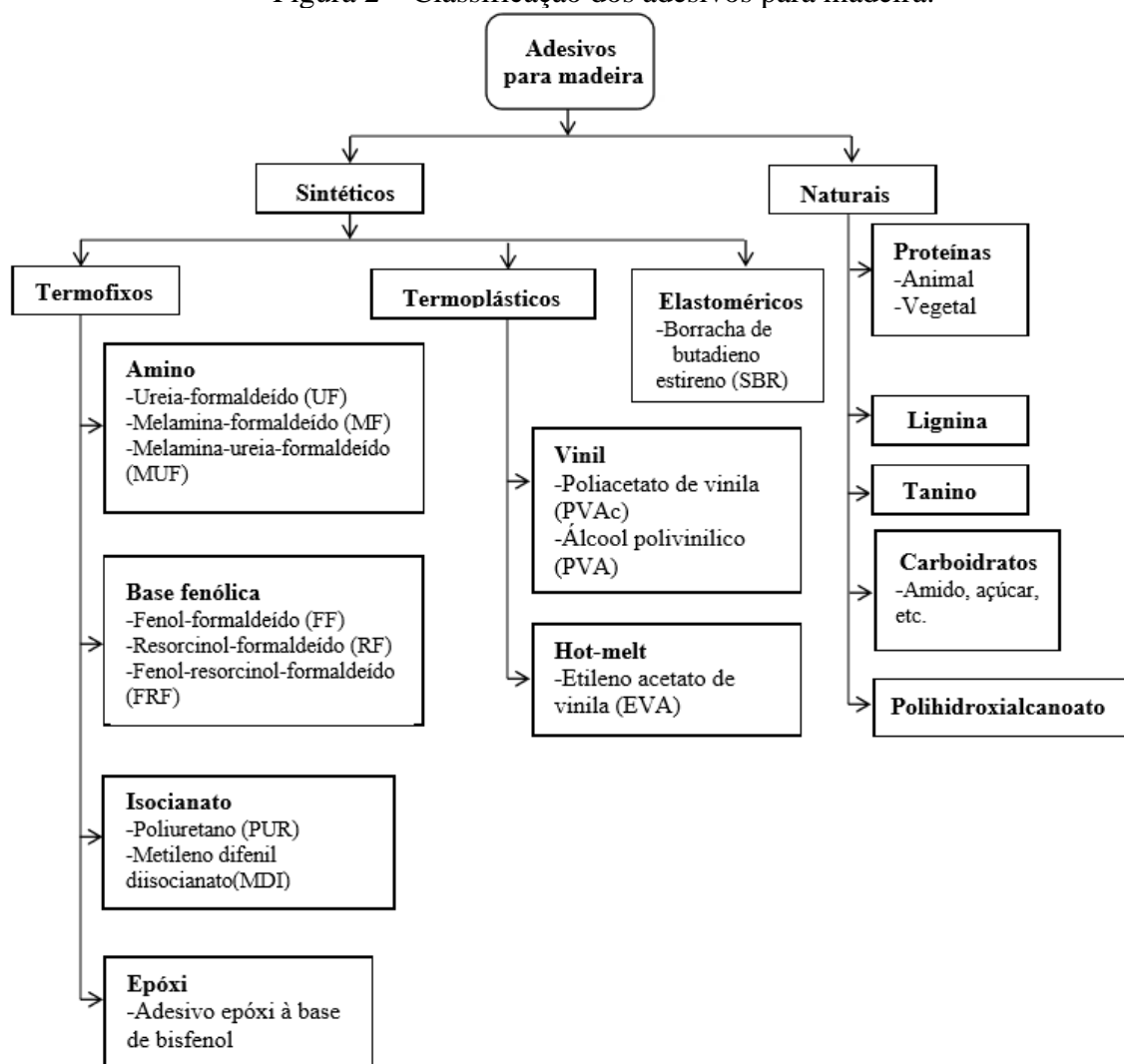
Para tornar esses painéis viáveis e funcionais, a utilização de adesivos é essencial. A prática de usar adesivos pelo homem não é recente e tampouco começou com a revolução industrial. As primeiras substâncias empregadas como adesivos eram de origens naturais, como a lama e a argila, seguindo-se pelas ceras, resinas e mais tarde, com a utilização de sangue, ovos, caseína, peles fervidas e ossos (Iwakiri; Trianoski, 2020). Em meados do século XX, os adesivos sintéticos tornaram-se disponíveis e, desde então, dominaram os de base biológica devido às suas propriedades superiores em relação ao desempenho de colagem, fácil manuseio e preço favorável (Hemmilä *et al.*, 2017).

As ligações adesivas são fatores importantes para a colagem e a qualidade dos produtos de madeira (Tran *et al.*, 2020). Compreender a colagem de madeira envolve o conhecimento de três conceitos iniciais: adesivo, aderente e adesão. O adesivo é a substância com capacidade aderente, ou seja, uma substância capaz de unir outros materiais em sua superfície. O aderente é o sólido (madeira) que receberá o adesivo, e a adesão é o fenômeno físico-químico que estabelece a ligação entre superfícies sólidas (Iwakiri; Trianoski, 2020). Este processo de

colagem citado é amplamente utilizado na fabricação de painéis de madeira (Bianche *et al.*, 2022).

Os adesivos para madeira podem ser classificados como sintéticos ou naturais. Os adesivos sintéticos podem ser classificados como termofixos, termoplásticos e elastoméricos. Já os adesivos naturais ou de base biológica podem ser derivados de quatro fontes principais: lignina, proteína, amido e taninos (Kumar e Leggate 2022). A Fig. 2 mostra a classificação dos adesivos para madeira e suas subclassificações.

Figura 2 – Classificação dos adesivos para madeira.



Fonte: Adaptado de Kumar e Leggate (2022).

Atualmente, os adesivos mais usados nas indústrias de painéis de madeiras são adesivos termofixos à base de formaldeído derivados de petróleo, como a uréia-formaldeído (UF), fenol-formaldeído (FF), melamina-ureia-formaldeído (MUF) e resorcionol formaldeído (RF), devido

à sua excelente força de adesão e aplicabilidade tecnológica (Liu *et al.*, 2018; Bousseta *et al.*, 2022). Embora estes adesivos à base de formaldeído tenham muitas vantagens sobre os adesivos de base natural, eles podem gerar compostos orgânicos voláteis, tais como a emissão de formaldeído, que é cancerígeno resultando em potenciais danos ao homem e ao meio ambiente (Radabutra *et al.*, 2022; Sulaiman *et al.*, 2018).

2.2.1 Ureia-formaldeído

Este adesivo foi desenvolvido no início da década de 30, e são definidos como polímeros sintéticos termoendurecíveis obtidos através da reação de condensação de ureia e formaldeído (Pereira *et al.*, 2019; Iwakiri; Trianoski, 2020). Cerca de 90% ou mais da produção mundial de painéis aglomerado são feitos com o adesivo UF (Khanjanzadeh *et al.*, 2019). Diante a sua ampla utilização na produção dos painéis aglomerados, o mercado global do adesivo UF foi registrado em cerca de 12,3 milhões de toneladas em 2020 e o mercado está projetado para registrar uma taxa de crescimento anual de mais de 4% durante o período de previsão em 2021-2026 (Mordor Intelligence, 2022).

Sua ampla aplicação se deve ao seu baixo custo em relação aos demais adesivos para painéis de madeira, seu processo de produção é simples, incolor, apresenta alta reatividade, excelente adesão a materiais lignocelulósicos e possui uma cura rápida (Pu *et al.*, 2022; Ren *et al.*, 2021). Apesar de todas as suas propriedades favoráveis, as principais desvantagens do adesivo UF é a emissão de formaldeído livre nos painéis de madeira, uma vez que, a reação ureia e formaldeído são reversíveis, logo fornece potencial para liberação de formaldeído ao longo prazo (Khanjanzadeh *et al.*, 2019; Moslemi *et al.*, 2020) ou rapidamente após a produção do painel (Solt *et al.*, 2019).

O formaldeído também pode ser liberado devido à hidrólise da ligação aminoplástica do adesivo, que irá emitir ao longo da vida útil do painel quando exposta a umidade e temperatura elevada; ou de fontes biogênicas, uma vez que o formaldeído também é onipresente em organismos vivos e ocorre naturalmente em muitas plantas e na madeira, porém neste caso as concentrações são muito baixas e não causa nenhum efeito nocivo (Solt *et al.*, 2019). Além disso, o adesivo apresenta uma baixa resistência à água e umidade especialmente em combinação com o calor (Dorieh *et al.*, 2022).

2.2.2 Emissões de Formaldeído

O formaldeído (CH_2O) conhecido popularmente como formol é um gás incolor, estável, inflamável e de odor sufocante (United States, 2019). Relata-se que a poluição do ar interior causada pelo formaldeído associado aos materiais de construção e móveis, impôs uma variedade de efeitos adversos agudos e crônicos à saúde das pessoas, como irritação do trato respiratório inferior e dos olhos, intoxicação aguda, alergias dérmicas, asma alérgica, neurotoxicidade, danos na função pulmonar e em casos extremos de exposição pode causar câncer (Li *et al.*, 2019; Huang *et al.*, 2013; Tang *et al.*, 2009).

Conforme estes riscos à saúde humana, em 2004 o formaldeído foi reclassificado de “provável cancerígeno humano” para “conhecido cancerígeno humano” (Grupo 1) pela Agência Internacional para Pesquisa sobre o Câncer (IARC, 2004). A avaliação foi baseada em informações sobre a relação entre câncer de nasofaringe e leucemia relacionada à exposição ao formaldeído (Salthammer, 2019). Para garantir qualidade do ar e prevenção de câncer, existem diversas diretrizes e regulamentações governamentais para emissões de formaldeído de materiais à base de madeira.

A Organização Mundial da Saúde (OMS, 2010), por exemplo, estabeleceu o valor de referência interna de exposição ao formaldeído de $0,1 \text{ mg/m}^3$ - (0,08 ppm) para 30 minutos de exposição. Os limites estabelecidos para os painéis aglomerados no Brasil e Europa são de 0,1 ppm; Estados Unidos 0,09 ppm; Alemanha 0,05 ppm e Japão 0,04–0,03 ppm. Além destes limites, a Nova Zelândia tem seus próprios padrões para classificar as classes de emissão de painéis, assim como, a China e Rússia que têm seus próprios níveis para móveis, sendo o russo o limite mais severo de formaldeído no mundo 0,01 ppm (Bolognesi 2010; Hemmilä, 2019; Solt *et al.*, 2019).

Os níveis de formaldeído presentes no ar interno são altamente dependentes das fontes de formaldeído, temperatura, umidade e taxa de troca de ar no edifício. As principais fontes de emissão de formaldeído interno nas residências e instalações educacionais atualmente incluem acabamentos de pisos de madeira, produtos à base de madeira como aglomerados, compensados e painéis de fibra de média densidade, papel de parede e tintas, além de fumaça de cigarro (Campagnolo *et al.*, 2017). Nesse sentido, uma das maneiras de reduzir a emissão de formaldeído consiste em diminuir a proporção molar de formaldeído ou utilizar agentes modificadores naturais, para reagir ou capturar o formaldeído livre no adesivo nos painéis de madeira (Ghani *et al.*, 2018).

No entanto, diminuir a proporção do formaldeído leva a uma reticulação reduzida, e conseqüentemente, um desempenho inferior do adesivo, no que diz respeito à sua resistência mecânica e resistência à água (Marutzky; Pizzi, 1986). Logo, a inclusão de nanomateriais para

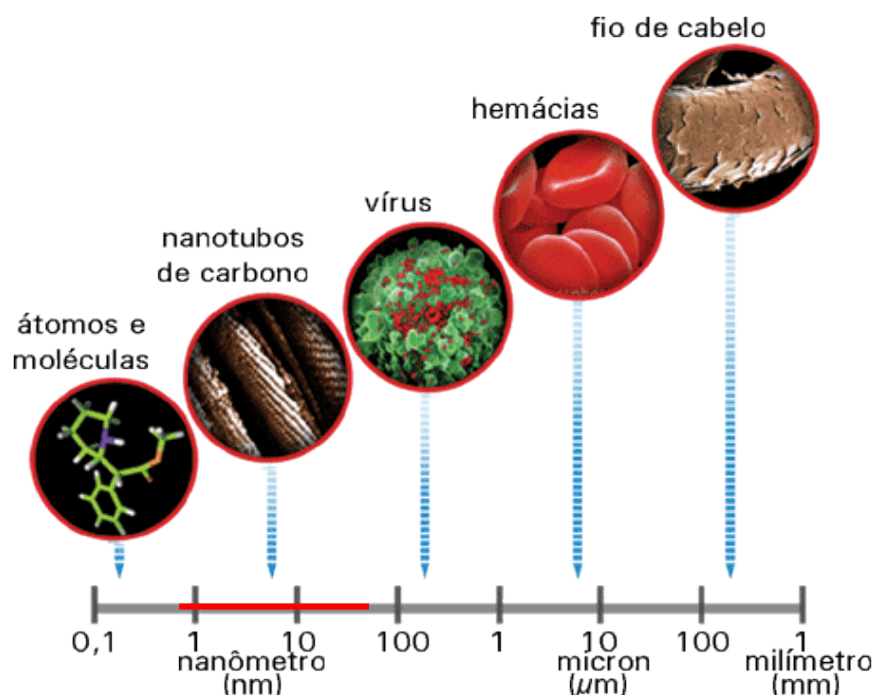
melhorar e aderir novas propriedades aos adesivos sintéticos e, ainda, resultar na redução da emissão de formaldeído, tem despertado considerável atenção na comunidade científica (Vats *et al.*, 2022). Assim como, a busca por adesivos de base biológica e promotores de adesão, por meio de um material ecologicamente correto, sem comprometer as propriedades de desempenho dos adesivos (Vineth *et al.*, 2019).

2.3 Nanopartículas de sílica

A nanotecnologia é definida como uma ciência, engenharia e tecnologia conduzida em nanoescala, que permite estudar e desenvolver os mais diversificados tipos de materiais em escala “nano” o que remete a algo de tamanho muito pequeno (Bayda *et al.*, 2020; INN- INICIATIVA NACIONAL DE NANOTECNOLOGIA, 2022). Os nanomateriais ou nanoestruturas têm uma faixa de tamanho com uma ou mais dimensões externas variando de 1 a 100 nm (Figura 3) devido às suas diferentes formas, tamanhos, grande área de superfície e alta reatividade (Nabi *et al.*, 2018).

A nanotecnologia é considerada uma das tecnologias mais promissoras do século XXI, devido sua alta capacidade de desenvolver materiais de boa qualidade (Yadav *et al.*, 2022) além de possibilitar a redução de emissões de formaldeído dos painéis de madeira. Isso ocorre, pois, as nanopartículas podem proporcionar o (i) aumento indireto do grau de cura das resinas, resultando em estabilidade hidrolítica aprimorada devido ao aumento das ligações químicas dos componentes da resina com formaldeído livre, (ii) reação de grupos hidroxila que ocorrem na superfície do nanomaterial com formaldeído livre e (iii) propriedades de barreira ou "efeito de blindagem" (Lykidis, 2023).

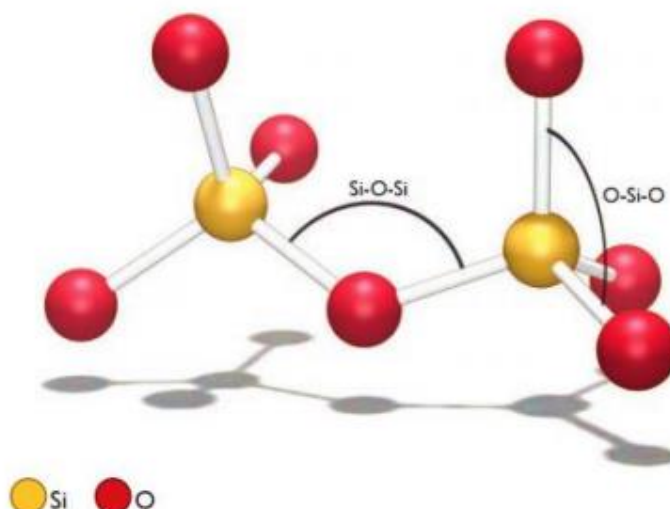
Figura 3 – Comparação do tamanho das estruturas em diferentes escalas.



Fonte: TOMA (2009).

De acordo com a literatura os compostos que têm sido investigados na forma de nanopartículas são dióxido de silício, dióxido de titânio, haloisita, óxido de alumínio, óxido de zinco, e nanotubos de carbono de nanocelulose (Lykidis, 2023). Dentre estas possibilidades, o silício (Si) é considerado um dos elementos mais predominante no planeta, com ampla aplicação à nanotecnologia. Esse elemento combinado com dois átomos de oxigênio, possui estrutura tetraedro conhecido como dióxido de silício (SiO_2) ou sílica, ilustrado na Figura 4 (Yadav *et al.*, 2022). A sílica pode ser encontrada em forma pura (em quartzo, areia, arenito e quartzito) ou mineral (em feldspato e silicato). A estrutura química da sílica forma um tetraedro de silício-oxigênio (SiO_4) combinado com quatro átomos de oxigênio ligados nas extremidades pode ser amorfa ou cristalina (Teixeira *et al.*, 2021, Alshatwi *et al.*, 2015).

Figura 4 – Representação da unidade estrutural da sílica com dois tetraedros ligados.



Fonte: Figueiredo (2018).

A nanossílica (nano-SiO₂) também chamada de pó de quartzo ou pó de sílica, é um material que se caracteriza por alto percentual de SiO₂ superior a 99% (Gayarre *et al.*, 2021). Há dois tipos de nano-SiO₂ diante a visão estrutural, a do tipo P e do tipo S. As partículas de nano-SiO₂ do tipo P, contêm numerosos nanoporos a uma taxa de 0,61 ml/g, e as nanopartículas do tipo S, são conhecidas por terem uma pequena quantidade de nanoporos (Azonano, 2019). A nano-SiO₂ pode ser sintetizada por meio de diversos métodos, dentre eles, o processo sol-gel, microemulsão reversa, deposição química de vapor, síntese de plasma (Rahem *et al.*, 2021; Singh *et al.*, 2019).

As nanopartículas de sílica têm atraído atenção de pesquisadores nos últimos anos, devido às suas características únicas, como alta capacidade de fortalecimento e preenchimento, alta área superficial, tamanho de poro ajustável, alta estabilidade e efeitos mínimos de toxicidade (Rahem *et al.*, 2021; Singh *et al.*, 2019). A alta área de superfície da nano-SiO₂ torna-se ideal para uma variedade de aplicações, incluindo enchimento de reforço na indústria da borracha, melhorando as propriedades do concreto, indústria de inseticidas, campo de pintura, indústria alimentícia, medicina, preparação de sistemas vitrocerâmicos, produtividade de culturas agrícolas (Didamon *et al.*, 2020) e adesivos.

2.3.1 Adição de nanopartículas de sílica em adesivos para painéis de madeira

A adição de nanopartículas em adesivos sintéticas e naturais para melhorar a adesão em componentes lignocelulósicos é uma técnica que vem sendo pesquisada. A utilização de

nanopartículas de sílica em adesivos para painéis de madeira, pode contribuir para melhorar a resistência física e mecânica do painel, além de diminuir ou bloquear a emissão de formaldeído (Costa, 2015). Os efeitos das nanopartículas de sílica sobre a estrutura e as propriedades de adesivos indicam que estas são promissoras em adesivos de madeira, pois tem capacidade de produzir materiais com alto desempenho (Lin *et al.*, 2005; Wang *et al.*, 2011).

Lin *et al.* (2006) ao estudarem o desempenho dos painéis compensados, aglomerados e painéis de fibra de média densidade (MDF), com adição de 0,5, 1, 1,5, e 2% de nano-SiO₂ em relação ao adesivo UF, constataram, que a adição de 1% de nano-SiO₂ misturada ao adesivo, melhorou a resistência da ligação do adesivo e diminuiu a emissão de formaldeído dos painéis. Com foco nos painéis aglomerados, os autores reportaram que para a ligação interna houve uma melhoria de 0,33-0,42MPa e para emissão de formaldeído houve uma redução de 12,7-3,22 (mg/100g painel), neste caso, os painéis atingiram o grau E1, ou seja, à classe com menor emissão de formaldeído (<8 mg/100g painel). Isso ocorreu, pois, a nano-SiO₂ tem capacidade de absorção muito forte, logo as partículas de nano-SiO₂ reagiram com os grupos ativos da resina UF pura e absorveram o formaldeído livre, demonstrando assim, o bom desempenho da nano para esta propriedade.

Salari *et al.* (2013) ao avaliarem o efeito das diferentes concentrações (0, 1, 3 e 5%) de nanopartículas de sílica no adesivo UF, para a produção de painéis OSB (*oriented strand board*) com a madeira de baixa densidade *Paulownia fortunei*, foi observado que a inclusão de 3% de nanopartículas de sílica aumentou a resistência mecânica MOR (18,12-21,73 MPa), a resistência à absorção de água (AA) após 2h (68,63 – 52,85 %) e após 24h (122,30-98,08%). E também reduziu a emissão de formaldeído 10,80-4,60(mg/100g painel) uma vez que, a adsorção física do formaldeído foi acompanhada pela formação de ligações de hidrogênio entre os grupos silanol na superfície da sílica e os grupos ativos do adesivo e do formaldeído. Conforme os autores, essas melhorias ocorrem com acréscimo em até 3% de nanopartículas, concentrações acima desse valor acarretaram perda de qualidade do material.

Dukarska e Czarnecki (2015) avaliando o efeito da aplicação das nanopartículas de sílica pirogênicas como material de preenchimento para o adesivo melamina-ureia-fenol-formaldeído (MUFF) no processo de fabricação de compensados, relataram que a porcentagem ideal de nanosilica em relação a 100% de MUFF é de 2%, uma vez que nesta porcentagem, a viscosidade atinge valores de viscosidade comparáveis aos do adesivo controle (1000 MPa.s) que foi feito de acordo com a receita industrial. Foi observado também que a aplicação do adesivo MUFF com adição de nano-SiO₂ até 120 g/m² permitiu reduzir o formaldeído livre em mais 20%, enquanto a aplicação de 180 g/m² permitiu reduzir a emissão de formaldeído em

25%. Sendo assim, a revisão de literatura mostra que a redução da liberação de formaldeído de placas coladas com resina UF modificada por uma pequena quantidade de nano-SiO₂ pode ser atribuída às propriedades de absorção da superfície bem desenvolvida da sílica.

Li *et al.* (2022) reportaram que o adesivo melamina-formaldeído (MF) modificado com nano-SiO₂ teve um efeito positivo nas propriedades físicas (tempo de cura, formaldeído livre e alongamento de ruptura). A incorporação de 0,42% de SiO₂ reduziu a temperatura de transição vítrea da resina MF em 29,4 °C, enquanto o espectro TG demonstrou que a introdução de nano-SiO₂ pouco afetou a estabilidade térmica da MF, com perda de massa semelhante entre o adesivo modificado e de referência. Para o formaldeído livre houve uma redução de 0,133 - 0,076 %. Observa-se, portanto, que o adesivo com adição de nano-SiO₂, apresenta propriedades favoráveis para sua aplicação em painéis de madeira e outros compósitos.

2.4 Cardanol

Com base nesses avanços, nos últimos anos adesivos livres de formaldeído, naturais e de baixo custo, vêm sendo amplamente investigados como candidatos potenciais à substituição dos adesivos à base de formaldeído (Zeng *et al.*, 2022) uma vez que, os adesivos sintéticos são altamente perigosos para o meio ambiente, pois, podem contaminar a água, o solo e o ar, representando um risco para o meio ambiente e para a saúde (González *et al.*, 2016).

No entanto, estes adesivos naturais apresentam desafios que limitam sua utilização e industrialização, como a baixa resistência à umidade e baixa adesão (Boussetta *et al.*, 2022). As principais vantagens e desvantagens destes adesivos livres de formaldeído estão apresentadas na Tabela 1 (Huang *et al.*, 2022).

Tabela 1 – Características dos adesivos livres de formaldeído.

Tipo de adesivo	Vantagens	Desvantagens	Referências
À base de proteína de soja	Abundância, favorável ao meio ambiente, renovável, baixo custo, boa resistência a seco, biodegradável.	Baixa resistência à água, baixa taxa de cura, fácil de mofar.	Averina <i>et al.</i> (2021) ; Gu <i>et al.</i> (2020) ; Pang <i>et al.</i> (2021) ; Xu <i>et al.</i> (2020)
À base de amido	Não tóxico, favorável ao meio ambiente, baixo custo, textura fina, não mancha, boa resistência a seco, boa estabilidade, pH neutro.	Baixa resistência à água, má adesão inicial, fácil de mofar.	Din <i>et al.</i> (2020) ; Monroy <i>et al.</i> (2020) ; Xiong <i>et al.</i> (2020)

À base de lignina	Abundância, favorável ao meio ambiente, renovável, baixo custo.	Alta variabilidade, desempenho instável.	Ghaffar e Fan (2014) ; Raj <i>et al.</i> (2020) ; Zou <i>et al.</i> (2021)
À base de tanino	Abundância, favorável ao meio ambiente, renovável, baixo custo, cura rápida.	Alta viscosidade, alta reatividade, vida útil curta, baixa resistência à umidade.	da Silva Araújo <i>et al.</i> (2021) ; Lopes <i>et al.</i> (2021)
À base de isocianato	Alta reatividade, cura rápida, boa resistência à água, livre de formaldeído.	Alta toxicidade, alto custo, baixo peso molecular, penetração excessiva.	Ma <i>et al.</i> (2020) ; Okada <i>et al.</i> (2020)
Termoplástico	Processo de fabricação simples e tempo de fabricação curto.	Baixa temperatura de transição térmica, baixa rigidez.	Forrester <i>et al.</i> (2020)
Látex	Baixa viscosidade, favorável ao meio ambiente, baixo custo, boa adesão.	Baixa resistência à água, deformação por fluência.	Mabrouk <i>et al.</i> , 2020 , Ouzas <i>et al.</i> , 2018

Fonte: Adaptado de Huang *et al.*, (2022).

Dentre os diversos tipos de adesivos livres e com baixa emissão de formaldeído apresentado na Tabela 1, o cardanol é uma fonte renovável aromática promissora, não tóxica, que representa uma alternativa natural aos fenóis derivados do petróleo. Uma vez que é um subproduto agrícola de baixo custo, extraído do líquido da casca de castanha de caju (LCC), obtido do fruto do cajueiro (*Anacardium occidentale*), em que o líquido corresponde de 20-25% do peso do caju presente no mesocarpo da casca da castanha de caju, conforme ilustrado na Figura 5 (Uchoa *et al.*, 2021; Jia *et al.*, 2019, Caillol, 2018).

Figura 5 – Seção transversal da castanha de caju



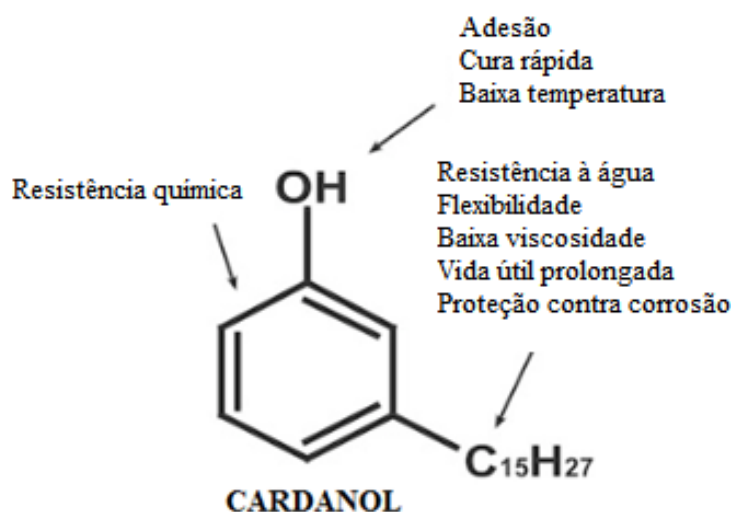
Fonte: Adaptado de Puchot (2017)

A extração do LCC pode ser feita por meio de solvente ou extração mecânica. Quando obtido através de solvente, o líquido contém em torno de 10% de cardanol, 60%–65% ácido anacárdico, 15%–20% cardol e vestígios de metilcardol (Nambela *et al.*, 2022). Já por meio mecânico através da torrefação, em temperatura acima de 180°C, obtém-se o LCC de grau técnico, neste caso o ácido anacárdico sofre uma reação de descarboxilação e é convertido em cardanol, obtendo-se 68-95% de cardanol, 3,8-19% de cardol, 1,2-4,1% de metilcardol e 1,1-1,8% de ácido anacárdico (Mazzetto; Lomonaco; Mele, 2009).

Em 2021, aproximadamente 3,71 milhões de toneladas métricas de castanha de caju com casca foram produzidas em todo o mundo (Fior Market, 2020). De acordo com o relatório publicado pela Fior Markets (2023), o mercado global de LCC deve atingir US\$ 489 milhões até 2026, com uma taxa de crescimento anual composta (CAGR) de 7,81% de 2019 a 2026. Com uma produção global em torno de 800kt/ano, o tamanho do mercado de cardanol foi de US\$ 32 milhões em 2022 e está projetado para atingir US\$ 58 milhões até 2028, exibindo um CAGR de 10,3% durante o período de previsão. Isso torna o LCC e o cardanol disponíveis comercialmente como recursos de base biológica (Calioll, 2023).

O cardanol em relação aos demais materiais renováveis, como os mencionados acima, apresenta alta resistência, rigidez e flexibilidade simultaneamente. Isso ocorre devido à existência do grupo hidroxila fenólico, anel benzênico, cadeia insaturada linear C15 e posição de dupla ligação, no qual permite inúmeras funcionalizações e atrai atenção para a fabricação de polímeros à base de cardanol, incluindo adesivos (Huang *et al.*, 2022). O anel aromático, por exemplo, fornece uma estrutura química forte e resistente ao calor, enquanto o grupo hidroxila proporciona boa adesão, reatividade, cura rápida e em baixa temperatura. Enquanto a cadeia lateral longa oferece excelente resistência à água e umidade, baixa viscosidade, vida útil prolongada e excelente proteção contra corrosão (Philips, 2022), conforme demonstrado na Figura 6.

Figura 6 – Estrutura química do cardanol e suas características.



Fonte: Adaptado de Philips (2022).

Devido à presença de grupos fenólicos, o cardanol reage com o formaldeído sob várias condições para formar adesivos novolac ou resol (Sarika *et al.*, 2020). A cadeia de hidrocarbonetos presente no cardanol, também atua como um plastificante interno, dando flexibilidade à síntese de adesivos, uma vez que, o cardanol tem a capacidade de condensar com formaldeído produzindo uma rede de polímero semelhante às resinas fenol-formaldeído (Santos *et al.*, 2010) com caráter promissor a fim de diminuir a emissão de formaldeído.

Em virtude de sua estrutura única e características específicas, antioxidante; resistente à chama; hidrofóbico e biodegradável (Mazzetto; Lomonaco; Mele, 2009), o cardanol vem se tornando um dos focos de pesquisas, levando em consideração a crescente conscientização no mundo sobre o uso de materiais seguros para o meio ambiente e a população. Logo, a substituição parcial ou completa de fenóis petrolíferos por cardanol é desejável, pois pode melhorar o perfil econômico e ambiental das resinas fenólicas, aproveitando um produto residual e ajudando a conservar os recursos petrolíferos (Sarika *et al.*, 2020).

Neste contexto Zhang *et al.* (2020) estudaram a estabilidade e degradação térmica do adesivo fenólico cardanol-formaldeído sintetizado. Conforme os autores, os adesivos fenol-cardanol-formaldeído (FCF) têm as características usuais do FF e uma flexibilidade melhor. No entanto, as desvantagens das resinas FCF em comparação com as resinas fenólicas são sua menor resistência à tração e estabilidade térmica. De acordo com os resultados apresentados, o comportamento térmico do adesivo FCF sintético foi semelhante adesivo FF comercial em temperaturas mais baixas. No entanto, existem algumas diferenças na estabilidade entre os dois adesivos em altas temperaturas. O FF é mais estável, deixando maior quantidade de resíduo

(80% a 460°C), e o FCF é menos estável, com menor resíduo (80% a 390°C). Este fato pode ser explicado devido à influência negativa da longa cadeia alquílica no grau de reticulação. Diante o estudo, os adesivos fenólicos novolac modificadas por cardanol podem ser usados em aplicações industriais como adesivos estruturais, revestimentos e matrizes compostas avançadas nas indústrias aeroespacial e eletrônica.

Stalin e Shobhanadevi (2021) desenvolveram um biocompósito utilizando fibra de juta como reforço (10, 20, 30 e 40% em peso) tratada e não tratada, e a resina de cardanol-formaldeído como matriz. O adesivo cardanol-formaldeído foi produzido utilizando cardanol, formaldeído e hidróxido de amônio na razão molar de 1,0:1,5:0,140 em peso. Os compósitos de juta 30% em peso revelaram melhores características térmicas. Por outro lado, as propriedades térmicas melhoraram com os compósitos de juta tratados (5% NaOH). Isso foi causado pela melhor aderência interfacial e melhor dispersão entre a resina de cardanol e a fibra de juta. Logo os resultados mostram que a utilização de juta em compósitos por meio de resina de cardanol-formaldeído é uma possibilidade de reforço de matrizes poliméricas na fabricação de usinas de biogás.

Furtini *et al.*, (2022) avaliaram a substituição do adesivo UF pelo cardanol (0, 20, 40, 60 e 80%) para a produção de painéis aglomerados. Foi observado que o teor de sólidos do adesivo aumentava (70–87%) e a viscosidade diminuía (1,81–0,11 Pa·s) diante a substituição do adesivo UF. Para as propriedades físicas dos painéis, a absorção de água (AA), inchamento em espessura (IE) e a taxa de não retorno de espessura (TNR) aumentaram com a adição de cardanol e isso ocorreu devido à baixa adesão das partículas. Para as propriedades mecânicas, o módulo de elasticidade (2641–743 MPa), módulo de ruptura (13,00–1,08 MPa) e ligação interna (0,77–0,06 MPa) diminuíram. No teste de combustibilidade, até 60% de cardanol retardaram eficientemente a combustão dos painéis. Considerando a análise conjunta de todos os resultados obtidos, foi possível uma substituição máxima de UF por cardanol de 5% para comercialização dos painéis.

Faria *et al.* (2023) avaliaram a produção de painéis aglomerados utilizando cardanol-formaldeído em substituição à ureia. Os painéis foram produzidos com diferentes proporções de resíduos de palha de feijão em substituição à madeira de pinus. A combinação de adesivo ecológico e partículas de madeira de pinus apresentaram melhor desempenho mecânico e menor absorção de água em relação aos painéis feitos com resíduos de feijão e UF. Foi constatado, um maior módulo de elasticidade (MOE) (1172 MPa) e módulo de ruptura (MOR) (4,39 MPa) sobre os painéis colados com UF, que apresentaram MOE de 764 MPa e MOR de 2,45 MPa. E

o adesivo cardanol-formaldeído promoveu redução de 93% na emissão de formaldeído, com redução de 16,76 para 1,09 mg/100 g, indicando o potencial do adesivo cardanol-formaldeído.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio da revisão apresentada neste capítulo, observa-se à preocupação com desenvolvimento de painéis ecologicamente correto e que não causem agressão ao meio ambiente e à saúde humana. Pesquisas evidenciam a possibilidade de substituição total ou parcial do adesivo sintético UF pelo adesivo natural à base de cardanol e a inclusão de nanopartículas de sílica para a redução da emissão de formaldeído livre.

O presente estudo contribuirá com a indicação da melhor proporção do teor de adesivo cardanol-formaldeído nanomodificado, como um possível adesivo para a produção de painéis MDP atendendo a normativa de comercialização. Auxiliará com a evolução do conhecimento em bioadesivos nanomodificados a partir da utilização de cardanol e nanopartículas de sílica, gerando transferência de informações, em razão do crescente interesse da indústria por novas técnicas e produtos para a indústria de painéis de madeiras.

REFERÊNCIAS

- AHMAD, N.; YYUNUS N.Y.; MOHAMMAD N.A.; HASSAN N.H.; MAHMUD S.Z. The Effect of Density and Resin Content on Oil Palm Trunk Particleboard. **Materials Science Forum.**, v.1056, p. 69-74, 2022.
- ALSHATWI, A.A.; ATHINARAYANAN, J.; PERIASAMY, V.S. Biocompatibility assessment of rice husk-derived biogenic silica nanoparticles for biomedical applications. **Mater. Sci. Eng. C.**, v.47, p. 8-16, 2015.
- AVERINA, E.; KONNERTH, J.; D'AMICO, S.; VAN HERWIJNEN, H. W. Protein Adhesives: Alkaline hydrolysis of different crop proteins as a modification to improve wood bonding performance. **Ind. Crops Prod.**, v.161, 113187, 2021.
- AZONANO. **Silicon Dioxide (SiO₂) Nanoparticles (2109). Properties & Applications** Disponível em: <<https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=3398> > Acesso em: 8 set. 2022.
- BARBU, M. C., REH, R.; IRLE, M. "**Wood-based Composites. Materials Science and Engineering: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications**". 2017.
- BAYDA, S.; ADEEL, M.; TUCCINARDI, T.; CORDANI, M.; RIZZOLIO, F. The History of Nanoscience and Nanotechnology: From Chemical–Physical Applications to Nanomedicine. **Molecules**, v.25, n.1, 2020.
- BIANCHE, J. J.; CARNEIRO, A. D. C. O.; VITAL, B. R.; de Andrade, B. G.; Gomes, R. M., de Oliveira Araújo, S.; de Souza, E. C. Improving the understanding of wood bonding: behavior of different adhesives on the surface of eucalyptus and pine wood. **Int. J. Adhes. Adhes.**, v.112, p. 102987, 2022.
- BOLOGNESI, L. **Quantificação de formaldeído em extrato aquoso obtido da emissão de painéis de madeira por espectrofotometria acoplada à injeção em fluxo.** 2010. 64 f. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba
- BOUSSETTA, A.; BENHAMOU, A.A.; IHAMMI, A.; ABLOUH, E.H.; BARBA, F.J.; BOUSSETTA, N.; GRIMI, N.; MOUBARIK A. Shrimp waste protein for bio-composite manufacturing: Formulation of protein-cornstarch-mimosa-tannin wood adhesives. **Ind. Crops Prod.**, v. 187, p.115323. 2022 .
- CAILLOL, S. Cardanol: A promising building block for biobased polymers and additives. **Curr. Opin. Green Sustain. Chem.**, v. 14, p. 26-32, 2018.
- CAMPAGNOLO, D.; SARAGA, D.E.; CATTANEO, A.; SPINAZZÈ, A.; MANDIN, C.; MABILIA, R.; PERRECA, E.; SAKELLARIS, I.; CANHA, N.; MIHUCZ, V.G; SZIGETI, T. VOCs and aldehydes source identification in European office buildings – the OFFICAIR study. **Build. Environ.**, v.115, p.18-24, 2017.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Culturas Regionais- Castanha de Caju, Análise Mensal.** Maio/2024. Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/info->

agro/analises-do-mercado-agropecuário-e-extrativista/analises-do-mercado/historico-mensal-de-castanha-de-caju > Acesso em: 10 dez. 2024.

COSTA, T. G. **Caracterização de adesivos sintéticos com adição de nanopartículas de sílica como carga de reforço**. 2016. 87 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, 2015.

da Silva Araujo, E. M.S. Lorenço, M. S.; Zidanes, U. L.; Sousa, T. B.; da Silva Mota, G., de Oliveira Reis, V. D. N.; Mori, F. A. Quantification of the bark *Myrcia eximia* DC tannins from the Amazon rainforest and its application in the formulation of natural adhesives for wood. **J. Clean. Prod.**, v. 280, p.124324, 2021.

DAZMIRI, M. K.; KIAMAHALLEH, M. V.; DORIEH, A.; PIZZI, A. Effect of the initial F/U molar ratio in urea-formaldehyde resins synthesis and its influence on the performance of medium density fiberboard bonded with them. **Int J Adhesion Adhes**, v.95, p. 102440, 2019.

DIN, Z. U.; CHEN, L.; XIONG, H.; WANG, Z.; ULLAH, I.; LEI, W.; KHAN, S. A. "Starch: an undisputed potential candidate and sustainable resource for the development of wood adhesive." **Starch-Stärke**, v.72, n 3-4, p.1900276, 2020.

DORIEH, A.; SELAKJANI, P.P.; SHAHAVI, M.H.; PIZZI, A.; MOVAHED, S.G.; POUR, M.F.; AGHAEI, R. Recent developments in the performance of micro/nanoparticle-modified urea-formaldehyde resins used as wood-based composite binders: A review. **Int J Adhesion Adhes**, v.114, p.103106, 2022.

DUKARSKA, D.; CZARNECKI, R. Fumed silica as a filler for MUPF resin in the process of manufacturing water-resistant plywood. **Eur. J. Wood Prod.** v.74, p.5–14 2016.

EL-DIDAMONY, H.; EL-FADALY, E.; AMER, A.A.; ABAZEED, I.H. Synthesis and characterization of low cost nanosilica from sodium silicate solution and their applications in ceramic engobes. **Bol. De. la Soc. Esp. De. Cerámica Y. Vidr.**, v.59, n.1, p. 31-43, 2020.

FARIA, D. L.; SCATOLINO, M. V.; DE OLIVEIRA, J. E.; GONÇALVES, F. G.; SORIANO, J.; DE PAULA PROTÁSIO, T., LELIS, C. C. R; CARVALHO, L.M.H.; MENDES, L.M.; JUNIOR, J. B. G. Cardanol-based adhesive with reduced formaldehyde emission to produce particleboards with waste from bean crops. **Environ. Sci. Pollut. Res**, v.30, n.16, p. 48270-48287, 2023.

FIGUEIREDO, S. S. **Estudo da modificação da superfície de aerogéis de sílica a partir da troca de solvente com HMDS**. Trabalho de conclusão de curso (Tecnologia em Materiais) – Faculdade de Tecnologia de São Paulo, São Paulo, 76 p. 2018.

FIOR MARKET RESEARCH LLP. **Cashew Nut Shell Liquid (CNSL) Market by Type (Raw Cashew Nut Shell Liquid, Technical Cashew Nut Shell Liquid), Application, End User Industry**. Regions, Global Industry Analysis, Market Size, Share, Growth, Trends, and Forecast 2019 to 2026. Fior Market Research LLP, 2020.

FIOR MARKETS. **Cardanol Market Size, Share, Growth and Industry Growth by Type, by Application**. Regional Forecast to 2028, Business Research Insights, Pune, India, 2023

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **FAO Forest Products Produits Forestiers Statical. 2023.** Disponível em: < <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/6e04f2b4-82fc-4740-8cd5-9b66f5335239/content> > Acesso em: 02 jul. 2024.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **FAO Statistical Yearbook. World Food and Agriculture. 2021.** Disponível em: < <https://www.un-ilib.org/content/books/9789210010474> > Acesso em: 18 jun. 2022.

FORRESTER, M.; BECKER, A.; HOHMANN, A.; HERNANDEZ, N.; LIN, F.Y.; BLOOME, N.; JOHNSON, G.; DIETRICH, H.; MARCINKO, J.; WILLIAMS, R.C. COCHRAN, E. RAFT thermoplastics from glycerol: A biopolymer for development of sustainable wood adhesives. **Green. Chem.**, v.22, p. 6148-6156, 2020.

FURTINI, A.C.C, BRITO, F.M.S., GUIMARÃES JUNIOR, M.; FURTINI, J.A.O, PINTO, L.A.M.; PROTÁSIO, T.P.; MENDES, L.M.; GUIMARÃES JUNIOR, J.B Substitution of urea-formaldehyde by renewable phenolic compound for environmentally appropriate production of particleboards. **Environ Sci Pollut Res.**, v. 29, p.66562–66577, 2022.

GAYARRE, F. L., BOADELLA, I. L., GONZALEZ, J. S., LOPEZ-COLINA, C., LOPEZ, M. S., & STOCHINO, F. "Waste for aggregates in ultrahigh performance concrete (UHPC)." **Waste and Byproducts in Cement-Based Materials**, p.29-51, 2021.

GHAFFAR,S.H.; FAN,M. Lignin in straw and its applications as an adhesive. **Int. J. Adhes. Adhes.**, v.48 , p. 92-101, 2014.

GHANI, A.; ASHAARI, Z.; BAWON, P.; LEE, S. H. Reducing formaldehyde emission of urea formaldehyde-bonded particleboard by addition of amines as formaldehyde scavenger. **Build. Environ.**, v. 142, p. 188-194, 2018.

GONZÁLEZ, I. V.; HUPFFER, H. M.; JAHNO, V. D. Os riscos ambientais da indústria de adesivos. **Desenvolvi. e Meio Ambiente.**, v.38, p.787-802, 2016.

GU, W.; LI, F.; LIU, X.; GAO, Q.; GONG, S.; LI, J.; SHI, S. Q. Borate chemistry inspired by cell walls converts soy protein into high-strength, antibacterial, flame-retardant adhesive. **Green. Chem.**, v.22, p. 1319-1328, 2020.

GUO, W.; WANG, X.; HUANG, J.; MU, X.; CAI, W.; SONG, L.; HU, Y., Phosphorylated cardanol-formaldehyde oligomers as flame-retardant and toughening agents for epoxy thermosets. **Chem. Eng. J.**, v. 423, p.130192, 2021.

HEMMILÄ, V.; ADAMOPOULOS, S.; KARLSSON, O.; KUMAR, E.A. Development of sustainable bio-adhesives for engineered wood panels – A Review. **RSC.Adv.** ,v.7, n.61 ,p. 38604–38630, 2017.

HEMMILÄ,V. **Towards low-emitting and sustainable particle- and fibreboards – Formaldehyde emission test methods and adhesives from biorefinery lignins.** Doctoral Dissertation, Forestry and Wood Technology, Linnaeus University, Växjö, 2019

HIDAYAT, W.; APRILLIANA, N.; ASMARA, S.; BAKRI, S.; HIDAYATI, S.; BANUWA, I.S.; LUBIS, M.A.R.; ISWANTO, A.H. Performance of eco-friendly particleboard from agro-industrial residues bonded with formaldehyde-free natural rubber latex adhesive for interior applications. **Polym. Comp.**, v.43, n.4, p.2222-2233, 2022.

HUANG, C.; PENG, Z.; LI, J.; LI, X.; JIANG, X.; DONG, Y. Unlocking the role of lignin for preparing the lignin-based wood adhesive: A review. **Ind. Crops Prod.**, v.187, 115388, 2022.

HUANG, J.; DING, H.; WANG, X.; SONG, L.; HU, Y. Cardanol-derived anhydride cross-linked epoxy thermosets with intrinsic anti-flammability, toughness and shape memory effect. **Chem. Eng. J.**, v.450, 137906, 2022.

HUANG, L.; MO, J.; SUNDELL, J.; FAN, Z.; ZHANG, Y. Health risk assessment of inhalation exposure to formaldehyde and benzene in newly remodeled buildings, Beijing. **PloS One**, v.8, n.11, p. 79553, 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE ÁRVORES. IBA. **Estatística da indústria brasileira de árvores**. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/cenarios/70cenarios_2.pdf> Acesso em: 18 ago. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção de Castanha-de-caju (cultivo)**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/castanha-de-caju-cultivo/br>> Acesso em: 10 dez. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE ÁRVORES. IBA. **Relatório Anual 2023**. Disponível em: <<https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2023-r.pdf>> Acesso em: 09 dez. 2024.

INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER. **Press Release No.153: IARC classifies formaldehyde as carcinogenic to humans**. Lyon, 2004. Disponível em: <<https://www.iarc.who.int/pageroot/PRELEASES/pr153a.html>>. Acesso em: 18 jun. 2022

IWAKIRI, S. **Opiniões Sobre o Setor de Florestas Plantas – História, evolução, tecnologia e perspectivas**. 2013. Disponível em: <<https://florestal.revistaopinioes.com.br/revista/detalhes/7-historia-evolucao-tecnologia-e-perspectivas>>. Acesso em: 24 de agosto de 2022

IWAKIRI, S.; TRIANOSKI, R. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: FUPEF. 2020. 247

JADHAV, N.L.; SASTRY, S.K.C.; PINJARI, D.V. Energy efficient room temperature synthesis of cardanol-based novolac resin using acoustic cavitation. **Ultrasonics Sonochemistry**. v.42, p.532–540, 2018.

JASMANI, L.; RUSLI, R.; KHADIRAN, T.; JALIL, R.; ADNAN, S.; Application of Nanotechnology in Wood-Based Products Industry: A Review. **Nanoscale Res Lett** 15, 207 (2020).

JIA, P.; SONG, F.; LI, Q.; XIA, H.; LI, M.; SHU, X.; ZHOU, Y. Recent development of cardanol based polymer materials – a review. **J. Renew. Mater.**, v.7, p. 601-619, 2019.

JIMENEZ JR, J. P.; ACDA, M. N.; RAZAL, R. A.; ABASOLO, W. P.; HERNANDEZ, H. P.; ELEPAÑO, A. R. Influence of mixing waste tobacco stalks and paper mulberry wood chips on the physico-mechanical properties, formaldehyde emission, and termite resistance of particleboard. **Ind. Crops Prod.**,v.187, p.115483, 2022.

KHAN, S.; MASOOD, S.; SIDDIQUI, K.; ALAM, M.; ZAFAR, F.; HAQUE, Q. M. R.; NISHAT, N. "Utilization of renewable waste material for the sustainable development of thermally stable and biologically active aliphatic amine modified Cardanol (phenolic lipid) - Formaldehyde free standing films." **J. Clean. Prod.**, v. 196, p. 1644-1656, 2018.

KHANJANZADEH, H.; BEHROOZ, R.; BAHRAMIFAR, N.; PINKL, S.; GINDL-ALTMUTTER W. Application of surface chemical functionalized cellulose nanocrystals to improve the performance of UF adhesives used in wood based composites-MDF type. **Carbohydr. Polym.** v.206, p.11-20, 2019

KUMAR, C.; LEGGATE, W. An overview of bio-adhesives for engineered wood products. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, p.103187. 2022.

LI, B.; CHENG, Z.; YAO, R.; WANG, H.; YU, W.; BU, Z.; XIONG, J.; ZHANG, T.; ESSAH, E.; LUO, Z.; SHAHRESTANI, M. An investigation of formaldehyde concentration in residences and the development of a model for the prediction of its emission rates. **Build Environ.**, v.147, p.540-550, 2019.

LI, C.F.; QIN, Z.X.; LIU, Y.; PAN, Y.D; LIU, M.L."Preparation of a nano-silica modified melamine formaldehyde resin." **Int. J. Adhes. Adhes.**, v.113, p. 103076, 2022.

LIN, Q.; YANG, G. D.; LIU, J. H. Application and mechanism principium research on nano-SiO₂/urea formaldehyde resin. **Journal of Fujian College of Forestry**, Fujian, v. 25, n. 2, p. 97-102, 2005

LIN, Q.; YANG, G.; LIU, J. RAO, J. Property of nano-SiO₂/urea formaldehyde resin. **Frontiers of Forestry in China**, v.1, n.2, p.230-237, 2006.

LIU, M.; WANG, Y.; WU, Y.; HE, Z.; WAN, H. "Greener" adhesives composed of urea-formaldehyde resin and cottonseed meal for wood-based composites. **J Clean Prod.**, v.187, p.361–371, 2018.

LOPES, P.J.G.; CALEGARI, L.; DE MEDEIROS SILVA, W.A.; GATTO, D.A., DE MEDEIROS NETO, P.N.; DE MELO, R.R.; BAKKE, I.A.; DE AVILA DELUCIS, R.; MISSIO, A.L. Tannin-based extracts of *Mimosa tenuiflora* bark: features and prospecting as wood adhesives. **Appl. Adhes. Sci.**, v.9, p. 3, 2021.

LYKIDIS, C. (2023). **Formaldehyde Emissions from Wood-Based Composites: Effects of Nanomaterials**. In: Taghiyari, H.R., Morrell, J.J., Husen, A. (eds) *Emerging Nanomaterials*. Springer, Cham, 2023.

MA, Y.; LV, S.; YAO, X.; ZHANG, Y.; GU, J. Preparation of isocyanate microcapsules as a high-performance adhesive for PLA/WF. **Constr. Build. Mater.**, v.260, p. 120483, 2020.

MABROUK, A.B.; DUFRESNE, A.; BOUFI, S. Cellulose nanocrystal as ecofriendly stabilizer for emulsion polymerization and its application for waterborne adhesive. **Carbohydr. Polym.**, v.229, p.11550, 2020.

MARUTZKY, R. **Release of formaldehyde by wood products**. Wood Adhesives Chemistry and Technology, Taylor & Francis Inc, Abingdon, Virginia v.2, p.307-388, 1989.

MAZZETTO, S. E; LOMONACO, D; MELE, G. Óleo da castanha de caju: oportunidades e desafios no contexto do desenvolvimento e sustentabilidade industrial. **Quím. Nova**, v. 32, n. 3, p. 732-741, 2009.

MELO, R. R. **Propriedades físico-mecânicas e resistência a biodeterioração de chapas aglomeradas construídas por diferentes proporções de madeira e casca de arroz**. 2009, 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) –Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

MENDOZA, Z. M. S. H. **Efeito da inclusão laminar nas propriedades de painéis aglomerados fabricados com resíduos da indústria laminadora**. 128p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, MG, 2010.

MONROY, Y.; SERÉ, P.; RIVERO, S.; GARCÍA, M. A. Sustainable panels based on starch bioadhesives: An insight into structural and tribological performance. **Int. J. Biol. Macromol.**, v.148, p. 898-907, 2020.

MORDOR INTELLIGENCE. **Mercado resinas de uréia formaldeído crescimento, tendências, impacto covid-19 e previsões (2022-2027)**. Disponível em: < <https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/urea-formaldehyde-market> > Acesso em: 18 ago. 2020.

MOSLEMI, A.; BEHZAD, T.; PIZZI, A. Addition of cellulose nanofibers extracted from rice straw to urea formaldehyde resin; effect on the adhesive characteristics and medium density fiberboard properties. **Int. J. Adhes. Adhes.**, v. 99, p. 102582, 2020.

NABI, G.; KHALID, N. R.; TAHIR, M. B.; RAFIQUE, M.; RIZWAN, M.; HUSSAIN, S.; MAJID, A. A review on novel eco-friendly green approach to synthesis TiO₂ nanoparticles using different extracts. **J. Inorg. Organomet. Polym. Mater.**, v.28, n.4, p. 1552-1564, 2018.

NAMBELA, L.; HAULE, L. V.; MGANI, Q. A. Anacardic acid isolated from cashew nut shells liquid: A potential precursor for the synthesis of anthraquinone dyes. **Clean. Chem. Eng.**, v.3, p.100056, 2022.

NATIONAL NANOTECHNOLOGY INITIATIVE. INN. **National Nanotechnology Coordination Office**, 2415 Eisenhower Avenue, Alexandria. Disponível em: < www.nano.gov > Acesso em: 18 set. 2022.

NORSTRÖM, E.; DEMIRCAN, D.; FOGELSTRÖM, L.; KHABBAZ, F.; MALMSTRÖM, E.; Green binders for wood adhesives. **Applied adhesive bonding in science and technology**, v.1, p.13-70, 2018 .

OKADA, T.; KOBORI, H.; KOJIMA, Y.; SUZUKI, S.; NISHIKIDO, K.; HIROSE, A.; TAKAHASHI, K. Evaluating the durability of structural glulam bonded with aqueous polymer-isocyanate adhesive by two kinds of accelerated aging treatments. **Eur. J. Wood Wood Prod.**, v.78, p.113-122, 2020.

OKTAY, S.; KIZILCAN, N.; BENGÜ, B. "Development of bio-based cornstarch - Mimosa tannin - sugar adhesive for interior particleboard production." **Ind. Crop Prod.**, v.170, p.113689, 2021.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **Diretrizes da OMS para a Qualidade do Ar Interior: Poluentes Selecionados**. Escritório Regional da OMS para a Europa , Copenhaga, 2010.

OUZAS, A.; NIINIVAARA, E.; CRANSTON, E. D.; DUBÉ, M. A. In situ semibatch emulsion polymerization of 2-ethyl hexyl acrylate/n-butyl acrylate/methyl methacrylate/cellulose nanocrystal nanocomposites for adhesive applications. **Macromol. React. Eng.**, v.12, n.02 , p. 1700068, 2018.

OWODUNNI, A.A.; LAMAMING, J.; HASHIM, R.; TAIWO, O.F.A.; HUSSIN, M.H.; MOHAMAD KASSIM, M.H.; BUSTAMI, Y.; SULAIMAN, O.; AMINI, M.H.M.; HIZIROGLU, S. Adhesive application on particleboard from natural fibers: A review. **Polymer Composites**, v.41, n.11, p.4448-4460, 2020.

PANG, B.; YANG, S.; FANG, W.; YUAN, T.Q.; ARGYROPOULOS, D.S.; SUN, R.C. Structure-property relationships for technical lignins for the production of lignin-phenol-formaldehyde resins. **Ind. Crops Prod.**, v.108, p. 316-326, 2017.

PEŃDZIK, M.; JANISZEWSKA, D.; ROGOZIŃSKI, T. Alternative lignocellulosic raw materials in particleboard production: A review. **Ind. Crop Prod.**, v.174, p.114162, 2021.

PEREIRA, P., ALMEIDA, M., PEREIRA, J., PAIVA, N.T., FERRA, J.M., MARTINS, J., CARVALHO, L. AND MAGALHÃES, F.D. Improvement of storage stability of UF resins by adding caprolactam. **Int. J. Adhes. Adhes.**, v 92, p.105-110, 2019.

PHILIPS, P. **Cardanol. Green Bio Technology**, 2022. Disponível em: <<https://www.lcbuffalo.com/cardanol/>> Acesso em: 11 jul. 2022.

PU, H.; HAN, K.; DAI, R.; SHAN, Z., Semi-liquefied bamboo modified urea-formaldehyde resin to synthesize composite adhesives. **Int. J. Adhes. Adhes.**, v. 113, p.103061, 2022.

PUCHOT, L. **Cardanol: a bio-based building block for new sustainable and functional materials**. 2016. 198 p. Tese (Doutorado em Química de Materiais) – Université de Cergy Pontoise, França, 2016.

RADABUTRA, S.; KHEMTHONG, P.; SAENGSUWAN, S.; CHANTHADAND, C.; PONYUT, N.; PIJARN, N. Preparation and characterization of wood-to-wood bonding

adhesive by glycidyl methacrylate grafting natural rubber. **Int. J. Adhes. Adhes.**, v.114, p.103093, 2022.

RAHEEM, A.A.; ABDULWAHAB, R.; KAREEM, M.A. "Incorporation of metakaolin and nanosilica in blended cement mortar and concrete- A review." **J. Clean. Prod.** v.290, p. 125852, 2021.

RAJ, A.; DEVENDRA, L. P.; SUKUMARAN, R. K. Comparative evaluation of laccase mediated oxidized and unoxidized lignin of sugarcane bagasse for the synthesis of lignin-based formaldehyde resin. **Ind. Crops Prod.**, v.150, p.112385, 2020.

RANJBARAN, S.; NAZERIAN, M.; KERMANIAN, H.; KOOSHA, M.; GARMAROODY, E. R. High strength papers impregnated with urea/melamine formaldehyde resin/nanosilica nanocomposite coatings: the effects of paper type, blend ratio and nano-content. **Mater. Today Commun.** v.25, p.101300, 2020.

REN, T.; WANG, Y.; WU, N.; QING, Y.; LI, X.; WU, Y.; LIU, M. Degradation of urea-formaldehyde resin residues by a hydrothermal oxidation method into recyclable small molecular organics. **J. Hazard. Mater.** v.426, p.127783, 2021.

SALARI, A.; TABARSA, T.; KHAZAEIAN, A.; SARAEIAN, A. "Improving some of applied properties of oriented strand board (OSB) made from underutilized low quality paulownia (*Paulownia fortunei*) wood employing nano-SiO₂." **Ind. Crops Prod.**, v.42, p.1-9, 2013.

SALTHAMMER, T.; "Formaldehyde sources, formaldehyde concentrations and air exchange rates in European housings." **Build Environ.**, v.150, p. 219-232, 2019.

SALTHAMMER, T.; MENTESE, S.; MARUTZKY, R. Formaldehyde in the indoor environment. **Chem. Rev.**, v. 110 p. 2536-2572, 2010

SANTOS, R.S.; SOUZA, A. A.; PAOLI, M.; SOUZA, C. M. L. Cardanol-formaldehyde thermoset composites reinforced with buriti fibers: Preparation and characterization. **Compos. - A: Appl. Sci. Manuf.**, v.41, n.9, p.1123-1129, 2010.

SARIKA, P. R.; NANCARROW, P.; KHANSAHEB, A.; IBRAHIM, T. Bio-based alternatives to phenol and formaldehyde for the production of resins. **Polymers**, v.12, n.10, p.2237, 2020.

SCALDAFERRI, C.A.; PASA, V.M.D. "Green diesel production from upgrading of cashew nut shell liquid." **Renewable Sustainable Energy Rev.**, v. 111, p. 303-313, 2019.

SCATOLINO, M. V.; COSTA, A. D. O.; GUIMARÃES, J. B.; PROTÁSIO, T. D. P.; MENDES, R. F.; MENDES, L. M. Eucalyptus wood and coffee parchment for particleboard production: Physical and mechanical properties. **Cienc. e Agrotecnologia**, v.41, p. 139-146, 2017.

SINGH, P.; SRIVASTAVA, S.; SINGH, S.K. Nanosilica: recent progress in synthesis, functionalization, biocompatibility, and biomedical applications. **ACS Biomater. Sci. Eng.** v.5, n.10, p.4882-4898, 2019.

SOLT, P.; KONNERTH, J.; GINDL-ALTMUTTER, W.; KANTNER, W.; MOSER, J.; MITTER, R.; VAN HERWIJNEN, H. W. Technological performance of formaldehyde-free adhesive alternatives for particleboard industry **Int. J. Adhes. Adhes.**, v.94, p.99-131, 2019.

STALIN, N., SHOBHANADEV, N. Studies on thermal, structural and compositional properties of agro-residue jute fiber composite reinforced with cardanol resin. **Biomassa Conv. Bioref.**, 2021.

SULAIMAN, N.S.; HASHIM, R.; SULAIMAN, O.; NASIR, M.; AMINI, M.H.M.; HIZIROGLU, S. Partial replacement of urea-formaldehyde with modified oil palm starch based adhesive to fabricate particleboard. **Int. J. Adhes. Adhes.**, v. 84, p.1-8, 2018.

TANG, X.; BAI, Y.; DUONG, A.; SMITH, M.T.; LI, L.; ZHANG, L. Formaldehyde in China: production, consumption, exposure levels, and health effects. **Environ. Int.** v.35, n.8, p.1210-1224, 2009.

TEIXEIRA, B.L.; GUZI, M.E.; PAOLINELLI, S.G.; FALK, G.; NOVAES, O. A.P. Obtaining Biogenic Silica from Sugarcane Bagasse and Leaf Ash. **Waste Biomass.**, v.12, p. 3205–3221, 2021

TODOROVIC, T.; NORSTRÖM, E.; KHABBAZ, F.; BRÜCHER, J.; MALMSTRÖM, E.; FOGELSTRÖM, L. "A fully bio-based wood adhesive valorising hemicellulose-rich sidestreams from the pulp industry." **Green Chem.**, v.23, n. 9, p. 3322-3333, 2021.

TRAN A.; MAYR M.; KONNERTH J.; GINDL-ALTMUTTER W. Adhesive strength and micromechanics of wood bonded at low temperature. **Int. J. Adhes. Adhes.**, v.103, p.102697, 2020.

TOMA, E. H. **O Mundo Nanométrico: a dimensão do novo século**. 2.ed. São Paulo:Oficina de Textos, 2009

UCHOA, A. F.; ROCHA, W. S.; FEITOSA, J. P.; BRITO, D. H.; GONDIM, L. M.; RICARDO, N. M. S.; SOARES, J. B.; SOARES, S. A. Exploiting epoxidized cashew nut shell liquid as a potential bio-additive to improve asphalt binder performance. **J. Clean. Prod.**, v.314, p.128061, 2021.

UNITED STATES. Environmental Protection Agency. **Facts about Formaldehyde**. Washington, DC: Environmental Protection Agency, 2019

VATS, S.; KUMAWAT, S.; BRAR, J.; KAUR, S.; YADAV, K.; MAGAR, S. G.; JADHAV, P. V.; SALVI, P.; SONAH, H.; SHARMA, S.; DESHMUKH, R. Opportunity and challenges for nanotechnology application for genome editing in plants. **Plant Nano Biology**, v.1, p. 100001, 2022.

VELOSO, M.C.R.A; PIRES, M.R.; VILLELA, L.S.; SCATOLINO, M.V.; de PAULA PROTÁSIO, T.; MENDES, L.M; JÚNIOR, J.B.G. Potential destination of Brazilian cocoa agro-industrial wastes for production of materials with high added value. **Waste Management**, v.118, p.36-44, 2020.

VINEETH, S. K.; GADHAVE, R. V.; GADEKAR, P. T. Chemical modification of nanocellulose in wood adhesive. **Open J. Polym. Chem.**, v.9, n. 4, p.86, 2019.

VIVA DECORA. MDP ou MDF: Qual a diferença? Veja qual tipo de madeira é melhor. Viva Decora, 2 jun. 2021. Disponível em: <<https://www.vivadecora.com.br/pro/mdp-ou-mdf/>>. Acesso em: 26 mai. 2024.

WANG, H.; ZHANG, C.; ZENG, W.; ZHOU, Q. Making alkyd greener: modified cardanol as bio-based reactive diluents for alkyd coating. **Prog.Org.Coat.**, v.135, p. 281-290, 2019 a.

WANG, Z.; GU, Z.; HONG, Y.; CHENG, L.; LI, Z. Bonding strength and water resistance of starch-based wood adhesive improved by silica nanoparticles. **Carbohydr. Polym.**, London, v. 86, n. 1, p. 72-76, 2011.

WANG, Z.; ZHAO, S.; ZHANG, W.; QI, C.; ZHANG, S.; LI, J. Bio-inspired cellulose nanofiber-reinforced soy protein resin adhesives with dopamine-induced codeposition of “water-resistant” interphases. **Appl. Surf. Sci.**, v.478, p. 441-450, 2019 b.

WOOD BASED PANELS INTERNATIONAL. WBPI. **Dexco records best-ever performance.** Disponível em: <<https://www.wbpionline.com/news/dexco-records-best-ever-performance-9479102/>> Acesso em: 02 out. 2022.

WU, Q.; SHAO, W.; XIA, N.; WANG, P.; KONG, F. A separable paper adhesive based on the starch-lignin composite. **Carbohydr. Polym.**, v.229, p.115488, 2020.

YADAV, M.; DWIBEDI, V.; SHARMA, S.; GEORGE, N. Biogenic silica nanoparticles from agro-waste: Properties, mechanism of extraction and applications in environmental sustainability. **Environ. Chem. Eng.**, p.108550, 2022.

ZENG, G.; ZHOU, Y.; LIANG, Y.; ZHANG, F.; LUO, J.; LI, J.; FANG, Z. A hair fiber inspired bio-based adhesive with high bonding strength and mildew tolerance. **Chem. Eng. J.**, v.434, p.134632, 2022.

ZHANG, W.; JIANG, N.; ZHANG, T.; LI, T. Thermal stability and thermal degradation study of phenolic resin modified by cardanol. **Emerg. Mater. Res.**, v.9, n.(1), p.180-185, 2020.

ZOU, T.; SIPPONEN, M. H.; HENN, A.; ÖSTERBERG, M. Solvent-resistant lignin-epoxy hybrid nanoparticles for covalent surface modification and high-strength particulate adhesives. **ACS Nano**, v.15, p. 4811-4823, 2021.

SEGUNDA PARTE: ARTIGO

ADESIVO NATURAL À BASE DE CARDANOL MODIFICADO COM NANOPARTÍCULAS DE SÍLICAS PARA PRODUÇÃO DE PAINÉIS MDP

RESUMO

Os adesivos naturais têm se destacado como uma alternativa sustentável e eficaz na indústria de painéis de partículas de média densidade (MDP). O cardanol obtido através do líquido da castanha de caju (LCC) é uma fonte renovável aromática promissora, não tóxica, que representa uma alternativa aos fenóis derivados do petróleo, devido sua alta reatividade com o formaldeído. Estudos indicam que a inserção de nanopartículas de sílica (SiO_2NPs) em adesivos à base de formaldeído, reduz a emissão de formaldeído livre. Neste sentido, o objetivo deste estudo foi avaliar o potencial de utilização do adesivo cardanol-formaldeído, modificado com diferentes porcentagens de nanopartículas de sílica e teores de adesivo, para a produção de painéis MDP. Os painéis foram produzidos com partículas de *Pinus oocarpa* e a densidade nominal dos painéis foi de 0.70 g/cm^3 . Foram utilizadas diferentes proporções de teores de adesivos cardanol-formaldeído (8, 10, 12 e 14%) em relação a massa seca das partículas, com adição de 0, 1 e 2% de SiO_2NP nas proporções em massa, com base no teor de sólidos do adesivo. Foram avaliadas as propriedades físicas, químicas e térmicas dos adesivos, e as propriedades físicas, mecânicas, interface madeira-adesivo, emissão de formaldeído, isolamento térmico e a combustibilidade dos painéis. Com base nos resultados obtidos, observou-se que a adição de SiO_2NPs reduziu o teor de sólidos dos adesivos de 94.29 – 87.19% e aumentou a viscosidade 21.97 – 345.65 Pa.s. A análise das propriedades físicas dos painéis revelou uma interação significativa entre o teor de adesivo e a adição de SiO_2NPs apenas na absorção de água após 2 horas de imersão (AA2h). A adição de 2% de SiO_2NPs ao adesivo com 8% de cardanol-formaldeído mostrou diferenças significativas nas propriedades de AA2h (31.95-45.10%); inchamento em espessura (IE) após 2 e 24 horas de imersão (6.58-8.58% e 12.81-13.94%) e taxa de não retorno de espessura (TNRE) (7.14-8.10%). A cada 1% de aumento no teor de adesivo, houve uma redução de 0.66% no teor de umidade, 8.35% para AA 24h, 1.15% no IE2h, 1.89% IE24h e 1.31% na TNRE. Para as propriedades mecânicas, foi observado interação significativa entre o teor de adesivo e adição de nanopartículas somente para a compressão. A inclusão de SiO_2NPs , proporcionou a redução das propriedades mecânicas, com exceção a dureza janka (DJ). A cada 1% de adesivo inserido, houve um aumento de 102.15MPa para o módulo de elasticidade (MOE); 1.035MPa para o módulo de ruptura (MOR); 0.04 MPa para ligação interna (LI); 0.72 MPa para DJ e 0.26MPa para a compressão. Para emissão de formaldeído, os resultados mostraram que todos os painéis atenderam à classe E1 para baixa emissão. A partir das análises conjuntas dos resultados, recomenda-se o teor de 11% do adesivo cardanol-formaldeído para a comercialização dos painéis, contribuindo assim para a saúde da população e do meio ambiente.

Palavras-chave: adesivo nanomodificado; casca do caju; fonte renovável; emissão de formaldeído.

ABSTRACT

Natural adhesives have emerged as a sustainable and effective alternative in the medium-density particleboard (MDP) industry. Cardanol obtained from cashew nut liquid (CNSL) is a promising, non-toxic, aromatic renewable source that represents an alternative to petroleum-derived phenols due to its high reactivity with formaldehyde. Studies indicate that the insertion of silica nanoparticles (SiO₂NPs) in formaldehyde-based adhesives reduces the emission of free formaldehyde. In this sense, the objective of this study was to evaluate the potential use of cardanol-formaldehyde adhesive, modified with different percentages of silica nanoparticles and adhesive contents, for the production of MDP panels. The panels were produced with *Pinus oocarpa* particles and the nominal density of the panels was 0.70 g/cm³. Different proportions of cardanol-formaldehyde adhesive contents (8, 10, 12 and 14%) were used in relation to the dry mass of the particles, with the addition of 0, 1 and 2% of SiO₂NP in the mass proportions, based on the solids content of the adhesive. The physical, chemical and thermal properties of the adhesives, and the physical, mechanical properties, wood-adhesive interface, formaldehyde emission, thermal insulation and combustibility of the panels were evaluated. Based on the results obtained, it was observed that the addition of SiO₂NPs reduced the solids content of the adhesives from 94.29 to 87.19% and increased the viscosity from 21.97 to 345.65 Pa.s. The analysis of the physical properties of the panels revealed a significant interaction between the adhesive content and the addition of SiO₂NPs only in the water absorption after 2 hours of immersion (WA2h). The addition of 2% SiO₂NPs to the adhesive with 8% content showed significant differences in the properties of WA2h (31.95-45.10%); thickness swelling (TS) after 2 and 24 hours of immersion (6.58-8.58% and 12.81-13.94%) and thickness non-return rate (NTS) (7.14-8.10%). For each 1% increase in the adhesive content, there was a reduction of 0.66% in the moisture content, 8.35% for WA 24h, 1.15% in TS2h, 1.89% TS 24h and 1.31% in TNRE. For the mechanical properties, a significant interaction between the adhesive content and addition of nanoparticles was observed only for compression. The inclusion of SiO₂NPs provided a reduction in the mechanical properties, with the exception of janka hardness (JH). For every 1% of adhesive added, there was an increase of 102.15MPa for modulus of elasticity (MOE); 1.035MPa for modulus of rupture (MOR); 0.04MPa for internal bonding (LI); 0.72MPa for JH and 0.26MPa for compression. For formaldehyde emission, the results showed that all panels met the E1 class for low emission. From the joint analysis of the results, content of 11% of the cardanol-formaldehyde adhesive is recommended for the marketing of the panels, thus contributing to the health of the population and the environment.

Keywords: nanomodified adhesive; cashew shell; renewable source; formaldehyde emission.

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a busca por materiais alternativos em substituição à madeira maciça, vem sendo destaque no setor moveleiro e na construção civil (Başboğa *et al.*, 2023). As indústrias de painéis aglomerados e painéis de partículas de média densidade (MDP) registrou em 2021, um consumo de aproximadamente 100 milhões de m³ de painéis no mundo (Food and Agricultural Organization, Statistical, 2021). A elevada demanda destes painéis MDP gera a maior utilização dos adesivos sintéticos a base de formaldeído (Kristak *et al.*, 2022). Sendo a ureia-formaldeído (UF) o adesivo líder em termos de consumo, representando cerca de 90% ou mais da produção mundial dos painéis MDP (Khanjanzadeh *et al.*, 2019).

A ampla utilização do adesivo UF acontece devido seu baixo custo em relação aos demais adesivos para painéis de madeira, apresenta um processo de produção simples, alta reatividade, excelente adesão aos materiais lignocelulósicos, cura rápida e é incolor (Pu *et al.*, 2022, Ren *et al.*, 2021). Porém, o adesivo UF apresenta fraca durabilidade sob a influência de umidade ou água, especialmente em temperaturas mais altas, favorecendo a emissão de formaldeído livre (Dorieh *et al.*, 2022). Isso acontece, pois as reações entre a ureia e formaldeído são reversíveis, logo fornece potencial para liberação de formaldeído ao longo prazo ou rapidamente após a produção do painel (Khanjanzadeh *et al.*, 2019; Moslemi *et al.*, 2020; Solt *et al.*, 2019). O formaldeído emitido é um composto químico tóxico, classificado como cancerígeno, no qual apresenta um odor desagradável que irrita os olhos e as passagens nasais, podendo causar problemas de saúde (Kordkheili; Pizzi, 2023; Resmi; Sunil 2015).

Por esse motivo muitos países desenvolveram legislações para emissões de formaldeído de painéis derivados de madeira (Zhang *et al.*, 2018). A Organização Mundial da Saúde (OMS, 2010), estabeleceu um o valor de referência interna de exposição ao formaldeído de 0.1 mg/m³ - (0.08 ppm) para 30 minutos de exposição ao formaldeído. Os limites estabelecidos para os painéis MDP no Brasil e Europa são de 0.1 ppm; Estados Unidos 0.09 ppm; Alemanha 0.05 ppm e Japão 0.04–0.03 ppm (Bolognesi 2010; Hemmilä, 2019; Solt *et al.*, 2019). Neste sentido, as indústrias de painéis de madeira têm feito grandes esforços, a fim de cumprir os requisitos estabelecidos pelas legislações juntamente com nanotecnologia, que é considerada um setor promissor na redução das emissões de formaldeído nos painéis de madeira (Baharuddin *et al.*, 2023; Lykidis, 2023).

Estudos indicam que a inclusão de nanopartículas de sílica (SiO₂NPs) em adesivo para painéis de madeira pode aumentar a qualidade dos painéis, reduzir a emissão de formaldeído livre e aumentar a força de ligação (Lu *et al.*, 2021). Lin *et al.* (2006) ao estudarem o

desempenho dos painéis compensados, aglomerados e painéis de fibra de média densidade (MDF), com adição de 0.5, 1, 1.5, e 2% SiO₂NPs em relação ao adesivo UF, constataram, que a adição de 1% de SiO₂NPs misturada ao adesivo, melhorou a resistência da ligação do adesivo e diminuiu a emissão de formaldeído dos painéis. No entanto, pensando no contexto de desenvolvimento sustentável, o adesivo UF é de origem petrolífera, no qual, polui o meio ambiente externo e interno, e restringe severamente a reciclagem dos painéis (Zhou *et al.*, 2023). Neste contexto, matérias-primas renováveis têm sido consideradas uma opção interessante para o desenvolvimento de adesivos sustentáveis para a produção de painéis de madeira (Arias *et al.*, 2021).

Os adesivos sustentáveis, como por exemplo, a lignina, amido, proteínas vegetais e tanino, apresentam certas vantagens sobre os adesivos sintéticos, pois são desenvolvidos a partir de materiais abundantes, ecologicamente corretos e podem apresentar baixo custo (Alawode *et al.*, 2019). Porém, estes adesivos apresentam algumas deficiências, como a baixa resistência mecânica e baixa resistência à umidade (Boussetta *et al.*, 2021). Logo é necessário o desenvolvimento de adesivos de madeira de fontes renováveis, que sejam isentos ou apresentem capacidade de reduzir a emissão de formaldeído e possuam propriedades de resistência comparáveis aos adesivos sintéticos comumente usados. Dentre estas fontes, o cardanol é considerado uma fonte renovável aromática promissora aos fenóis derivados do petróleo (Caillol, 2018).

O cardanol é um subproduto agrícola de baixo custo, não tóxico, extraído do líquido da casca de castanha de caju (LCC), obtido do fruto do cajueiro (*Anacardium occidentale*) espécie nativa do nordeste brasileiro (Uchoa *et al.*, 2021; Jia *et al.*, 2019, Caillol, 2018). Em relação aos demais materiais renováveis, como os mencionados acima, o cardanol apresenta alta reatividade, rigidez e flexibilidade simultaneamente. Isso ocorre devido à existência do grupo hidroxila fenólico, anel benzênico, cadeia insaturada linear C15 e posição de dupla ligação, no qual permite inúmeras funcionalizações e atrai atenção para a síntese de adesivos (Huang *et al.*, 2022). Vale ressaltar que o cardanol tem a capacidade de condensar com formaldeído produzindo uma rede de polímero semelhante aos adesivos fenol-formaldeído (Santos *et al.*, 2010) com caráter promissor a fim de diminuir a emissão de formaldeído.

Em virtude de sua estrutura única, características específicas (antioxidante; resistente à chama; hidrofóbico e biodegradável) (Mazzetto; Lomonaco; Mele, 2009) e a crescente conscientização no mundo sobre o uso de materiais seguros para o meio ambiente e a população, o cardanol vem se tornando evidente no meio acadêmico. Furtini *et al.*, (2022) em busca da substituição da UF nos painéis aglomerados, observaram que é possível substituição máxima

de UF por cardanol em 5%, pois, nesta situação, os painéis atingem as normas estabelecidas para a comercialização. Outros estudos conduzidos por Khan *et al.*, (2018); Zhang *et al.*, (2020); Stalin e Shobhanadevi (2021); Faria *et al.*, (2023), relataram o potencial da síntese de adesivos à base de cardanol-formaldeído, no entanto, não há estudos com a inclusão de SiO₂NPs em adesivos para painéis MDP.

Mediante o exposto, o objetivo deste estudo avaliar o potencial de utilização do adesivo cardanol-formaldeído, modificado com diferentes porcentagens de nanopartículas de sílica e teores de adesivo, para a produção de painéis MDP.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Obtenção e preparo do material lignocelulósico

Os painéis MDP foram produzidos com a madeira de *Pinus oocarpa*, provenientes de árvores com idades próximas de 20 anos, oriundas de plantios experimentais da Universidade Federal de Lavras – UFLA, localizada no município de Lavras- Minas Gerais, sob as coordenadas 21° 14' 45" S 44° 59' 59" W e altitude de 920 m.

Das árvores, foram retirados 5 discos para a caracterização química e densidade básica, e em seguida, as árvores foram seccionadas em toretes com 58 cm. Os discos e os toretes foram encaminhados à Unidade Experimental de Produção de Painéis de Madeira (UEPAM) da UFLA. Os discos foram seccionados em quatro partes, com o auxílio de uma serra fita, obtendo duas cunhas opostas para análise química e outras duas foram utilizadas para a densidade básica. Já os toretes, ficaram imersos em um tanque com água por um período de 48 horas a 85 °C, para promover o cozimento e conseqüentemente, o amolecimento da madeira para facilitar o processo de laminação.

As lâminas foram geradas em torno laminador, com espessura nominal de 2 mm e, em seguida foram secas naturalmente e em estufa, até atingirem o teor de umidade de 8%. Após a secagem, as lâminas foram moídas em moinho do tipo martelo, obtendo-se assim as partículas. Nas faces dos painéis as partículas utilizadas foram aquelas que passaram pela peneira de malha 12 (1.680 mm) e ficaram retidas na malha de 35 (0.500mm). Já para o miolo foram utilizadas as partículas que passaram pela peneira de malha 12 e ficaram retidas na peneira de malha 20 (0.84mm). Após serem classificadas, elas foram secas em estufa a 90 °C, até que atingissem uma umidade próxima de 5%.

2.2 Caracterização do material lignocelulósico

A densidade básica da madeira de *Pinus oocarpa* foi realizada a partir dos corpos de provas obtidas das cunhas opostas com dimensões 2.5 x 2.5 x 1.5 cm (comprimento x largura x espessura), segundo a metodologia de imersão em água, descrito pela norma técnica NBR (Norma Brasileira Regulamentadora) 11941 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003), sendo realizadas cinco repetições, e a umidade na base seca das partículas por meio da norma NBR 14929 (ABNT, 2017).

Para a análise das propriedades químicas do material lignocelulósico foram realizados testes em triplicatas. Determinando assim, os extrativos totais (ET), a lignina insolúvel (LI) e o teor de cinzas (CI) de acordo com as seguintes normativas NBR 14853 (ABNT, 2010), NBR 7989 (ABNT, 2010) e NBR 13999 (ABNT, 2017). O percentual de holocelulose foi obtido por meio do somatório dos níveis de lignina (LI), extrativos (ET) e cinzas (CI), subtraídos de 100, conforme mostrado na equação 1:

$$\text{Holocelulose (\%)} = 100 - (\text{LI} + \text{ET} + \text{CI}) \quad (1)$$

2.3 Síntese e caracterização dos adesivos

O adesivo cardanol-formaldeído foi sintetizado conforme as metodologias propostas por Santos *et al.* (2010) e Faria *et al.* (2023). Uma solução de NaOH 2.0 M foi usada como catalisador na reação de policondensação usando uma proporção de 1:5 de formaldeído para cardanol. Primeiramente, o cardanol foi misturado com formaldeído sob agitação constante em banho-maria a 90 °C por 60 minutos para homogeneizar os reagentes. Posteriormente, por se tratar de uma reação de policondensação, o catalisador foi gotejado por 60 min para evitar o rápido aumento da massa polimérica e controlar a viscosidade (Faria *et al.*, 2023). Por fim, nanopartículas de sílica foram adicionadas em diferentes concentrações em relação à massa seca do adesivo (Tabela 1), com base nos estudos de Lin *et al.* (2006) e Dukarska e Czarnecki (2015). O cardanol foi doado pela empresa *Resibras Cashol* e as SiO₂NPs pela empresa *Polystell do Brasil LTDA*.

Tabela 1 – Plano experimental.

Teor de adesivo (%)	Concentração de SiO ₂ NPs (%)
8	0
	1
	2
10	0
	1
	2
12	0
	1
	2
14	0
	1
	2

Fonte: Da autora (2024).

As caracterizações dos adesivos ocorreram por meio das análises das propriedades físicas, químicas e térmicas, tais como viscosidade, teor de substâncias sólidas, tempo de gelatinação, pH, análise termogravimétrica (TGA) e termogravimetria derivada (DTG). A viscosidade foi obtida por meio de um reomêtro do tipo Anton Paar (modelo MCR 102e), o teor de sólidos seguiu as recomendações das norma ASTM D1582-60 (ASTM, 1994), tempo de gelatinação conforme Mori (2000), pH por leitura de medição direta por meio do aparelho pHmetro Tecnal tec-3mp e o TGA/DTG por meio de um analisador térmico Q500 (TA Instruments®), conforme Natarajan e Murugavel (2017). Para todas as propriedades foram realizados triplicatas.

2.4 Produção dos painéis MDP

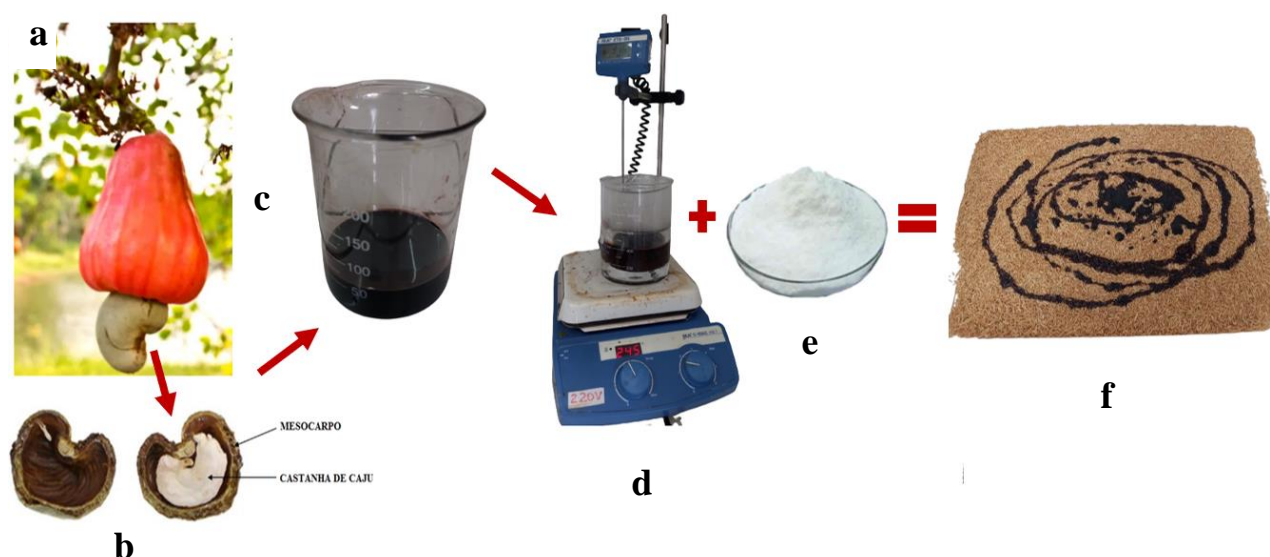
Os painéis MDP foram produzidos com densidade nominal de 0.70 g/cm³, dimensões de 30 x 30 x 1.5 cm (comprimento x largura x espessura, respectivamente) e com uma distribuição percentual das partículas de 40/60/40 (face/miolo/face) em relação a sua massa total. A aplicação do adesivo às partículas das faces e o miolo de cada painel foi realizada de forma separada e manual. Foram utilizadas diferentes porcentagens de adesivo e concentração de SiO₂NPs conforme a Tabela 1 para seleção da mais adequada. Para cada tratamento foram produzidos três painéis, totalizando 36 unidade experimentais.

As misturas adesivo-partículas foram distribuídas em camadas (face/miolo/face) em uma caixa de madeira, com dimensões internas de 30 x 30 cm, para formar o “colchão de

partículas”. O colchão formado foi pré-prensado em temperatura ambiente e pressão de 2 MPa, para retirada de ar e pré-consolidação, sendo posteriormente prensado a quente por 15 minutos com pressão de 4 MPa e temperatura de 160°C. A Fig. 1 ilustra o resumo gráfico da produção dos painéis.

Os painéis foram acondicionados em sala climatizada 20 ± 2 °C e umidade relativa de $65 \pm 3\%$ até a cura final do adesivo e padronização da umidade. Em seguida, foram submetidos ao processo de esquadrejamento para a retirada dos efeitos de bordas e, posteriormente, na serra circular para a retirada dos corpos-de-prova e conseqüentemente à avaliação dos painéis.

Figura 1 – Produção dos painéis MDP a) caju, adaptado de Bernadino (2022); b) castanha de caju, adaptado de Puchot (2017); c) cardanol; d) síntese do adesivo e) SiO₂NPs f) aplicação de adesivo nas partículas



Fonte: Da autora (2024).

2.5 Caracterizações dos painéis

2.5.1 Avaliação das propriedades físicas e mecânicas dos MDP

A determinação da absorção de água após 2 e 24h de imersão (AA 2h e AA 24h), inchamento em espessura após 2 e 24h de imersão (IE 2h e IE 24h) e a taxa de não retorno em espessura (TNRE) foram realizadas de acordo com a norma ASTM D-1037 (American Society for Testing and Materials, 2012). Densidade aparente, umidade, dureza janka, tração

perpendicular (TP) e compressão foram avaliadas pela norma NBR 14810-2 (ABNT, 2018). O módulo de elasticidade (MOE) e o módulo de ruptura (MOR) na flexão estática foram avaliados pelos procedimentos da norma DIN 52362 (Normem Fur Holzfaserplatten Spanplatten Sperrholz, 1982) padrão. A razão de compactação foi calculada dividindo-se a densidade aparente dos corpos de prova do painel e a densidade básica do material lignocelulósico utilizado.

2.5.2 Avaliação microestrutural da interface madeira-adesivo

A avaliação da interface madeira-adesivo foi realizada por meio de um microscópio óptico de luz composto Leica DM4000B (LM) acoplado com câmera digital Moticam X – Motic Europe CMOS com aumento de 100x. Avaliou-se a região fraturada obtida por meio do teste de ligação interna.

2.5.3 Avaliação da emissão de formaldeído

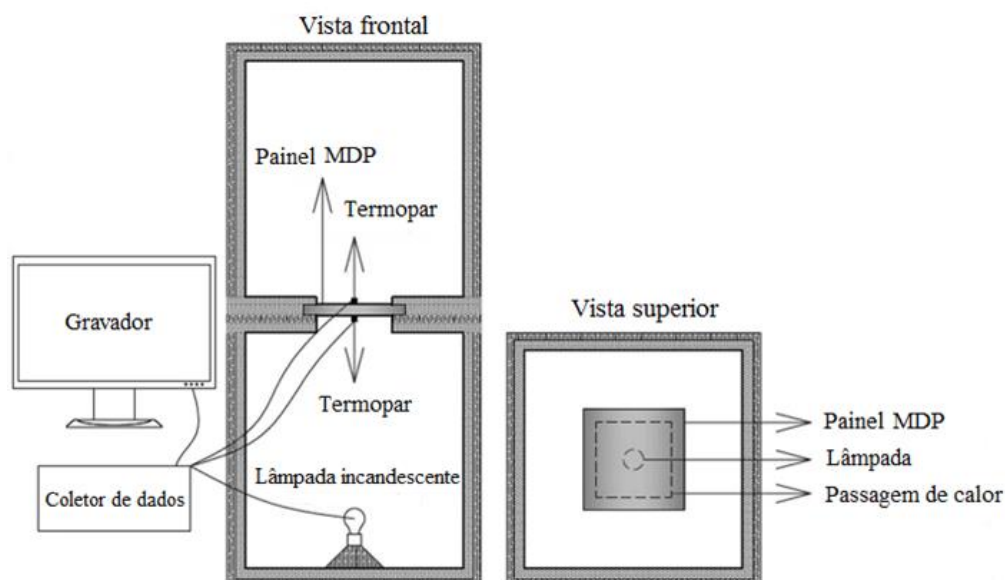
O ensaio para a determinação do teor de formaldeído livre nos painéis foi realizado pelo método do frasco, conforme a norma EN 717–3 (Norma Europeia-EN 1996). O método envolve a suspensão de amostras preparadas dos painéis, totalizando 20 g, em um frasco fechado contendo 50 ml de água destilada. O frasco é mantido selado e aquecido a 40 ± 1 °C por 3 horas. Após esse período, o formaldeído absorvido na água é quantificado por espectroscopia UV/VIS a 412 nm usando o método da acetilacetona. O resultado obtido é expresso em mg de formaldeído por kg de placa de aglomerado seca, conforme especificado na norma.

2.5.4 Propriedades de isolamento térmico

O ensaio para a determinação da propriedade de isolamento térmico foi realizado no Laboratório da Unidade Experimental de Painéis de madeira (UEPAM) da UFLA, por meio de um equipamento advindo de uma adaptação do método da coluna fracionada descrito por Mendes *et al.* (2021), utilizando duas câmeras térmicas e um atuador térmico na parte inferior, mantendo a temperatura em torno de 60°C. As temperaturas foram registradas por meio de sensores. A taxa de aquecimento foi de 1°C/min e o ciclo de 1 hora. Os dados foram registrados durante este período por sensores utilizando equipamento Data Collector, modelo IM DC 100-01E. Os resultados de isolamento térmico do material foram obtidos pela diferença dos

termopares da base do padrão e do topo, conforme ilustrado na Fig. 2. Os valores referentes à condutividade térmica, resistência térmica e transmitância térmica, foram obtidos conforme a NBR 15220 (ABNT, 2005).

Figura 2 – Diagrama para obtenção da condutividade térmica dos painéis MDP



Fonte: Adaptado de Mendes *et al.* (2021)

2.5.5 Teste de combustibilidade

O teste de combustibilidade foi realizado para avaliar o comportamento dos painéis durante a combustão, através da metodologia proposta por Quirino (1991) e utilizada por Setter *et al.* (2020). Foram utilizados corpos de prova de 5 x 5 cm, sendo os mesmos, posteriormente seccionados em quatro amostras por painel de 2.5 x 2.5 cm cada, conforme Scatolino *et al.* (2015). O método corresponde a um dispositivo composto por um combustor fabricado em chapa de ferro galvanizada, uma base de alumínio e madeira, um controlador de temperatura, uma balança com precisão de 5 mg e um anteparo de alumínio que envolve o combustor para protegê-lo da interferência do vento durante a combustão (Fig. 3). Os dados de perda de massa e temperatura foram registrados a cada minuto durante o teste, onde os dados registrados foram processados para construir curvas de massa vs. tempo e temperatura vs. tempo.

Figura 3 – Aparato utilizado para o teste de combustibilidade.



Fonte: Da autora (2024).

2.6 Análise estatística dos dados experimentais

Os resultados foram avaliados em um delineamento inteiramente casualizado arranjados em esquema fatorial. O fator 1 considerou as diferentes quantidades de adesivo utilizadas na produção dos painéis MDP (8,10,12 e 14%) e o fator 2 as diferentes quantidades de nanopartículas inseridas nos adesivos (0,1e 2%) totalizando 12 tratamentos. A análise estatística descritiva foi aplicada para avaliar a composição química com valores de média e desvio padrão. Para avaliação das propriedades dos adesivos formulados e dos painéis foi realizado a análise estatística por meio do teste de média de Scott-Knott a 95% de probabilidade e regressão. A interface madeira adesivo foi avaliada por imagens digitais e o teste de combustibilidade foi verificado por meio de imagens gráficas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização física e química do material lignocelulósico

Para a densidade básica da madeira de *P. oocarpa*, foi encontrada uma média de $0.52 \pm 0.03 \text{ g.cm}^{-3}$. A madeira com baixa densidade ($<0.55 \text{ g.cm}^{-3}$) conforme a classificação da

normativa NBR11941, é um requisito básico para a produção de painéis MDP, isso ocorre, porque facilita a densificação devido o melhor contato do adesivo às partículas (Shmulsky; Jones, 2019; Silveira *et al.* 2013). O valor obtido neste estudo, foi semelhante ao reportado por Brito *et al.* (2022) e próximo ao de Miranda *et al.* (2023) que reportaram 0.48 g.cm^{-3} para as espécies *P. oocarpa*.

Para o teor de umidade em base seca, obteve-se uma média de 5.46%. O teor de umidade das partículas exerce grande influência sobre a cura do adesivo, logo, recomenda-se uma umidade entre 3 e 6% para as partículas a fim de garantir uma boa penetração do adesivo (Iwakiri; Trianoski, 2020). Quando as partículas contêm um alto teor de umidade, é necessário que o excesso seja removido durante a prensagem, caso contrário, a pressão de vapor interna excederá a adesão e pode resultar em rachaduras internas do painel (Oktay *et al.*, 2021). Por outro lado, quando o teor de umidade está baixo, a madeira absorverá a água do adesivo tão rapidamente (durante a prensagem) que seu fluxo e penetração na madeira serão inibidos (Magalhaes *et al.*, 2021).

Os valores médios da caracterização química da madeira *P. oocarpa* e seu comparativo encontram-se na Tabela 2.

Observa-se que para os extrativos totais, o valor do presente estudo é superior ao reportado por Faria *et al.* (2023) e próximo aos demais autores. A faixa recomendável para o teor de extrativos presentes em matérias primas para produção de painéis é de 4 a 10% (Iwakiri; Trianoski, 2020). Valores superiores a esta faixa, contribuem negativamente para a cura e polimerização do adesivo, promovendo má adesão e diminuindo as propriedades mecânicas dos painéis (Brito *et al.*, 2021; Bufalino *et al.*, 2012). Logo, o teor do presente estudo, atinge a faixa recomendável.

Tabela 2 – Caracterização química da madeira *P. oocarpa*

Autores	Extrativos totais (%)*	Lignina insolúvel (%)**	Cinzas (%)*	Holocelulose (%)**
Presente estudo	6.89±1.46	29.63 ±0.12	0.33±0.03	63.15±0.77
Brito <i>et al.</i> 2021	6.34±0.28	29.43±0.73	0.93±0.03	63.29±1.05
Furtini <i>et al.</i> 2022	6.18±0.72	29.28±0.14	1.25±0.14	63.29±0.81
Faria <i>et al.</i> 2023	4.03±0.17	26.08±2.50	0.26±0.02	69.62±6.08
Furtini <i>et al.</i> 2023	5.43±1.04	28.99±1.21	1.28±0.07	66.43±2.67

*Base massa seca; **Base massa seca livre de extrativos.

Para o teor de lignina insolúvel, o valor obtido neste estudo encontra-se de acordo com literatura. A lignina é um polímero fenólico natural com estrutura reticulada que confere rigidez ao material (Chio; Qin, 2019). Assim, maiores teores deste componente são desejados, pois promove a coesão das partículas, melhorando a adesão e aumentando as propriedades mecânicas dos painéis (Faria *et al.*, 2023). Portanto, o valor do presente estudo salienta estes fatos.

O teor de cinzas deste estudo mostra próximo ao obtido por Faria *et al.* (2023) e inferior em relação aos demais. Uma alta concentração deste componente pode afetar a adesão e a trabalhabilidade das partículas devido o bloqueio dos locais reativos, prejudicando a qualidade da colagem e o desempenho mecânico do painel (Villarruel *et al.*, 2023; Ndazi *et al.*, 2007).

Quanto a holocelulose os valores estão próximos aos descritos por Brito *et al.* (2021) e Furtini *et al.* (2022). Conforme Fiorelli *et al.* (2018), a holocelulose (celulose + hemicelulose) é constituída por regiões amorfas e apresenta alta capacidade de absorção de água, podendo interferir nas propriedades físicas dos painéis. Portanto, são desejáveis menores teores de holocelulose para a produção de painéis particulados.

De uma maneira geral, os resultados obtidos da composição química da madeira *Pinus* mostram que esse material não limita a produção e a qualidade dos painéis. Assim, podemos inferir a qualidade de adesão especificamente pelo efeito do teor de adesivo e a inclusão das nanopartículas de sílica no cardanol.

3.2 Caracterização dos adesivos

Na Tabela 3 estão apresentados os valores médios obtidos para o teor de sólidos, viscosidade, tempo de gelatinação e pH. Observa-se que os valores encontrados para o teor de sólidos diferiram estatisticamente, indicando que a inserção das SiO₂NPs afetou esta propriedade.

Tabela 3 – Caracterização do adesivo cardanol-formaldeído em função da concentração de nanopartículas de sílica (SiO₂NPs).

Concentração SiO ₂ NPs (%)	Teor de sólidos (%)	Viscosidade (Pa.s)	Tempo de gelatinação (s)	pH
0	97.18 ± 0.72 A	21.97 A	565 A	9.21 A
1	82.70 ± 0.24 B	294.08 B	423 A	9.38 A
2	87.19 ± 1.15 B	345.65 C	436 A	9.47 A

*Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ao nível de significância de 5%.

Fonte: Da autora (2024).

Nota-se que o adesivo cardanol-formaldeído apresentou um teor de sólidos superior aos adesivos com a inclusão de SiO₂NPs. Segundo Bardak *et al.* (2016) o que pode gerar a diminuição do teor de sólidos no adesivo com a inclusão de SiO₂NPs, é a falta de interação entre os grupos hidroxila e outros grupos funcionais do adesivo, ocasionando, portanto, uma estrutura adesiva instável.

Adesivos com baixo teor de sólidos (<20%) pode ser considerado um ponto crítico para a produção dos painéis MDP, isso ocorre, pois a elevada porcentagem de água dificulta a adesão entre as partículas de madeira e o adesivo; e requer um ciclo de prensagem a quente mais longo para remover o excesso de umidade (Solt *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2020). Já teores maiores resultam em adesivos mais resistentes à linha de cola, uma vez que, o teor de sólidos indica a porcentagem de sítios reativos com o ligante (Carvalho *et al.*, 2014).

Diante da literatura, Parameswaran *et al.* (2010) observaram teor de sólidos de 78% para o adesivo fenol-cardanol-formaldeído e 81% para o cardanol-formaldeído, valores próximos aos tratamentos com 1 e 2 % de SiO₂NPs. Já Faria *et al.* (2023) obtiveram um teor de 73.57% para o adesivo cardanol-formaldeído, valor inferior comparado ao presente estudo. De um modo geral, os valores obtidos neste estudo são aceitáveis e indicam maior resistência do adesivo devido aos maiores teores de sólidos.

Para a viscosidade, observa-se um aumento significativo com a inclusão de SiO₂NPs. Conforme Long *et al.* (2022) o aumento da viscosidade ocorre, pois, as SiO₂NPs são hidrofílicas, logo, aglomeram-se com facilidade em adesivos epóxi, devido à grande quantidade de hidroxila presente superfície das SiO₂NPs. Assim, as SiO₂NPs tendem a se aglomerar quando misturados no adesivo, podendo resultar em uma alta heterogeneidade dos materiais compósitos, devido ao aumento da viscosidade do adesivo.

Uma alta viscosidade (> 1.5 Pa.s) diminui a fluidez do adesivo na madeira, podendo obter baixa operacionalidade devido à dificuldade da aplicação do adesivo por spray (Bacigalupe; Escobar, 2017; Liu *et al.*, 2017; Gonçalves e Lelis, 2009). Por outro lado, se a viscosidade for muito baixa, pode ocasionar uma maior penetração do adesivo na madeira, resultando em uma linha de cola “faminta”, o que prejudica o desempenho do adesivo em relação à colagem das partículas (Pizzi; Mittal, 2018).

No presente estudo esta propriedade não dificultou a aplicação manual do adesivo nas partículas de madeira. No entanto, para uso futuro em larga escala requer certa agilidade, logo, os adesivos devem ser testados com outra modificação química que proporcione uma viscosidade menor, para serem usados como adesivos comerciais (Araújo *et al.*, 2021). Diante da literatura Chae *et al.* (2021) obtiveram a mesma tendência do presente estudo, ou seja, houve o aumento da viscosidade do adesivo epóxi em relação ao adesivo com inclusão de 0.3% SiO₂NPs, variando de 71.58 Pa·s para 121.57 Pa·s. De acordo com Long *et al.* (2022) é necessário modificação da superfície das SiO₂NPs para aumentar sua compatibilidade com o adesivo e melhorar o efeito das SiO₂NPs nas propriedades dos adesivos, assim como, a viscosidade.

Para o tempo de gelatinização, observa-se que não houve diferença estatística significativa a inclusão das SiO₂NPs nos adesivos. Embora o tempo de gelatinização tenha reduzido com a adição das SiO₂NPs, essa redução não é estatisticamente significativa. Isso sugere que as nanopartículas afetam mais a viscosidade do que a cura do adesivo. Segundo Boschetti (2018), o tempo de gelatinização indica a velocidade de polimerização do adesivo, sendo que quanto maior a velocidade de reação, maior será a produtividade industrial e, menor o custo energético no processo. Todavia, ressalta-se que o tempo de gel não pode ser muito curto, pois pode ocorrer pré-cura do adesivo, antes que ele realize as suas funções de movimento e mobilidade. Portanto, os valores obtidos no presente estudo são considerados aceitáveis, uma vez que, apresentam valores próximos a faixa padrão do adesivo fenol-formaldeído industrial que varia de 180 a 660 segundos (IWAKIRI; TRIANOSKI, 2020).

De acordo com Varghese e Thachil (2007) é relatado um gel time de aproximadamente 2000s para o adesivo cardanol-fenol-formaldeído (1:2:6). Entretanto, este adesivo se difere do utilizado no presente trabalho, uma vez que foram produzidos por uma via de síntese ligeiramente diferente, utilizando outra tipologia de formaldeído (formalina) e com a introdução do fenol sintético. Logo, é de se esperar diferenças quanto à reatividade dos adesivos, o que pode explicar a diferença para os valores de gel time observados entre o presente trabalho.

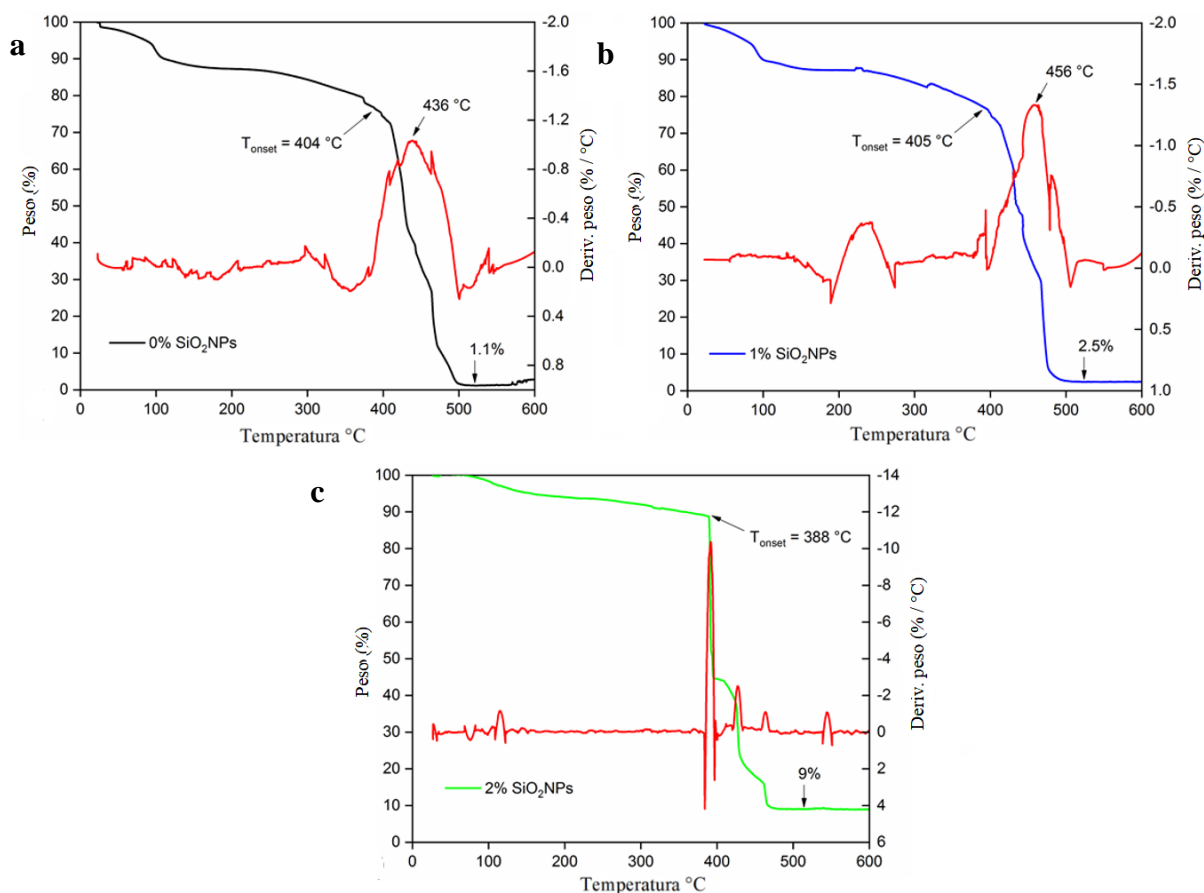
Do mesmo modo que o tempo de gelatinação, a inclusão das SiO₂NPs nos adesivos não influenciou o pH. O pH obtido em todos tratamentos foi básico, ou seja, maior que 7. Conforme Iwakiri e Trianoski (2020), os valores do pH dos adesivos devem estar compreendidos numa faixa de variação estipulada entre 2.5 e 11. O fato de o pH estar fora desta faixa, pode resultar numa degradação das fibras da madeira, e se o pH for muito baixo pode proporcionar a formação de espuma na mistura, prejudicando o processo de colagem. Comparado a literatura Furtini *et al.* (2022) obtiveram o pH variando de 6.86-5.86 ao substituir UF pelo cardanol e Faria *et al.* (2023) reportaram o pH 6.23 para o adesivo cardanol-fomaldeído, valores menores em relação ao presente estudo. Já Costa (2016) reportaram valores médios de pH de 7.98-9.96 para o adesivo UF com SiO₂NPs (1,3,5 e 10%), próximos aos encontrados neste estudo.

Logo os valores obtidos neste estudo, indicam que a adição de SiO₂NPs modifica significativamente o teor de sólidos e viscosidade, enquanto o tempo de gelatinização e pH não são afetados. No entanto, independente das modificações causadas pela adição das SiO₂NPs, os valores mostraram-se adequados para a produção dos painéis MDP em escala laboratorial.

Os termogramas dos adesivos cardanol-formaldeído com adição de 0%, 1% e 2% SiO₂NPs estão apresentados na Figura 4. Para todas composições avaliadas observa-se expressiva redução de massa até cerca de 100 °C, atribuído à evaporação de água presente no adesivo. A partir desse ponto, a perda de massa ocorre de maneira gradual até aproximadamente 350 °C, à exceção do adesivo com 2% SiO₂NPs. O adesivo com 2% de SiO₂NPs apresentou estabilidade térmica até 388 °C, além de menor perda de massa até essa faixa de temperatura, sendo possível inferir que esse comportamento é atribuído a uma menor quantidade de voláteis, indicando maior estabilidade inicial. Conforme Papadopoulou *et al.* (2018) essa perda de massa ocorre devido à evaporação da água e outros produtos químicos de baixo peso molecular, como por exemplo, o formaldeído.

Para o adesivo puro, a partir de 300 °C ocorre perda de massa relativamente gradual até cerca de 350 °C, quando ocorre uma queda mais acentuada em 404 °C. Já para o adesivo com 1% de SiO₂NPs, a perda de massa é ligeiramente mais estável até 350 °C, comparada ao adesivo sem nanopartículas, indicando uma maior resistência térmica. Já para o adesivo com 2% de SiONPs, a perda de massa é mais abrupta em 388 °C, após essa faixa, a fase final é mais estável, semelhante ao adesivo com 1% de SiO₂NPs, sugerindo maior estabilidade térmica em temperaturas mais elevadas.

Figura 4 – Curvas TGA e DTG a) Em função do adesivo cardanol-formaldeído b) Em função do adesivo com 1% SiO₂NPs c) Em função do adesivo com 2% SiO₂NPs.



Fonte: Da autora (2024).

Conforme Jahan et al. (2023), a degradação entre 421 °C e 514 °C pode ser correlacionada com a decomposição da longa cadeia alquílica presente no cardanol, além da quebra de ligações no metil, carbonila, anel fenólico e benzeno (ALAM et al., 2016; HAN et al., 2018). Segundo Liou (2004), a degradação de compostos orgânicos remanescentes da síntese dos adesivos ocorre até aproximadamente 500 °C. Para o adesivo com 1 e 2% de SiO₂NPs, acima de 500 °C, até cerca de 570 °C, ocorre a perda de água formada pela condensação dos grupos silanóis (Lu et al., 2013).

O principal evento térmico verificado para o adesivo puro e nanorreforçado com 1% de SiO₂NPs ocorre em 404 °C e 405 °C, respectivamente, referente ao ponto em que se inicia a degradação térmica do material (T_{onset}), enquanto o adesivo nanorreforçado com 2% de SiO₂NPs tem seu início de degradação térmica em 388 °C, ligeiramente inferior às demais composições. A inserção de maior teor de SiO₂NPs resultou em redução do início da degradação térmica do material, entretanto, nota-se que a perda de massa foi muito menor comparativamente ao adesivo puro e nanorreforçado com 1% de SiO₂NPs. De acordo com as

curvas de DTG, observa-se que o adesivo com 2% de SiO₂NPs apresentou pico de degradação térmica exatamente na temperatura T_{onset} (388 °C), enquanto o adesivo puro em 436 °C e o adesivo nanorreforçado com 1% de SiO₂NPs em 456 °C. Esses resultados sugerem que a presença de maiores teores de nanopartículas de sílica é responsável por reduzir a estabilidade térmica do adesivo.

Embora inseridos em baixos teores, as nanopartículas de sílica (SiO₂NPs) promoveram maior teor de resíduo ao final da varredura térmica. Conforme se nota na Figura 4, o adesivo puro apresentou massa final de 1.1%, enquanto o adesivo nanorreforçado com 1 e 2% de SiO₂NPs apresentaram teores de 2.5 e 9%, respectivamente. Esse maior teor de material residual é explicado devido à natureza do material de reforço empregado; por se tratar de nanopartículas cerâmicas, esta possui alta temperatura de degradação térmica, logo, maiores teores inseridos no adesivo conseqüentemente resultam em maior massa residual.

3.3 Caracterização dos painéis

3.3.1 Propriedades físicas

Pelo Teste F na análise de variância pode-se constatar que não houve interação significativa entre o teor de adesivo e as concentrações de SiO₂NPs para a densidade aparente (F_c= 0.760 ns) e razão de compactação (F_c=0.605 ns) dos painéis MDP. Observa-se na Tabela 4 e Tabela 5 os valores médios para a densidade aparente e razão de compactação, em função do teor de adesivo e a concentração de SiO₂NPs, respectivamente.

Tabela 4 – Densidade aparente e razão de compactação em função do teor de adesivo para produção de painéis MDP

Teor de adesivo (%)	Densidade aparente (g/cm ³)	Razão de compactação (%)
8	0.66 ± 0.02 A	1.28 ± 0.03 A
10	0.67 ± 0.03 A	1.30 ± 0.04 A
12	0.66 ± 0.02 A	1.27 ± 0.05 A
14	0.66 ± 0.01 A	1.26 ± 0.03 A

Fonte: Da autora (2024).

Tabela 5 – Densidade aparente e razão de compactação em função da concentração de nanopartículas de sílicas (SiO₂NPs) nos adesivos para produção dos painéis MDP

Concentração SiO ₂ NPs(%)	Densidade aparente (g/cm ³)	Razão de compactação (%)
0	0.67 ± 0.02 A	1.30 ± 0.03 A
1	0.66 ± 0.03 A	1.28 ± 0.04 A
2	0.65 ± 0.02 A	1.26 ± 0.03 A

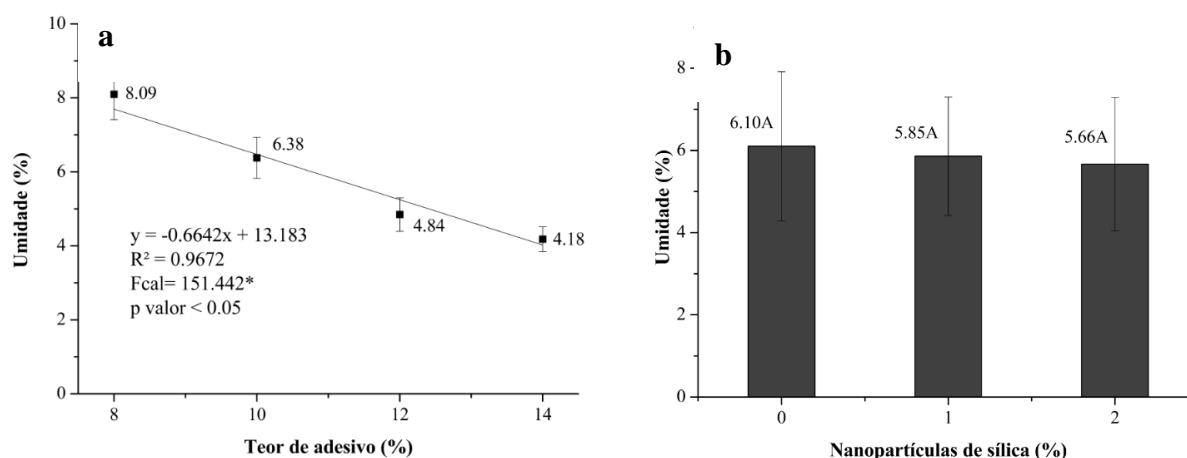
Fonte: Da autora (2024).

A densidade aparente dos painéis variaram entre 0.65-0.67 g/cm³, sendo todos os painéis classificados de média densidade, conforme a classificação da NBR 14810-2 que estabelece uma faixa de 0.55 a 0.75 g/cm³. A densidade nominal (0.70 g/cm³) dos painéis foi superior à densidade aparente, no entanto não prejudicaram a interpretação dos resultados, pois não houve diferença significativa. A redução da densidade aparente em relação a nominal, pode ser atribuída à perda de partículas nas etapas de aplicação do adesivo, no manuseio no processo de conformação dos painéis (Brito *et al.*, 2020) e no não retorno da espessura após a prensagem a quente (Furtini *et al.*, 2022)

Conforme Maloney (1993) a faixa ideal do valor da razão de compactação deve estar entre 1.3 a 1.6 para garantir uma área de contato satisfatória entre as partículas e a densificação para a formação do painel. Portanto, todos os painéis estão condizentes a esta faixa. Narciso *et al.* (2021) obtiveram valor semelhante ao presente estudo de 1.30% para painel MDP, com partículas de pinus e adesivo UF. Ressalta-se, ainda, que a adição de SiO₂NPs não trouxe problemas para a densidade aparente e razão de compactação.

De acordo com a análise de variância (ANOVA), não foi observado interação significativa entre o teor de adesivo e adição de SiO₂NPs para o teor de umidade (Fc= 1.283 ns). Os valores médios obtidos para esta propriedade em relação ao teor de adesivo e a adição das SiO₂NPs, encontram-se na Figura 5a e 5b, respectivamente.

Figura 5 – Teor de umidade dos painéis: a) Em função do teor de adesivo
b) Em função das SiO₂NPs



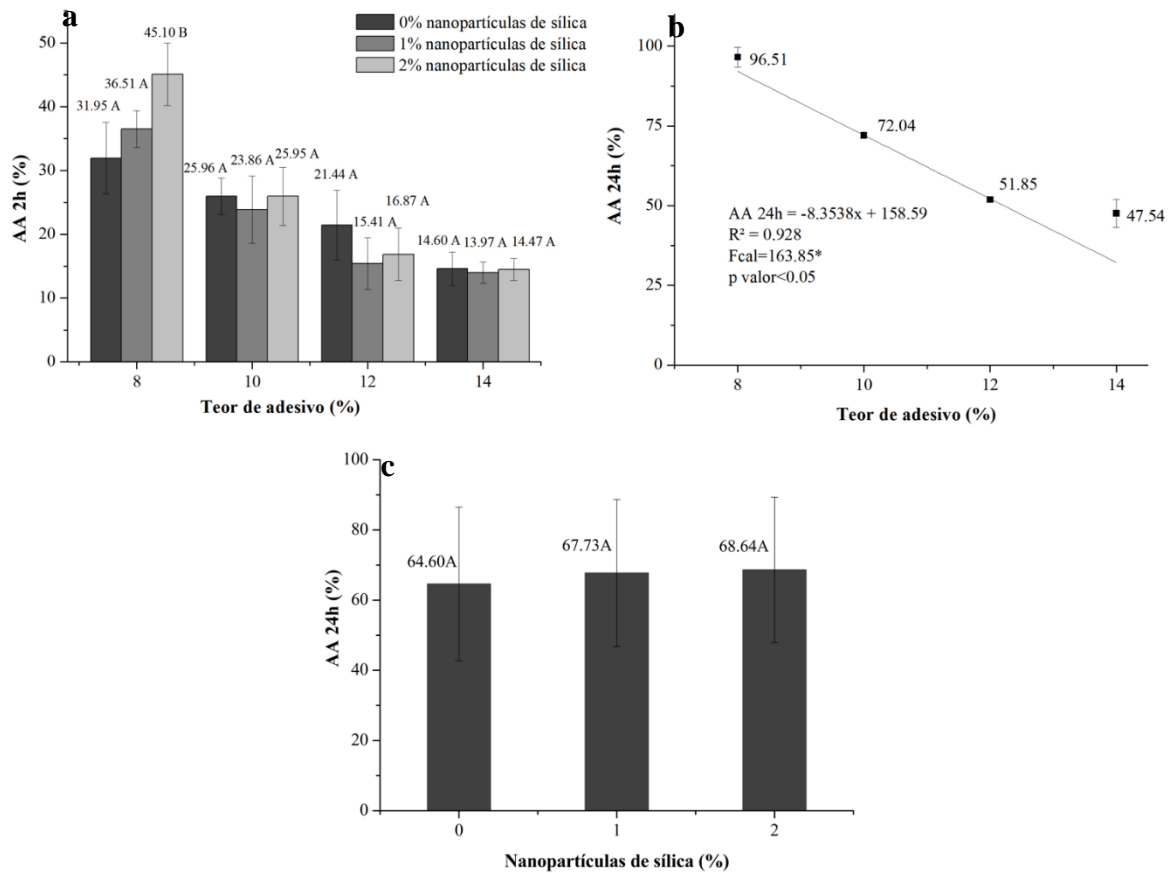
Fonte: Da autora (2024).

Observa-se na Figura 5a uma correlação significativa e decrescente, ou seja, para cada 1% do teor de adesivo inserido houve redução de 0.66% do teor de umidade. Fato esperado, uma vez que, o cardanol tem a capacidade de servir como uma barreira à absorção de umidade (Furtini *et al.*, 2022). A adição das SiO₂NPs não apresentou efeito significativo aos painéis (Figura 5b). Condição semelhante ao estudo de Roumeli *et al.* (2012) ao adicionar SiO₂NPs (1, 2, 3 e 3.5%) ao adesivo UF em painéis aglomerados comerciais, os autores constataram que não houve efeito significativo e obtiveram médias variando de 6.33-7.33%, valores próximos ao presente estudo.

Diante da literatura, os valores obtidos neste estudo se assemelham aos painéis comerciais com o adesivo UF. Andrade *et al.* (2019) obtiveram uma média de 7.37% de umidade para os painéis MDP com partículas de pinus e o adesivo UF sendo aplicado 11% para a face dos painéis e 7% para o miolo. A norma de comercialização europeia *EN-312* (European Standards, 1993) estipula uma faixa de 5 a 13% de teor de umidade para os painéis MDP, portanto, atendem às especificações o teor de 8 a 12.40% de adesivo (Figura 5a) e todas as concentrações de SiO₂NPs (Figura 5b).

Conforme a análise de variância (ANOVA), foi observado interação significativa entre o teor de adesivo e adição de SiO₂NPs para AA2h (Fc= 3.416*). Já para a AA 24h não foi observado interação significativa entre o teor de adesivo e adição de SiO₂NPs (Fc=0.430 ns). Os valores médios obtidos para AA 2h e AA 24h em relação ao teor de adesivo estão mostrados na Figura 6.

Figura 6 – Absorção de água após 2 e 24 horas de imersão a) AA2h em função do teor de adesivo b) AA24h em função do teor de adesivo c) AA24h em função das SiO₂NPs.



Fonte: Da autora (2024).

Nota-se na Figura 6a que o teor de adesivo de 8% contendo adição de 2% de SiO₂NPs, demonstrou um comportamento que indica maior absorção de água após 2h de imersão. Supõe-se, neste caso, que a inclusão das nanopartículas dificultou a adesão das partículas, devido a uma possível falta de interação e consequentemente houve o aumento de absorção de água. Por outro lado, este comportamento não foi observado para os demais teores de adesivo e nem para a AA 24h, ou seja, as nanopartículas não afetaram essa propriedade (Figura 3c), fator positivo, uma vez que, as SiO₂NPs tendem a apresentar características hidrofílicas.

Observa-se na Figura 6b uma correlação significativa e decrescente, ou seja, para cada 1% do teor de adesivo inserido, houve redução da absorção de água de 8.35 % para 24h. A diminuição da AA2h (Fig 6a) e AA24h conforme aumenta o teor de adesivo está relacionada a um maior recobrimento das partículas, fazendo com que ocasione uma melhor ligação das mesmas e proporcione uma barreira à absorção de água, tendo por consequência a diminuição dos valores médios destas propriedades (Mendes *et al.*, 2012). Fato esperado, pois o cardanol possui um grupo aromático que induz a propriedade repelente à água (Kanann *et al.*, 2023).

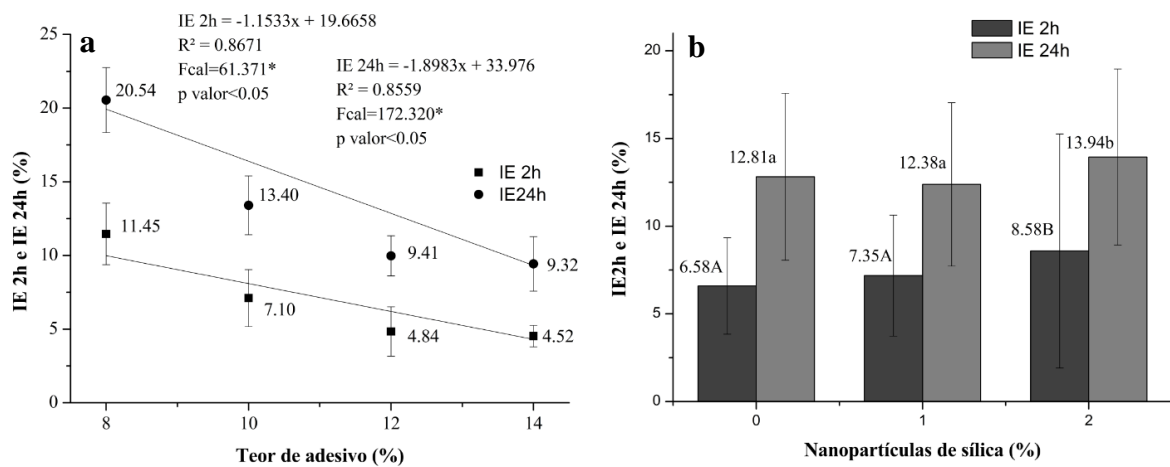
Portanto, à medida que aumentou o teor de adesivo, o cardanol que é um material hidrofóbico, diminui a absorção de água nos painéis.

Os valores obtidos neste estudo foram inferiores ao de Narciso *et al.* (2021) que obtiveram para os painéis MDP com madeira de *P. oocarpa* e adesivo UF (11% de adesivo nas faces e 7% de adesivo no núcleo) valores médios de AA 2h e AA 24h variando de 72 a 78%, respectivamente. Dourado *et al.* (2020) obtiveram para os painéis MDP de *Pinus spp* produzidos com o adesivo UF na proporção de 12% e parafina na proporção de 0.5%, teor médio de 85% para AA 2h e 99% para AA24h. Dukarska (2013) ao produzir painéis aglomerados com partículas de madeira e palha, com adesivo UF e SiO₂NPs (0; 0.5; 1.0; 1,5 e 2%) observaram o aumento AA24h variando de 81.2 – 92.5 %. Os autores relatam que a inclusão das SiO₂NPs ao adesivo UF na proporção de 12% indicaram uma adesão mais fraca aos painéis, proporcionando menor resistência à água e nas propriedades mecânicas em relação ao adesivo puro de UF.

Não há valores normativos para absorção de água de painéis de MDP, portanto, diante a literatura os valores de AA deste estudo revelam potencial do adesivo cardanol-formaldeído com adição de SiO₂NPs, uma vez que, os resultados são eminentes comparados aos painéis convencionais da literatura produzidos com o adesivo UF.

Segundo a análise de variância (ANOVA), não foi observado interação significativa entre o teor de adesivo e as concentrações de SiO₂NPs para IE 2h (Fc=0.285ns) e IE24h (Fc=0.164 ns). Os valores referentes ao inchamento em espessura após 2h (IE2h) e 24 h (IE24h) de imersão em água dos painéis em função do teor de adesivo, encontram-se na Figura 7a. Verifica-se uma relação linear significativa e decrescente, para cada 1% de adesivo inserido ocorre a redução de 1.15% para IE2h e 1.89% para IE24h.

Figura 7 – Inchamento em espessura após 2 e 24 horas de imersão dos painéis a) Em função do teor de adesivo b) Em função das SiO₂NPs.



Fonte: Da autora (2024).

Conforme o esperado, maior teor de adesivo por partículas resulta em uma melhor ligação entre as mesmas, acarretando em um menor inchamento em espessura (IE). Segundo Mendes *et al.* (2012) o aumento do teor de adesivos nas partículas resulta em menor disponibilidade dos sítios de sorção para a ligação com as moléculas de água e consequentemente ocorre a redução do IE. A norma *EN 312-4* (European Standards, 2003) estipula o valor máximo de 14% para IE24h em painéis MDP de uso geral sob condições úmidas, portanto, o teor de adesivo de cardanol-formaldeído com adição de SiO₂NPs a partir de 10.52% atendem o padrão de comercialização. Os valores obtidos neste estudo foram inferiores aos relatados na literatura, fator favorável para o adesivo cardanol-formaldeído.

Furtini *et al.* (2022) obtiveram para os painéis aglomerados com partículas de *P.oocarpa* e 12% do teor de adesivo cardanol em substituição à UF (80%) uma variação de 19.32% a 42.61% no IE2h e 23.30% a 54.27% para o IE24h. Faria *et al.* (2023) constataram para os painéis aglomerados com partículas de *P.oocarpa* e teor de 8% do adesivo cardanol-formaldeído uma média de 23.14% e 29.89% para a IE 2h e 24h respectivamente. Reis *et al.* (2020) reportaram para os painéis MDP de partículas de pinus, 11% de adesivo UF nas faces e 7% no núcleo, uma média de aproximadamente 18% e 23% para a IE 2h e 24h respectivamente.

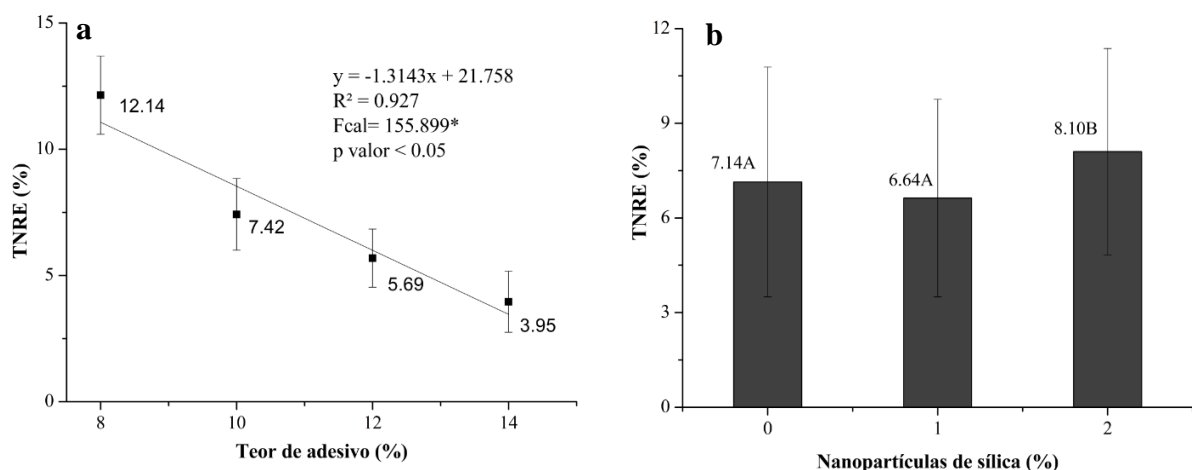
Segundo Faria *et al.* (2023) a redução do IE dos painéis com adesivo cardanol-formaldeído ocorre devido a formação de ligações covalentes entre o cardanol e o formaldeído, resultando em uma ligação eficiente entre o adesivo e a partícula, e como consequência maior estabilidade dimensional.

De acordo com a análise de variância (ANOVA) a adição de 2% de SiO₂NPs ao adesivo cardanol-formaldeído foi significativa para o IE 2h e 24h (Figura 7b). Supõe-se que a redução do teor de sólidos do adesivo (Tabela 3) diante estas propriedades, diminuiu as porcentagens de sítios reativos e conseqüentemente houve menor interação entre o adesivo e as partículas, resultando, portanto em um maior IE.

Valle *et al.* (2020) constataram para os painéis MDP produzidos com partículas de *Eucalyptus grandis* e o adesivo UF com teor de 10% para camadas externas e 8% para o núcleo, com adição de 4% SiO₂NPs em relação ao peso da UF, a diminuição do inchamento em espessura do painel em 42% (62-37%). A adição das nanopartículas no adesivo aumentou a estabilidade dimensional do painel. Já Dukarska e Derkowski (2014) obtiveram para os painéis aglomerados com madeira de pinus e palha de colza, encolados com o adesivo UF no teor de 12% e adição de SiO₂NPs (0, 10, 20, 30, 40, 50 e 60%) um teor médio de 20.72 – 37.58% de IE 24h. A adição das nanopartículas indicaram baixa adesão e conseqüentemente maior inchamento em espessura.

Conforme a análise de variância (ANOVA), não foi observado interação significativa ($F_c=1.179_{ns}$) entre o teor de adesivo e a adição de SiO₂NPs. Os valores da taxa de não retorno de espessura (TNRE) em relação ao teor de adesivo estão descritos na Figura 8a e em relação à adição das SiO₂NPs na Figura 8b.

Figura 8 – Taxa de não retorno de espessura dos painéis a) Em função do teor de adesivo b) Em função das SiO₂NPs.



Fonte: Da autora (2024).

Observa-se na Figura 8a que o aumento de 1% do teor de adesivo, levou a um decréscimo da TNRE na ordem de 1.31%. E a adição de 2% de SiO₂NPs ao adesivo cardanol-

formaldeído foi significativa (Figura 8b), proporcionando um aumento da TNRE, condição similar ao IE2h e IE24h. Os resultados das análises apontam que os painéis com maior teor de adesivo (Figura 8a) e menor adição de SiO₂NPs (Figura 8b) apresentam uma TNRE baixa. Isso ocorre, devido a melhor interface de ligação entre o adesivo e as partículas de madeira (Vilela *et al.*, 2017).

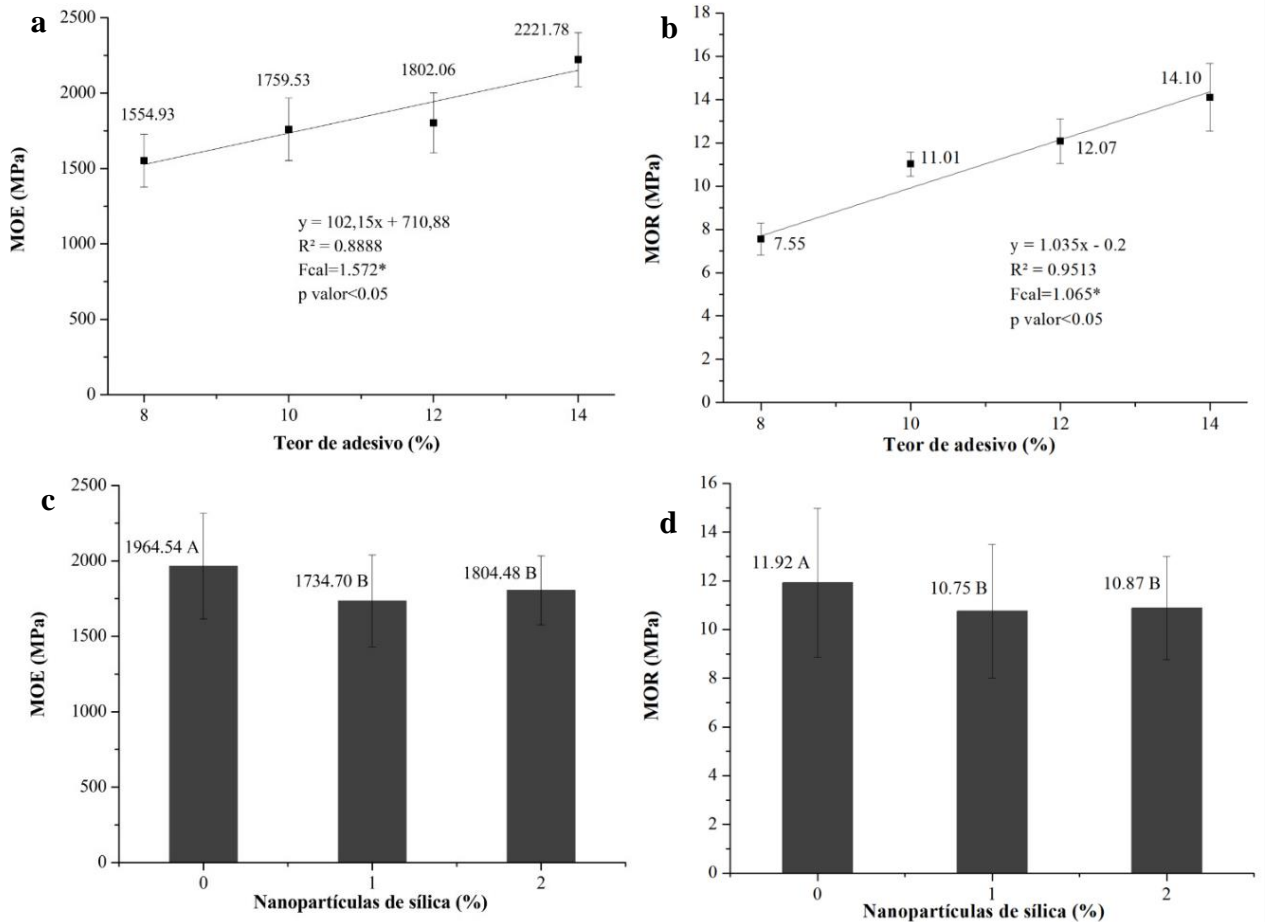
Vilela *et al.* (2017) estudando painéis aglomerados com a madeira de pinus e 7% do adesivo UF obtiveram um teor médio de 9.80%, valor próximo do presente estudo na faixa de 9% do teor de adesivo (Figura 8a) e com adição de 2% de SiO₂NPs (Figura 8b). Indicando, portanto, que os painéis do presente estudo têm uma boa estabilidade dimensional, ou seja, ele retém sua forma e espessura original mesmo após o período de imersão e exposição à umidade. Condição importante em aplicações onde a deformação do painel devido à umidade pode ser problemática, como na fabricação de móveis ou em instalações de revestimento de paredes.

Segundo Mendes *et al.* (2014) essa característica da madeira está diretamente ligada à propriedade de inchamento em espessura, e a variação apresentada é um fator resultante do alívio das tensões de compressão, que se torna parcialmente irrecuperável. O inchamento ocorre por causa dos sítios de sorção da madeira, que absorvem a umidade causando a separação das partículas. Como resultado, ocorre o alívio de tensões devido à compressão utilizada na prensagem das placas. Porém, quando o painel perde umidade, parte do inchamento se torna irrecuperável (Saad *et al.*, 2016).

3.3.2 Propriedades mecânicas

De acordo com a análise de variância (ANOVA), não foi observado interação significativa entre o teor de adesivo e as concentrações de SiO₂NPs para o módulo de elasticidade (MOE) (Fc=1.572ns) e módulo de ruptura (MOR) (Fc=1.139 ns). Os valores referentes ao MOE e MOR em função do teor de adesivo, encontram-se nas Figura 9a e 9b respectivamente. Já os valores médios em relação à adição das SiO₂NPs, estão descritos na Figura 9c para o MOE e na Figuras 9d para o MOR.

Figura 9 – Flexão estática a) MOE em função do teor de adesivo b) MOR em função do teor de adesivo c) MOE em função das SiO₂NPs d) MOR em função das SiO₂NPs



Fonte: Da autora (2024).

Observa-se nas Figuras 9a e 9b uma relação linear significativa e crescente, para cada 1% de adesivo inserido, houve um aumento de 102.15 MPa para o MOE e 1.035 MPa para o MOR. O aumento destes valores médios, estão relacionados ao aumento do teor de adesivo, pois, o cardanol permite propriedades mecânicas superiores, devido, à sua função fenólica e à sua longa cadeia alifática insaturada (Guo *et al.*, 2021; Mora *et al.*, 2019). Portanto, o aumento do adesivo promoveu maior ligação entre as partículas e, assim, melhorou a resistência mecânica dos painéis.

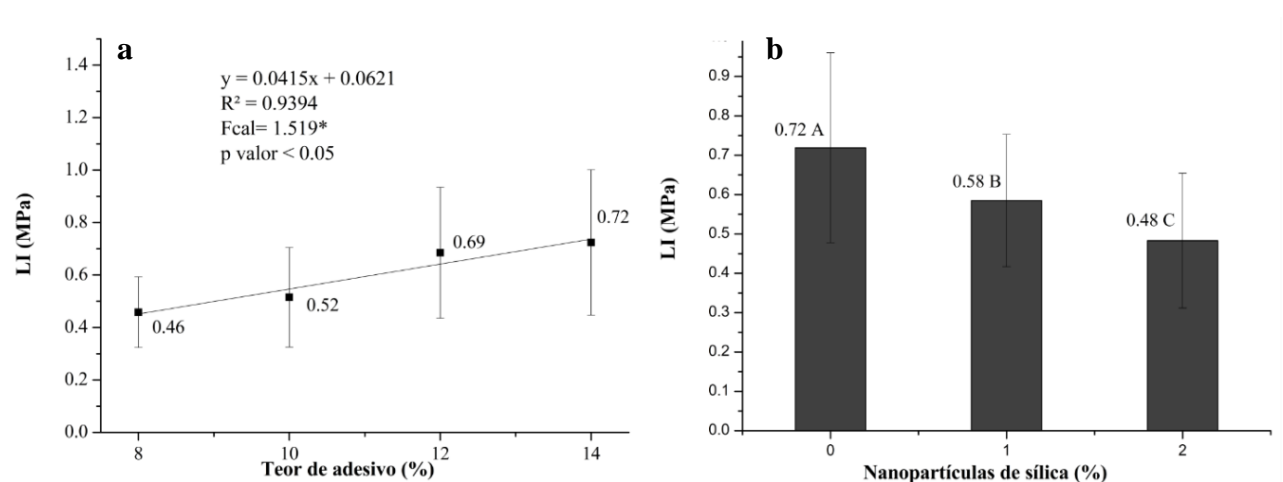
No entanto, nas Figuras 9c e 9d observa-se uma redução significativa à adição de 1 e 2% de SiO₂NPs ao adesivo cardanol-formaldeído. Este decréscimo pode ser considerado em razão do efeito de agrupamento das SiO₂NPs, no qual, dificulta o mecanismo de suporte de carga do adesivo (Subbiah *et al.*, 2022; Alshahrani; Vr, 2022). A norma EN 312 (European Standards, 2003) estipula para uso não estrutural em condições secas um valor mínimo de 1600

MPa para o MOE e 11MPa para o MOR. Portanto, observa-se, que o MOE a partir de 8.70% do teor de adesivo (Fig.9a) e com a inclusão de até 2% SiO₂NPs (Fig.9c) atendem a normativa. Já para o MOR a partir de 10.85% do teor de adesivo (Fig.9b) e 0% de SiO₂NPs (Fig.9d) atendem a normativa.

Veloso *et al.* (2020) ao estudarem painel MDP, com a madeira pinus e o adesivo UF em teor de 12% nas faces e 10% no núcleo, obtiveram valores médios para o MOE de 2020 MPa e MOR de 15.2MPa, valores próximos ao teor de 14% do cardanol-formaldeído. Do mesmo modo Souza *et al.* (2019) que avaliaram o painel MDP de pinus, com 13% de adesivo UF nas faces e 8% de UF no núcleo, sendo todas camadas com 1% de parafina, reportaram valores médios para o MOE de 2208.82 MPa e MOR de 13.74 MPa.

Conforme a análise de variância (ANOVA), não foi observado interação significativa entre o teor de adesivo e as concentrações de SiO₂NPs para a ligação interna (LI) (F_c= 1.519). Os valores médios referentes a LI em relação ao teor de adesivo e a adição das SiO₂NPs, encontram-se na Figura 10a e 10b, respectivamente.

Figura 10 – Ligação interna dos painéis a) Em função do teor de adesivo b) Em função das SiO₂NPs.



Fonte: Da autora (2024).

Observa-se na Figura 10a uma relação linear significativa e crescente, para cada 1% de adesivo inserido, houve um aumento 0.04 MPa. De acordo com Li *et al.* (2016), a quantidade e a distribuição adequada do adesivo influenciam diretamente na resistência do painel e proporcionam melhor transferência de tensões interfaciais quando submetido à cargas, aumentando a resistência e evitando falhas prematuras. Como exemplo dessa relação, Zau *et al.* (2014) observaram melhorias para a LI quando o teor de adesivo foi aumentado.

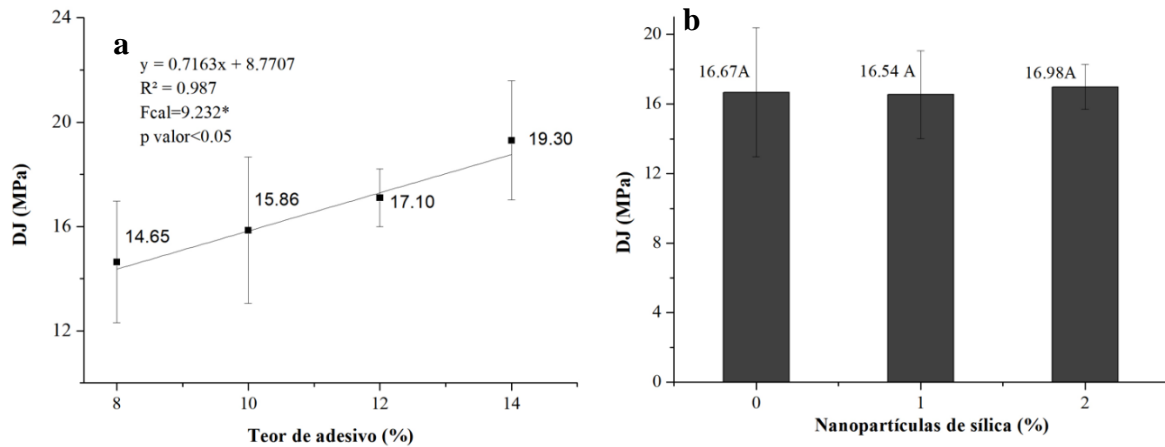
No entanto em função das SiO₂NPs, observa-se uma redução significativa à medida que aumenta os teores de SiO₂NPs. Conforme Aliakbari *et al.* (2019) essa redução pode ter ocorrido, devido, o aumento da viscosidade do adesivo, diante o aumento da porcentagem de peso das SiO₂NPs e a distribuição não uniforme do adesivo nas partículas, o que resulta em aglomerações concentradas, diminuindo, portanto, as propriedades mecânicas. A norma EN 312 (1993), estipula o valor mínimo de 0.30 MPa, logo, todos os teores de adesivo (Fig.10a) e concentrações de SiO₂NPs (Fig. 10b) atendem o mínimo estipulado pela normativa. À vista disso, evidencia-se uma alta resistência de ligação interna do adesivo cardanol-formaldeído, mesmo com a inclusão de SiO₂NPs no adesivo.

Veloso *et al.* (2020) ao estudarem o painel MDP, com o adesivo UF, obtiveram valores médios para a LI de 0.54 MPa, valor próximo ao teor de 10% do adesivo cardanol-formaldeído e com a inclusão de 1% de SiO₂NPs. Valle *et al.* (2020) ao estudarem painel MDP com 10% de UF, 1% de catalisador (sulfato de amônio) para as camadas externas, e 8% de UF, 1% de catalisador para as camadas centrais, com adição de 4% SiO₂NPs em relação ao peso do adesivo UF, obtiveram teores 0.79 MPa próximos ao teor de 14% do adesivo cardanol-formaldeído sem a inclusão de SiO₂NPs.

De acordo com a análise de variância (ANOVA), não foi observado interação significativa entre o teor de adesivo e adição de SiO₂NPs para a dureza janka (DJ) ($F_c = 2.220$ ns). Os valores médios obtidos para esta propriedade em relação ao teor de adesivo e a adição das SiO₂NPs, encontram-se na Figura 11a e 11b, respectivamente.

Verifica-se na Figura 11a, uma relação linear significativa e crescente, para cada 1% de adesivo inserido ocorreu um aumento de 0.72 MPa. Supõe-se que o aumento do teor do adesivo promoveu uma ligação mais eficaz entre as partículas de madeira, resultando em uma estrutura mais coesa e resistente, contribuindo para o aumento da DJ do painel. Já na Figura 8b, observa-se que a inclusão das SiO₂NPs não afetou significativamente a DJ. Neste caso, pressupõe-se que as SiO₂NPs não interagiram suficientemente com o adesivo cardanol-formaldeído para aumentar ou diminuir a coesão e a resistência dos painéis. O valor mínimo de DJ exigido pela norma NBR 14.810-2 (ABNT, 2013) é de 1.0 MPa, portanto, todos os tratamentos atenderam este requisito.

Figura 11 – Dureza Janka a) Em função do teor de adesivo b) Em função das SiO₂NPs.

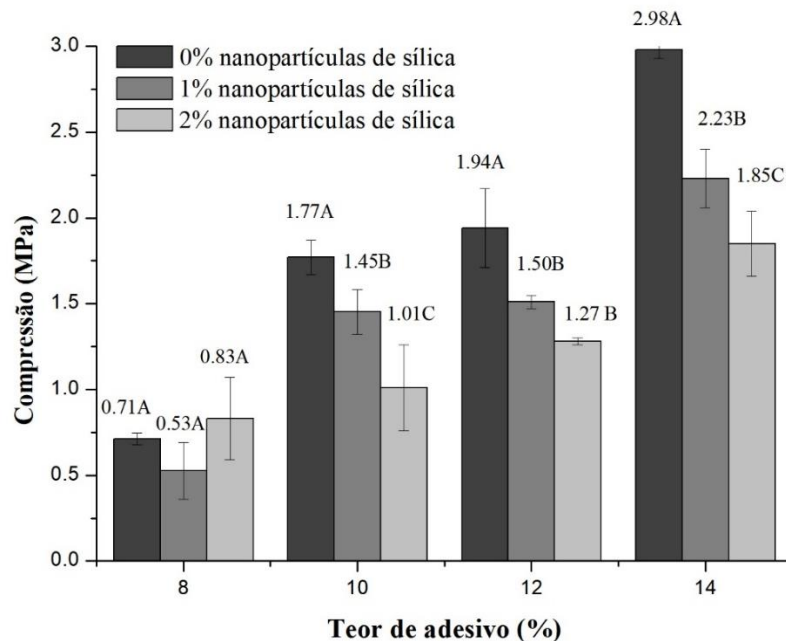


Fonte: Da autora (2024).

Os valores obtidos neste estudo, mostram inferiores aos relatados na literatura. Narciso *et al.* (2021) obtiveram para os painéis MDP, produzidos com adesivo UF (11% de adesivo nas faces e 7% de adesivo no núcleo) com 0 e 100% de fibra de coco em substituição à madeira de pinus, com prensagem de 3.94 MPa, temperatura de 160°C, durante 8 minutos, valores médios de DJ de 27.7 e 19.9 MPa. Uma possível explicação dos altos valores da literatura, em relação ao presente estudo, é que o valor de DJ é fortemente influenciado pela pressão e temperatura durante o processo de fabricação, e consequentemente pelas densidades das amostras (Büyüksari, 2013).

Conforme a análise de variância (ANOVA), foi observado interação significativa entre o teor de adesivo e adição de SiO₂NPs para a compressão ($F_c = 3.416^*$). Os valores médios obtidos para a compressão em relação ao teor de adesivo, encontram-se na Figura 12.

Figura 12 – Compressão em função do teor de adesivo



Legenda: *Médias seguidas da mesma letra, em cada teor de adesivo, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ao nível de significância de 5%.

Fonte: Da autora (2024).

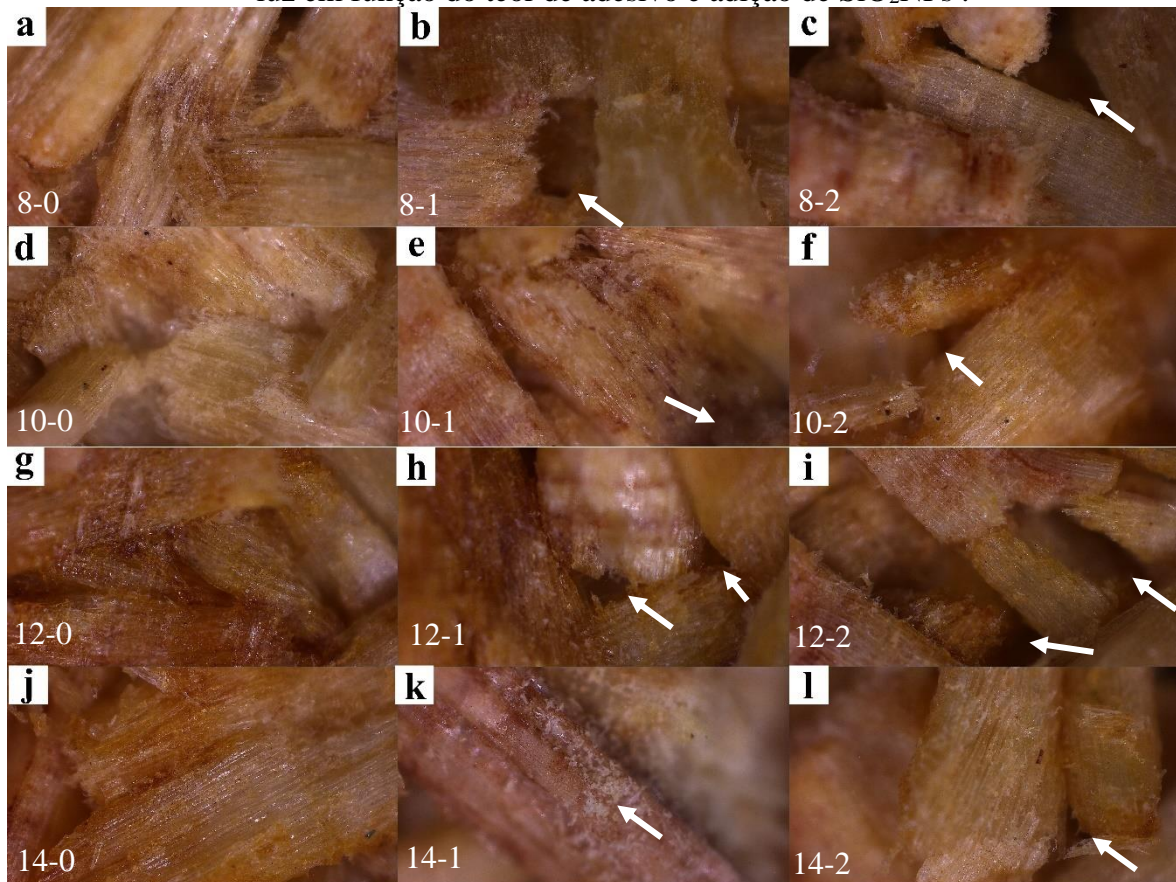
Observa-se na Figura 12 o aumento da compressão à medida que aumenta o teor de adesivo. O aumento do teor de adesivo proporciona melhor colagem das partículas, influenciando positivamente nas propriedades de compressão dos painéis (Oliveira *et al.*, 2016). Nota-se que a partir de 10% do teor de adesivo houve um efeito significativo a inclusão de SiO₂NPs, observa-se, resultados inferiores em relação ao adesivo com 0% de SiO₂NPs. A mesma tendência, foi observada para a LI, MOE e MOR, em que a adição das SiO₂NPs teve a efeitos negativos na resistência dos painéis nessas propriedades.

Não há valores normativos para compressão de painéis MDP, portanto a adição de SiO₂NPs no adesivo cardanol-formaldeído não é uma barreira para a compressão.

3.3.3 Avaliação microestrutural da interface madeira-adesivo

A Figura 13 representa as imagens obtidas com o microscópio óptico de luz, referente aos diferentes tratamentos em relação ao teor de adesivo e a adição de SiO₂NPs.

Figura 13 – Imagens da estrutura interna dos painéis MDP obtidas por microscópio óptico de luz em função do teor de adesivo e adição de SiO₂NPs .



Legenda: Teor de adesivo (%) - Concentração de SiO₂NPs: a)8-0 b) 8-1 c)8-2 d) 10-0 e)10-1 f)10-2 g) 12-0 h) 12-1 i)12-2 j)14-0 k)14-1 l)14-2. As setas indicam os espaços vazios, com exceção da imagem k que indica a aglomeração das SiO₂NPs.

Fonte: Da autora (2024).

As imagens mostram que o aumento do teor de adesivo (de 8% a 14%) sem a adição de SiO₂NPs leva a um arranjo de partículas mais organizado e compacto, como observado na primeira coluna (Fig. 13a, d, g, j). Já nas colunas 2 e 3, nota-se um aumento dos espaços vazios com a adição de SiO₂NPs. Diante o exposto, supõe-se que o aumento da concentração de SiO₂NPs e sua distribuição não uniforme, causaram aglomerações (manchas brancas), afetando negativamente a colagem e as propriedades mecânicas dos painéis, como MOE, MOR, LI e compressão.

Roumeli *et al.* (2012) reportaram comportamento semelhante, ao adicionarem 1, 2, 3 e 3.5% de SiO₂NPs ao adesivo UF para a produção de painéis particulados. Os autores observaram que as nanopartículas tenderam a ficar nas bordas ásperas das partículas de madeira

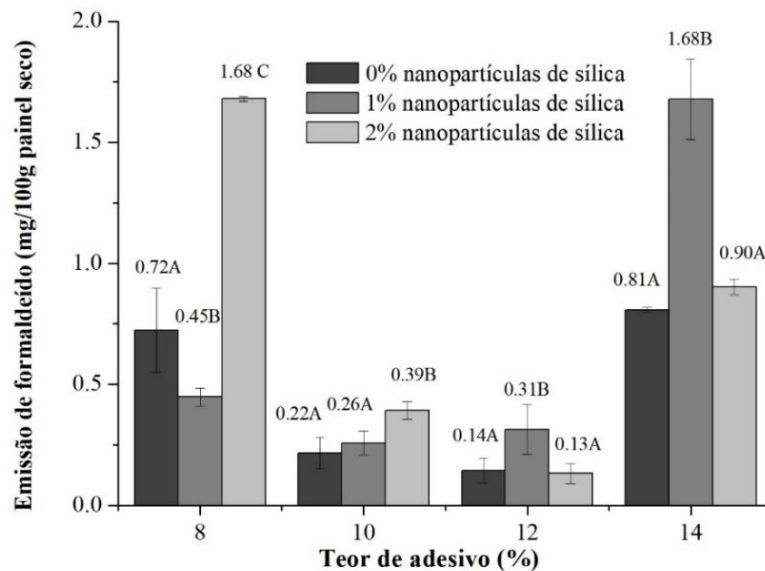
(manchas brancas identificadas com análise EDS), no qual tenderam a formar agregados, afetando certas propriedades mecânicas dos painéis.

Isso sugere a necessidade de uma investigação mais aprofundada sobre a interação entre as nanopartículas de sílica e o adesivo cardanol-formaldeído, assim como métodos para melhorar a dispersão e compatibilidade das nanopartículas, visando melhorar a resistência dos painéis MDP com a adição de SiO₂NPs.

3.3.4 Avaliação da emissão de formaldeído

Conforme a análise de variância (ANOVA), foi observado interação significativa entre o teor de adesivo e adição de SiO₂NPs para a emissão de formaldeído ($F_c=135.88^*$). Os valores médios obtidos para a emissão de formaldeído em relação ao teor de adesivo, encontram-se na Figura 14.

Figura 14 – Emissão de formaldeído dos painéis



Fonte: Da autora (2024).

Verifica-se na Figura 14 a redução da emissão de formaldeído com a inclusão de 1% de SiO₂NPs em 8% do teor de adesivo. Essa redução pode ter ocorrido, devido à alta porcentagem de átomos de superfície, presente nas nanopartículas, além das grandes áreas de superfície específicas e alta capacidade de adsorção. As SiO₂NPs podem se ligarem ao formaldeído livre por meio de ligações de hidrogênio ou covalentes, reduzindo o conteúdo de formaldeído livre

em painéis de madeira, atuando como uma barreira à emissão de formaldeído (Wu *et al.*, 2017; Wei *et al.*, 2024).

Observa-se menor emissão de formaldeído com 12% de adesivo com inclusão de 0% e 2% de SiO₂NPs. Todos os painéis MDP produzidos com o adesivo cardanol-formaldeído e adição de SiO₂NPs, foram categorizados na classe E1 (<8mg/100g), evidenciando baixa emissão de formaldeído em comparação aos painéis convencionais produzidos com o adesivo UF. Faria *et al.* (2023) obtiveram emissões de 1.09 (mg/100g) para painéis com 8% de adesivo cardanol-formaldeído e 16.76 (mg/100g) para painéis com o adesivo UF. Roumeli *et al.*, (2012) reportaram emissões de 6.01 (mg/100g) para painéis aglomerados com adesivo UF e de 5.97 a 5.99 (mg/100g) para painéis com adesivo UF e inclusão de SiO₂NPs (1, 2, 3 e 3.5%). Segundo Roumeli *et al.* (2012) esperava-se que conteúdo de formaldeído livre fosse visivelmente reduzido na presença de SiO₂NPs devido ao efeito de blindagem, no entanto, essa redução não foi observada, possivelmente porque as quantidades de nanopartículas usadas eram pequenas (máximo de 3.5% em peso) e a dispersão não era perfeita.

Neste contexto, destaca-se o potencial do adesivo cardanol-formaldeído em relação ao adesivo UF. Isso ocorre, devido, as pontes de metileno (CH₂) que circundam total ou parcialmente as frações fenólicas do adesivo cardanol-formaldeído. Essas pontes de metileno são mais estáveis do que as pontes da UF, que são responsáveis pela redução na emissão de formaldeído (Younesi-Kordkheili *et al.*, 2015). Além do mais, o cardanol tem a capacidade de condensar com formaldeído produzindo uma rede de polímero semelhante aos adesivos fenol-formaldeído (Santos *et al.*, 2010) reduzindo, assim, a emissão de formaldeído de formaldeído livre. Isso evidencia o potencial do adesivo cardanol-formaldeído, que pode se tornar uma opção viável para a indústria madeireira, atendendo aos requisitos de comercialização e aplicação em ambientes internos.

3.3.5 Teste de isolamento térmico

Por meio do Teste F na análise de variância pode-se verificar que não houve interação significativa entre o teor de adesivo e as concentrações de SiO₂NPs para a condutividade térmica (Fc= 0.320 ns) e resistência térmica (Fc=0.313 ns). Observa-se na Tabela 6 e Tabela 7 os valores médios para a condutividade térmica e resistência térmica dos painéis MDP, em função do teor de adesivo e a concentração de SiO₂NPs, respectivamente.

Tabela 6 – Valores de Condutividade Térmica (λ), Resistência Térmica (RT) em função do teor de adesivo para produção de painéis MDP

Teor de adesivo (%)	λ (W/m.K)	RT (m ² .K/W)
8	0.15 ± 0.01 A	0.10 ± 0.01 A
10	0.16 ± 0.01 A	0.09 ± 0.01 A
12	0.16 ± 0.01 A	0.09 ± 0.01 A
14	0.16 ± 0.01 A	0.10 ± 0.01 A

Fonte: Da autora (2024).

Tabela 7 – Valores de Condutividade Térmica (λ), Resistência Térmica (RT) em função da concentração de nanopartículas de sílicas (SiO₂NPs) nos adesivos para produção dos painéis MDP

Concentração SiO ₂ NPs (%)	λ (W/m.K)	RT (m ² .K/W)
0	0.16 ± 0.01 A	0.10 ± 0.01 A
1	0.16 ± 0.01 A	0.10 ± 0.01 A
2	0.16 ± 0.01 A	0.09 ± 0.01 A

Fonte: Da autora (2024).

*Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ao nível de significância de 5%.

Conforme observado na Tabela 6 e Tabela 7 não houve diferença significativa a inclusão das SiO₂NPs para a condutividade térmica e resistência térmica. Os valores destas propriedades respectivamente, foram de 0.16 W/m.K e 0.10 m².K/W. De acordo com NBR 15220 (ABNT, 2005), para que painéis apresentem característica de material isolante térmico, os valores de condutividade térmica devem ser inferiores a 2W/m.K, portanto, todos os painéis independentes do teor de adesivo e a inclusão de SiO₂NP, podem ser potencialmente utilizados como material de isolamento térmico para edifícios.

De acordo com Li *et al.* (2024) e Wang (1988) a condutividade térmica pode ser usada para avaliar o efeito de isolamento térmico de um material, quanto menor a condutividade térmica de um material (<0.25 W/mK) melhor será o seu efeito de isolamento térmico, logo, todos valores do presente estudo enquadram nesta faixa. Villena *et al.* (2020) relata que a condutividade térmica dos painéis aglomerados de madeira (com espécie não identificada) tendem a variar de 0.070-0.180 W/mK. Era esperado, portanto, a redução da condutividade térmica com a inclusão das SiO₂NP, uma vez que as nanopartículas desempenham um papel

como uma barreira térmica devido à baixa condutividade térmica da sílica tendo 1.5 W/m.K (Lee *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2018).

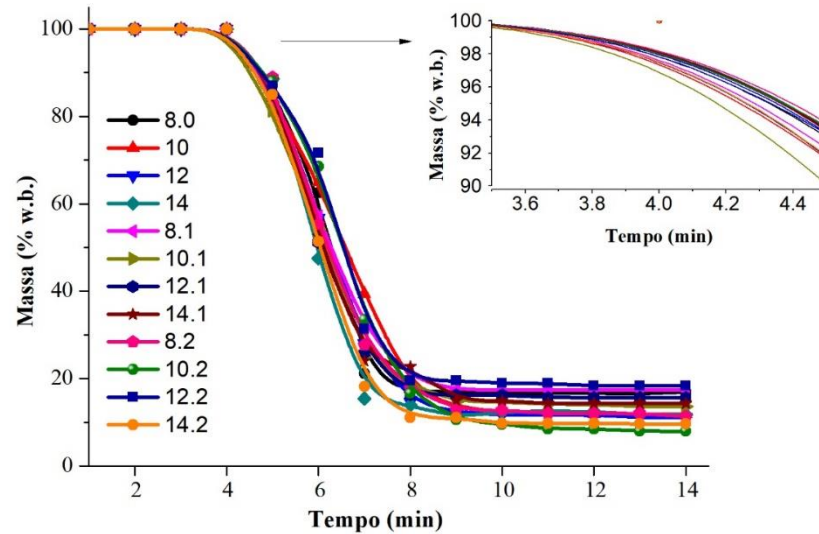
Em relação a resistência térmica, a normativa NBR 15220 (ABNT, 2005) determina valores acima 0.02 m².K/W, logo, todos os painéis atendem o mínimo específico. Conforme Güth *et al.*, (2018) a resistência térmica de um material está associada à dificuldade deste em transferir calor, assim, quanto maior for a resistência térmica, melhor é o isolante térmico. Estudos reportam, que o tamanho das nanopartículas e sua distribuição influenciam na condutividade térmica, logo, supõe-se as SiO₂NP, não tiverem o tamanho ou distribuição o suficiente para melhorar a condutividade térmica e a resistência térmica dos painéis (Idumah; Hassan, 2016).

3.3.6 Teste de combustibilidade

As curvas que ilustram a variação da massa dos painéis MDP ao longo do tempo de combustão são mostradas na Figura 15.

Observa-se que a relação entre a massa e tempo de combustão dos painéis MDP com diferente teor de adesivo cardanol-formaldeído e adição de SiO₂NPs, apresentaram diferença visualmente significativa a partir de 3.8 minutos, no qual o painel com 10% de adesivo e adição de 1% de SiO₂NPs apresentaram maior perda de massa nos minutos iniciais. Neste caso, pressupõe-se que não houve uma mistura homogênea do adesivo com adição das SiO₂NPs, levando à diferentes características combustíveis nas regiões deste painel, resultando em um comportamento não padrão em relação aos demais. No entanto, era esperado o retardamento da combustão destes painéis com adição de SiO₂NPs, devido o comportamento dos adesivos no TGA e DTG do presente estudo.

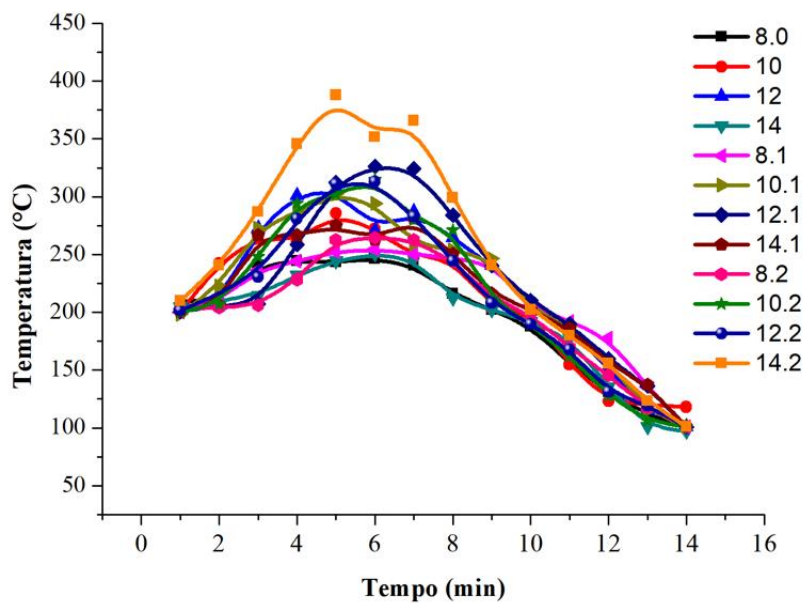
Figura 15 – Relação entre massa e tempo de combustão de painéis MDP produzidos com diferentes teores adesivo cardanol-formaldeído e adição de SiO₂NPs.



Fonte: Da autora (2024).

As variações de temperatura de acordo com o tempo de combustão dos painéis MDP são mostradas na Figura 16 .

Figura 16 – Variação de temperatura durante o teste de inflamabilidade



Fonte: Da autora (2024).

Nota-se que o maior pico de temperatura foi obtido para o tratamento que possui maior teor de adesivo (14%) com adição de 2% de SiO₂NPs. Conforme Furtini *et al.* (2022) isso se deve ao fato do cardanol possuir anéis aromáticos e uma longa cadeia lateral carbônica; ou seja, a maior quantidade de carbono resulta no aumento da entalpia de combustão e no aumento da temperatura. Do mesmo modo, as SiO₂NPs quando adicionado em uma matriz polimérica tem como tendência aumentar a estabilidade térmica e o retardamento de chama em diferentes tipos de polímeros (Chrissafis *et al.*, 2011; Chrissafis *et al.*, 2008; Zhai *et al.*, 2020).

4 CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo evidenciaram o potencial do adesivo cardanol-formaldeído como uma alternativa sustentável para a produção de painéis MDP. As propriedades físicas e mecânicas dos painéis atenderam aos requisitos normativos, e o adesivo destacou-se por sua baixa emissão de formaldeído, sendo classificado como classe E1. Este desempenho é relevante, considerando que o cardanol é um recurso renovável proveniente de resíduos da extração da casca da castanha de caju, contribuindo para a sustentabilidade e para a redução do risco de exposição a substâncias cancerígenas.

A adição de SiO₂NP, entretanto, mostrou-se desfavorável para este adesivo. Uma vez que, aumentou significativamente sua viscosidade, prejudicou a distribuição da linha de cola e resultou em uma adesão fraca, o que comprometeu certas propriedades mecânicas dos painéis. Portanto, considerando a análise combinada de todos os resultados obtidos, recomenda-se o teor de 11% do adesivo cardanol-formaldeído sem a inclusão de SiO₂NPs, afim de atender às exigências técnicas de comercialização dos painéis e promover benefícios ambientais e sociais.

5 AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoa Nível Superior (CAPES) – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais (PPG BIOMAT-UFLA), à empresa *Resibras Cashol* pela doação do cardanol e a empresa *Polystell do Brasil LTDA* pela doação das nanopartículas de sílica.

6 REFERÊNCIAS

- ALAM, N.M. ALANDIS, E. SHARMIN, F. ZAFAR, M.A.A. Properties of olive oil polyurethanamide/ZnO biocomposite Anticorrosive coatings. **Korean J. Chem. Eng.** v.33, n.5, p.1736-1742, 2016.
- ALAWODE, A.; BUNGU, P. E.; AMIANDAMHEN, S.; MEINCKEN, M.; TYHODA, L. Properties and characteristics of novel formaldehyde-free wood adhesives prepared from *Irvingia gabonensis* and *Irvingia wombolu* seed kernel extracts. **Int. J. Adhes. Adhes.**, v.95, p.102423, 2019.
- ALSHAHRANI, H.; VR, A. P. Mechanical, wear, and fatigue behavior of alkali-silane-treated areca fiber, RHA biochar, and cardanol oil-toughened epoxy biocomposite. **Biomass Conv. Bioref.**, v.14, p. 6609–6620, 2022.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. **ASTM D1200-10**: Standard test method for viscosity by ford viscosity cup. West Conshohocken, 2018.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1037**: Standard methods of evaluating properties of wood-base fiber and particles. West Conshohocken, 2012.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1582-60**: Annual book of standards: Denver, 1994.
- ANDRADE, N. C. FREIRE, T.P.P.; TERRA, I. C.; MENDES, L. M.; MENDES, R. F. Painéis MDP produzidos com resíduos de extração de celulose. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 14, n. 3, p. 6446, 2019.
- ARAÚJO, E. A.S.; LORENÇO, M. S.; ZIDANES, U. L.; SOUSA, T. B.; DA SILVA MOTA, G.; REIS, V. N.O.; SILVA, M. G.; MORI, F. A. Quantification of the bark *Myrcia eximia* DC tannins from the Amazon rainforest and its application in the formulation of natural adhesives for wood. **J. Clean. Prod.**, v.280, p.124324, 2021.
- ARIAS, A.; FEIJOO, G.; MOREIRA, M. T. Evaluation of Starch as an Environmental-Friendly Bioresource for the Development of Wood Bioadhesives. **Molecules.**, v.26, n.15,p. 4526, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14810-2**: Painéis de partículas de média densidade – Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio 2018. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14929**: Madeira – Determinação do teor de umidade de cavacos – Método por secagem em estufa. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941**: Madeira – Determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13999**: Papel, cartão, pastas celulósicas e madeira – Determinação do resíduo (cinza) após a incineração a 525 °C. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14853**: Madeira – Determinação do material solúvel em etanol-tolueno e em diclorometano e em acetona. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220**: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, Brasil, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7989**: Pasta celulósica e madeira – Determinação de lignina insolúvel em ácido. Rio de Janeiro. 2010.

BACIGALUPE A, H. Z; ESCOBAR, M.M. Effects of Rheology and Viscosity of Bio-based Adhesives on Bonding Performance. In: **Bio-based Wood Adhesives**. CRC Press, p. 293–309, 2017.

BAHARUDDIN, M.; ZAIN, N. M.; HARUN, W.; ROSLIN, E. N.; GHAZALI, F. A.; MD SOM, S. N. Development and performance of particleboard from various types of organic waste and adhesives: A review. **Int. J. Adhes. Adhes.**, v.124, p.103378, 2023.

BARDAK, T.; TANKUT, A.N.; TANKUT, N.; SOZEN, E.; AYDEMIR, D. The effect of nano-TiO₂ and SiO₂ on bonding strength and structural properties of poly (vinyl acetate) composites. **Meas J. Int. Meas. Confed**, v.93, p. 80-85, 2016.

BAŞBOĞA, İ. H.; TAŞDEMİR, Ç.; YÜCE, Ö.; MENGELÖĞLU, F. Utilization of different size waste melamine impregnated paper as an adhesive in the manufacturing of particleboard. **Int. J. Adhes. Adhes.**, v.120 p. 103275, 2023.

BERNADINO, K. A. **Caju: aprenda como plantar e quais seus benefícios**. Blog MF Rural, 09 març. 2022. Disponível em: < <https://blog.mfrural.com.br/caju/>>. Acesso em: 26 ago. 2024.

BIANCHE, J.J., CARNEIRO, A.D.C.O., VITAL, B.R., PEREIRA, F.A., DOS SANTOS, R.C. AND SORATTO, D.N., 2012. Properties of particleboards fabricated with eucalyptus (*Eucalyptus urophylla*), parica (*Schizolobium amazonicum*) and vassoura (*Sida spp.*) particles. **Cerne.**, v.18, n.4, p.623-630, 2012.

BOLOGNESI, L. **Quantificação de formaldeído em extrato aquoso obtido da emissão de painéis de madeira por espectrofotometria acoplada à injeção em fluxo**. 2010. 64 f. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

BOSCHETTI, W. T. N. **Produção e caracterização de nanocristais e microcristais de celulose e sua aplicação em adesivos de ureia-formaldeído**. 113 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2017.

BOUSSETTA, A., ABLOUH, E., BENHAMOU, A. A., TAOURIRTE, M., & MOUBARIK, A. Valorization of Moroccan brown seaweeds: Elaboration of formaldehyde-free particleboards

based on sodium alginate–corn-starch - Mimosa tannin wood adhesives. **Int. J. Adhes. Adhes.**, v.108, p.102894, 2021.

BRITO, F. M. S., SILVA, B. A., CARVALHO, I. M. D., BAÚTI, S. B., MENDES, L. M., & GUIMARÃES JÚNIOR, J. B. Technological Properties of Medium Density Particleboards Produced with Peanut (*Arachis Hypogaea*) and *Pinus Oocarpa* Hulls. **Floresta e Ambient.**, v.29, 2022.

BRITO, F. M. S.; SILVA, P. X. S.; PALUMBO, S. K. C.; GUIMARÃES JÚNIOR, J. B.; MENDES, L. M. Technological characterization of particleboards constituted with pistachio shell (*Pistacia vera*) and *Pinus oocarpa* wood. **Rev. Bras. Cienc. Agrar.**, v.16, n.2, p.8902, 2021.

BRITO, F.M.S.; BORTOLETTO JÚNIOR, G.; PAES, J.B.; BELINI, U.L.; TOMAZELLO-FILHO, M. Technological characterization of particleboards made with sugarcane bagasse and bamboo culm particles. **Constr. Build. Mater.**, 262, p.120501, 2020.

BUFALINO, L.; ALBINO, V. C. S.; DE SÁ, V. A.; CORRÊA, A. A. R.; MENDES, L. M.; ALMEIDA, N. A. Particleboards made from Australian red cedar: Processing variables and evaluation of mixed-species. **J. Trop. for Sci.**, v.24, p.162–172, 2012.

BÜYÜKSARI, Ü. Surface characteristics and hardness of MDF panels laminated with thermally compressed veneer. **Compos. Part B Eng.**, v.44, p.675–678, 2013.

CAILLOL, S. Cardanol: A promising building block for biobased polymers and additives. **Curr. Opin. Green Sustain. Chem.**, v. 14, p. 26-32, 2018.

CARVALHO, A. G.; LELIS, R. C. C.; NASCIMENTO, A. M. Avaliação de adesivos à base de taninos de *Pinus caribaea* var. *bahamensis* e de *Acacia mearnsii* na fabricação de painéis aglomerados. **Ciênc. Florest.**, v. 24, n. 2, p. 479-489, 2014.

CHAE, G.; PARK, H.; KWON, K.; SHIN, S. Comparative Study of the Impact Wedge-Peel Performance of Epoxy Structural Adhesives Modified with Functionalized Silica Nanoparticles. **Polymers.**, v.13, n.3, 469, 2021.

CHIO,C.; SAIN, M.; QIN,W. Lignin utilization: a review of lignin depolymerization from various aspects. **Renew. Sustain. Energy Rev.**, v.107, p. 232249, 2019.

CHRISAFIS K, PARASKEVOPOULOS KM, PAPAGEORGIOU GZ, BIKIARIS DN. Thermal and dynamic mechanical behavior of bionanocomposites: fumed silica nanoparticles dispersed in poly (vinyl pyrrolidone), chitosan, and poly (vinyl alcohol). **J. Appl. Polym. Sci.**, v.110, n.3. p.1739-49, 2008.

CHRISAFIS K, PAVLIDOU E, PARASKEVOPOULOS KM, BESLIKAS T, NIANIAS N, BIKIARIS D. Enhancing mechanical and thermal properties of PLLA ligaments with fumed silica nanoparticles and montmorillonite. **J. Therm. Anal. Calorim.**, v.105, n.1, p. 313-23, 2011.

CONNOR, D.; BLUM, F. D. Thermal stability of substituted phenol-formaldehyde resins. **J. Appl. Polym. Sci.**, v.33, n.6, p.1933-1941, 1987.

COSTA, T. G. **Caracterização de adesivos sintéticos com adição de nanopartículas de sílica como carga de reforço**. 2016. 87 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, 2015.

DORIEH, A.; SELAKJANI, P. P.; SHAHAVI, M. H.; PIZZI, A.; GHAFARI MOVAHED, S.; FARAJOLLAH POUR, M.; AGHAEI, R. Recent developments in the performance of micro/nanoparticle-modified urea-formaldehyde resins used as wood-based composite binders: A review. **Int. J. Adhes. Adhes.**, v.114, p.103106, 2022.

DOURADO, D.C.C.; HENKES, J.A. Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de painéis “MDP” com adição de raspas de pneu. **Rev. Bras. Gest. Ambient. Sustentabilidade.**, v. 9, n. 1, p. 79-95, 2020

DUKARSKA, D. The effect of an addition of nano-SiO₂ to urea resin on the properties of boards manufactured from rape straw. **Annals of Warsaw University of Life Sciences-SGGW. Forestry and Wood Technology.**, v.82, 2013.

DUKARSKA, DOROTA; DERKOWSKI, A. D. A. M. Rape straw-wood particleboards resinated with UF resin and supplemented with nano-SiO₂. **Annals of Warsaw University of Life Sciences-SGGW. Forestry and Wood Technology**, n. 85, 2014.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 312:** Particleboard: Specifications. E.C. S., Bruxelas, 1993.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 312:** Particleboard: Specifications. E.C. S., Bruxelas, 2003. 22p.

EUROPEAN STANDARDS **EN 312-4.** Particleboards. Specifications. Part 4. Requirements for load-bearing boards for use in dry conditions, 2003.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 717-3:** Wood-based panels- Determination of formaldehyde release. Part 3: Formaldehyde emission by the flask method, Brussels, 1996.

FARIA, D. L.; SCATOLINO, M. V.; DE OLIVEIRA, J. E.; GONÇALVES, F. G.; SORIANO, J.; DE PAULA PROTÁSIO, T., LELIS, C. C. R; CARVALHO, L.M.H.; MENDES, L.M.; JUNIOR, J. B. G. Cardanol-based adhesive with reduced formaldehyde emission to produce particleboards with waste from bean crops. **Environ. Sci. Pollut. Res.**, v.30, n.16, p. 48270-48287, 2023.

FIORELLI, J. *et al* Multilayer particleboard produced with agroindustrial waste and Amazonia vegetable fibres. **Waste and Biomass Valor.**,v. 9, n. 7,p. 1151-1161,2018

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **FAO Statistical Yearbook. World Food and Agriculture. 2021.** Disponível em: < <https://www.un-ilibrary.org/content/books/9789210010474> > Acesso em: 18 jun. 2022. FAO Statistical, 2021

FURTINI, A. C. C., SANTOS, C. A. D., MIRANDA, E. H. D. N., VILLARRUEL, D. C. V., GOMES, D. A. C.; FERREIRA, G. C; GUIMARÃES JÚNIOR, J. B. Using miriti petiole to produce particleboards. **Ambiente Construído**, v. 23, p. 149-162, 2023.

FURTINI, A.C.C, BRITO, F.M.S., GUIMARÃES JUNIOR, M.; FURTINI, J.A.O, PINTO, L.A.M.; PROTÁSIO, T.P.; MENDES, L.M.; GUIMARÃES JUNIOR, J.B Substitution of urea-formaldehyde by renewable phenolic compound for environmentally appropriate production of particleboards. **Environ Sci Pollut Res.**, v. 29, p.66562–66577, 2022.

GONÇALVES, F.G.; LELIS, R.C.C. Properties of two synthetic resins after addition of modified tannin. **Floresta e Ambient.**,v. 2, p 1-7, 2009.

GÜTHS, G. L.; GÜTHS, S.; MICHELS, C. **Resistência térmica de cavidades de ar horizontais e fechadas para aplicações em edificações**. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Anais [...]. Porto Alegre: ANTAC, v. 17, n. 1, p. 399-405, 2018. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/1367>. Acesso em: 23 jun. 2024.

HAINES, P. J. **Principles of thermal analysis and calorimetry**. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2002. 268 p. (RSC Paperbacks).

HAN, H.; LI, S.; ZHU, X.; JIANG, X.; KONG, X. Z. One step preparation of porous polyurea by reaction of toluene diisocyanate with water and its characterization. **RSC advances.**, v.4, n.63, p.33520-33529, 2014.

HEMMILÄ,V. **Towards low-emitting and sustainable particle- and fibreboards – Formaldehyde emission test methods and adhesives from biorefinery lignins**. Doctoral Dissertation, Forestry and Wood Technology, Linnaeus University, Växjö, 2019

HUANG, J.; DING, H.; WANG, X.; SONG, L.; HU, Y. Cardanol-derived anhydride cross-linked epoxy thermosets with intrinsic anti-flammability, toughness and shape memory effect. **Chem. Eng. J.**, v.450, 137906, 2022.

IDUMAH, C. I.; HASSAN, A. Recently emerging trends in thermal conductivity of polymer nanocomposites. **Rev. Chem. Eng.**, v.32, n.4, p.413-457, 2016.

IONASHIRO, M; GIOLITO, I. **Fundamentos da termogravimetria, análise térmica diferencial, calorimetria exploratória diferencial**. São Paulo: Giz Editorial, 2005.

IWAKIRI, S.; TRIANOSKI, R. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: FUPEF. 2020. 247

JAHAN, A.; MASOOD, S.; ZAFAR, F.; RIZVI, S. A.; ALAM, M.; HAQ, Q.M.R.; NISHAT, N. Ambient-cured cardanol-derived polyurea coatings for anti-corrosive and anti-bacterial applications. **Prog. Org. Coat.**, v.182, 107638, 2023.

JIA, P.; SONG, F.; LI, Q.; XIA, H.; LI, M.; SHU, X.; ZHOU, Y. Recent development of cardanol based polymer materials – a review. **J. Renew. Mater.**, v.7, p. 601-619, 2019.

KANNAN, R.; ANAND, A.V.; HARIPRASAD, V.; SINGH, R.A.; JAYALAKSHMI, S.; ARUMUGAM, V. Effect of Cashew Nut Shell Oil (Cardanol) on Water Absorption and Mechanical Characters of Sisal Fiber. **Proc. Int. Conf. Eng. Sci. Appl.**, p.91-92, 2023.

KHALINA, M.; SANEI, M.; MOBARAKEH, H. S.; MAHDAVIAN, A. R. Preparation of acrylic/silica nanocomposites latexes with potential application in pressure sensitive adhesive. **Int. J. Adhes. Adhes.**, v.58, p.21-27, 2015.

KHAN, S.; MASOOD, S.; SIDDIQUI, K.; ALAM, M.; ZAFAR, F.; HAQUE, Q. M. R.; NISHAT, N. "Utilization of renewable waste material for the sustainable development of thermally stable and biologically active aliphatic amine modified Cardanol (phenolic lipid) - Formaldehyde free standing films." **J. Clean. Prod.**, v. 196, p. 1644-1656, 2018.

KHANJANZADEH, H.; BEHROOZ, R.; BAHRAMIFAR, N.; PINKL, S.; GINDL-ALTMUTTER W. Application of surface chemical functionalized cellulose nanocrystals to improve the performance of UF adhesives used in wood based composites-MDF type. **Carbohydr. Polym.**, v.206, p.11-20, 2019

KIM, Y.; KIM, M.; SEONG, H.; JUNG, J. Y.; BAECK, S.; SHIM, S. E. Roles of silica-coated layer on graphite for thermal conductivity, heat dissipation, thermal stability, and electrical resistivity of polymer composites. **Polímero.**, v.148, p. 295-302, 2018.

KORDKHEILI, H.Y.; PIZZI, A. Lignin-based wood adhesives: A comparison between the influence of soda and Kraft lignin. **Int. J. Adhes. Adhes.**, v.121, p.103312, 2023.

KRISTAK, L.; ANTOV, P.; BEKHTA, P.; LUBIS, M.A.R.; ISWANTO, A.H.; REH, R.; SEDLIACIK, J.; SAVOV, V.; TAGHIYARI, H.R.; PAPADOPOULOS, A.N.; *et al.* Recent progress in ultra-low formaldehyde emitting adhesive systems and formaldehyde scavengers in wood-based panels: A review. *Wood Mater.* **Sci. Eng.**, p.1–20, 2022.

LEE, G. W., PARK, M., KIM, J., LEE, J. I., & YOON, H. G. YoonEnhanced thermal conductivity of polymer composites filled with hybrid filler. **Composit. Part A.**, v. 37, p.727-734, 2006.

LI, J.; HUNT, J.F.; GONG, S.; CAI, Z. Improved fatigue performance for wood-based structural panels using slot and tab construction. **Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.**, v.82, p.235-242, 2016.

LI, Y.; DAI, Z.; HU, C.; TU, D.; YUN, H. Optimisation of particle distribution and performance in three-layer tubular particleboards using response surface methodology. **J. Build. Eng.**, v.82, p.108256, 2024.

LIYOU, T.H. Evolution of chemistry and morphology during the carbonization and combustion of rice husk. **Carbon** v.42, n.4, p. 785-794, 2004.

LIU, C.; ZHANG, Y.; LI,X.; LUO, J.; GAO,Q.; LI, J. "Green" bio-thermoset resins derived from soy protein isolate and condensed tannins. **Ind. Crop. Prod.**, v.108, p. 363-370, 2017.

LONG, J.; LI, C.; LI, Y. Enhancement of Mechanical and Bond Properties of Epoxy Adhesives Modified by SiO₂ Nanoparticles with Active Groups. **Polymers.**, v.14, n.10, p.2052, 2022.

LU, H.T. Synthesis and characterization of aminofunctionalized silica nanoparticles. **J. Colloid.**, v.75, n.3, p. 311–318, 2013.

LU, L.; WANG, Y.; LI, T.; WANG, S.; YANG, S.; QING, Y.; XINGONG, L.; YIQIANG W.; LIU, M. Calcium carbonate modified urea–formaldehyde resin adhesive for strength enhanced medium density fiberboard production. **RSC Advances**, v.11, n.40, p.25010-25017, 2021.

LYKIDIS, C. Formaldehyde Emissions from Wood-Based Composites: Effects of Nanomaterials. In: Taghiyari, H.R., Morrell, J.J., Husen, A. (eds) *Emerging Nanomaterials*. Springer, Cham. p. 337-360, 2023.

MAGALHÃES, R.; NOGUEIRA, B.; COSTA, S.; PAIVA, N.; FERRA, J. M.; MAGALHÃES, F. D.; MARTINS, J.; CARVALHO, L. H. Effect of Panel Moisture Content on Internal Bond Strength and Thickness Swelling of Medium Density Fiberboard. **Polymer.**, v.13, n.1, p.114, 2021.

MAGALHAES, W. L. E.; ARTNER, M. **Determinação de formaldeído pelo método dessecador utilizando reagente analítico acetilacetona: modificação da norma ASTM D 5582**. Colombo: Embrapa Florestas, 2018. 9 p. (Embrapa Florestas. Comunicado técnico,426).

MALONEY, T. M. **Modern particleboard and dry-process fiberboard manufacturing**. São Francisco: Miller Freeman, 1993.

MAZZETTO, S. E; LOMONACO, D; MELE, G. Óleo da castanha de caju: oportunidades e desafios no contexto do desenvolvimento e sustentabilidade industrial. **Quím. Nova**, v. 32, n. 3, p. 732-741, 2009.

MENDES, R. F.; MENDES, L. M.; MENDONÇA, L. L.; JÚNIOR, J. B. G.; MORI, F. A. Quality of homogeneous particleboard produced with *Eucalyptus urophylla* clone wood. **Cerne.**, v. 20, n. 2, p. 329-336, 2014.

MENDES, R. F.; NARCISO, C. R. P.; MENDES, J. F.; VIANA, Q. S.; EUGÊNIO, T. M. C.; VILELA, A.P. Study of new reinforcing materials for cementitious panel production. **Environ Sci Pollut Res**, v.28, p.37217-37230, 2021.

MENDES, R.F.; MENDES, L.M.; GUIMARÃES JÚNIOR, J.B.; SANTOS, R.C.D.; CÉSAR, A.A.D.S. Efeito da associação de bagaço de cana, do tipo e do teor de adesivo na produção de painéis aglomerados. **Cienc. Florest**, v. 22, p. 161-170, 2012.

MIRANDA, E. H.N.; GOMES, D. A. C.; FURTINI, A. C. C; VILLARRUEL, D. C. V.; DOS SANTOS, C. A.; MENDES, L. M.; JÚNIOR, J. B. G. Evaluation of bean residues in the production of agglomerated panels. **Maderas-Cienc Tecnol**, v. 25, 2023.

MORA, A. S.; DECOSTANZI, M.; DAVID, G.; CAILLOL, S. Cardanol-based epoxy monomers for high thermal properties thermosets. **Eur. J. Lipid Sci. Technol.**, v.121. n.8, p.1800421, 2019.

MORI, F.A. **Caracterização parcial dos taninos da casca e dos adesivos de três espécies de *E. grandis***. 73p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2000.

MOSLEMI, A.; BEHZAD, T.; PIZZI, A. Addition of cellulose nanofibers extracted from rice straw to urea formaldehyde resin; effect on the adhesive characteristics and medium density fiberboard properties. **Int. J. Adhes. Adhes.**, v. 99, p. 102582, 2020.

NARCISO, C.R.P.; REIS, A.H.S.; MENDES, J.F.; NOGUEIRA, N. D.; MENDES, R. F. Potential for the Use of Coconut Husk in the Production of Medium Density Particleboard. **Waste Biomass Valor.**; v.12, p.1647–1658, 2021.

NATARAJAN, M.; MURUGAVEL, S.C; Thermal stability and thermal degradation kinetics of bio-based epoxy resins derived from cardanol by thermogravimetric analysis. **Polym. Bull.** v.74, p. 3319–3340 , 2017.

NDAZI, B. S.; NYAHUMWA, C.; TESHAI, J. Chemical and physical modifications of rice husks for use as composite panels. **Composites Part A: applied science and manufacturing**, v. 38, n. 3, p. 925-935, 2007.

NORMEN FÜR HOLZFASERPLATEN SPANPLATTEN SPERRHOLZ. **DIN 52362**. Testing of wood chipboards bending test, determination of bending strength. Berlin, p. 39- 40. 1982.

OKTAY, S.; KIZILCAN, N.; BENGU, B. Oxidized cornstarch – Urea wood adhesive for interior particleboard production. **Int. J. Adhes. Adhes.**, v.110, p.102947, 2021.

OLIVEIRA, S. L. **Interação da espécie de madeira e do tipo de adesivo na qualidade da madeira laminada colada**. 2016. 123 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **Diretrizes da OMS para a Qualidade do Ar Interior: Poluentes Selecionados**. Escritório Regional da OMS para a Europa , Copenhaga, 2010.

PAPADOPOULOU, E.; DE WILD, P. J.; KOUNTOURAS, S.; CHRISAFIS, K. Evaluation of torrefaction condensates as phenol substitutes in the synthesis of phenol-formaldehyde adhesives suitable for plywood. **Thermochimi. Acta.**, v.663, p.27-33, 2018.

PARAMESWARAN, P. S.; ABRAHAM, B. T.; THACHIL, E. T. Cardanol-based Resol Phenolics – a Comparative Study. Progress in Rubber. **Prog. Rubber Plast. Recycl. Technol.**, v. 26 n. 1, p. 31-50, 2010.

PIZZI, A.; MITTAL, K. L. **Handbook of adhesive technology**. 3rd Ed. Boca Raton: CRC. Press, 2018. 658 p.

PU, H.; HAN, K.; DAI, R.; SHAN, Z., Semi-liquefied bamboo modified urea-formaldehyde resin to synthesize composite adhesives. **Int. J. Adhes. Adhes.**, v. 113, p.103061, 2022.

PUCHOT, L. **Cardanol: a bio-based building block for new sustainable and functional materials**. 2016. 198 p. Tese (Doutorado em Química de Materiais) – Université de Cergy Pontoise, França, 2016.

QUIRINO, W. F. **Características e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal**. 1991. 64 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.

RANJBARAN, S.; NAZERIAN, M.; KERMANIAN, H.; KOOSHA, M.; GARMAROODY, E. R. High strength papers impregnated with urea/melamine formaldehyde resin/nanosilica nanocomposite coatings: the effects of paper type, blend ratio and nano-content. **Mater. Today Commun.** v.25, p.101300, 2020.

REIS, A.H.S.; SILVA, D.W.; SCATOLINO, M.V.; MENDES, R.F.; MENDES, L.M. Technological features of medium density particleboards produced with *Acrocarpus fraxinifolius* in association with *Pinus oocarpa*. **Mat. Int.**, v.2, p.0465-0471, 2020.

REN, T.; WANG, Y.; WU, N.; QING, Y.; LI, X.; WU, Y.; LIU, M. Degradation of urea-formaldehyde resin residues by a hydrothermal oxidation method into recyclable small molecular organics. **J. Hazard. Mater.** v.426, p.127783, 2021.

RESMI, V.C.; SUNIL K. N. Reduction of free formaldehyde content in resol using urea as scavenger. **Int. J. Eng. Res. Technol.**, v.2, n.2, p.2394 – 3386, 2015.

ROUMELI, E.; PAPADOPOULOU, E.; PAVLIDOU, E.; VOURLIAS, G.; BIKIARIS, D.; PARASKEVOPOULOS, K.; CHRISSAFIS, K. Synthesis, characterization and thermal analysis of urea–formaldehyde/nanoSiO₂ resins. **Thermochimi. Acta.**, v.527, p.33-39, 2012.

SAAD, M.J.; KAMAL, I. Mechanical and physical properties of low density kenaf core particleboards bonded with different resins. **J. Sci. Technol.**, v. 4, n. 1, 2012.

SAAD, S.; KOBORI, H.; KOJIMA, Y.; SUZUKI, S. Performance evaluation of wood-based panels under a mild accelerated aging treatment. **J. Wood Sci.**, v. 62, n. 4, p. 324-331, 2016.

SANGEETHA, N. J. Preparation and properties of cardanol-formaldehyde resole resin. **J Chem Cheml Sci**, v. 8, p. 625-629, 2018.

SANTOS, R.S.; SOUZA, A. A.; PAOLI, M.; SOUZA, C. M. L. Cardanol–formaldehyde thermoset composites reinforced with buriti fibers: Preparation and characterization. **Compos. - A: Appl. Sci. Manuf.**, v.41, n.9, p.1123-1129, 2010.

SCATOLINO, M. V.; PROTÁSIO, T. P.; MENDES, R. F.; MENDES, L. M. Thermal stability of *Pinus oocarpa* and maize cob particleboards. **Ciênc. agrotec.**, v. 39, n. 4, p. 348-354, 2015.

SETTER, C.; BORGES, F. A.; CARDOSO, C. R.; MENDES, R. F.; OLIVEIRA, T. J. P. Energy quality of pellets produced from coffee residue: Characterization of the products obtained via slow pyrolysis. **Ind. Crops Prod.**, v. 154, p. e112731, 2020.

SHMULSKY, R.; JONES, P. D. **Forest products and wood science: an introduction**. 6th Wiley, New York, 2019.

SILVEIRA, L. H. C.; REZENDE, A. V.; VALE, A. T. Teor de umidade e densidade básica da madeira de nove espécies comerciais amazônicas. **Acta Amazônica.**, v. 43, n. 2, p.179 – 184, 2013.

SOLT, P.; KONNERTH, J.; GINDL-ALTMUTTER, W.; KANTNER, W.; MOSER, J.; MITTER, R.; VAN HERWIJNEN, H. W. Technological performance of formaldehyde-free adhesive alternatives for particleboard industry **Int. J. Adhes. Adhes.**, v.94, p.99-131, 2019.

SOUZA, J. T.; TALGATTI, M.; SILVEIRA, A. G.; MENEZES, W. M.; HASELEIN, C. R.; SANTINI, E. J. Propriedades mecânicas do MDP produzido com partículas de madeira de *Ilex paraguariensis*, *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis*. **Sci. For.**, v.47, n.122, p. 273-285, 2019.

STALIN, N., SHOBHANADEV, N. Studies on thermal, structural and compositional properties of agro-residue jute fiber composite reinforced with cardanol resin. **Biomassa Conv. Bioref.**, 2021.

SUBBIAH, R.; KALIAPPAN, S. V, B.; P. PATIL, P. Effect of nanosilica on mechanical, thermal, fatigue, and antimicrobial properties of cardanol oil/sisal fiber reinforced epoxy composite. **Polym. Compos.**, v.43, n.11, p.7940-7951, 2021.

TRIANOSKI, R.; IWAKIRI, S.; MATOS, J.L.M.; PRATA, J.G. Avaliação de espécies alternativas de rápido crescimento para a produção de painéis de madeira aglomerada de três camadas. **Sci. For. (IPEF)**, v. 39, p. 97-104, 2011.

UCHOA, A. F.; ROCHA, W. S.; FEITOSA, J. P.; BRITO, D. H.; GONDIM, L. M.; RICARDO, N. M. S.; SOARES, J. B.; SOARES, S. A. Exploiting epoxidized cashew nut shell liquid as a potential bio-additive to improve asphalt binder performance. **J. Clean. Prod.**, v.314, p.128061, 2021.

VALLE, A.C.M.; FERREIRA, B.S.; PRATES, G.A.; GOVEIA, D.; CAMPOS, C.I. Physical and mechanical properties of particleboard from *Eucalyptus grandis* produced by urea formaldehyde resin with SiO₂ nanoparticles. **Eng. Agric.**, v.40, n.3, p.289–293, 2020.

VARGHESE, L.A.; THACHIL, E.T. Effect of Composition on Adhesive Blends Consisting of Neoprene and Phenol-Cardanol-Formaldehyde Copolymer. **Int. J. Polym. Mater.**, v.56, n.1, p.79-91, 2007.

VILELA, A. P.; SILVA, D. W.; MENDES, L. M.; MARTINS, M. A.; DE SIQUEIRA BRANDÃO, L. E. V.; MENDES, R. F. Effects of the corona treatment of rubber tire particles on the properties of particleboards. **BioResources**, v.12, n.4, p. 9452-9465, 2017.

VILLARRUEL, D. C.V.; DE NOVAIS MIRANDA, E. H.; GOMES, D. A. C.; FURTINI, A. C. C.; DOS SANTOS, C. A.; MENDES, L. M., GUIMARÃES JÚNIOR, J. B. Evaluation of the addition of wheat residues in the production of *Pinus oocarpa* agglomerated panels. **Clean Techn Environ Policy** p. 1-8, 2023.

VILLENA, F. M.; GARCIA, F. C. E.; GARCIA, O.T.; FERRANDEZ, G, A.; FERRANDEZ G. M. T. Analysis of the thermal insulation and fire-resistance capacity of particleboards made from vine (*Vitis vinifera L.*) prunings. **Polym.**, v.12, n.5, 1147, 2020.

WANG, S.H. **Construction materials science**. Construction Industry Publisher, China Beijing, 1988.

WEI, Z.; KONG, X.; JIA, B.; XIA, S.; HAN, S. Resina MUF incorporando nanopartículas de SiO₂ e TiO₂: caracterização e desempenho como um adesivo para compensado. **Eur. J. Wood Wood Prod.**, v.82, n.3, p.797-808, 2024.

WU, L.; GUO J.F.; ZHANG Z.Y.; ZHAO, S. Influence of oxidized starch and modified nano-SiO₂ on performance of urea-formaldehyde (UF) resin. **Polym-Koreav.**, v.41, n.1, p. 83–89, 2017.

YOUNESI-KORDKHEILI, H.; PIZZI A.; NIYATZADE, G. Reduction of formaldehyde emission from particleboard by phenolated Kraft lignin. **J. Adhes.**; v.92, n.6, p.485-497. 2015.

ZAU, M.D.L.; VASCONCELOS, R.P.D.; GIACON, V.M; LAHR, F.A.R. Chemical, Physical and Mechanical Properties of Particleboard Produced with Amazon Wood Waste - Cumaru (*Dipteryx Odorata*) - and Castor Oil Based Polyurethane Adhesive. **Polímer.**, v.24, p. 726-732, 2014.

ZHAI, W.; ZHONG, Y.; WEI, X. Processing renewable corks into excellent thermally stable, flame-retardant and smoke-suppressant composite materials by respiratory impregnation method. *Ind Crops Prod.*, v.157, p.112932, 2020.

ZHANG, J.; SONG, F.; TAO, J.; ZHANG, Z.; SHI, S.Q. Research progress on formaldehyde emission of wood-based panel. **Int. J. Polym. Sci.**, p. 9349721, 2018

ZHANG, W.; JIANG, N.; ZHANG, T.; LI, T. Thermal stability and thermal degradation study of phenolic resin modified by cardanol. **Emerg. Mater. Res.**, v.9, n.1, p.180-185, 2020.

ZHOU, Y.; ZENG, G.; ZHANG, F.; LI, K.; LI, X.; LUO, J.; LI, J.; LI, J. Design of tough, strong and recyclable plant protein-based adhesive via dynamic covalent crosslinking chemistry. **J. Chem. Eng.**, v.460, p.141774, 2023.